

Научная статья  
УДК 614.849  
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-3-16-21>

## **Информационное моделирование технологических процессов с применением цепей массового обслуживания**

---

*Виталий Валерьевич Коротков*

*Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,  
Санкт-Петербург, Россия, korotkovvv@gumrf.ru*

---

**Аннотация.** Цель статьи – раскрыть возможности информационного моделирования технологических процессов эффективных инфокоммуникационных систем, которое позволяет повысить надежность и качество систем. Как правило, потоки заказов на обслуживание принимаются пуассоновскими, что справедливо не во всех случаях, поэтому необходимо рассмотреть модификацию уравнения Колмогорова, с тем чтобы получить систему уравнений, справедливых для любых дисперсий, что позволит использовать их в любых цепях поставок. Показано, что информационный подход к моделированию систем позволяет в реальных условиях уточнить алгоритм или упростить и ускорить процедуру поиска решения посредством использования метода цепей массового обслуживания. С такими цепями могут быть связаны как чисто производственные (технологические) процессы, так и процессы обработки информации в телекоммуникационных и вычислительных комплексах. Следовательно, разработанная модель позволит менять условия постановки задачи по модернизации сети и поиска оптимального решения. Показана перспективность метода, поскольку он рассчитан на эффективное использование технических средств при построении инфокоммуникационных систем.

**Ключевые слова:** информационное моделирование, система массового обслуживания, потоки заказов, пуассоновское распределение, марковская цепь, дисперсия, технологический процесс

**Для цитирования:** *Коротков В. В. Информационное моделирование технологических процессов с применением цепей массового обслуживания // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 3. С. 16–21. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-3-16-21>.*

Original article

## **Information modeling technological processes by using queuing chains**

---

*Vitaly V. Korotkov*

*Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
Saint-Petersburg, Russia, korotkovvv@gumrf.ru*

---

**Abstract.** The purpose of the article is to reveal the possibilities of information modeling of technological processes of effective infocommunication systems, which allows increasing the reliability and quality of systems. As a rule, service order flows are taken as poisson streams, which is true not in all cases, therefore, it is necessary to consider a modification of the Kolmogorov equation in order to obtain a system of equations that are valid for any variances, which will allow them to be used in any supply chains. It is shown that the information approach to modeling systems allows in real conditions to refine the algorithm or simplify and speed up the procedure of finding a solution by using the method of queuing chains. Both purely production (technological) processes and information processing processes in telecommunication and computing complexes can be connected with such chains. Consequently, the model developed will allow changing the conditions for setting the task of network modernization and finding the optimal solution. The prospects of the method are shown, since it is designed for the effective use of technical means in the construction of infocommunication systems.

**Keywords:** information modeling, queuing system, order flows, Poisson distribution, Markov chain, dispersion, technological process

**For citation:** *Korotkov V. V. Information modeling technological processes by using queuing chains. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics. 2022;3:16-21. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-3-16-21>.*

### Введение

Организация производственных процессов – обширная область, для исследования проблем в которой разработаны разнообразные модели, базирующиеся на применении методов математического программирования, статистических методов.

Информационный подход к моделированию систем позволяет в реальных условиях уточнить алгоритм или упростить и ускорить процедуру поиска решения посредством метода цепи массового обслуживания [1–8]. К таким цепям могут быть сведены как чисто производственные (технологические) процессы, так и процессы обработки информации в телекоммуникационных и вычислительных комплексах. Обычно потоки заказов (требований) на обслуживание в таких цепях принимаются пуассоновскими (описываются законом Пуассона), т. е. без учета последствия, а сами цепи рассматриваются как марковские, что справедливо лишь в весьма ограниченном числе случаев [9–15].

Цель статьи – упростить и ускорить обработку заказов за счет применения информационного моделирования технологических процессов. Для решения поставленной цели необходимо модифицировать систему уравнений, справедливую для любых систем массового обслуживания.

### Информационное моделирование технологических процессов

Простейший (пуассоновский) поток с интенсивностью  $\lambda$  характеризуется экспоненциальным распределением плотности вероятности

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

( $t$  – время), которая в информационных терминах представляет собой материальный (информационный) ток  $I = f(t)$  в цепи (рис. 1), где сущность  $H = 1$ , сопротивление  $\tau = 1/\lambda$ , а емкость  $n = 1$ .

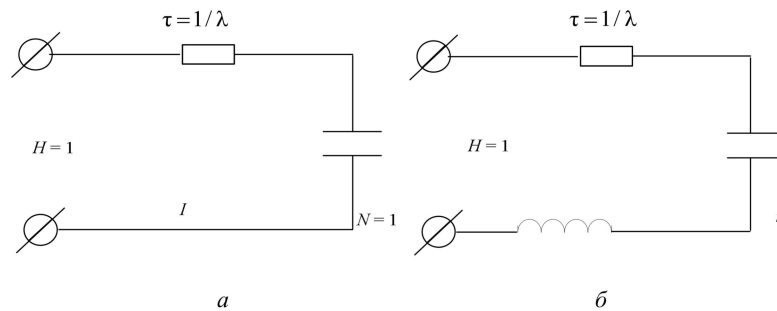


Рис. 1. Минимальная информационная цепь: а – первоначальная; б – после преобразования

Fig. 1. Minimal information circuit: a - initial; б - after conversion

Уравнение такой цепи

$$H = I\tau + \frac{1}{n} \int Idt$$

при начальных условиях  $I(0) = H/\tau = \lambda$  имеет решение, совпадающее с пуассоновским распределением.

Однако полная минимальная информационная цепь, как было показано, кроме сопротивления  $\tau$  и емкости  $n$ , обладает еще и ригидностью  $L$ , в которой выражается ее последствие (рис. 1, б). Кроме того, и емкость  $n$ , характеризующая неординарность потока, может иметь в общем случае значение, отличное от единицы. Уравнение (1) для такой цепи преобразуется в

$$H = I\tau + I/n \int Idt + L/dt, \quad (2)$$

как в простейшем потоке. Емкость и неординарность потоков позволяют определить все входящие в них вероятности для произвольных цепей массового обслуживания.

В то же время можно обойтись и без псевдостояний, если вместо уравнений Колмогорова написать систему.

При начальных условиях

$$I(0) = 0 \text{ и } dI(0)/dt = H/L = I/L$$

имеет решение

$$2\lambda t / T \exp(-t/T) \text{ при } \delta > 1;$$

$$\frac{2\lambda\delta}{\sqrt{\delta^2 + 1}} sh \frac{t\sqrt{\delta^2 - 1}}{T} \exp(-\delta t/T) \text{ при } \delta > 1,$$

где  $T$  – время потока  $T^2 = nL$ ;  $\delta = \sqrt{n/L/2\lambda}$ ,  $L = (\tau^2 - D)/2$ ,  $D$  – дисперсия промежутка времени между заявками.

Таким образом, уравнение (2) и его решения аппроксимируют широкий класс пакетов заявок с различными интенсивностями  $\lambda$  и дисперсиями  $D$ , включая пуассоновский поток, для которого  $D = (1/\lambda) = \tau^2$  и  $n = 1$ .

В результате описание широкого класса систем массового обслуживания с последствием и неоднородностью сводится к системе уравнений типа (2), отличающихся от обычно применяющихся

в марковских цепях уравнений Колмогорова слагаемыми  $I/dt$  и  $L/dt$ .

Например, если граф состояний простейшей системы массового обслуживания имеет вид, показанный на (рис. 2), то, по Колмогорову, для марковской цепи имеем

$$p_0 + p_1 = 1; \quad dp_0/dt = -\lambda p_0 + \mu p_1,$$

где  $p_0$  – вероятность того, что система свободна;  $p_1$  – вероятность того, что система занята;  $\lambda, D_\lambda$  – интенсивность и дисперсия потока их выполнения;  $\mu$  – интенсивность перехода системы в обратное состояние.

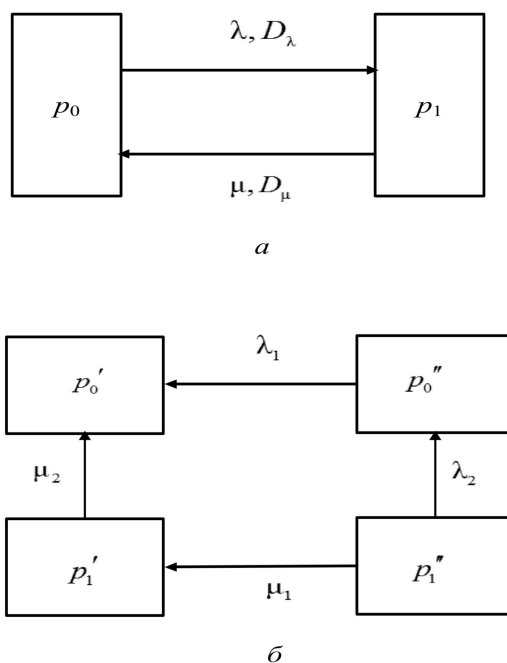


Рис. 2. Граф простейшей системы массового обслуживания: *a* – первоначальная; *б* – после преобразования

Fig. 2. Graph of the basic queuing system: *a* - initial; *b* - after conversion

При тех же условиях, но в цепях с последствием и произвольными потоками появляются еще псевдосостояния, поскольку передаточная функция цепи на рис. 1, *б* приводится к произведе-

нию передаточных функций цепей на рис. 1, *a* при условии  $\tau = \tau_1 + \tau_2$  и  $\lambda = \tau_1 \tau_2$ .

Таким образом, имеем

$$\begin{aligned} dp_0' / dt &= \lambda_1 p_0' + \mu_2 p_1''; & p_1' + p_1'' &= p d; \\ dp_0'' / dt &= -\lambda_2 p_0'' + \lambda_1 p_0'; & dp_1' / dt &= -\mu_1 p_1' + \lambda_2 p_0''; \\ p_0' + p_0'' &= p_0; & p_0 + p_1 &= 1, \quad \text{где } 1/\lambda = 1/\lambda_1 + 1/\lambda_2; \\ \lambda_1 \lambda_2 (1 - \lambda^2 D_\lambda) &= 2\lambda^2; & 1/\mu &= 1/\mu_1 + 1/\mu_2; \\ \mu_1 \mu_2 (1 - \mu^2 D_\mu) &= 2\mu_2. \end{aligned}$$

Эти соотношения, подобные уравнениям Колмогорова, справедливы для любых дисперсий в пределах  $\lambda^2 D_\lambda \geq 0,5$ , а не только  $\lambda^2 D_\lambda = 1$ , как в простейшем потоке. Они позволяют определить

все входящие в них вероятности для произвольных цепей массового обслуживания.

Если вместо уравнений Колмогорова написать систему

$$\begin{aligned} \{[(\lambda^2 D_\lambda - 1) / 2\lambda] d^2 p_0 / dt^2\} &= dp_0 / dt = -\lambda p_0 + \mu p_1; \\ \{[(\mu^2 D_\mu - 1) / 2\mu] d^2 p_1 / dt^2\} &= dp_1 / dt = -\mu p_1 + \lambda p_0, \end{aligned}$$

то можно обойтись и без псевдосостояния, также справедливую при любых значениях дисперсии в оговоренных пределах. Если же снять всякие

ограничения на дисперсию потока, то для произвольного случая, не прибегая к псевдосостояниям, получаем систему из уравнений вида

$$\begin{aligned} \mu p_1 - \lambda p_0 &= dp_0 / dt + \lambda / \lambda_1 \left[ (C_n^2 - m + 1) / \lambda_1 + (m - 1) / \lambda_2 \right] d^2 p_0 / dt^2 + \dots \\ &\dots + \lambda / \lambda_1^{i-1} \left[ (C_n^1 - m + i - \lambda) / \lambda_1 + (m - i + \lambda) / \lambda_2 \right] d^i p_0 / dt^i + \dots \\ &\dots + (1 / \lambda - k) d^n p_0 / dt^n, \end{aligned}$$

где  $m$  – ближайшее к  $k$  большее целое число;  $k = \lambda / \lambda^2 D$ ;  $1 / \lambda = (m - 1) / \lambda_1 + 1 / \lambda_2$ ;  $D_i = (m - 1) / \lambda_1^2 + 1 / \lambda_2^2$ .

Это уравнение представляет собой обобщение уравнения Колмогорова на случай потоков Эрланга нецелой степени, т. е. на случай потоков с любым последствием.

В последнее время уделяется большое внимание решению вероятностных задач, связанных с работой систем массового обслуживания. Задача теории массового обслуживания – установить зависимость результирующих показателей работы системы массового обслуживания от входных показателей. Установить такие зависимости можно только для простых систем массового обслуживания. Изучение реальных систем проводится путем моделирования их работы с применением метода статистических испытаний [16–20]. Анализ систем массового обслуживания упрощается, если в системе протекает марковский процесс, тогда систему можно описать обыкновенными дифференциальными уравнениями, а предельные вероятности – линейными алгебраическими уравнениями. В дальнейшем планируется не только составить уравнения Колмогорова, но и решить его для задачи моделирования

транспортного потока на нерегулируемом пересечении, а также вычислить основные характеристики (средние длины очередей, среднее время ожидания в очереди) и провести анализ характеристик при различных значениях интенсивности потока.

### Заключение

Получено уравнение, которое позволяет определять вероятности для произвольных цепей массового обслуживания.

Информационное моделирование технологических процессов на основе полученных выражений представляет собой обобщение уравнения Колмогорова для случая потоков с любым последствием. Таким образом, информационный подход к моделированию систем позволяет ускорить процедуру поиска решения задачи информационного моделирования методом цепей массового обслуживания. К цепям такого рода сводятся как технологические процессы, так и процессы обработки информации в телекоммуникационных и вычислительных комплексах. Показана перспективность метода, позволяющего эффективно использовать технические средства при построении инфокоммуникационных систем.

### Список источников

1. Панителев В. И., Поддубных Л. Ф. Многоцелевая оптимизация и автоматизированное проектирование управления качеством электроснабжения в электроэнергетических системах: моногр. Красноярск: Изд-во Сиб. федер. ун-та, 2009. 194 с.
2. Сердцева А. В. Развитие автоматизированных систем управления технологическими процессами // Вестн. Ульянов. гос. техн. ун-та. 2016. № 3 (75). С. 58–61.
3. Boriev Z., Sokolov S., Nyrkov A., Nekrasova A. Mathematical and information maintenance of biometric systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. N. 124 (1):012046. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012046.
4. Автоматизированная система управления технологическими процессами Волховской ГЭС // ИСУП. 2009. № 2 (22). URL: <https://isup.ru/articles/2/326> (дата обращения: 20.04.2022).
5. АСУ ТП подстанции // ЭНПРО. 2011. URL: <https://www.en-pro.ru/blog/resheniya-i-tehnologii/asu-tp-podstantsii/> (дата обращения: 20.04.2022).
6. Sokolov S. S., Alimov O. M., Golubeva M. G., Burlov V. G., Vikhrov N. M. The automating process

- of information security management // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018 (Moscow and St. Petersburg, Russia, 29 January 2018 - 01 February 2018). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8317045> (дата обращения: 20.04.2022).
7. Голоскоков К. П. Прогнозирование и оценка технического состояния сложных систем // Науч.-техн. вестн. Санкт-Петерб. гос. политехн. ун-та. 2008. № 1 (53). С. 164–168.
8. Брусакова И. А., Власов М. П., Голоскоков К. П. Информационные технологии в научных исследованиях высшей школы: моногр. СПб.: Изд-во Санкт-Петерб. гос. ун-та вод. коммуникаций, 2012. 160 с.
9. Голоскоков К. П. Автоматизированная система испытаний в структуре системы управления качеством // Науч.-техн. вестн. Санкт-Петерб. гос. политехн. ун-та. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2008. № 6 (69). С. 116–120.
10. Голоскоков К. П., Нестеренко Н. К., Чиркова М. Ю. Повышение эффективности деятельности производственного предприятия // Аудит и финансовый анализ. 2014. № 1. С. 331–335.

11. Брусакова И. А., Голоскоков К. П. Математическая модель функциональной надежности автоматизированных систем управления // Вестн. ИНЖЭКОНа. Сер.: Технические науки. 2010. № 8. С. 48–51.
12. Голоскоков К. П. Формирование информационной базы для прогнозирования качества продукции // Инновации. 2009. № S1. С. 91–94.
13. Голоскоков К. П. Прогнозирование технического состояния изделий судовой электронной техники. СПб., ООО «ПаркКом», 2007. 148 с.
14. Нырко А. П., Нырко А. А., Соколов С. С., Шнуренко А. А. Обеспечение безопасности объектов информатизации транспортной отрасли. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 544 с.
15. Нырко А. П., Соколов С. С., Башмаков А. В. Методика проектирования безопасных информационных систем на транспорте // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2010. № 3. С. 58–61.
16. Люльченко А. Н., Нырко А. П., Швед В. Г. Модель системы обеспечения информационной безопасности на транспорте // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота

им. адм. С. О. Макарова. 2015. № 5 (33). С. 184–193.

17. Буторов В. В., Тынченко С. В., Царев Р. Ю. Оценка надежности клиент-серверных приложений корпоративной системы управления предприятием // Фундаментальные исследования. 2015. № 5-3. С. 488–492.
18. Кузнецов А. С., Ченцов С. В., Царев Р. Ю. Многоэтапный анализ архитектурной надежности и синтез отказоустойчивого программного обеспечения сложных систем: моногр. Красноярск: Изд-во Сиб. федер. ун-та, 2013. 143 с.
19. Любицын В. Н. Необходимость разработки надежного программного обеспечения как вызов современности // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2012. № 23. С. 26–29.
20. Царев Р. Ю., Пунков А. Н., Огнерубова М. А., Сержантова М. В., Бесчастная Н. А. Модель анализа надежности распределенных вычислительных систем // Вестн. Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. 2013. № 1 (47). С. 86–91.

## References

1. Pantelev V. I., Poddubnykh L. F. *Mnogotslevaia optimizatsiia i avtomatizirovannoe proektirovanie upravleniia kachestvom elektrosnabzheniia v elektroenergeticheskikh sistemakh: monografiia* [Multi-purpose optimization and automated design of power supply quality management in electric power systems: monograph]. Krasnoyarsk, Izd-vo Sib. feder. un-ta, 2009. 194 p.
2. Serdtseva A. V. Razvitiie avtomatizirovannykh sistem upravleniia tekhnologicheskimi protsessami [Development of automated control systems for technological processes]. *Vestnik Ul'ianovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 3 (75), pp. 58-61.
3. Boriev Z., Sokolov S., Nyrkov A., Nekrasova A. Mathematical and information maintenance of biometric systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. No. 124 (1):012046. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012046.
4. Avtomatizirovannaia sistema upravleniia tekhnologicheskimi protsessami Volkhovskoi GES [Automated control system for technological processes of the Volkhov hydropower plant]. *ISUP*, 2009, no. 2 (22). Available at: <https://isup.ru/articles/2/326> (accessed: 20.04.2022).
5. ASU TP podstantsii [Industrial automatic control system of substation]. *ENPRO*, 2011. Available at: <https://www.en-pro.ru/blog/resheniya-i-tehnologii/asu-tp-podstantsii/> (accessed: 20.04.2022).
6. Sokolov S. S., Alimov O. M., Golubeva M. G., Burlov V. G., Vikhrov N. M. The automating process of information security management. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018 (Moscow and St. Petersburg, Russia, 29 January 2018 - 01 February 2018)*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8317045> (accessed: 20.04.2022).
7. Goloskokov K. P. Prognozirovanie i otsenka tekhnicheskogo sostoiianiia slozhnykh sistem [Forecasting and evaluation of technical condition of complex systems]. *Nauchno-tekhnichestkie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2008,

no. 1 (53), pp. 164-168.

8. Brusakova I. A., Vlasov M. P., Goloskokov K. P. *Informatsionnye tekhnologii v nauchnykh issledovaniakh vysshei shkoly: monografiia* [Information technologies in scientific research of higher education: monograph]. Saint-Petersburg, Izd-vo Sankt-Peterb. gos. un-ta vod. kommunikatsii, 2012. 160 p.
9. Goloskokov K. P. Avtomatizirovannaia sistema ispytaniia v strukture sistemy upravleniia kachestvom [Automated test system in structure of quality management system]. *Nauchno-tekhnichestkie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*, 2008, no. 6 (69), pp. 116-120.
10. Goloskokov K. P., Nesterenko N. K., Chirkova M. Iu. Povyshenie effektivnosti deiatel'nosti proizvodstvennogo predpriiatiia [Improving efficiency of manufacturing enterprise]. *Audit i finansovyi analiz*, 2014, no. 1, pp. 331-335.
11. Brusakova I. A., Goloskokov K. P. Matematicheskaiia model' funktsional'noi nadezhnosti avtomatizirovannykh sistem upravleniia [Mathematical model of functional reliability of automated control systems]. *Vestnik INZhEKONa. Serii: Tekhnicheskii nauki*, 2010, no. 8, pp. 48-51.
12. Goloskokov K. P. Formirovanie informatsionnoi bazy dlia prognozirovaniia kachestva produktsii [Formation of information base for predicting product quality]. *Innovatsii*, 2009, no. S1, pp. 91-94.
13. Goloskokov K. P. *Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoiianiia izdelii sudovoi elektronnoi tekhniki* [Forecasting technical condition of products of marine electronics]. Saint-Petersburg, ООО «ПаркКом» Publ., 2007. 148 p.
14. Nyrkov A. P., Nyrkov A. A., Sokolov S. S., Shnurenko A. A. *Obespechenie bezopasnosti ob"ektov informatizatsii transportnoi otrasli* [Ensuring security of objects of informatization of transport industry]. Saint-Petersburg, Izd-vo Politekh. un-ta, 2015. 544 p.
15. Nyrkov A. P., Sokolov S. S., Bashmakov A. V. Metodika proektirovaniia bezopasnykh informatsionnykh sistem na transporte [Methods of designing secure infor-

mation systems in transport]. *Problemy informatsionnoi bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy*, 2010, no. 3, pp. 58-61.

16. Liul'chenko A. N., Nyrkov A. P., Shved V. G. Model' sistemy obespecheniia informatsionnoi bezopasnosti na transporte [Model of information security system in transport]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2015, no. 5 (33), pp. 184-193.

17. Butorov V. V., Tynchenko S. V., Tsarev R. Iu. Otsenka nadezhnosti klient-servernykh prilozhenii korporativnoi sistemy upravleniia predpriatiem [Reliability assessment of client-server applications of corporate enterprise management system]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2015, no. 5-3, pp. 488-492.

18. Kuznetsov A. S., Chentsov S. V., Tsarev R. Iu. *Mnogoetapnyi analiz arkhitekturnoi nadezhnosti i sintez otkazoustoichivogo programmnoho obespecheniia slozhnykh*

*sistem: monografiia* [Multi-stage analysis of architectural reliability and synthesis of fault-tolerant software for complex systems: monograph]. Krasnoiarsk, Izd-vo Sib. feder. un-ta, 2013. 143 p.

19. Liubitsyn V. N. Neobkhodimost' razrabotki nadezhnogo programmnoho obespecheniia kak vyzov sovremennosti [Need to develop reliable software as challenge of our time]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*, 2012, no. 23, pp. 26-29.

20. Tsarev R. Iu., Pupkov A. N., Ognerubova M. A., Serzhantova M. V., Beschastnaia N. A. Model' analiza nadezhnosti raspredelennykh vychislitel'nykh sistem [Model of reliability analysis of distributed computing systems]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M. F. Reshetmeva*, 2013, no. 1 (47), pp. 86-91.

Статья поступила в редакцию 23.05.2022; одобрена после рецензирования 04.07.2022; принята к публикации 20.07.2022  
The article was submitted 23.05.2022; approved after reviewing 04.07.2022; accepted for publication 20.07.2022

#### **Информация об авторе / Information about the author**

**Виталий Валерьевич Коротков** – доцент кафедры комплексного обеспечения информационной безопасности; Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова; korotkovvv@gumrf.ru

**Vitaly V. Korotkov** – Assistant Professor of the Department of Integrated Information Security; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; korotkovvv@gumrf.ru

