

УДК 004.7:519.872

DOI: 10.17223/19988605/50/13

**О.В. Семёнова, З.Т. Буй****ПАКЕТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ПОЛЛИНГА***Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ, проект № 18-570002.*

Приведено описание пакета прикладных программ, предназначенного для расчета характеристик систем массового обслуживания с несколькими очередями и общим сервером, а именно систем поллинга с различными видами порядка опроса очередей: циклическим, адаптивным циклическим, случайным; и различными дисциплинами обслуживания: шлюзовой, исчерпывающей, глобально-шлюзовой, ограниченной, пороговой и случайной. Входной поток может быть простейшим, потоком фазового типа или коррелированным MAP-потоком. Описаны основные структуры и механизм работы пакета прикладных программ. Приведены численные примеры, иллюстрирующие результаты исследования систем поллинга с входным коррелированным потоком.

**Ключевые слова:** системы поллинга; пакет прикладных программ; имитационное моделирование; MAP-поток.

Системы поллинга представляют собой системы массового обслуживания с несколькими очередями (или несколькими потоками заявок) [1, 2]. Обслуживающий прибор по определенному правилу посещает очереди и обслуживает находящиеся в них заявки. Системы поллинга эффективно используются для оценки производительности, проектирования и оптимизации структуры телекоммуникационных систем и сетей, транспортных систем и систем управления дорожным движением, производственных систем и систем управления запасами [3]. Для исследования математических моделей систем поллинга применяют различные методы: метод производящих функций, метод средних, метод ветвящихся процессов и другие [4] для получения точных формул вычисления характеристик производительности систем, а также различные эвристические методы для систем поллинга специального вида [5–8] и имитационное моделирование в случаях, когда проведение точного анализа системы не представляется возможным либо когда необходимо оценить точность приближенных результатов исследования.

Разработка пакета прикладных программ для расчета характеристик и имитационного моделирования систем поллинга на данный момент становится весьма актуальной задачей, поскольку в литературе удается найти лишь одну работу [9], описывающую пакет программ имитационного моделирования для систем поллинга с несколькими обслуживающими устройствами (серверами), но порядок обслуживания очередей рассматривается лишь циклический. Представляемый же в данной работе пакет программ предполагает наличие только одного сервера в моделях, но рассматривается широкий класс типов опроса очередей в системах поллинга: циклический, адаптивный циклический, случайный. Пакет создан с помощью OMNeT++ Discrete Event Simulator, а также OMNeT++ Simulation Manual Version 4.6. OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed на C++) - это модульная, основанная на компонентах библиотека моделирования и C++, в основном для создания сетевых симуляторов.

**1. Модуль аналитических расчетов**

Разработанный пакет программ делится на два крупных модуля (рис. 1): модуль имитационного моделирования и модуль аналитических расчетов характеристик производительности

сти систем поллинга, реализующий формулы их расчета. Модуль аналитических расчетов характеристик систем поллинга реализован с помощью Matlab 2013 на основе точных результатов анализа [1, 3], полученных для следующих систем поллинга:

- Система циклического опроса с шлюзовой дисциплиной.
- Система циклического опроса с исчерпывающей дисциплиной.
- Система циклического опроса с глобально-шлюзовой дисциплиной.
- Система адаптивного циклического опроса с шлюзовой дисциплиной.
- Система адаптивного циклического опроса с исчерпывающей дисциплиной.

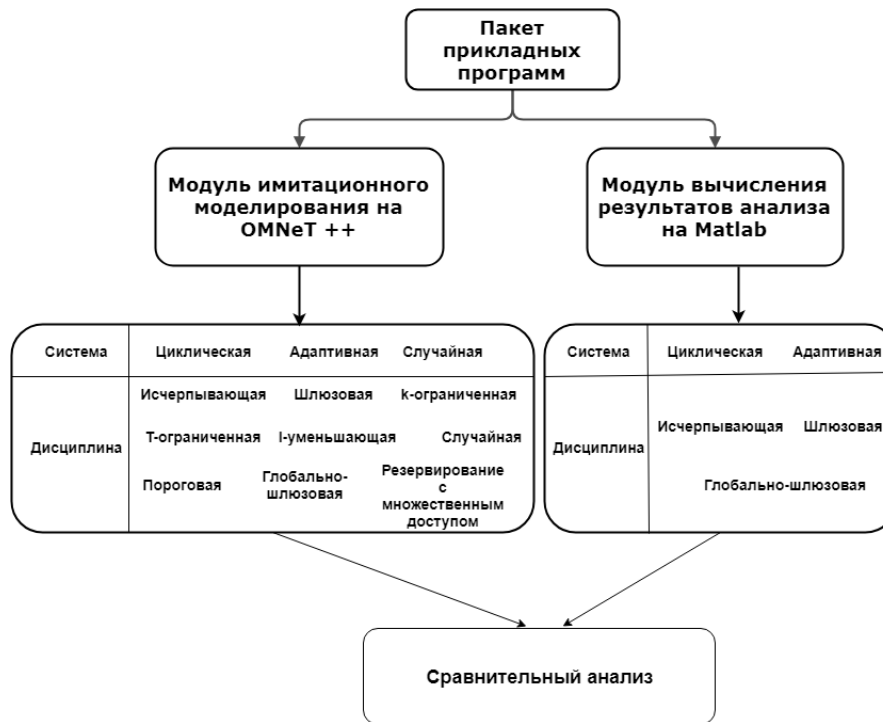


Рис. 1. Схема пакета прикладных программ  
Fig. 1. The scheme of the application package

Данный модуль позволяет получить следующие характеристики:

- Вероятность опроса каждой очереди при адаптивном опросе.
- Вероятность того, что сервер пропускает  $k$  очередей после завершения обслуживания  $i$ -й очереди (переходит в  $(i + k)$ -ю очередь),  $k = \overline{1, N}$ .
- Первые и вторые моменты длины каждой очереди в момент ее опроса сервером.
- Вторые моменты длины каждой очереди в момент опроса сервера.
- Среднее время цикла для каждой очереди.
- Среднее время пребывания заявок в системе адаптивного динамического поллинга с исчерпывающей и шлюзовой дисциплиной.

## 2. Модуль имитационного моделирования

Для имитационного моделирования, был использован OMNeT++ Discrete Event Simulator, а также OMNeT++ Simulation Manual Version 4.6. OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed на C++) – это модульная, компонентно-ориентированная C++ библиотека и фреймворк для дискретно-событийного моделирования, используемая прежде всего для создания сетевых симуляторов. OMNeT++ представляет архитектуру компонентов для моделей. Компоненты (модули) запрограммированы на C++, а затем собраны в более крупные компоненты и модели с использованием языка высокого уровня (NED). OMNeT++ имеет обширную поддержку графического интерфейса, и благодаря

его модульной архитектуре ядро моделирования (и модели) может быть легко внедрено во многие приложения.

В пакете имитационного моделирования реализованы следующие модели систем поллинга: циклический опрос с шлюзовой, исчерпывающей, глобально-шлюзовой, пороговой,  $k$ - и  $T$ -ограниченными дисциплинами, адаптивный циклический опрос с шлюзовой, исчерпывающей и глобально-шлюзовой дисциплиной, упорядоченный адаптивный динамический опрос с шлюзовой и исчерпывающей дисциплиной, циклический опрос с резервированием с множественным доступом, система циклического поллинга с пороговой исчерпывающей дисциплиной и простоями сервера, система поллинга с приоритетом, система поллинга со случайным порядком опроса при шлюзовой дисциплине, система поллинга со случайным порядком опроса при исчерпывающей или шлюзовой дисциплине, а также система циклического поллинга со случайной дисциплиной обслуживания очередей. Подробную информацию об этих дисциплинах опроса и обслуживания очередей, а также описание основной модели системы поллинга можно найти в [1, 3].

**Структура пакета имитационного моделирования.** Программа состоит из трех основных типов файлов (рис. 2):

– Входные файлы: здесь задаются параметры модели системы поллинга: количество очередей, тип (простейший, фазового типа или MAP) и параметры входных потоков, тип и параметры процесса обслуживания заявок в каждой очереди, параметры процессов переключения сервера между очередями (табл. 1). Подробную информацию о MAP-потоках, их обобщении VMAP-потоках и распределении фазового типа можно найти в [10].

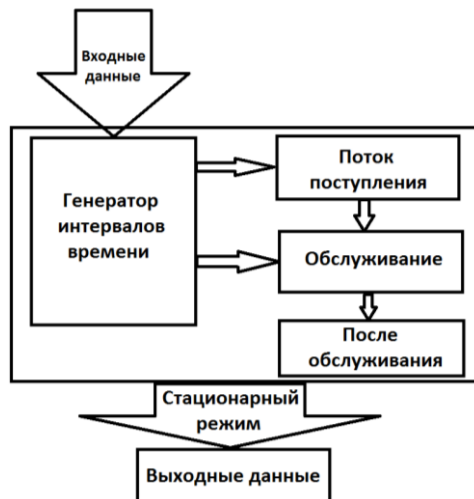


Рис. 2. Основная структура программы  
Fig. 2. The basic structure of the program

Т а б л и ц а 1

Пример входных и выходных данных

Вход	Выход
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. *.numQueues = 2: определение количества очередей.</li> <li>2. *.generator[0].interArrivalTime = exponential(1/30): интенсивность поступления заявок для первой очереди.</li> <li>3. *.generator[1].interArrivalTime = MAP("MAP.txt"): тип поступления заявок для второй очереди.</li> <li>4. *.threshold_gated_queue[*].serviceTime = PhaseType("Ph.txt"): тип обслуживания заявок для всех очередей.</li> <li>5. **.switching_time = "0.001 0.002": интенсивность переключения между очередями</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Delay time in Queues i: среднее время пребывания заявок в очереди i</li> <li>2. InterVisit time in Queues i: среднее время между последующими посещениями в очереди i</li> <li>3. Number of cycle in Queues i: общее количество циклов в этой очереди (посещений сервером этой очереди)</li> <li>4. Cycle_time: среднее время цикла</li> <li>5. Ave_delay: среднее время пребывания заявок в системе</li> <li>6. Number_of_packet: количество пакетов данных, прошедших сквозь систему в течение всего времени моделирования</li> <li>7. График флуктуации среднего времени ожидания</li> </ol>

– Файлы алгоритмов: эти файлы содержат информацию о типе опроса очередей и дисциплинах их обслуживания, генерируют поток входных данных и процесс обслуживания для каждой очереди, а также генерируют случайное время переключения сервера между очередями. Далее в этих файлах производится расчет требуемых характеристик системы.

– Выходные файлы: эти файлы содержат результаты работы программы: среднее время ожидания в очереди системы, среднее время цикла, среднее время между посещениями очереди сервером, а также другие характеристики производительности (см. табл. 1).

**Механизм работы пакета программ.** На рис. 3 показан механизм работы пакета программ. После определения входных данных и запуска программы для каждой очереди отдельно генерируется момент времени, в который поступит следующая заявка. Сервер по выбранному правилу опроса в момент завершения обслуживания очередной очереди принимает решение, какая следующая очередь подлежит обслуживанию, и начинает к ней переключаться. Заявка, получившая обслуживание, отправляется в Sink, далее по моменту завершения обслуживания происходит перерасчет текущего среднего времени пребывания в системе и проверяется условие остановки моделирования.

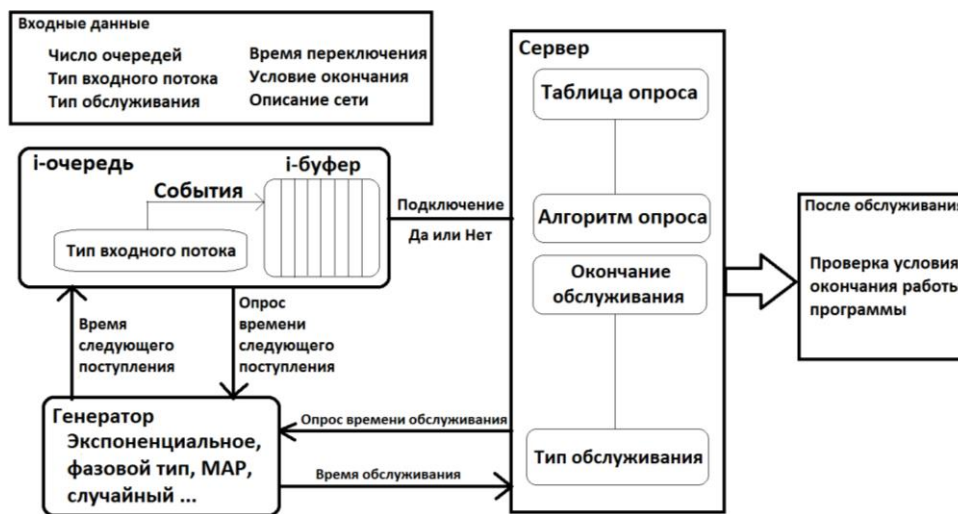


Рис. 3. Механизм работы пакета программ  
Fig. 3. The mechanism of the software package

**Задача остановки моделирования.** Проблема остановки программного моделирования, когда поведение системы достигает режима, близкого к стационарному, является важной задачей для экономии ресурсов процессора и памяти. Рассмотрим следующий метод, который описан в работе [11].

Пусть  $W_i, i \geq 1$  – последовательность значений среднего времени пребывания заявок после каждого обслуживания,

$$\bar{W}(n) = \sum_{i=1}^n \frac{W_i}{n}, \quad \varepsilon_i = \frac{\Delta W}{\bar{W}(n)}, \quad \Delta W_i = W_i - W_{i-1}, i \geq 1,$$

где  $\varepsilon_i$  – относительная точность доверительного интервала. Пусть вероятность

$$P\left(\left|\bar{W}(n) - W\right| < \Delta w_i\right) = 1 - \alpha,$$

где  $W$  – неизвестное среднее время пребывания заявок в системе. Критерием остановки моделирования является выполнение неравенства  $\varepsilon_i < \varepsilon_{\max}$ , где  $\varepsilon_{\max}$  – требуемая предельная относительная точность результатов при уровне достоверности  $100(1 - \alpha)\%$  ( $0 < \varepsilon_{\max} < 1$ ).

### 3. Некоторые результаты моделирования

При проведении имитационного моделирования часто требуется больше времени (особенно в случае большой загрузки системы), чем для того, чтобы рассчитать характеристики этих же систем

по точным или приближенным формулам (для тех моделей, для которых получены такие формулы). Это также касается случаев, когда входной поток не является простейшим (МАР- или РН-поток в нашем случае), поскольку такое усложнение системы ухудшает сходимость результатов моделирования. Однако аналитические результаты получены лишь для относительно небольшого числа систем поллинга, и зачастую доступны только приближенные формулы для расчета характеристик систем поллинга, представляющих интерес для практического применения. В данном разделе для некоторых моделей представим результаты обоих способов расчета их характеристик, а также продемонстрируем результаты имитационного моделирования для систем поллинга, не имеющих на данный момент удобных для численной реализации способов расчета их характеристик (например, для систем поллинга с коррелированными входными потоками).

Рассмотрим систему поллинга с адаптивным циклическим опросом, тремя очередями и исчерпывающим обслуживанием, время обслуживания для всех очередей имеет одинаковое экспоненциальное распределение со средним  $b = 0,01$ , время переключения между очередями имеет одинаковое экспоненциальное распределение со средним  $c = 0,001$ , время простоя сервера (в случае, когда все очереди должны быть пропущены согласно адаптивной дисциплине) имеет экспоненциальное распределение со средним  $\beta = 0,002$ , потоки заявок в очереди – простейшие с параметрами  $\lambda_1 = 30$ ,  $\lambda_2 = 20$ , а параметр входного потока в третью очередь изменяется от  $\lambda_3 = 2$  до  $\lambda_3 = 16$  (табл. 2). Очереди обслуживаются согласно шлюзовой дисциплине. Аналитические формулы для расчета характеристик такой системы получены в работе [12].

Таблица 2

Сравнение аналитических результатов и результатов имитационного моделирования

$\lambda_3$	Аналитические результаты			Имитационное моделирование			Относительная погрешность, %		
	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3
2	0,0239	0,0263	0,0318	0,0236	0,0260	0,0305	13	1,1	4,1
4	0,0247	0,0273	0,0321	0,0242	0,0268	0,0314	2	1,8	2,2
6	0,0256	0,0284	0,0328	0,0254	0,0281	0,0323	0,8	1,1	1,5
8	0,0267	0,0296	0,0337	0,0263	0,0291	0,0333	1,5	1,7	1,2
10	0,0279	0,0311	0,0347	0,0274	0,0305	0,0342	1,8	1,9	1,4
12	0,0292	0,0327	0,0358	0,0288	0,0321	0,0355	1,4	1,8	0,8
14	0,0308	0,0345	0,0371	0,0303	0,0338	0,0366	1,6	2	1,4
16	0,0325	0,0366	0,0386	0,0321	0,0358	0,0379	1,2	2,2	1,9

Рассмотрим далее симметричную систему циклического (не адаптивного) опроса с двумя очередями и шлюзовой дисциплиной. Параметры системы те же, что и в предыдущем случае, а параметры входных потоков идентичны, но изменяются от  $\lambda_1 = \lambda_2 = 2$  до  $\lambda_1 = \lambda_2 = 40$  (табл. 3). Аналитические формулы для расчета характеристик такой системы получены в [13].

Таблица 3

Сравнение аналитических результатов и результатов имитационного моделирования

$\lambda_2 = \lambda_1$	Имитационное моделирование		Аналитические результаты		Относительная погрешность, %	
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_1$	$\lambda_2$
2	0,01209	0,01188	0,01198	0,01198	0,918196995	0,834724541
10	0,01434	0,01439	0,01438	0,01438	0,278164117	0,069541029
30	0,02879	0,02877	0,02875	0,02875	0,139130435	0,069565217
40	0,05746	0,05743	0,0575	0,0575	0,069565217	0,12173913

Высокую практическую значимость имеют модели систем поллинга с коррелированными входными потоками (например, МАР- или ВМАР-потоками). Однако известные на данный момент аналитические результаты их исследования [14, 15] ставят дополнительную задачу численной реализации этих результатов, и эта задача авторами работ не решена. Поэтому в пакете прикладных программ мы ограничились лишь имитационным моделированием таких систем. И для примера опишем влияние коэффициента корреляции на характеристики системы, в частности на среднее время пребы-

вания заявки в системе, полученное как сумма средних времен пребывания во всех очередях системы, взвешенных по доле загрузки соответствующих очередей.

Рассмотрим систему 5 очередей с адаптивным циклическим опросом и шлюзовой дисциплиной обслуживания очередей. Входящие потоки в очереди могут быть детерминированными (D), простейшими (M) и MAP-потоками с параметрами  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 10$  и  $\lambda_4 = \lambda_5 = 20$ . Рассмотрим три варианта MAP-потоков в очереди ( $MAP_i$  с коэффициентом корреляции  $c_i, i = \overline{1,3}$ ):

$$MAP_1: D_0 = \begin{bmatrix} -60 & 20 \\ 0 & -10 \end{bmatrix}, D_1 = \begin{bmatrix} 0 & 40 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}, c_1 = 0,$$

$$MAP_2: D_0 = \begin{bmatrix} -30 & 0 \\ 0 & -6 \end{bmatrix}, D_1 = \begin{bmatrix} 20 & 10 \\ 2 & 4 \end{bmatrix}, c_1 = 0,07843,$$

$$MAP_3: D_0 = \begin{bmatrix} -18,75 & 0,625 \\ 0,625 & -2,5 \end{bmatrix}, D_1 = \begin{bmatrix} 18,125 & 0 \\ 0 & 1,875 \end{bmatrix}, c_1 = 0,2704.$$

В каждом из случаев предполагаем, что входные потоки заявок в очереди характеризуются одними и теми же матрицами  $MAP$ , но для 4-й и 5-й очередей эти матрицы соответствующим образом масштабируются (умножаются на скаляр), чтобы получить требуемые значения  $\lambda_4$  и  $\lambda_5$ .

Среднее время обслуживания заявки для всех очередей одинаково и равно 0,01. Рассмотрим различные типы обслуживания: детерминированное (D) время обслуживания заявки в очереди, фазового типа (PH) и марковское (MAP) обслуживание, задаваемое матрицами  $MAP_1$  и  $MAP_3$ , отмасштабированными соответствующим образом для сохранения одинаковых параметров обслуживания. Распределение фазового типа задано вектором  $\alpha$  и неприводимой матрицей  $S$  следующим образом:

$$\alpha = [0,5 \quad 0,5], S = \begin{bmatrix} -10 & 0 \\ 10 & -20 \end{bmatrix}.$$

На рис. 4 представлена зависимость среднего времени пребывания заявки в системе для различных моделей системы поллинга с 5 очередями от типа выбранной модели и степени коррелированности входных потоков и процесса обслуживания при изменении интенсивности потока заявок в очереди с номерами 4 и 5 от 2 до 34.

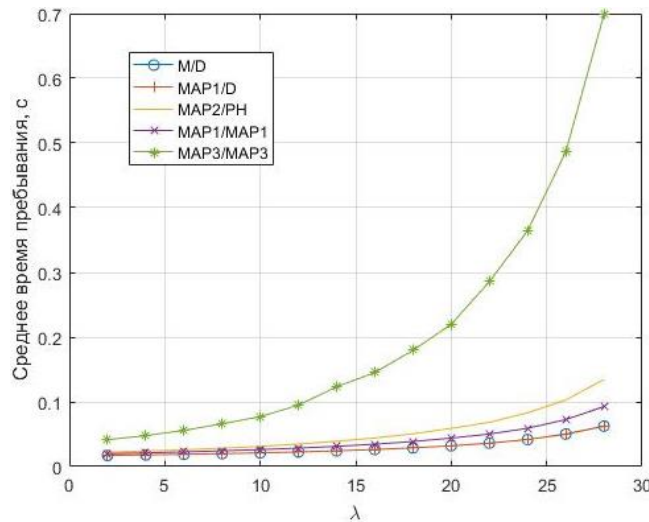


Рис. 4. Зависимость времени пребывания заявок в системе адаптивного поллинга от интенсивности поступления  
 Fig. 4. Dependence of the residence time of applications in the system adaptive polling on the intensity of admission

Заметим, что при отсутствии корреляции среднее время пребывания заявок в системах M/D и  $MAP_1/D$  практически совпадает. При введении коррелированного процесса обслуживания среднее время пребывания заявок начинает возрастать и в случае  $MAP_3$  с наибольшим коэффициентом корреляции существенно превышает результаты для остальных рассматриваемых моделей.

## Заключение

В данной работе представлен пакет прикладных программ для оценки характеристик широкого класса систем поллинга с различными типами порядка опроса и дисциплинами обслуживания очередей. Пакет программ состоит из модуля расчета характеристик систем поллинга с помощью формул, реализованных с помощью Matlab, а также модуля имитационного моделирования на OMNeT++ для моделей систем поллинга, для которых не удастся получить точные формулы расчета характеристик их производительности, в том числе слабоизученных в настоящее время систем поллинга с коррелированными входными потоками. Данный пакет программ зарегистрирован в Реестре программ для ЭВМ [16].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вишнеvский В.М., Семенова О.В. Математические методы исследования систем поллинга // Автоматика и телемеханика. 2006. №2. С. 3–56.
2. Borst S.C., Vohma O. Polling: past, present, and perspective // TOP. 2018. V. 26, No. 3. P. 335–369.
3. Boon M.A.A., van der Mei R.D., Winands E.M.M. Applications of polling systems // Surveys in Operations Research and Management Science. 2011. V. 2011, No. 16. P. 67–82.
4. Вишнеvский В.М., Семёнова О.В. Системы поллинга: теория и применение в широкополосных беспроводных сетях. М. : Техносфера, 2007. 312 с.
5. Van der Mei R.D., Winands E. Heavy traffic analysis of polling models by mean value analysis // Performance Evaluation. 2008. V. 65, No. 6-7. P. 400–416.
6. Van Vuuren M., Winands E.M.M. Iterative approximation of k-limited polling systems // Queueing Systems. 2007. V. 55, No. 3. P. 161–178.
7. Van der Mei R.D., Roubos A. Polling models with multi-phase gated service // Annals of Operations Research. 2012. V. 198, No. 1. P. 25–56.
8. Bekker R., Vis P., Dorsman J.L., Van der Mei R.D., Winands E.M.M. The impact of scheduling policies on the waiting-time distributions in polling systems // Queueing Systems. 2015. V. 79, No. 2. P. 145–172.
9. Соськин М.А., Моисеев А.Н., Соськин Д.М., Буртовая Д.А. Объектная модель приложения для имитационного моделирования циклических систем массового обслуживания // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2017. № 40. С. 71–80.
10. Вишнеvский В.М., Дудин А.Н., Клименок В.И. Стохастические системы с коррелированными потоками. Теория и применение в телекоммуникационных сетях. М. : Техносфера, 2018. 564 с.
11. Pawlikowski K. Steady state simulation of queueing processes: a survey of problems and solutions // ACM Computing Surveys. 1990. V. 22, No. 2. P. 123–170.
12. Semenova O.V., Bui D.T. Method of generating functions for performance characteristic analysis of the polling systems with adaptive polling and gated service // Communications in Computer and Information Science. 2018. V. 912. P. 348–359.
13. Yechiali U. Analysis and control of polling systems // Performance Evaluations of Computer and Communication Systems / ed. L. Donatiello, R. Nelson. Springer-Verlag, 1993. P. 630–650.
14. Saffer Z., Telek M. Unified analysis of BMAP/G/1 cyclic polling models // Queueing Systems. 2010. V. 64, No. 1. P. 69–102.
15. Saffer Z. BMAP/G/1 cyclic polling model with binomial disciplines // Modern Probabilistic Methods for Analysis of Telecommunication Networks. Communications in Computer and Information Science. 2013. V. 356. P. 157–166.
16. Вишнеvский В.М., Семёнова О.В., Буй З.Т. Программный комплекс оценки характеристик систем стохастического поллинга : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614554 РФ; зарег. 08.04.2019.

Поступила в редакцию 28 апреля 2019 г.

Semenova O.V., Bui D.T. (2020) THE SOFTWARE PACKAGE AND ITS APPLICATION TO STUDY THE POLLING SYSTEMS. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie vychislitel'naja tehnika i informatika* [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]. 50. pp. 106–113

DOI: 10.17223/19988605/50/13

The paper describes the application package designed to calculate the characteristics of queuing systems with multiple queues and a common server, namely, polling systems with various types of the polling order: cyclic, adaptive cyclic, random; and various service disciplines: gated, exhaustive, globally-gated, limited, threshold and random. The input flow of customers may be a Poisson, a phase-type, or a correlated MAP. The basic structures and mechanism of the application package are described. Numerical examples illustrate the results of the study of polling systems with correlated input.

Polling systems are the queuing systems with multiple queues (or multiple input flows). The server visits the queues and serves the queued customers accordingly to a certain rule. To study the mathematical models of polling systems, various methods are used:

the method of generating functions, the mean-value method, descendant set approach, etc. to obtain exact formulas for calculating the performance characteristics, as well as various heuristic methods for special types of polling systems and simulation modeling in case when an exact analysis of the system is not possible to provide, or when it is necessary to estimate the accuracy of the approximate investigation results.

The developed software package consists of two large modules: a simulation module based on OMNeT++ Discrete Event Simulator, as well as OMNeT++ Simulation Manual Version 4.6, and a module for analytical calculations of the performance characteristics of the polling systems based on Matlab for some polling systems allowing exact analysis, in particular, polling systems with cyclic and adaptive cyclic polling and gated, exhaustive and globally-gated service of customers.

The following models of the polling systems are implemented in the simulation package: a cyclic polling system with gated, exhaustive, globally-gated, threshold and limited service disciplines, adaptive and ordered adaptive cyclic polling, priority polling system, polling system with random polling and other models.

Keywords: polling systems; software package; simulation.

SEMENOVA Olga Valeryevna (Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russian Federation).

E-mail: olgasmnv@gmail.com.

BUI Duy Tan (Post-graduate Student, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow, Russian Federation).

E-mail: duytan@phystech.edu.

#### REFERENCES

1. Vishnevskii, V.M. & Semenova, O.V. (2006) Mathematical methods to study the polling systems. *Automation and Remote Control*. 67. pp. 173–220. DOI: 10.1134/S0005117906020019
2. Borst, S.C. & Boxma, O. (2018) Polling: past, present, and perspective. *TOP*. 26(3). pp. 335–369. DOI: 10.1007/s11750-018-0490-7
3. Boon, M.A.A., van der Mei, R.D. & Winands, E.M.M. (2011) Applications of polling systems. *Surveys in Operations Research and Management Science*. 16(2). pp. 67–82. DOI: 10.1016/j.sorms.2011.01.001
4. Vishnevsky, V. & Semenova O. (2012) *Polling Systems: Theory and Applications for Broadband Wireless Networks*. LAMBERT Academic Publishing.
5. Van der Mei, R.D. & Winands, E. (2008) Heavy traffic analysis of polling models by mean value analysis. *Performance Evaluation*. 65(6-7). pp. 400–416. DOI: 10.1016/j.peva.2007.12.002
6. Van Vuuren, M. & Winands, E.M.M. (2007) Iterative approximation of k-limited polling systems. *Queueing Systems*. 55(3). pp. 161–178. DOI: 10.1007/s11134-007-9010-4
7. Van der Mei, R.D. & Roubos, A. (2012) Polling models with multi-phase gated service. *Annals of Operations Research*. 198(1). pp. 25–56. DOI: 10.1007/s10479-011-0921-4
8. Bekker, R., Vis, P., Dorsman, J.L., Van der Mei, R.D. & Winands, E.M.M. (2015) The impact of scheduling policies on the waiting-time distributions in polling systems. *Queueing Systems*. 79(2). pp. 145–172. DOI: 10.1007/s11134-014-9416-8
9. Sonkin, M.A., Moiseev, A.N., Sonkin, D.M. & Burtovaya, D.A. (2017). Object model of application for simulation of cyclic queueing systems. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 40. pp. 71–80. DOI: 10.17223/19988605/40/8
10. Vishnevsky, V.M., Dudin, A.N. & Klimenok, V.I. (2018) *Stochastic Systems with Correlated Arrivals. Theory and Applications in Telecommunication Networks*. Moscow: Tekhnosfera.
11. Pawlikowski, K. (1990) Steady state simulation of queueing processes: a survey of problems and solutions. *ACM Computing Surveys*. 22(2). pp. 123–170. DOI: 10.1145/78919.78921
12. Semenova, O.V. & Bui, D.T. (2018) Method of generating functions for performance characteristic analysis of the polling systems with adaptive polling and gated service. *Communications in Computer and Information Science*. 912. pp. 348–359. DOI: 10.1007/978-3-319-97595-5\_27
13. Yechiali, U. (1993) Analysis and control of polling systems. In: Donatiello, L. & Nelson, R. (eds) *Performance Evaluations of Computer and Communication Systems*. Springer-Verlag. pp. 630–650.
14. Saffer, Z. & Telek, M. (2010) Unified analysis of BMAP/G/1 cyclic polling models. *Queueing Systems*. 64(1). pp. 69–102. DOI: 10.1007/s11134-009-9136-7
15. Saffer, Z. (2013) BMAP/G/1 cyclic polling model with binomial disciplines. *Modern Probabilistic Methods for Analysis of Telecommunication Networks. Communications in Computer and Information Science*. 356. pp. 157–166. DOI: 10.1007/978-3-642-35980-4\_18
16. Vishnevsky, V.M., Semenova, O.V. & Bui, D.T. (2019) *Programmnyy kompleks otsenki kharakteristik sistem stokhasticheskogo pollinga : svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2019614554 RF* [Software system for evaluating the characteristics of stochastic polling systems: Certificate of the State Registration of Computer Programs No. 2019614554 of Russian Federation]. Registered 08.04.2019.