

24. Ataei, M., and A. Yousefi-Koma. "Three-dimensional optimal path planning for waypoint guidance of an autonomous underwater vehicle." *Robotics and Autonomous Systems* 67 (2015): 23–32. DOI:10.1016/j.robot.2014.10.007.
25. Alvarez, A., A. Caiti, and R. Onken. "Evolutionary path planning for autonomous underwater vehicles in a variable ocean." *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 29.2 (2004): 418–429. DOI: 10.1109/JOE.2004.827837.
26. Asanov, M. O., V. A. Baranskij, and V. V. Rasin. *Diskretnaja matematika: grafy, matroidy, algoritmy*. Izhevsk: NIC "Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika", 2001.
27. Goloskokov, D. P. *Prakticheskij kurs matematicheskoj fiziki v sisteme Maple*. SPb.: Izd-vo ParkKom, 2010.
28. Archive. <<http://Vuz.Exponenta.Ru/Maple-Path-Animation.Rar>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Курсанов Михаил Николаевич —
доктор физико-математических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»
C216@Ya.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kirsanov Mihail Nikolaevich —
Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor.
MPEI
C216@Ya.ru

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2016 г.

УДК 656.621/.626

**И. В. Кукушкин,
А. П. Нырков,
А. А. Нырков**

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ КАБОТАЖНЫХ ГРУЗОВ

В данной работе рассмотрено построение имитационной модели процессов переработки каботажных грузов, основанной на генерации подчиненных гамма-распределению случайных величин. Так же, как и имитационная модель, основанная на равномерном распределении данная модель дает приближенные к реальным значения статистических величин, таких как математическое ожидание времени ожидания каботажных судов в очереди и в терминале. Эти величины получаются более достоверными по сравнению с марковской (классической) моделью массового обслуживания, которая дает немного завышенные значения вероятностных характеристик. В рамках данной статьи дана математическая формулировка задачи и предложены основные алгоритмы работы программы. В работе приведены таблицы, позволяющие дать оценку влияния среднеквадратичных отклонений случайных величин на вероятностные характеристики процессов. Алгоритм послужил основой для разработки программы, вычисляющей вероятностные характеристики процессов переработки каботажных грузов.

Ключевые слова: обработка каботажных судов, имитационное моделирование, алгоритмы, гамма-распределение, модель массового обслуживания.

Введение

При моделировании реальных систем и процессов одной из наиболее сложных проблем является адекватность модели соответствующей системе или процессу. Не являются исключением и имитационные модели, для которых входные данные являются случайными величинами [1]. Законы распределения вероятностей входных параметров модели существующего объекта можно получить путем сбора и анализа данных функционирования этого объекта. В этом случае в качестве законов распределения входных параметров модели нередко используют функции эмпири-

ческого распределения. В работах [2] – [4] автором был применен именно такой подход при моделировании процессов перегрузки контейнеров в морских и речных транспортных узлах с целью определения оптимальных режимов их работы. Предпочтительнее все же вместо эмпирических распределений использовать известные теоретические законы распределения, полученные асимптотическим приближением к функциям эмпирического распределения. Такой метод, однако, неприменим к моделируемым системам с целью их проектирования. Также следует отметить, что подбор теоретического распределения на выходе может дать не одно, а два или более законов распределения, каждый из которых удовлетворяет критерию согласия [5]. Например, для непрерывных случайных величин такими законами распределений являются нормальный закон распределения и закон распределения Стьюдента. Поэтому логично применять при моделировании входных параметров различные законы распределения.

В работах [6], [7] исследованы недостатки марковских моделей массового обслуживания, применяемых для моделирования процессов переработки грузов. В них также для создания имитационной модели и проектирования случайных событий предлагается использовать разброс некоторых вероятностных характеристик. Чтобы модель выдавала более достоверные результаты, стохастические параметры модели должны подчиняться законам распределения вероятностей параметров реальных систем. Не всегда это можно выполнить. Однако можно последовательными приближениями, начиная, например, с равномерного или треугольного законов распределения, добиться более качественных результатов работы имитационной модели. Следовательно, подход, используемый в [6], можно улучшить подбором других законов распределения вероятностей параметров модели.

Рассмотрим перевозки каботажных грузов как последовательный ряд повторяющихся операций, в которых каждое отдельное судно везет груз из одного порта в другой, а затем повторяет операцию, возвращаясь в первый порт. Иногда, когда встают вопросы оптимальной загрузки терминала, оценок или выбора оптимального числа причалов, на практике, обычно, начинают использовать детерминированные модели процессов обработки судов. Однако при использовании детерминированных моделей принимаются довольно серьезные, нежелательные допущения, существенно идеализирующие процессы обработки груза. Именно поэтому Б. В. Гнеденко предложил использовать марковские модели массового обслуживания для решения подобных задач.

Постановка задачи

Разработать более достоверную имитационную модель, основываясь на интервальных оценках расчета вероятностных характеристик работы транспортно-технологического терминала. В основу новой модели было положено гамма-распределение вероятностей случайных величин.

Актуальность

Описываемая в статье имитационная модель и алгоритм позволят улучшить качество проектируемых перегрузочных контейнерных терминалов, что, в свою очередь, даст возможность делать более точные поправки в планировании обработки судов и управлении этими процессами.

Математическая формулировка задачи

Рассматриваются два контейнерных терминала, между которыми совершаются каботажные перевозки. Первый терминал включает в себя S_1 причалов для обработки судов, второй — S_2 причалов. Случайную величину — время полного цикла движения одного судна от одного терминала до другого и обратно — будем обозначать $T_{ц}$. Его математическое ожидание находится как сумма математических ожиданий следующих составляющих:

$$T_{ц} = T_{м1} + T_{м2} + T_{обр1} + T_{обр2} + T_{ож1} + T_{ож2}. \quad (1)$$

В работе [7] показано, что на время движения судна $T_{м1}$ и $T_{м2}$ оказывают влияние многие факторы, в особенности гидрометеорологические условия. Это означает, что уже через небольшое количество рейсов временные интервалы между приходами двух судов могут сильно отличаться друг от друга. Это говорит об их стохастичности.

На время обработки судов в порту также оказывают действие различные факторы, влияние которых может сильно изменить ожидаемое значение. Для более адекватного описания процессов переработки каботажных грузов следует использовать не детерминированные, а вероятностные модели [7] – [9]. Основываясь на этих наблюдениях, вводим в модель разброс величин $T_{м1}$, $T_{м2}$, $T_{обр1}$ и $T_{обр2}$. Варьируемость новых значений зависит от генерируемых случайных величин, подчиненных гамма-распределению.

Как известно, гамма-распределение имеет ряд особенностей. Так, функция плотности гамма-распределения a -го порядка имеет вид

$$p(x) = \begin{cases} \frac{\lambda^a x^{a-1} e^{-\lambda x}}{\Gamma(a)}, & x \geq 0. \\ 0, & x < 0, \end{cases}$$

При $a = 1$ гамма-распределение превращается в показательное распределение с $M(X) = \frac{1}{\lambda}$. При целом $a > 1$ гамма-распределение называется *распределением Эрланга a -го порядка*. Распределение Эрланга широко применяется в теории массового обслуживания. Для четного порядка $2a$ с параметром $\lambda = 0,5$ это распределение превращается в χ^2 -распределение с a степенями свободы.

По мере увеличения параметра a график функции плотности гамма-распределения становится похож на график плотности нормального закона, точнее, усеченного нормального закона с некоторой кривизной (коэффициент асимметрии отличен от нуля). Пример функции плотности гамма-распределения с параметром $\lambda = 1$ приведен на рис. 1.

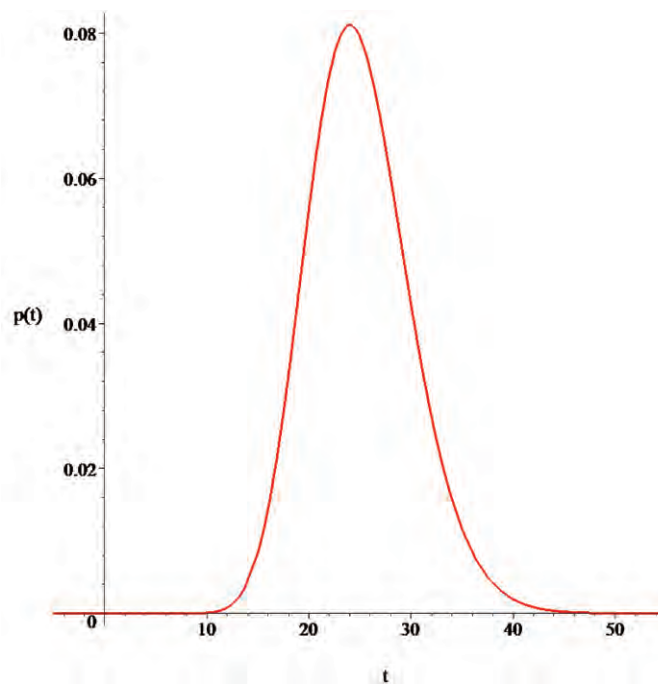


Рис. 1. Функция плотности гамма-распределения с параметром $\lambda = 1$, математическим ожиданием, равным 25, и средним квадратическим отклонением, равным 5

Вероятность того, что $t \in [0; 55]$ практически равна единице. Здесь t — время обработки в порту, выраженное в часах.

Можно утверждать, что практически достоверно изменение этих величин будет находиться в некотором интервале $[c; d]$, длину которого обозначим 6σ [10]. Так, уже начиная с $a = 13$, вероят-

ность попадания в интервал $[M - 6\sigma; M + 6\sigma]$ превосходит 0,95, а с $a = 16$ — более 0,99. Для того чтобы при моделировании оперировать безразмерными величинами, зададим коэффициент

$$r = \frac{\sigma}{M}, \quad (2)$$

где σ — среднее квадратическое отклонение; M — математическое ожидание.

Так как в имитационной модели генерируются положительные величины, определяющие время движения судов по маршруту и время обработки в портах, то r принимает неотрицательные значения. Как уже было указано, наша модель будет опираться на то, что разница между c и d -границами изменения параметра равна 6σ :

$$d - c = 6\sigma.$$

Из выражения (2) получаем $\sigma = r \cdot M$. Границы изменения c и d выразим через математическое ожидание M и коэффициент r :

$$\begin{cases} M + 3\sigma = d; \\ M - 3\sigma = c. \end{cases} \quad (3)$$

Откуда получаем

$$\begin{cases} d = M(3r + 1); \\ c = M(1 - 3r). \end{cases} \quad (4)$$

Учитывая, что генерируемые величины не могут быть отрицательными, левая граница $c > 0$. Отметим, что если задать значение величины r слишком малым, разброс будет получаться небольшим, в частности, если задать $r = 0$, то мы получим $c = d = M$, что соответствует детерминированным моделям.

Для генерации гамма-распределения при больших значениях a воспользуемся алгоритмом, предложенным И. Г. Аренсом (Ahrens J. H. L.) для $\lambda = 1$ и модернизированным авторами [11].

1. Генерируется равномерно распределенное в $[0; 1]$ число U . Вычисляются значения $Y = \text{tg}(\pi U)$ и $X = Y\sqrt{2a-1} + a - 1$.

2. Если $X \leq 0$, то нужно перейти к шагу 1, иначе генерируется равномерно распределенное в $[0; 1]$ число V .

3. Если $V > (1 + Y^2) e^{((a-1)\ln(X/(a-1)) - Y\sqrt{2a-1})}$, то нужно перейти к шагу 1, иначе вычисленное X — искомое.

Среднее приведенное время ожидания в очереди и среднее приведенное время движения судна между терминалами найдем из соотношений:

$$\tau_{\text{ож}} = \frac{T_{\text{ож}}}{T_{\text{обр}}}; \quad \tau_M = \frac{T_M}{T_{\text{обр}}}.$$

На рис. 2 и 3 изображена схема работы алгоритма имитационной модели с учетом разброса случайных величин.

На рис. 2 представлен общий алгоритм работы имитационной модели. Сначала задаются исходные данные, но в отличие от алгоритма, описанного в [6], в данном случае среди задаваемых величин присутствует параметр «method_type», который определяет, какое распределение будет использоваться для разброса случайных величин: равномерное, нормальное или гамма-распределение.

Рис. 3, описывающий процесс генерации гамма-распределенных случайных величин, является вспомогательным для схемы на рис. 1. Значения случайных величин генерируются из интервала $[c; d]$. В этой схеме используется коэффициент r , влияющий на величину границ разброса генерируемых значений.

Для проверки точности реализации алгоритма Аренса были проведены серии генераций, по которым построены гистограммы. Сравнение гистограмм сгенерированных случайных величин с графиком функции плотности гамма-распределения было проведено в математическом пакете Maple.

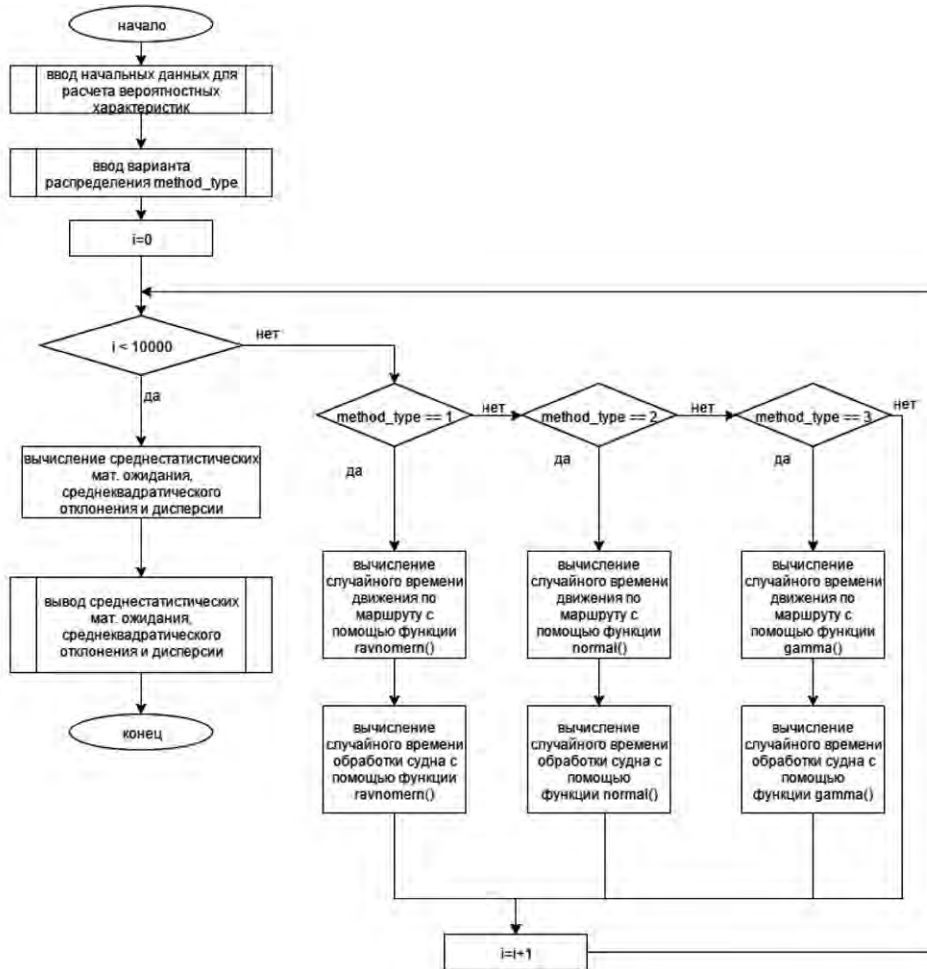


Рис. 2. Алгоритм генерации времени обработки судна

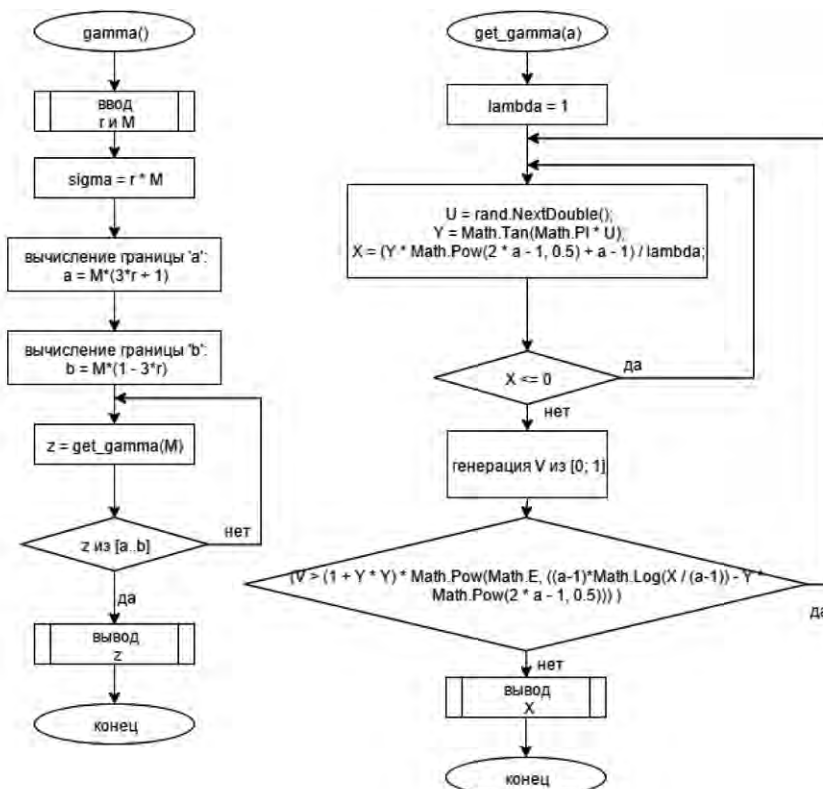


Рис. 3. Генерация гамма-распределенной случайной величины

На рис. 4 – 7 представлены гистограммы выборок объемом 2500 случайных значений для различных значений параметра a гамма-распределения. Как видно из рис. 4 – 7, графики функций плотности гамма-распределения схожи с гистограммами выборок генерируемых величин, построенных на основе алгоритма, описанного ранее. Визуальное сравнение подтверждается критерием согласия Пирсона: значения χ^2 -критерия, вычисленные по выборкам, не превосходят критического значения этого критерия, равного 66,34, с уровнем значимости 0,05:

$$\chi^2 = 28,0 \text{ при } a = 2; \chi^2 = 48,11 \text{ при } a = 3; \chi^2 = 52,19 \text{ при } a = 4; \chi^2 = 39,32 \text{ при } a = 5.$$

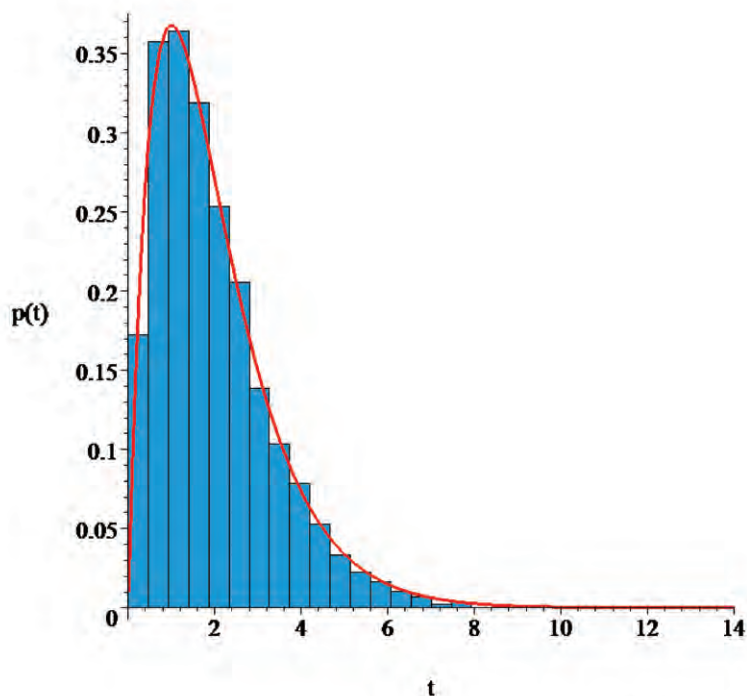


Рис. 4. Гистограмма и функция плотности для математического ожидания, равного двум

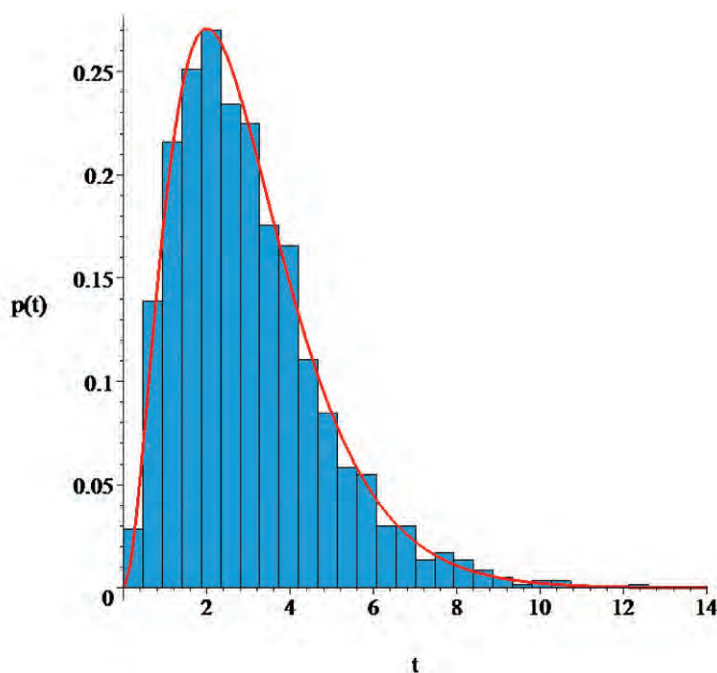


Рис. 5. Гистограмма и функция плотности для математического ожидания, равного трем

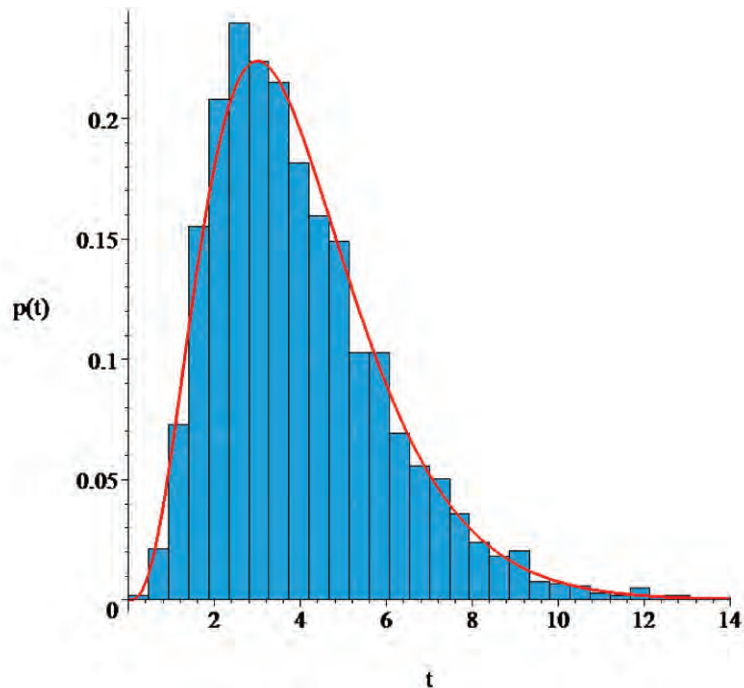


Рис. 6. Гистограмма и функция плотности для математического ожидания, равного четырем

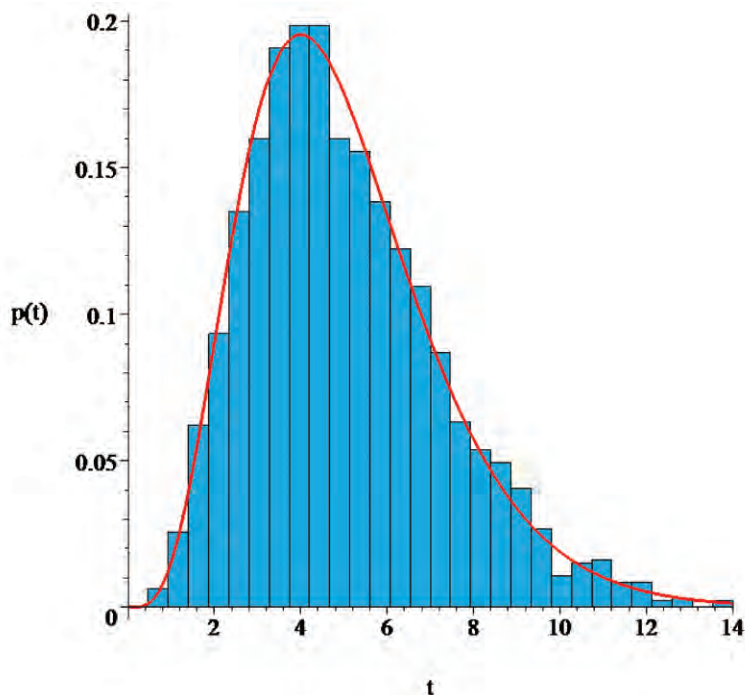


Рис. 7. Гистограмма и функция плотности для математического ожидания, равного пяти

Для оценки влияния величины r на значение среднего приведенного времени ожидания судна в очереди $\tau_{ож}$ была разработана программа [12], реализующая алгоритмы, приведенные на рис. 2 и 3.

На рис. 8 и 9 изображены графики и соответствующие им табл. 1 и 2, в которых представлены зависимости времени ожидания от приведенного среднего времени движения судна по маршруту и величины r . Значения среднего приведенного времени ожидания судна в порту, достига-

емые при $r = 0$, соответствуют детерминированным моделям, а при r_{\max} — марковской модели массового обслуживания [7]. Как видно из графиков и таблиц, с увеличением числа судов m существенно возрастает максимальное значение величины r , которое соответствует марковской модели массового обслуживания.

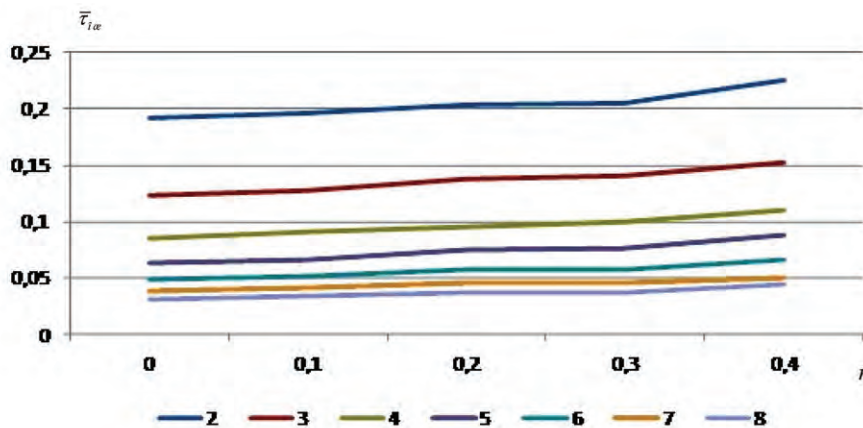


Рис. 8. График зависимости среднего приведенного времени ожидания судна в очереди от r при двух причалах и шести судах для разного времени движения судна по маршруту (от двух до восьми суток)

Таблица 1

Среднее приведенное время ожидания судна в очереди при различных r и времени движения судна по маршруту (от двух до восьми суток) для двух причалов и шести судов

r	τ_M						
	2	3	4	5	6	7	8
0	0,19242	0,12325	0,08539	0,06269	0,04803	0,03801	0,03086
0,1	0,19595	0,12779	0,09031	0,06654	0,05131	0,04079	0,03296
0,2	0,20330	0,13772	0,09567	0,07449	0,05689	0,04517	0,03649
0,3	0,20453	0,14104	0,09998	0,07547	0,05709	0,04568	0,03652
0,4	0,22570	0,15245	0,10977	0,08739	0,06531	0,05045	0,04402

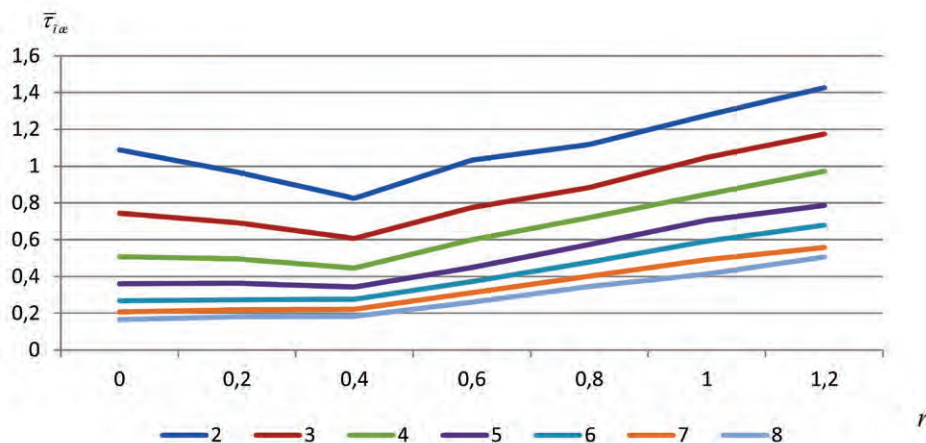


Рис. 9. График зависимости среднего приведенного времени ожидания судна в очереди от r при двух причалах и двенадцати судах, для разного времени движения судна по маршруту (от двух до восьми суток)

Среднее приведенное время ожидания судна в очереди при различных r и времени движения судна по маршруту (от двух до восьми суток) для двух причалов и двенадцати судов

r	τ_M						
	2	3	4	5	6	7	8
0	1,08875	0,74304	0,50808	0,36086	0,26817	0,20730	0,16542
0,2	0,96781	0,69249	0,49549	0,36386	0,27307	0,21870	0,18001
0,4	0,82482	0,60648	0,44579	0,34313	0,27593	0,22156	0,18347
0,6	1,03296	0,77476	0,59993	0,44929	0,37153	0,31164	0,25971
0,8	1,11769	0,88435	0,71993	0,57346	0,47851	0,40219	0,34598
1,0	1,27532	1,04793	0,84654	0,70586	0,59145	0,49090	0,41348
1,2	1,42575	1,17377	0,97167	0,78641	0,67894	0,55783	0,50705

В общем случае r_1 и r_2 для разброса значений T_M и $T_{обр}$ надо брать различными. В данной работе $r_1 = r_2 = r$.

Вывод

Значения приведенного времени ожидания судна в очереди из представленных таблиц начинают практически точно совпадать со значениями марковской модели для $m = 6$ при $r = 0,4$ для любого τ_M , а для числа судов $m = 12$ — при $r \in [0,6 - 1,2]$. Для малых значений, например, $\tau_M = 2$, даже до $r = 1,2$. Стоит отметить, что с увеличением τ_M , максимальное значение разброса r , при котором происходит совпадение с результатами марковской модели, снижается.

Для эксплуатации данной имитационной модели необходимо на основе статистических данных по разбросу величин τ_M и $\tau_{обр}$ определять величины r_1 и r_2 . Это позволит точнее определить вероятностные характеристики процессов переработки каботажных грузов, такие как среднее число судов, находящихся в очереди; среднее число судов, находящихся в терминале; среднее время пребывания судна в очереди и среднее время пребывания судна в терминале.

Применение данной модели позволит обеспечить оптимальное управление каботажными перевозками в транспортно-технологическом комплексе, включающем два терминала. Изучение данного вопроса является перспективным, так как более точные данные могут существенно снизить материальные затраты на каботажные перевозки. Также в будущем на основе полученных результатов этой работы возможно дальнейшее развитие темы и проведение подобных исследований и оценок для системы с большим количеством терминалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лоу А. М. Имитационное моделирование / А. М. Лоу, В. Д. Кельтон. — СПб.: Питер, 2004. — 847 с.
2. Нырков А. П. Математические модели и алгоритмы оптимизации процессов управления перегрузочным комплексом в информационной технологии АСУ (на примере специализированных терминалов речных портов): дис. ... канд. техн. наук / А. П. Нырков. — СПб.: СПГУВК, 1994. — 193 с.
3. Нырков А. П. Оценка напряженности планов транспортных узлов / А. П. Нырков. — Л.: Изд-во ЛИВТ, 1985. — 24 с.
4. Нырков А. П. Автоматизированное управление и оптимизация технологических процессов в транспортных узлах: дис. ... д-ра техн. наук / А. П. Нырков. — СПб.: СПГУВК, 2003. — 304 с.
5. Нырков А. П. Теория статистических решений (Статистическая проверка гипотез) / А. П. Нырков, А. А. Нырков. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2006. — 60 с.

6. Зубарев Ю. Я. Имитационная модель процессов обработки каботажных судов / Ю. Я. Зубарев, И. В. Кукушкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 186–192.

7. Зубарев Ю. Я. Оптимизация процессов переработки каботажных грузов / Ю. Я. Зубарев, А. М. Тюкавин. — СПб.: Политехника, 2009. — 168 с.

8. Нырков А. П. Автоматизированное управление транспортными системами / А. П. Нырков, С. С. Соколов, А. А. Шнуренко. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 325 с.

9. Нырков А. П. Математическое обеспечение нестандартных задач / А. П. Нырков. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 1997. — 46 с.

10. Истомин Е. П. Методы теории вероятностей и математической статистики в моделировании транспортных процессов / Е. П. Истомин, Т. П. Кныш, А. П. Нырков, А. Р. Шкадова. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 1999. — 168 с.

11. Нырков А. А. Имитационное моделирование транспортных процессов / А. А. Нырков, А. П. Нырков. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2010. — 112 с.

12. Зубарев Ю. Я. Имитационная модель процессов обработки каботажных судов (ИМПОКС): программа для ЭВМ / Ю. Я. Зубарев, И. В. Кукушкин, А. П. Нырков. — Свидетельство № 2016610037. — Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11 января 2016 г.

ALGORITHMS AND SOFTWARE OF SIMULATION MODELING OF THE COASTING SHIPS PROCESSING

This work present a creation simulation of handling processing coasting courts, based on gamma-distribution generation of random variables is considered. As well as the simulation model, which based on uniform distribution, this model will give more exact values of statistical parameters, such as an average of waiting time coasting courts in turn and in the terminal. These characteristics values will be also more exact, in comparison with Markov (classical) model of mass service, which gives a little overestimated values of probabilistic characteristics. Within this article, fundamental algorithms of the program were put and the mathematical formulation of a task is given. Work contains few tables, which allowing to give an assessment of influence of random variables mean square deviations on probabilistic characteristics of processes. The algorithm is a basis for developing computer program, which calculating probabilistic characteristics of coasting freights handling.

Keywords: coasting ships handling, simulation modeling, algorithms, gamma-distribution, queueing model.

REFERENCES

1. Lou, A. M., and V. D. Kelton. *Imitacionnoe modelirovanie*. SPb.: Piter, 2004.
2. Nyrkov, A. P. *Matematicheskie modeli i algoritmy optimizacii processov upravlenija peregruzochnym kompleksom v informacionnoj tehnologii ASU (na primere specializirovannyh terminalov rechnyh portov)*: Ph.D. Diss. (Tech.). SPb.: SPGUVK, 1994.
3. Nyrkov, A. P. *Ocenka naprjazhennosti planov transportnyh uzlov*. L.: LIVT, 1985.
4. Nyrkov, A. P. *Avtomatizirovannoe upravlenie i optimizacija tehnologicheskikh processov v transportnyh uzlah*: Dr. Diss. (Tech.). SPb.: SPGUVK, 2003.
5. Nyrkov, A. P., and A. A. Nyrkov. *Teorija statisticheskikh reshenij (Statisticheskaja proverka gipotez)*. SPb.: SPGUVK, 2006.
6. Zubarev, Y. J., and I. V. Kukushkin. "Imitation model of the coasting ships processing." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 186–192.
7. Zubarev, Y. J., and A. M. Tukavin. *Optimizacija processov pererabotki kabotazhnyh грузов*. SPb.: Politehnika, 2009.
8. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, and A. A. Shnurenko. *Avtomatizirovannoe upravlenie transportnymi sistemami*. SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2013.
9. Nyrkov, A. P. *Matematicheskoe obespechenie nestandartnyh zadach*. SPb.: SPGUVK, 1997.
10. Istomin, E. P., T. P. Knysh, A. P. Nyrkov, and A. R. Shkadova. *Metody teorii veroyatnostej i matematicheskoy statistiki v modelirovanii transportnyh processov*. SPb.: SPGUVK, 1999.

11. Nyrkov, A. A., and A. P. Nyrkov. *Imitacionnoe modelirovanie transportnyh processov*. SPb.: SPGUVK, 2010.
12. Zubarev, Ju. Ja., I. V. Kukushkin, and A. P. Nyrkov. *Imitacionnaja model processov obrabotki kabotazhnyh sudov (IMPOKS): computer program*. Certificate № 2016610037. 11 Jan. 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кукушкин Иван Викторович — аспирант.
Научный руководитель:
Нырко́в Анато́лий Па́влович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
Iron-win@mail.ru
Нырко́в Анато́лий Па́влович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
kaf.koib@gmail.com, kaf_koib@gumrf.ru
Нырко́в Андре́й Анато́льевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
kaf.koib@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kukushkin Ivan Viktorovich — Postgraduate.
Supervisor:
Nyrkov Anatoliy Pavlovich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
Iron-win@mail.ru
Nyrkov Anatoliy Pavlovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf.koib@gmail.com, kaf_koib@gumrf.ru
Nyrkov Andrey Anatolievich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf.koib@gmail.com

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2016 г.

УДК 658.562(100)(075.8)

А. А. Вардомская

ГИБРИДНАЯ НЕЙРОННАЯ МОДЕЛЬ ДВУХЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА КАК ЗВЕНА ПОРТОВОГО ПЕРЕГРУЗОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рассмотрена модель двухзвенного манипулятора, построенная на основе гибридной нейронной сети с использованием блоков ANFIS для решения инверсной кинематической задачи обеспечения движения рабочего элемента по заданной траектории. Двухзвенные манипуляторы широко используются в перегрузочном оборудовании, которым оснащены современные порты и транспортные терминалы. Показано, что применение элементов гибридных сетей с простыми способами обучения и настройки позволяет значительно повысить эффективность и качество функционирования манипуляторов путем использования решений, основанных на фундаментальных положениях теории систем искусственного интеллекта. Для задания траекторий движения спредера применены сплайны. Приведены уравнения динамики модели двухзвенного манипулятора, позволяющие выполнять оценки допустимых нагрузок элементов конструкции и обеспечивать безаварийные режимы функционирования манипулятора.

Ключевые слова: манипулятор, модель, гибридная сеть, обучающая выборка, искусственный интеллект, сплайн, инверсная кинематическая задача, траектория движения

В ПОСЛЕДНЕЕ время проявляется большой интерес к системам искусственного интеллекта, которые находят все большее применение в различных сферах человеческой деятельности [1]. Высокая размерность моделей технологических процессов, сложность их математической формализации при наличии нестационарных нелинейных связей в системах, дополняемых комплексом логических переходов и параметрических ограничений, определяет необходимость обращения к технологиям построения систем искусственного интеллекта как наи-