

7. Радзиевский В. Г., Сирота А. А. Информационное обеспечение радиоэлектронных средств в условиях конфликта. М.: ИПРЖР, 2001. 456 с.

8. Дмитриев В. Ф. Устройства интегральной электроники: Акустоэлектроника. Основы теории, расчета и проектирования: учеб. пособие / ГУАП. СПб., 2006. 169 с.

9. Smetana D., Goncher G. Single board captures, digitizes DC to 6 GHz // Defense electronics magazine, 2013 // URL: <http://defenseelectronicsmag.com/systems-amp-subsystems/single-board-captures-digitizes-dc-6-ghz>.

10. Радиоэлектронная борьба. Цифровое запоминание и воспроизведение радиосигналов и электромагнитных волн / В. Д. Добыкин, А. И. Куприянов, В. Г. Пономарев, Л. Н. Шустов; под общ. ред. А. И. Куприянова. М.: Вуз. книга, 2009. 360 с.

11. Смогилев К. А., Вознесенский И. В., Филиппов Л. А. Радиоприемники СВЧ. М.: Воениздат, 1967. 556 с.

12. Белкин М. Е., Белкин Л. М. Особенности построения резистивных смесителей диапазона крайне высоких частот в монолитном исполнении // Электронная техника. Сер. 2 Полупроводниковые приборы, 2010. № 1. С. 98–104.

13. Белкин М. Е., Белкин Л. М. Разработка МИС смесителя миллиметрового диапазона // Электроника и микроэлектроника СВЧ: Всерос. конф. 4–7 июня 2012 г., Санкт-Петербург // URL: [http://mwelectronics.ru /2012/Oral/U39\\_M.E.%20Belkin\\_Razrabotka%20MIS%20smesite%20millimetrovogo%20diapazona.pdf](http://mwelectronics.ru /2012/Oral/U39_M.E.%20Belkin_Razrabotka%20MIS%20smesite%20millimetrovogo%20diapazona.pdf).

14. Maas S. A. Nonlinear microwave and RF circuits. Norwood: Artech house, 2003. 582 p.

A. S. Podstrigaev, A. I. Bezzub

Bryansk state technical university

### Wideband receiver of electronic warfare station

*Receivers of radio-electronic fight stations are considered. On the basis of known technical solutions approach to design of a receiver with the improved technical and economic indicators is offered. Criteria of feasibility of the receiver constructed according to the specified scheme, and also the expressions describing the frequency plan of a receiver are given. The problem of an exception of frequency determination ambiguity at penetration of strong signals in adjacent areas of the neighboring canals is solved.*

Radio engineering, military equipment, radio electronic fight, radio electronic countermeasure fight, receiver

Статья поступила в редакцию 15 августа 2014 г.

УДК 519.872

А. С. Тамазян, М. И. Богачёв

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Исследование влияния корреляционных свойств входного потока запросов на показатели эффективности системы массового обслуживания

*Рассматривается влияние корреляционных свойств входного потока запросов на такие показатели эффективности системы массового обслуживания, как пропускная способность системы, коэффициент ее использования, среднее число запросов и среднее время нахождения запросов в ней. Используется модель с долговременной зависимостью в сравнении с классической пуассоновской моделью M/M/1, а также с эмпирическими данными.*

### Система массового обслуживания, показатели эффективности, корреляция, долговременная зависимость, численное моделирование

Система массового обслуживания (СМО) может быть определена как динамическая система, предназначенная для эффективного обслуживания случайных потоков запросов при ограниченных ресурсах системы. Работа такой системы заключа-

ется в обслуживании поступающего в нее входящего потока запросов клиентов. Требования поступают в систему одно за другим в случайные моменты времени. Обслуживание поступившего запроса продолжается какое-то время, после чего

система освобождается для обслуживания очередного запроса. В теории массового обслуживания наиболее классическим случаем является СМО с пуассоновским входным потоком и экспоненциальным временем обслуживания типа  $M/M/1^1$  [1], [2].

Однако в ряде случаев (например, для информационных и телекоммуникационных систем, требования в которых инициируются самими пользователями), входящий поток запросов системы часто имеет непурассоновский характер и характеризуется наличием корреляции между временами их поступления [3]–[5]. Распределение интервалов между запросами в этом случае существенно шире экспоненциального и имеет медленно убывающий "хвост", поэтому моделирование такой системы должно существенно отличаться от традиционного случая СМО с пуассоновским входным потоком и экспоненциально распределенным временем обслуживания.

Целью исследования, представленного в настоящей статье, является изучение влияния наличия неэкспоненциального распределения и корреляционной зависимости во входном потоке запросов на показатели эффективности СМО. Для этого проведено сравнение результатов имитационного моделирования, выполненного для классической модели СМО с некоррелированным входным потоком, и результатов, полученных для модели СМО с непурассоновскими некоррелированным и коррелированным входными потоками запросов.

Для установления распределения интервалов между запросами предпринята попытка аппроксимации нормированных эмпирических данных, полученных из трафика сервера Университета Калгари с показателем Хёрста  $H = 0.6^2$  различными законами распределения. В ходе этого исследования установлено, что распределение интервалов между требованиями может быть описано обобщенным степенным распределением Вейбулла, а объем запрошенной информации – логнормальным распределением.

Обобщенное степенное распределение Вейбулла (Generalized power Waybill – GPW) введено Никулиным и Хагиги [6] и является частным случаем обобщенного распределения Вейбулла. Оно описывается плотностью вероятности

$$p(x, \alpha, \theta) = \alpha \theta x^{\alpha-1} (1+x^\alpha)^{\theta-1} \exp\left[1 - (1+x^\alpha)^\theta\right],$$

и функцией распределения

$$GPW(x, \alpha, \theta) = \exp\left[1 - (1+x^\alpha)^\theta\right], \quad x \geq 0,$$

где  $\alpha > 0$ ,  $\theta > 0$  – первый и второй коэффициенты формы соответственно.

В качестве модели корреляционной зависимости выбрана модель со степенным убыванием корреляционной функции интервалов между поступлениями запросов. Данная модель относится к классу моделей с долговременной зависимостью, характерной особенностью которых является расходимость интеграла автокорреляционной функции. Указанные модели широко используются в последнее время для описания динамики трафика в информационных системах [3]–[5].

Самым простым методом введения долговременной зависимости в дискретный процесс является метод фильтрации Фурье. Рассмотрим временной ряд из  $L$  независимых случайных чисел  $\{u_i\}$ ,  $i = 1, \dots, N$ , распределенных по равномерному закону. Поставим задачу – ввести долговременную зависимость в временной ряд  $\{u_i\}$  для получения нового временного ряда  $\{\eta_i\}$  с корреляционной функцией вида  $C(s) \sim s^{-\gamma}$ , где  $\gamma$  – корреляционный показатель. Спектральная плотность мощности  $S(\omega)$  такого процесса, полученная с помощью прямого преобразования Фурье корреляционной функции  $C(s)$ , будет иметь вид  $S(\omega) \sim \omega^{\gamma-1}$ . Отметим, что корреляционный показатель  $\gamma$  и показатель Хёрста взаимно однозначно связаны соотношением  $H = 1 - \gamma/2$ .

Поставленная задача может быть решена с помощью метода фильтрации Фурье [7]. Полученный в результате дискретный случайный процесс содержит только линейную долговременную зависимость, полностью характеризуемую корреляционным показателем  $\gamma$  или показателем Хёрста  $H$ .

Указанный метод дает хороший результат только при нормальном распределении исходного процесса. При применении этого метода к случайному процессу с долговременной зависимостью и распределением, отличным от нормального, в результате суммирования при выполнении преобразования Фурье согласно центральной предельной теореме теории вероятностей закон распределения фильтруемых данных нормализуется. Поэтому распределение полученного процесса будет отличаться от заданного.

<sup>1</sup> В обозначении СМО по системе Кендалла [1] первый элемент указывает распределение интервалов между запросами ( $M$  – экспоненциальное (пуассоновское) распределение), второй элемент – распределение длительности обслуживания запросов, третий элемент – количество запросов.

<sup>2</sup> <http://ita.ee.lbl.gov>

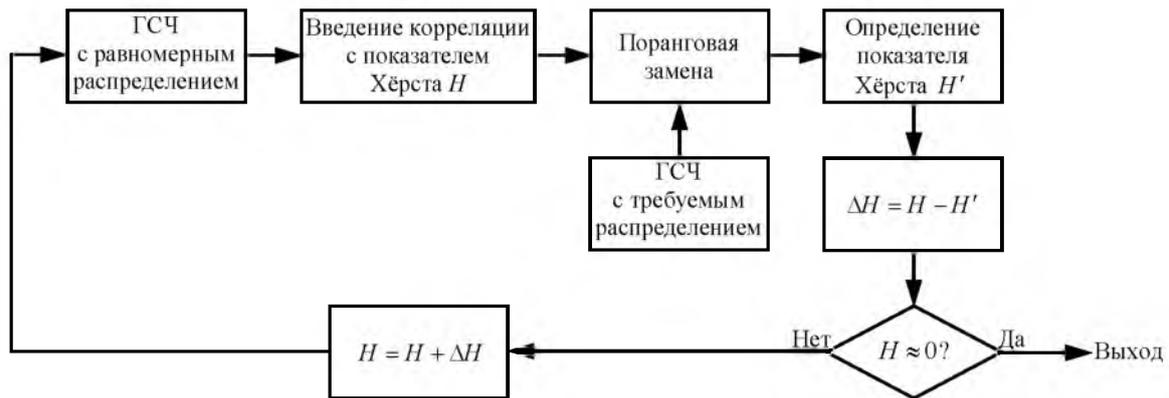


Рис. 1

Для решения проблемы нормализации Шрайбером и Шмитцем [8] разработан итерационный алгоритм, позволяющий вводить в дискретный случайный процесс  $\{x_i\}$  с некоторым распределением долговременную зависимость с нужным показателем Хёрста  $H$  (рис. 1, ГСЧ – генератор случайных чисел). Он предусматривает следующие операции.

1. Генерирование дискретного случайного процесса  $\{y_i\}$  с равномерным распределением и заданным показателем Хёрста  $H$  с помощью метода фильтрации Фурье.

2. Ранжирование значений процесса  $\{y_i\}$  и поранговая замена его значений значениями из исходного распределения  $\{x_i\}$ . В результате получим процесс  $\{z_i\}$ .

3. К сожалению, процесс  $\{z_i\}$  будет иметь показатель Хёрста  $H'$ , отличный от заданного показателя  $H$ . Поэтому далее  $H'$  оценивается с помощью методов флуктуационного анализа, например с помощью метода флуктуационного анализа с исключением тренда (DFA) [9], после чего рассчитывается поправка на показатель Хёрста:  $\Delta H = H - H'$ .

4. Повтор шагов 1–3 с заменой начального показателя Хёрста с  $H$  на  $H + \Delta H$ , и повторение этих операций до тех пор, пока сгенерированный процесс не будет отвечать требованиям как по распределению отсчетов, так и по показателю Хёрста.

В настоящей статье описанный алгоритм применен для введения требуемых корреляционных свойств в сгенерированный входной поток запросов. Выполнено моделирование двух СМО, обозначаемых с использованием системы Кендалла [1] как  $M/M/1$  и  $GPW/M/1$ . Исследуемые системы являются одноканальными, длительность обслуживания запросов в обеих системах распределена по экспоненциальному закону, а различаются они лишь распределениями интервалов между запросами.

Для моделирования СМО был применен дискретно-событийный подход. При этом подходе моделирование системы осуществляется выполнением упорядоченной во времени последовательности событий. Имитационная модель системы представляет собой набор процедур проверки возможности совершения событий, алгоритмов имитации выполнения действий и управляющей программы моделирования. Такая модель может быть задана описанием взаимосвязей событий между собой и временных характеристик действий различных компонентов системы.

На рис. 2 для СМО  $M/M/1$  и  $GPW/M/1$  приведены полученные моделированием зависимости показателей эффективности (пропускной способности  $X$ , коэффициента использования  $U$ , среднего числа запросов в системе  $L$  и среднего времени нахождения запросов в системе  $W$ ) от интенсивности входного потока запросов  $\lambda$  при интенсивности обслуживания  $\mu = 1.2$ . Квадратными маркерами показаны показатели эффективности для СМО  $M/M/1$  при некоррелированном входном потоке запросов ( $H = 0.5$ ), круглыми маркерами – показатели эффективности для СМО  $GPW/M/1$  при некоррелированном входном потоке запросов, треугольными маркерами – показатели эффективности для СМО  $GPW/M/1$  при входном потоке с долговременной зависимостью с  $H = 0.6$  – типичным значением показателя Хёрста для трафика информационных систем.

Как следует из результатов моделирования, пропускная способность системы и коэффициент ее использования слабо зависят от корреляционных свойств входного потока. В отличие от них среднее число запросов в системе и среднее время их нахождения в системе зависят от корреляционных свойств входного потока запросов: чем выше его показатель Хёрста  $H$ , тем больше значения данных показателей СМО при постоянстве прочих характеристик. Также следует отметить, что для  $GPW/M/1$  среднее число запросов и сред-

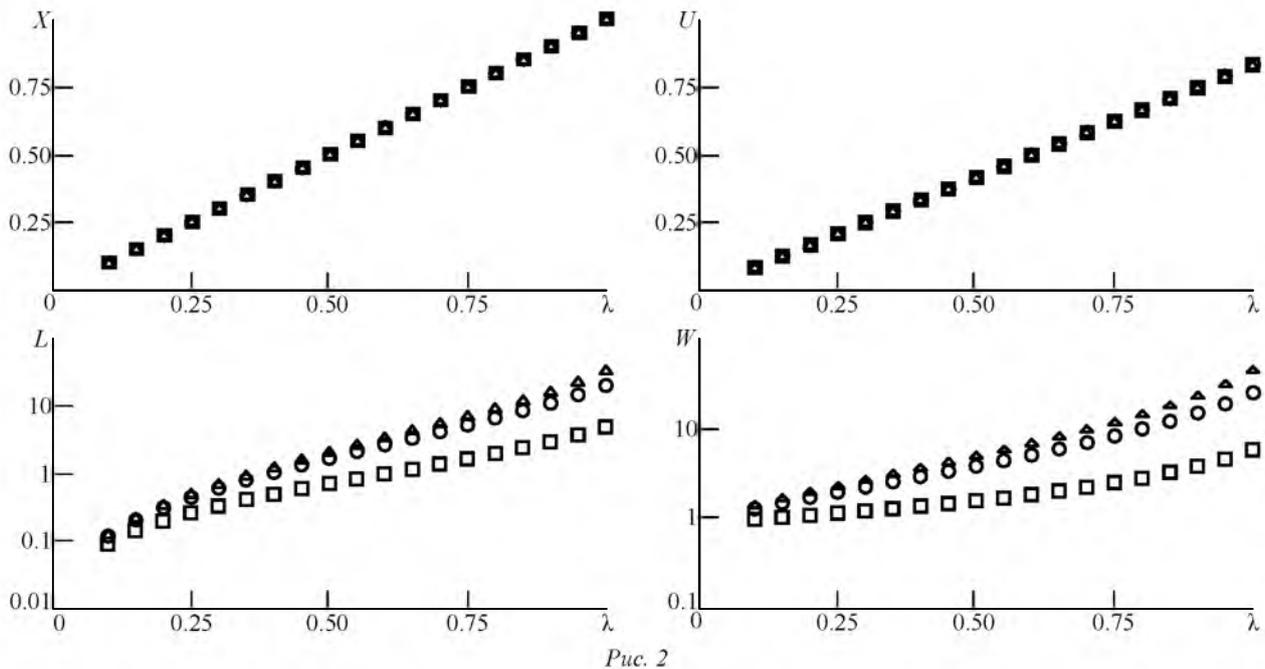


Рис. 2

нее время их нахождения в системе выше, чем для СМО  $M/M/1$ , а для СМО  $GPW/M/1$  среднее число запросов и среднее время их нахождения в

системе выше при наличии корреляции во входном потоке.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шелухин О. И., Тенякшев А. М., Осин А. В. Моделирование информационных систем: учеб. пособие. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
2. Саати Т. Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения / пер. с англ.; под ред. И. Н. Коваленко. М.: Кн. дом "ЛИБРОКОМ", 2010. 520 с.
3. The changing nature of network traffic / A. Feldmann, A. Gilbert, W. Willinger, T. Kurtz // ACM SIGCOMM computer communication review. 1998. Vol. 28, № 2. P. 5–29.
4. Paxson V., Floyd S. Wide area traffic: the failure of Poisson modeling // IEEE/ACM Transactions on Networking. 1995. Vol. 3. Iss. 3. P. 226–244.
5. Long-range dependence and heavy-tail modeling for teletraffic data / Cappe O., Moulines E., Pesquet J. et

al. // IEEE signal proc. magazine. 2002. Vol. 19. Iss. 3. P. 14–27.

6. Pham H., Lai C.-D. On recent generalizations of the Weibull distribution // IEEE Trans. on reliability. 2007. Vol. 56. Iss. 3. P. 454–458.

7. Feder J. Fractals. New York: Springer, 1988. 283 p.

8. Schreiber T., Schmitz A. Improved surrogate data for nonlinearity tests // Physical rev. let. 1994. Vol. 77. Iss. 4. P. 635–638.

9. Detecting long-range correlations with detrended fluctuation analysis / Kantelhardt J. W., Koscielny-Bunde E., Rego H. H. A. et al. // Physica A: Statistic. mechanics and its applications. 2001. Vol. 295. Iss. 3–4. P. 441–454.

A. S. Tamazian, M. I. Bogachev

Saint-Petersburg state electrotechnical university "LETI"

## The impact of incoming jobs correlation properties on the efficiency characteristics of the queueing system

*The effect of the incoming jobs correlation properties on the efficiency characteristics of the queueing system such as throughput, utilization, mean number of jobs and mean time spent in the system is considered. The simulated long-term correlated incoming jobs flow is compared with classical Poisson  $M/M/1$  model and with empirical data.*

Queueing system, efficiency characteristics, correlation, long-term dependence, numerical simulation

Статья поступила в редакцию 11 июня 2014 г.