

REDUNDANCY OPTIMIZATION FOR PACKET-SWITCHED NETWORKS

Troshin A.V.

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia Federation

E-mail: a.v.troshin77@yandex.ru

Traditional protocols that are often used for providing redundancy in modern packet-switched networks (Spanning Tree Protocol, Rapid Spanning Tree Protocol, Multiple Spanning Tree Protocol) are very inefficient because they prune links from the network topology in order to achieve a single spanning tree topology. In this paper a method of redundancy optimization for packet-switched networks is presented, based on using non-equal spanning trees of the network graph in order to resolve paths of packets between the switches. The use of non-equal spanning trees enables to get more paths for traffic balancing. Moreover, a proposition is made to connect making of spanning trees with the role of network switch. After that the balancing of network traffic can be optimized by linear programming methods. A practical example of optimization redundancy is shown.

Keywords: packet-switched networks, redundancy, spanning trees, switches, network optimization, linear programming

DOI: 10.18469/ikt.2017.15.4.06

Troshin Alexander Victotovich, Povolzhsky State University of Telecommunication and Informatics, 23 Lev Tolstoy str., Samara 443010, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Communication Systems; PhD in Technical Sciences, Associate Professor. Tel.: +78463391126. E-mail: a.v.troshin77@yandex.ru

References

1. Froom R., Frahim E. *Implementing Cisco IP Switched Networks (SWITCH) Foundation Learning Guide*. Cisco Press, 2015. 512 p.
2. Ronald van der Pol. TRILL and IEEE 802.1aq Overview. Available at: <https://kirk.rvdp.org/publications/TRILL-SPB.pdf> (accessed 22.05.2017)
3. Permal R., Eastlake D. Introduction to TRILL. *The Internet Protocol Journal*, 2011, vol. 14, no. 3 pp. 2-20.
4. Fedyk D., Seaman M. 802.1aq - Shortest Path Bridging. Available at: <http://www.ieee802.org/1/pages/802.1aq.html> (accessed 5.09.2017)
5. Wilson R.J. *Introduction to Graph Theory. Forth Edition*. Longman, 1996. 172 p.
6. Christofides N. *Graph Theory. An Algorithmic Approach*. Academic Press Inc., 1975. 415 p.
7. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. *Introduction to Algorithms. 3rd edition*. The MIT Press, 2009. – 1292 p.
8. Haggarti R. *Discrete Mathematics for computing*. Pearson, 2001. 248 p.
9. Deepankar Medhi, Michal Pioro. *Routing, Flow and Capacity Design in Communication and Computer Networks*. Elsevier, 2004. 765 p.
10. Berkelaar M., Dirks J., Eikland K., Notebaer P. Ip_solve reference guide menu. Available at: <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/> (accessed 01.06.2017).

Received 15.09.2017

ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

УДК 004.03

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ $H_2/M/1$

Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Карташевский И.В., Литилина Л.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

В данной статье представлены сравнительные результаты зарубежных и авторских публикаций по системам $G/M/1$, и в частности системе $H_2/M/1$ по определению среднего времени ожидания. При этом рассматриваемые результаты получены совершенно разными подходами к исследованию рассматриваемых систем, но конечные расчетные результаты полностью идентичны. Оба подхода имеют те или иные преимущества друг перед другом.

Зарубежные аналоги упрощают расчет характеристик такой системы, а авторский подход расширяет возможности расчета характеристик в плане определения моментов высших порядков для времени ожидания, что позволяет извлекать информацию для расчета, к примеру, джиттера. Учитывая определение джиттера в телекоммуникациях как разброс времени ожидания от его среднего значения, моменты высших порядков для времени ожидания позволяют тем самым получить значение джиттера через дисперсию, то есть второго момента случайного времени ожидания.

Ключевые слова: системы массового обслуживания G/M/1, H₂/M/1, среднее время ожидания в очереди, метод спектрального разложения, интегральное уравнение Линдли, преобразование Лапласа-Стилтьеса

Введение

В настоящее время не существует аналитических методов для точного определения характеристик СМО G/M/1 или G/M/m, и как следствие, это отражается на степени адекватности стохастических сетевых моделей реальным компьютерным и телекоммуникационным сетям и на качестве принимаемых проектных решений. Перспективным, на взгляд авторов, является такой подход к анализу систем G/M/1 или G/M/m, когда в качестве входного распределения G будет использована вероятностная смесь двух экспоненциальных распределений, то есть гиперэкспоненциальное распределение H₂.

При этом СМО с гиперэкспоненциальными входными распределениями, в отличие от систем с более сложными распределениями, позволяет получить решение задачи в аналитическом виде. Тот факт, что такие распределения имеют место на практике, подтвержден в работах [1-4], где приведены результаты анализа интервалов между пакетами входящего трафика на сервер вуза, полученные с помощью программы – дополнения к анализатору Wireshark.

Также в работах [1-4] авторами приведены полученные результаты для времени ожидания в системе H₂/M/1 и их практическое применение, а в работе [5] – для системы H₂/H₂/1. Также приведено преобразование Лапласа-Стилтьеса для функции плотности времени ожидания для системы H₂/M/1, полученное через решение интегрального уравнения Линдли методом спектрального разложения [6]. В зарубежной литературе [7] известны эвристические формулы для систем G/M/1 и G/G/1: в частности, для системы H₂/M/1 приведено выражение для среднего времени ожидания

$$\bar{W} = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)} \left\{ 1 + \frac{1}{\rho} [\sqrt{(1-\theta)^2 + (r-1)} - (1-\theta)] \right\}, \quad (1)$$

где промежуточные параметры

$$\theta = \frac{\rho(q-r) - (q-r^2)}{2\rho(r-1)}; \quad q = \frac{\bar{\tau}_\lambda^3}{6(\bar{\tau}_\lambda)^3}; \quad r = \frac{\bar{\tau}_\lambda^2}{6(\bar{\tau}_\lambda)^2},$$

а $\bar{\tau}_\lambda$, $\bar{\tau}_\lambda^2$, $\bar{\tau}_\lambda^3$ – начальные моменты до третьего порядка интервалов между поступлениями требований в систему. Выражение (1) получено с помощью преобразования Лапласа-Стилтьеса функции распределения, и это преобразование приведено также в [6].

Постановка задачи

В статье ставится задача качественного сравнения авторских результатов с результатами из зарубежных источников. Решение (1) в работе [7] получено с использованием результата [6]:

$$W = \frac{\sigma}{\mu(1-\sigma)}, \quad (2)$$

где $0 < \sigma < 1$ – корень уравнения

$$\sigma = \int_0^\infty e^{-\mu(1-\sigma)t} dF(t) = F^*(\mu(1-\sigma)), \quad (3)$$

где F^* – преобразование Лапласа-Стилтьеса для функции гиперэкспоненциального распределения $F(t) = 1 - pe^{-\lambda_1 t} - (1-p)e^{-\lambda_2 t}$. Далее в [6] найден нужный корень уравнения (3) в виде $\sigma = \frac{1}{2\mu} \{ \mu + \lambda_1 + \lambda_2 - \sqrt{(\mu + \lambda_1 - \lambda_2)^2 - 4p\mu(\lambda_1 - \lambda_2)} \}$, где μ – интенсивность обслуживания экспоненциального закона M, а p , λ_1 , λ_2 – параметры гиперэкспоненциального распределения, которые должны быть определены методом моментов из системы уравнений:

$$\begin{cases} \bar{\tau}_\lambda = \frac{p}{\lambda_1} + \frac{(1-p)}{\lambda_2}; \\ \bar{\tau}_\lambda^2 = \frac{2p}{\lambda_1^2} + \frac{2(1-p)}{\lambda_2^2}; \\ \bar{\tau}_\lambda^3 = \frac{6p}{\lambda_1^3} + \frac{6(1-p)}{\lambda_2^3}. \end{cases} \quad (3)$$

В [1-4] значения p , λ_1 , λ_2 для широкого диапазона изменения параметров трафика определялись с использованием пакета Mathcad. В [7] вместо использования пакета удалось параметры гиперэкспоненциального распределения p , λ_1 , λ_2 выразить через начальные моменты интервалов

между поступлениями требований в систему $\bar{\tau}_\lambda$, τ_λ^2 , τ_λ^3 до третьего порядка включительно. Окончательно корень уравнения (3) имеет вид:

$$\sigma = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \rho \frac{q-r}{q-r^2} - \sqrt{\left(1 - \rho \frac{q-3r+2}{q-r^2} \right)^2 + \rho^2 \frac{4(r-1)^3}{(q-r^2)^2}} \right\}. \quad (4)$$

После подстановки (4) для σ в (2) получается окончательный результат (1) для среднего времени ожидания в системе $H_2/M/1$. В этом случае указанные начальные моменты будут входными параметрами для расчета характеристик системы. Заметим, что данные результаты получены с помощью преобразования Лапласа-Стилтьеса функции гиперэкспоненциального распределения.

Решение задачи

В [1; 8] приведен подробный вывод решения для времени ожидания в системе $H_2/M/1$. Получено преобразование Лапласа-Стилтьеса функции плотности времени ожидания для системы $H_2/M/1$ путем решения интегрального уравнения Линдли методом спектрального разложения:

$$W^*(s) = \frac{\sigma_1(s + \mu)}{\mu(s + \sigma_1)}, \quad (5)$$

где σ_1 – значение отрицательного корня со знаком минус квадратного уравнения

$$s^2 - c_2 s - c_1 = 0 \quad (6)$$

с коэффициентами $c_1 = \mu[\lambda_1(1-p) + \lambda_2 p] - \lambda_1 \lambda_2$, $c_2 = \lambda_1 + \lambda_2 - \mu$. Величины p, λ_1, λ_2 являются параметрами гиперэкспоненциального закона распределения с функцией плотности

$$a(t) = p\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + (1-p)\lambda_2 e^{-\lambda_2 t} \quad (7)$$

для системы $H_2/M/1$. Окончательно для среднего времени ожидания получен результат:

$$\bar{W} = 1/\sigma_1 - 1/\mu. \quad (8)$$

В отличие от результата (1) в [7], выражение (4) в авторской работе позволяет определить и моменты высших порядков для времени ожидания. Это будет преимуществом перед результатом [7]. Например, начальный момент второго порядка времени ожидания равен значению второй производной от преобразования (5) в точке $s = 0$ и будет иметь вид

$$\bar{W}^2 = \frac{d^2 W^*(s)}{ds^2} \Big|_{s=0} = \frac{2s_1(\mu - \sigma_1)}{\mu(s + \sigma_1)^3} \Big|_{s=0} = \frac{2(\mu - \sigma_1)}{\mu\sigma_1^2}. \quad (9)$$

В свою очередь, начальный момент второго порядка позволяет определить дисперсию времени ожидания: $D_W = \bar{W}^2 - \bar{W}^2$. Учитывая определение джиттера в телекоммуникациях как разброс времени ожидания от его среднего значения [10], тем самым получим возможность определения джиттера через дисперсию. Это является важным результатом для анализа трафика, чувствительного к задержкам.

Теперь установим связь между величинами σ из (2)-(3) и σ_1 из выражений (5) и (8). Для этого вспомним, что величина σ получена из преобразования Лапласа-Стилтьеса функции распределения $F(t)$, а σ_1 – из преобразования Лапласа-Стилтьеса функции плотности $a(t)$. Следовательно, по свойству преобразования для функции плотности $a(t) = dF(t)/dt$ преобразование Лапласа будет иметь вид $sF^*(s)$, где $F^*(s)$ – преобразование Лапласа функции распределения $F(t)$. Из этого факта после проведения несложных преобразований над $F^*(s)$ и $W^*(s)$ получим: $\sigma_1 = \mu(1 - \sigma)$ или $\sigma = 1 - \sigma_1/\mu$.

Таким образом, подставив выражение для σ_1 в (8), получим рабочую формулу для определения среднего времени ожидания для системы $H_2/M/1$:

$$\bar{W} = \frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu(1 - \sigma)} - \frac{1}{\mu}, \quad (10)$$

где параметр σ определяется выражением

$$\sigma = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \rho \frac{q-r}{q-r^2} - \sqrt{\left(1 - \rho \frac{q-3r+2}{q-r^2} \right)^2 + \rho^2 \frac{4(r-1)^3}{(q-r^2)^2}} \right\}.$$

Здесь промежуточные параметры: $q = \frac{\tau_\lambda^3}{6(\bar{\tau}_\lambda)^3}$, $r = \frac{\tau_\lambda^2}{6(\bar{\tau}_\lambda)^2}$, а $\bar{\tau}_\lambda$, τ_λ^2 , τ_λ^3 – начальные моменты до третьего порядка интервалов между поступлениями требований в систему, через которые выражаются параметры q и r .

Использование выражения (10) не предполагает решения системы (3) в математических пакетах и значительно упрощает расчет среднего времени ожидания для системы $H_2/M/1$. Как было отмечено выше, начальные моменты: $\bar{\tau}_\lambda$, τ_λ^2 , τ_λ^3 являются входными параметрами для определения среднего времени ожидания для системы $H_2/M/1$.

Отсюда возникает естественный вопрос: любые ли значения начальных моментов $\bar{\tau}_\lambda$, τ_λ^2 , τ_λ^3 позволяют аппроксимировать произвольные

распределения гиперэкспоненциальным законом вида $F(t) = 1 - pe^{-\lambda_1 t} - (1-p)e^{-\lambda_2 t}$? Данный вопрос может быть переформулирован иначе: при любых ли значениях начальных моментов: $\bar{\tau}_\lambda$, $\bar{\tau}_\lambda^2$, $\bar{\tau}_\lambda^3$ система (3) имеет решение относительно параметров p , λ_1 , λ_2 гиперэкспоненциального закона распределения?

Эти вопросы исследованы в [9], и ответ получен в виде следующего ограничения:

$$\frac{\bar{\tau}_\lambda^3}{\bar{\tau}_\lambda} \geq 1,5 \bar{\tau}_\lambda^2. \quad (11)$$

Следовательно, при аппроксимации произвольных законов распределений гиперэкспоненциальным законом необходимо придерживаться ограничения (11).

Проверим корректность выражения (10) на примере. Для системы $H_2/M/1$ возьмем следующие входные параметры: $\bar{\tau}_\lambda = 10/9$; $\bar{\tau}_\lambda^2 = 5 (10/9)^2$; $\bar{\tau}_\lambda^3 = 45 (10/9)^3$. При нормированном времени обслуживания $\mu = 1$ выбранное значение $\bar{\tau}_\lambda$ даст коэффициент загрузки $\rho = 9/10$, а моменты высших порядков соответствуют коэффициенту вариации, равному 2, и асимметрии, равной 4. Значения промежуточных параметров для вычисления корня σ в этом случае: $q = 7,5$; $r = 2,5$. Тогда значение корня $\sigma \approx 0,959$ и, следовательно, значение среднего времени ожидания из выражения (10) $W \approx 23,453$. Точно такой же результат дает и формула (1) или (2). Таким образом, авторский результат (10) полностью идентичен результатам (1) и (2).

Особенности моментной аппроксимации гиперэкспоненциального закона

В [1-4] отмечена особенность гиперэкспоненциального распределения, заключающаяся в возможности его аппроксимации как на уровне двух первых моментов, так и на уровне трех моментов. При этом в первом случае результаты по задержке получаются заниженными, то есть более оптимистичными, по сравнению со вторым случаем. При аппроксимации на уровне двух первых моментов результаты по задержке хорошо согласуются с результатами [10], где так же использован метод двухмоментной аппроксимации.

Для объяснения данного факта рассмотрим характерный пример [8]. Пусть коэффициент загрузки СМО $\rho = \bar{\tau}_\mu / \bar{\tau}_\lambda = 0,9$, где $\bar{\tau}_\lambda$ и $\bar{\tau}_\mu$ – средние значения интервалов между поступлениями и времени обслуживания. Рассмотрим случай нормированного обслуживания, когда $\bar{\tau}_\mu = \mu^{-1} = 1$ выбранная ед. времени. Тогда средний интервал между поступлениями $\bar{\tau}_\lambda = 10/9$

ед. времени. Пусть коэффициент вариации случайной величины – интервала времени между поступлениями $c_\lambda = 4$. Аппроксимация на уровне двух первых моментов дает: $p \approx 0,9697$, $\lambda_1 \approx 1,7454$, $\lambda_2 \approx 0,0546$. Среднее время ожидания в этом случае равно $\bar{W} \approx 75,786$ ед. времени.

Теперь к имеющимся двум моментам добавим третий в виде коэффициента асимметрии $A_{S\lambda} = 7$. При тех же значениях входных параметров СМО начальные моменты второго и третьего порядков для распределения (8) соответственно будут: $\bar{\tau}_\lambda^2 = 17 \cdot (10/9)^2$, $\bar{\tau}_\lambda^3 = 497 \cdot (10/9)^3$. Подставив эти данные в систему (3) и решив ее, получим $p \approx 0,9111$; $\lambda_1 \approx 6,2291$; $\lambda_2 \approx 0,0922$. Среднее время ожидания $\bar{W} \approx 82,62$ ед. времени, что и подтверждает сказанное выше насчет задержки. Таким образом, получили две совершенно различные аппроксимации гиперэкспоненциального распределения. На рис.1 приведены графики функции плотности для двух этих случаев.

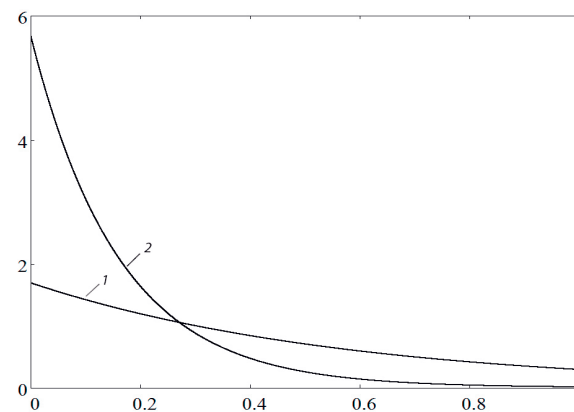


Рис. 1. Графики функции плотности (7):
1 – аппроксимация закона распределения H_2 на уровне двух моментов; 2 – на уровне трех моментов

Заключение

Проведенный сравнительный анализ авторских результатов с результатами из зарубежных источников показал их полную идентичность несмотря на разницу в подходах их получения. Кроме того, такой анализ позволил авторам оптимизировать расчет характеристик для системы $H_2/M/1$ в смысле упрощения расчетов. После этого стали возможны расчеты без применения математических пакетов. Такой подход может также упростить расчеты характеристик для более сложной системы $H_2/H_2/1$, рассмотренной авторами в работах [1; 5].

Литература

1. Тарасов В.Н. Исследование систем массового обслуживания с гиперэкспоненциальными

- входными распределениями // Проблемы передачи информации. 2016 – №1. – С.16-26.
2. Тарасов В.Н., Горелов Г.А., Ушаков Ю.А. Восстановление моментных характеристик распределения интервалов между пакетами входящего трафика // Инфокоммуникационные технологии, 2012. – Т.12. – №2. – С.40-44.
 3. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Горелов Г.А., Малахов С.В. Анализ входящего трафика на уровне трех моментов распределений временных интервалов // Информационные технологии. 2014. – №9. – С.54-59.
 4. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Горелов Г.А. Математическая модель трафика с тяжелохвостным распределением на основе системы массового обслуживания $H_2/M/1$ // Инфокоммуникационные технологии. 2014. – Т.12. – №3. – С.36-41.
 5. Тарасов В.Н., Карташевский И.В. Определение среднего времени ожидания требований в управляемой системе массового обслуживания $H_2/H_2/1$ // Системы управления и информационные технологии. 2014. – №3. – С. 92-96.
 6. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. // Пер. с англ. М: Машиностроение, 1979. – 432 с.
 7. Myskja A. An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals // Teletraffic and datatraffic in a Period of Change, ITC-13. Elsevier Science Publishers, 1991. – P. 683-688.
 8. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Липилина Л.В. Математическая модель телетрафика на основе системы G/M/1 и результаты вычислительных экспериментов // Информационные технологии. 2016. – №2. – С. 121-126.
 9. Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods // Operation Research, 30. 1982. – №1. – P. 125-147. doi: 10.1287/opre.30.1.125.
 10. Кругликов В.К., Тарасов В.Н. Анализ и расчет сетей массового обслуживания с использованием двумерной диффузионной аппроксимации // Автоматика и телемеханика. 1983. – №8. – С. 74-83.
 11. Standards Track. RFC 3393 IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM) // URL <https://tools.ietf.org/html/rfc3393> (д.о. 26.02.2017)

Получено 11.07.2017

Тарасов Вениамин Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой программного обеспечения и управления в технических системах (ПОУТС) ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (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

Липилина Людмила Владимировна, аспирант Кафедры ПОУТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 228-00-13; E-mail: mila199113@gmail.com

OPTIMISING H2/M/1 SYSTEM CHARACTERISTICS CALCULATION

Tarasov V.N., Bakhareva N.F., Kartashevskiy I.V., Lipilina L.V.

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

E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

Currently, there are no analytical methods for precisely determining the characteristics of queuing systems G/M/1 or G/M/m, and this lowers the degree of adequacy of stochastic network models to real computer and telecommunications networks and the quality of design decisions. This article shows the comparative results presented in various publications devoted to the calculation of the average waiting time in queuing systems G/M/1, in particular queuing system with hyper-exponential arrival rate. The results under consideration were obtained by completely different approaches, but the final calculated results are completely identical. These approaches have certain advantages to each other. Using of the analogues simplifies calculation of the characteristics for the system considered, and the author's approach expands the possibilities of calculating characteristics in terms of determining higher-order moments for the waiting time, which allows extracting information needed to calculate

a jitter, for example. Considering the definition of jitter in telecommunications as the spread of the waiting time from its average value, knowledge of higher order moments for the waiting time makes it possible to obtain the jitter value via calculating the variance, i.e. second moment of random waiting time.

Keywords: Queuing system G/M/1, $H_2/M/1$, average waiting time in the queue, method of spectral decomposition, Lindley integral equation, Laplace–Stieltjes transform

DOI: 10.18469/ikt.2017.15.4.07

Tarasov Veniamin Nikolayevich, Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, 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, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, 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.

Lipilina Liudmila Vladimirovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; PhD student of the Department of Software and Management in Technical Systems. Tel.: +78462280013. E-mail: mila199113@gmail.com.

References

1. 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 (In Russian).
2. Tarasov V.N., Gorelov G.A., Ushakov Y.A. Vosstanovlenie momentnykh harakteristik raspredeleniya intervalov vremeni mezhdu paketami vkhodyaschego trafika [Restoring moment distribution characteristics interval between packets of incoming traffic] *Informacionnye tehnologii*, 2014, no. 2, pp.40–44.
3. Tarasov V.N., Bahareva N.F., Gorelov G.A., Malakhov S.V. Analiz vkhodiaschego trafika na urovne trekh momentov raspredeleniy [Analyzing the Incoming Traffic at the Three Moments Distribution of Time Intervals]. *Informacionnye tehnologii*, 2014, no. 9, pp.54–59.
4. Tarasov V.N., Bahareva N.F., Gorelov G.A. Matematicheskaya model trafika s tiazhelohvochnymi raspredeleniyami na osnove sistemy massovogo obsluzhivaniya $H_2/M/1$ [Mathematical model of traffic with heavy-tailed distributions based queueing system $H_2/M/1$]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2014, no. 3, pp. 36–41.
5. Tarasov V.N., Kartashevskiy I.V. Opredelenie srednego vremeni ozhidaniya trebovaniy v upravliaemoy sisteme massovogo obsluzhivaniya $H_2/H_2/1$ [Determination of the average waiting time in controllable queueing system $H_2/H_2/1$]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tehnologii*, 2014, no.3, pp.92–95.
6. Kleinrock L. *Teoriya massovogo obsluzhivaniy* (Queueing theory) Moscow, Mashinostroenie Publ, 1979. 432 p.
7. Myskja A. An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals. *Teletraffic and datatrafic in a Period of Change, ITC-13*. Elsevier Science Publishers, 1991, pp. 683–688.
8. Tarasov V. N., Bahareva N. F., Lipilina L.V. Matematicheskaya model teletrafika na osnove sistemy G/M/1 i rezultaty vychislitelnykh eksperimentov [Mathematical Model of Teletraffic on the Based G/M/1 System and Results of Computational Experiment] *Informacionnye tehnologii*, 2016, no. 2, pp.121–126.
9. Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods. *Operation Research*, 1982, vol. 30. no. 1, pp. 125–147. doi: 10.1287/opre.30.1.125.
10. Kruglikov V.K., Tarasov V.N. Analiz i raschet setei massovogo obsluzhivaniya s ispolzovaniem dvumernoi diffuzionnoi aproksimacii [Analysis and design of queueing systems with the use of two-dimensional diffusional approximation] *Automation and Remote Control*, vol. 44, no. 8, 1983, pp. 1026–1034.
11. RFC 3393 IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM). Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc3393>. (accessed: 26.02.2016).

Received 11.07.2017