10. Neganov V.A. Samosoglasovanny metod rascheta eletromagnitnyh poley v blignih zonah izluchyushchih struktur, opisyvaemyh cilindricheskimi poverhnostyami [Self-consistent method for calculating electromagnetic fields in near zones radiating structures described coordinate cylindrical surfaces]. *DAN*, 2006, no. 2, pp. 178-181.
11. Vorob'ev N.N. *Teoriya ryadov* [The theory of series]. Moscow, Nauka. Fizmatlit Publ., 1979, 408 p.
12. Kurushin E.P., Nefedov E.I. *Eletrodinamika anizotropnyh volnovedushchih sruktur* [Electrodynamics of anisotropic waveguide structures]. Moscow, Nauka Publ., 1983, 304 p.
13. Neganov V.A., Nefedov E.I., Yarovoy G.P., P*olosko-shchelevye struktury sverh- i kraynevysokih chastot* [The strip-gap structure of SHF and EHF]. Moscow, Nauka. Fizmatlit Publ., 1996, 304 p.
14. Mittra, R., Lee, S.W. *Analytical Techniques in the Theory of Guided Waves.* New York, Mac-millan, 1971, 302 p. (Russ. ed.: Mitra R., Li S. Analiticheskie metidy teorii volnovodov. Moskow, MIR Publ., 1974, 323 p.).
15. Prudnikov A.P., Brychkov Yu.A., Marichev O.I. *Inegraly i ryady. Specialnye funkcii* [Integrals and series. Special functions]. Moscow, Nauka. Fizmatlit Publ., 1983, 752 p.
16. Prudnikov A.P., Brychkov Yu.A., Marichev O.I. *Inegraly i ryady. Elementarnye funkcii* [Integrals and series. Elementary functions]. Moscow, Nauka. Fizmatlit Publ., 1981, 798 p.
17. Gahov F.D., Cherskiy Yu.I. *Uravneniya tipa svertki* [Equations of convolution type]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 296 p.

Received 02.06.2015

ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 519.872

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБЩЕГО ВИДА С ПРОИЗВОЛЬНЫМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМИ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ

Буранова М.А., Карташевский В.Г., Киреева Н.В., Чупахина Л.Р.
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: buranova-ma@psuti.ru

В работе проанализирована структура трафика мультимедийных приложений. На основе анализа было проведено моделирование процессов сетевой обработки трафика в программе ns2. Рассмотрены два частных случая систем массового обслуживания общего вида: P1/W/1 и P2/P3/1. Получены оценки значений задержки в очереди для двух рассматриваемых случаев, проведена оценка задержки в очереди аналитически с применением аппарата теории массового обслуживания на основе решения уравнения Линдли спектральным методом.

Ключевые слова: системы массового обслуживания, среднее время задержки, имитационное моделирование, сетевое управление, интегральное уравнение Линдли, аппроксимация суммой затухающих экспонент.

Введение

Анализ структуры современного трафика на всех уровнях архитектуры мультисервисных сетей [1-2; 9] показывает, что он является самоподобным. Вследствие этого предлагаемые модели современного трафика основываются на процессах, отражающих свойства самоподобия. Наиболее популярными являются модели, построенные на базе ON/OFF процессов [2-3], учитывающих пачечный характер трафика. При этом ON и OFF периоды задаются распределениями с тяжелыми хвостами.

В инфокоммуникационных сетях большую часть трафика составляет мультимедийная нагрузка, которую не всегда можно описать моделями на основе ON/OFF процессов [9]. Здесь более корректной представляется модель, построенная на базе теории массового обслуживания [1; 9]. Следует заметить, что математический аппарат для расчетов параметров систем массового обслуживания (СМО) достаточно развит. В этой связи важным представляется возможность сравнения результатов имитационного моделирования с результатами аналитических расчетов.

Структура трафика мультимедийной нагрузки

Многочисленные исследования структуры трафика показывают, что такие характеристики, как интервалы времени между заявками и длительности заявок, применяемые в СМО, описываются распределениями с тяжелыми хвостами. Распределения Парето и Вейбулла при определенных значениях параметров дают достаточно точную аппроксимацию статистик интервалов времени между заявками и длительностей заявок, что позволяет применять их при моделировании трафика, обрабатываемого системами *G/G*/1.

Оценка параметров функционирования сетевого узла, описываемого моделью *G/G*/1 в среде ns2

Одним из важных показателей качества функционирования сети является задержка заявки при обработке в очереди.

Моделирование процессов сетевой обработки мультимедийного трафика реализовано в программе ns2. В качестве фрагмента сети, моделируемой в ns2, выбрана схема рис. 1, которая рассматривается как общий случай системы, описываемой моделью *G/G*/1 и обрабатывающей непуассоновский трафик.

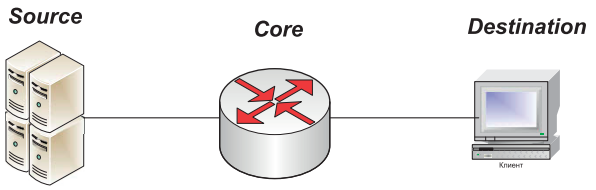

Рис. 1. Схема моделирования в ns2

Программа ns2 позволяет генерировать потоки различных распределений с установлением необходимых значений параметров.

Основываясь на имеющихся исследованиях трафика и его распределений [1-4; 9], были рассмотрены два случая СМО: система типа $P_1/W/1$ и $P_2/P_3/1$, где символы P и W означают распределения Парето и Вейбулла, которые, соответственно, имеют вид:

$$f(x) = \frac{\alpha\beta^{\alpha}}{x^{\alpha+1}}; \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta}\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1}\exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right), \quad (2)$$

где α – параметр формы; β – масштабный параметр. В качестве модуля транспортного уровня выбран модуль TCP. В первом случае (система $P_1/W/1$) для интервалов времени между пакетами (P_1) были установлены параметры: $\alpha_1 = 2{,}5$; $\beta_1 = 0{,}02$ и для длин пакетов (W) – параметры: $\alpha = 1{,}5, \beta = 0{,}01$. Во втором случае (система $P_2/P_3/1$) аналогично первому были установлены параметры P_2: $\alpha_2 = 2$, $\beta_2 = 2{,}5$; P_3: $\alpha_3 = 1{,}5$, $\beta_3 = 2$.

Пример задания трафика в нотации ns2 с распределениями параметров для второго случая ($P_2/P_3/1$):

```
set tcp1 [new Agent/TCP]
$ns attach-agent $s2 $tcp1

set rng1 [new RNG]
$rng1 seed 1
set arrival_t [new RandomVariable/Pareto]
$arrival_t use-rng $rng1
$arrival_t set avg_ 0.02
$arrival_t set shape_ 2.5

set rng2 [new RNG]
$rng2 seed 1
set pktSize [new RandomVariable/Weibull]
$pktSize  use-rng $rng2
$pktSize  set avg_ 0.01
$pktSize  set shape_ 1.5
set sink1 [new Agent/TCPSink]
$ns attach-agent $dest $sink1
$ns connect $tcp1 $sink1
```

В ns2 результатом моделирования является трейс-файл, в котором регистрируются все события, происходящие в моделируемой сети. Трейс-файл имеет четкую структуру, что позволяет выделить исходящие из узла-отправителя событий (исходящие пакеты).

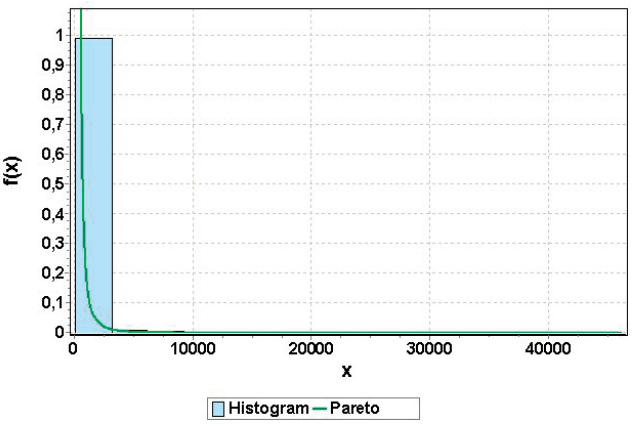

Рис. 2. Парето-распределение интервалов времени между пакетами, значение параметров: $\alpha = 2{,}7, \beta = 0{,}27$

По результатам моделирования была проведена проверка соответствия параметров генериру-

емого узлом-отправителем потока заданным параметрам с использованием программы Easy Fit. Были получены следующие распределения для интервалов времени между пакетами и длительностей пакетов (см. рис. 2 и рис. 3).

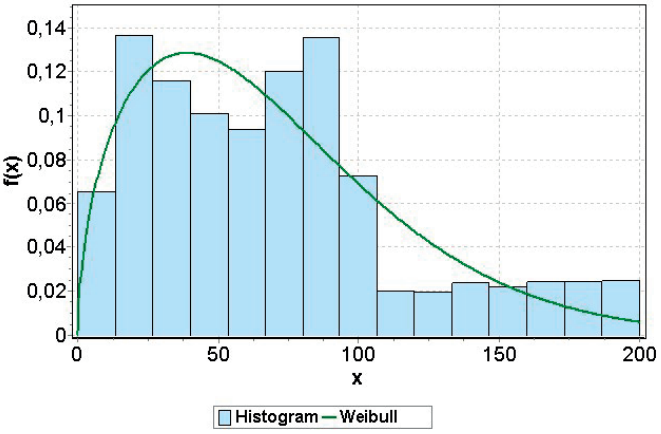

Рис. 3. Вейбулла-распределение длин пакетов, значение параметров: α=1,57, β=0,013

Дополнительно были исследованы корреляционные свойства генерируемых системой ns2 последовательностей интервалов времени между пакетами (с распределением Парето) и интервалов времени обработки пакетов (с распределением Вейбулла). Графики для коэффициентов корреляции, определяемых по формуле

$$r(k) = \frac{R(k)}{R(0)} = \\ = \frac{1}{(N-k)R(0)} \sum_{i=0}^{N-k} (x_i - m)\,(x_{i+k} - m), \quad (3)$$

где N – размер выборки, m – выборочное среднее, приведены на рис. 4 и рис 5.

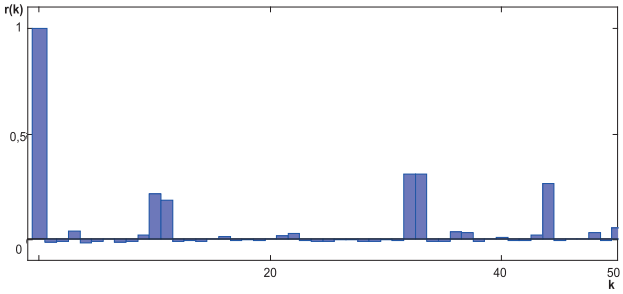

Рис. 4. График изменения коэффициента корреляции для интервалов времени между пакетами

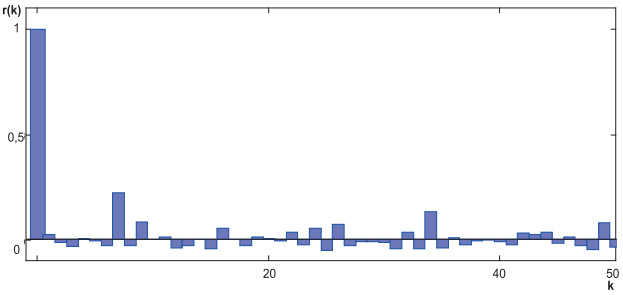

Рис. 5. График изменения коэффициента корреляции для интервалов времени обработки пакетов

Из графиков рис. 4 и рис. 5 следует, что для теоретического анализа работы систем G/G/1 может быть использовано уравнение Линдли, справедливость которого предполагает независимость значений интервалов времени в рассматриваемых последовательностях.

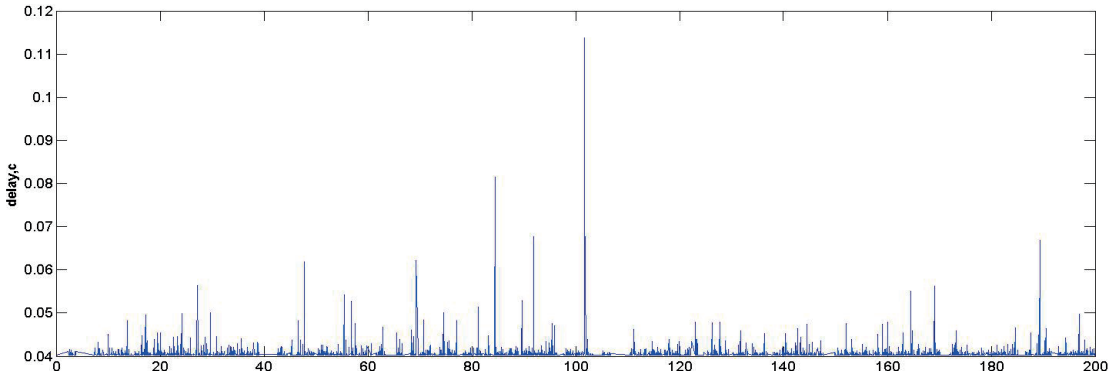

Рис. 6. Зависимость задержки от времени моделирования для системы $P_2/P_3/1$

Характер изменения задержки во времени для системы $P_2/P_3/1$ имеет вид, представленный на рис. 6. Очевидно, что в процессе передачи заданного потока имеются достаточно большие всплески, связанные с резким увеличением задержки. Это может быть объяснено, в том числе, ростом очередей в буфере обслуживающего устройства, а следовательно – увеличением задержки в очереди.

Для системы $P_1/W/1$ получены результаты с точностью, такой же, как и для системы $P_2/P_3/1$. С учетом того, что средние значения распределений Парето $m_{\text{п}}$ и Вейбулла $m_{\text{В}}$ определяются в виде

$$m_{\text{п}} = \frac{\propto \cdot \beta}{\alpha - 1};\ \ m_{\text{В}} = \beta\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right), \qquad (4)$$

для коэффициента загрузки одноканальной системы $P_1/W/1$ можно записать

$$\rho = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{В}}} = 0{,}269,$$

и в результате моделирования для системы $P_1/W/1$ было получено значение задержки в очереди, равное 1,379 мс. При этом время задержки заявки (пакета) в системе в целом $E(\tau)$ определяется как

$$E(\tau) = E(W) + 1/\mu, \qquad (5)$$

где $E(W)$ – среднее время ожидания заявки (пакета) в очереди; $1/\mu$ – средняя длительность обработки заявки (пакета). Для значения $m_{\text{в}} = 0{,}9$ мс получаем $E(\tau) = 2{,}279$ мс. Во втором случае (система $P_2/P_3/1$) значение задержки в очереди составило 1,902 мс. Аналитически оценить задержку в очереди для рассматриваемых систем $P_1/W/1$ и $P_2/P_3/1$ можно на основе решения уравнения Линдли для систем общего вида.

Решение уравнения Линдли спектральным методом

Уравнение Линдли имеет следующий вид [6]:

$$F(x) = \int_0^{\infty} H(x - y)dF(y),$$

где $F(\cdot)$ – функция распределения времени ожидания требования в очереди; $H(\cdot)$ – ядро, связывающее произвольную функцию распределения вероятностей интервалов времени между поступлениями соседних требований $A(\tau)$ и произвольную функцию распределения длительности обслуживания требований $B(\tau)$.

Заметим, что само уравнение Линдли выведено в предположении независимости элементов последовательности интервалов времени между заявками и интервалов времени обработки заявок. Результаты, определяемые рис. 4 и рис. 5, позволяют использовать уравнение Линдли для анализа рассматриваемых систем.

Известно, что для СМО типа $G/G/1$ возможен спектральный метод решения ИУ Линдли, если для плотностей вероятностей $a(\tau)$ и $b(\tau)$, соответствующих распределениям $A(\tau)$ и $B(\tau)$, использовать аппроксимацию в виде суммы затухающих экспонент [5].

В частности, решение уравнения Линдли спектральным методом реализуется относительно просто для экспоненциальных и гиперэкспоненциальных распределений [2].

Для использования методологии решения уравнения Линдли спектральным методом, представленной в [7-8], при произвольных распределениях интервалов времени между поступающими заявками (пакетами) и интервалов времени обработки пакетов в [5; 8] разработан метод аппроксимации произвольных плотностей вероятностей конечной суммой затухающих экспонент. При этом $a(\tau)$ и $b(\tau)$ имеют представление

$$a(\tau) = \sum_{k=1}^{n} \xi_k e^{-\eta_k(\tau)}, \qquad (6)$$

$$b(\tau) = \sum_{k=1}^{l} \varphi_k e^{-\theta_k(\tau)}. \qquad (7)$$

Так, например, для системы $P_1/W/1$, рассмотренной выше, с параметрами $\alpha_1 = 2{,}5$; $\beta_1 = 0{,}02$; $\alpha = 1{,}5$; $\beta = 0{,}01$ целесообразно выбрать $n = 5$; $l = 5$. Значения коэффициентов разложения при этом из (6) и (7) сведены в таблицу

Таблица 1. Значения коэффициентов разложения для системы $P_1/W/1$

k	1	2	3	4	5
ξ_k	0,000054	-0,00001	0,0034	-0,018	0,091
η_k	1	2	3	4	5
φ_k	0	$1{,}34 \times 10^{-15}$	$-1{,}35 \times 10^{-12}$	$6{,}32 \times 10^{-10}$	$-1{,}59 \times 10^{-17}$
θ_k	3,831	7,663	11,494	15,326	19,157

Точность аппроксимации согласно (6)-(7) характеризует график рис. 7, где представлена абсолютная ошибка аппроксимации для распределения Парето с выбранными параметрами.

Суть спектрального метода решения уравнения Линдли заключается в нахождении преобразования Лапласа функции распределения времени ожидания заявки в очереди. Для этого, как показано в [8], необходимо получить спектральное разложение выражения $A(-s)B(s) - 1$ в виде отношения двух полиномов

$$A(-s)B(s) - 1 = \frac{\Psi_+(s)}{\Psi_-(s)}, \qquad (8)$$

где $A(s)$ и $B(s)$ – преобразования Лапласа функций $a(\tau)$ и $b(\tau)$. На основе аппроксимаций (6)-(7) отношение (8) в общем виде может быть записано как

$$\frac{\Psi_+(s)}{\Psi_-(s)} = \frac{(s-s_{i1})(s-s_{i2})\ldots(s-s_{ir})}{(s-s_{j1})(s-s_{j2})\ldots(s-s_{jz})}, \qquad (9)$$

где в общем случае *r* и *z* не превосходят значения *n+l*. Требование существования конечных моментов для распределений $A(\tau)$ и $B(\tau)$, а также отсутствия бесконечного числа разрывов у этих функций [7] приводит к тому, что не все нули и полюса из (9) должны использоваться в формировании функции *F*(*s*), являющейся преобразованием Лапласа плотности распределения времени ожидания заявки в очереди.

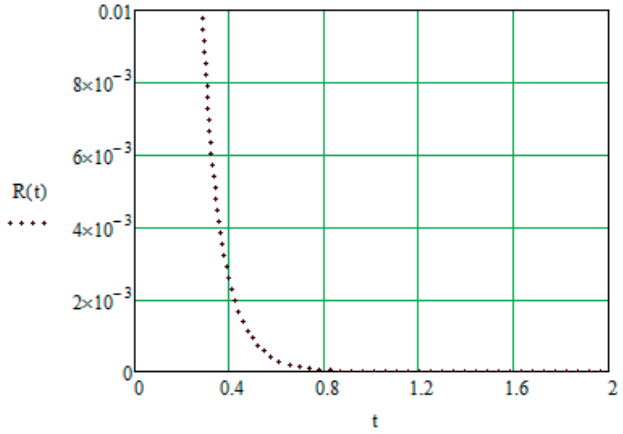

Рис. 7. График погрешности аппроксимации R(t) распределения Парето

В разложении *F*(s) останутся нули и полюса (9), удовлетворяющие условиям, налагаемым на функции $\Psi_+(s)$ и $\Psi_-(s)$

$$\lim_{s\to\infty} \frac{\Psi_+(s)}{s} = 1 \text{ для } R_e\, s > 0\,; \quad \lim_{s\to\infty} \frac{\Psi_-(s)}{s} = -1 \text{ для } R_e\, s < D. \qquad (10)$$

При этом для системы $P_1/W/1$ с выбранными параметрами разложение *F*(*s*) запишется как

$$F(s) = \frac{K(s-s_{01})(s-s_{02})(s-s_{03})(s-s_{04})(s-s_{05})}{(s-s_{n1})(s-s_{n2})(s-s_{n3})(s-s_{n4})(s-s_{n6})}, \qquad (11)$$

где *K* – константа, равная вероятности того, что поступающая заявка застанет систему свободной, и определяемая в виде

$$K = \lim_{s\to 0} \frac{\Psi_+(s)}{s}. \qquad (12)$$

В выражении (11) нули и полюса имеют значения $s_{01} = -4{,}625$; $s_{02} = -2{,}775$; $s_{03} = -3{,}7$; $s_{04} = -1{,}85$; $s_{05} = -0{,}925$; $s_{n1} = -0{,}436$; $s_{n2,3} = -1{,}854 \pm 0{,}843i$; $s_{n4,5} = -4{,}425 \pm 0{,}976i$. Очевидно, что для преобразования Лапласа самого распределения, а не плотности, будет справедлива запись $\Phi(s)/s$, обращая которую, получим функцию распределения, представленную на рис. 8 (кривая 1).

Поступая аналогичным образом, для системы $P_2/P_3/1$, где P_2 имеет параметры $\propto_2 = 2$, $\beta_2 = 2{,}5$, и P_3 – параметры $\alpha_3 = 1{,}5$, $\beta_3 = 2$, можно получить функцию распределения времени ожидания в очереди в виде кривой 2 на рис. 8.

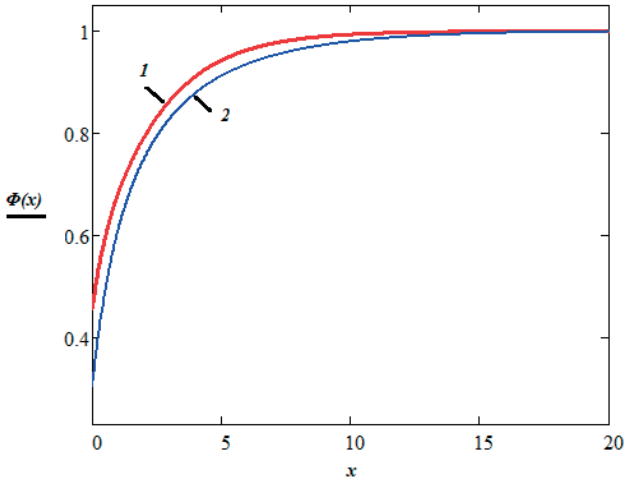

Рис. 8. График функции распределения времени ожидания в очереди

Функция распределения времени ожидания Ф(x) в нулевой точке определяет вероятность отсутствия очереди, то есть вероятность того, что накопитель системы пуст. Соответственно, для вышеприведенных примеров можно найти среднее время ожидания пакета в очереди согласно известному свойству характеристической функции

$$t_{\text{ср}} = \left.\frac{dF(s)}{ds}\right|_{s=0}.$$

После вычисления по последней формуле получаем $t_{\text{ср}1} = 1{,}15$, аналогично для второго случая $t_{\text{ср}2} = 1{,}585$. В качестве единиц измерения были выбраны мс.

Погрешность решения уравнения Линдли спектральным методом в сравнении с результатами моделирования составляет порядка 20 %, что является вполне приемлемым. Такая погрешность может быть связана с идеализацией исходных (реальных) распределений временных параметров рассматриваемых моделей с допущением независимости элементов рассматриваемых последовательностей интервалов времени

и с определенными точностями, характерными для любой моделирующей системы, в том числе и для ns2.

Заключение

Аналитическое исследование систем массового обслуживания общего вида (G/G/1) в случае, когда распределения интервалов времени между заявками и интервалов времени обслуживания заявок являются распределениями с тяжелыми хвостами, представляет собой сложную задачу. Оценить точность полученных аналитических результатов (особенно если они основаны на использовании аппроксимаций рассматриваемых функций распределений) можно с помощью моделирующей системы ns2.

Сравнение аналитических результатов и результатов экспериментов на модели в ns2, дающее 80-процентное совпадение, позволяет сделать вывод о допустимости выбранного метода решения интегрального уравнения Линдли в рассматриваемых условиях.

Точность полученного решения определяется точностью аппроксимации используемых распределений и при необходимости может быть повышена путем увеличения количества узлов интерполирования для выражений (6) и (7).

Литература

1. Шелухин О.И., Тенякшев А.М., Осин А.В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях. М.: Радиотехника, 2003. – 480 с.
2. Шелухин О.И., Осин А.В., Смольский С.М. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения. М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
3. Downey A. Lognormal and Pareto distributions in the Internet // Computer Communications. Vol. 28, No 7, 2005. – P. 790-801.
4. Агеев Д.В., Игнатенко А.А., Копылев А.Н. Методика определения параметров потоков на разных участках мультисервисной телекоммуникационной сети с учетом эффекта самоподобия // Проблемы телекоммуникаций. №3 (5), 2011. – С. 18-37. // http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_ageyev_method.pdf
5. Блатов И.А., Карташевский В.Г., Киреева Н.В. Метод аппроксимации произвольной плотности распределения суммами экспонент // Вестник ВГУ. № 2, 2013. – С. 53-57.
6. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
7. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.Н. Численные методы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2003. – 632 с.
8. Чупахина Л.Р. Анализ характеристик систем массового обслуживания при передаче непуассоновского трафика методом аппроксимации функций распределения. Дис. к.т.н. Самара, ПГУТИ, 2013. – 134 с.
9. Буранова М.А. Исследование статистических характеристик самоподобного телекоммуникационного трафика // Инфокоммуникационные технологии. Т. 10, № 4, 2010. – С. 35-40.

Получено 26.03.2015

Буранова Марина Анатольевна, к.т.н., доцент Кафедры мультисервисных сетей и информационной безопасности (МСИБ) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Тел. (8-846) 333-53-50. E-mail: buranova-ma@psuti.ru

Карташевский Вячеслав Григорьевич, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой МСИБ ПГУТИ. Тел. (8-846) 333-13-13. E-mail: kartash@psati.ru

Киреева Наталья Валерьевна, к.т.н., доцент Кафедры МСИБ ПГУТИ. Тел. (8-846) 339-11-67. E-mail: zeppelinSN@yandex.ru

Чупахина Лилия Равилевна, к.т.н., доцент Кафедры МСИБ ПГУТИ. Тел. (8-846) 339-11-62. E-mail: garip4ik555@mail.ru

SIMULATION AND ANALYSIS OF GENERALIZED QUEUE SYSTEM WITH ARBITRARY DISTRIBUTION OF SYSTEM PARAMETERS

Buranova M.A., Kartashevskiy V.G., Kireeva N.V., Chupahina L.R.
Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
E-mail: buranova-ma@psuti.ru

In this work we analyzed multimedia application traffic structure. Processes of traffic network handling were simulated by software ns2 based on carried out analysis. Two special cases of generalized

queue systems P1/W/1 and P2/P3/1 were examined, and we researched correlation properties of time interval sequences of both packets and packet processing. According to obtained research results, it is able to produce theoretical analysis of G/G/1 systems by Lindley equation. We estimated delays for mentioned above two cases. Also we computed delay analytically by using mathematical apparatus of theory of queues based on Lindley equation solution by spectral method.

Keywords: *queuing system, average delay time, simulation, network management, Lindley integral equation, approximation by sum of damped exponents*

DOI: 10.18469/ikt.2015.13.3.03

Buranova Marina Anatolyevna. PhD in Technical Science, Associate Professor of the Department of Multiservice Network and Information Security, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation. Tel.: +78463335350. E-mail: buranova-ma@psuti.ru.
Kartashevskiy Vjacheslav Grogorjevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, the Head of the Department of Multi-service Network and Information Security, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation. Tel. +78463331313. E-mail: kartash@psati.ru.
Kireeva Natalja Valeryevna, PhD in Technical Science, Associate Professor of the Department of Multi-service Network and Information Security, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation.. Tel.: +78463391167. E-mail: zeppe-linsn@yandex.ru.
Chupakhina Lilia Ravilyevna, PhD in Technical Science, Associate Professor of the Department of Multiservice Network and Information Security, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation.. Tel.: +78463391162. E-mail: ga-rip4ik555@mail.ru

References

1. Sheluhin O.I., Tenyakshev A.M., Osin A.V. *Fraktalnie processi v telekommunikaciyah* [Fractal Processes in Telecommunications]. Moscow, Radiotehnika Publ., 2003. 480 p.
2. Sheluhin O.I., Osin A.V., Smolskii S.M. *Samopodobie i fraktali. Telekommunikacionnie prilojeniya* [Self-similarity and fractals. Telecommunication applications]. Moscow, Fizmatlit publ., 2008, 368 p.
3. Downey A. Lognormal and Pareto distributions in the Internet. *Computer Communications*, 2005, vol. 28, no 7, pp. 790–801.
4. Ageev D.V., Ignatenko A.A., Kopilev A.N. Metodika opredeleniya parametrov potokov na raznih uchastkah multiservisnoi telekommunikacionnoi seti s uchetom effekta samopodobiya [Method of determining the fl ow parameters in different parts of multiservice telecommunications network, taking into account the effect of self-similarity]. *Problemi telekommunikacii*, 2011, vol. 3, no. 5, pp. 18–37. Available at: http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_ageyev_method.pdf. (ac-cessed 22.11.2014)
5. Blatov I.A., Kartashevskii V.G., Kireeva N.V. Metod approksimacii proizvolnoi plotnosti raspredeleniya summami eksponent [The method of approximating an arbitrary density distribution of the sum of exponents]. *Vestnik VGU*, 2013, no. 2, pp. 53–57.
6. Leonard Kleinrock. *Queueing Systems: Volume I, Theory*. New York, Wiley Interscience, 1975, 417 p.
7. Bahvalov N.S., Jidkov N.P., Kobelkov G.N. Chislennie metodi [Numerical methods]. Moscow, *Laboratoriya bazovih znanii*, 2003, 632 p.
8. Chupahina, L.R. *Analiz harakteristik sistem massovogo obslujivaniya pri peredache nepuassonovskogo trafi ka metodom approksimacii funkcii raspredeleniya*. Avtoref. dis. kand. tehn. nauk [Analysis of the characteristics of queuing systems in the transmission nonpoissonian traffi c approximation method of distribution functions Cand. eng. sci. diss.]. Samara, 2013, 134 p.
9. Buranova M.A. Issledovanie statisticheskih harakteristik samopodobnogo telekommunikacionnogo trafi ka [Research of statistical characteristics of the self-similar telecommunication traffi c]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2012, vol. 10, no. 4, pp. 35-40.

Received 26.03.2015