

УДК 004.75

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗЕРВИРОВАННОГО ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАПРОСОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ОБСЛУЖИВАНИЯ

В.А. Богатырев<sup>а</sup>, И.А. Сластихин<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: Vladimir.bogatyrev@gmail.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию 13.10.15, принята к печати 02.02.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-311-317

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Богатырев В.А., Сластихин И.А. Эффективность резервированного выполнения запросов в многоканальных системах обслуживания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 2. С. 311–317. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-311-317

### Аннотация

**Предмет исследования.** Анализируется эффективность резервированного выполнения запросов с учетом ненадежности вычислений в компьютерных системах, представляемых многоканальными системами массового обслуживания с общей очередью. Цель работы – исследование возможности повышения эффективности обслуживания при резервированном выполнении копий запросов в разных приборах многоканальной системы в условиях ненадежности вычислений. При резервированном обслуживании запроса требуется безошибочность его выполнения хотя бы в одном из приборов. **Метод.** Для анализа эффективности резервированного обслуживания запросов рассмотрена оценка среднего времени пребывания в системе с применением и без применения резервирования запросов при представлении системы простейшей моделью массового обслуживания типа  $M/M/n$ . Представленная оценка среднего времени пребывания при резервированном выполнении запросов является верхней, так как не учитывает возможность его снижения в результате вероятностного разброса времени выполнения запросов разными приборами. Комплексная эффективность резервированного обслуживания запросов определена на основе мультипликативного показателя, учитывающего безошибочность вычислений и средний запас времени относительно предельно допустимой задержки обслуживания. Оценка безошибочности вычислений при резервированном выполнении запросов получена при требовании безошибочного выполнения хотя бы одной копии запроса. **Основные результаты.** Показано, что резервирование запросов дает выигрыш в эффективности системы при небольшой интенсивности запросов (загрузке). Определена граница целесообразности (эффективности) резервированного обслуживания запросов. Показана возможность повышения эффективности системы при адаптивном изменении кратности резервирования запросов в зависимости от интенсивности потока запросов. Установлено, что выбор дисциплины обслуживания в системах информационного сервиса во многом определяется экономической эффективностью предоставления информационных услуг, которая оценивается прибылью от безошибочного предоставления информационных услуг, получаемой в единицу времени (интенсивность получения прибыли). Показано, что существует область эффективности информационного сервиса при резервированном обслуживании запросов в условиях отказов и ошибок. Определен порог интенсивности потока запросов, ниже которого резервированное обслуживание запросов целесообразно. **Практическая значимость.** Представленные результаты могут быть использованы при проектировании компьютерных систем, в том числе систем предоставления информационных услуг.

### Ключевые слова

многоканальная система массового обслуживания, надежность, резервированное выполнение запросов, кратность резервирования

### Благодарности

Работа выполнена в рамках НИР 610481 «Разработка методов и средств системотехнического проектирования информационных и управляющих вычислительных систем с распределенной архитектурой».

## EFFICIENCY OF REDUNDANT QUERY EXECUTION IN MULTI-CHANNEL SERVICE SYSTEMS

V.A. Bogatyrev<sup>а</sup>, I.A. Slastikhin<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russian Federation

Corresponding author: Vladimir.bogatyrev@gmail.com

### Article info

Received 13.10.15, accepted 02.02.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-1-54-60

Article in Russian

**For citation:** Bogatyrev V.A., Slastikhin I.A. Efficiency of redundant query execution in multi-channel service system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 311–317. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-311–317

#### Abstract

**Subject of Research.** The paper deals with analysis of the effectiveness of redundant queries based on untrusted computing in computer systems, represented by multi-channel queuing systems with a common queue. The objective of research is the possibility of increasing the efficiency of service requests while performing redundant copies of requests in different devices of a multi-channel system under conditions of calculations unreliability. The redundant service of requests requires the infallibility of its implementation at least in one of the devices. **Method.** We have considered estimation of the average time spent in the system with and without the use of redundant requests at the presentation of a simple queuing model of the  $M/M/n$  type to analyze the effectiveness of redundant service of requests. Presented evaluation of the average waiting time in the redundant queries is the upper one, since it ignores the possibility of reducing the average waiting time as a result of the spread of the probability of time querying at different devices. The integrated efficiency of redundant service of requests is defined based on the multiplicative index that takes into account the infallibility of calculations and the average time allowance with respect to the maximum tolerated delay of service. Evaluation of error-free computing at reserved queries is received at the requirement of faultless execution of at least one copy of the request. **Main Results.** We have shown that the reservation of requests gives the gain in efficiency of the system at low demand rate (load). We have defined the boundaries of expediency (efficiency) for redundant service of requests. We have shown the possibility of the effectiveness increasing of the adaptive changes in the multiplicity of the reservation of requests, depending on the intensity of the flow of requests. We have found out that the choice of service discipline in information service systems is largely determined by the economic efficiency of information services, estimated by the profit from the error-free provision of information services obtained per time unit (rate of profit). We have demonstrated the existence of an efficiency area of information services at the redundant service of requests under failures and errors. We have determined the flow rate threshold of requests below which a redundant service of requests is appropriate. **Practical Relevance** The results presented in the paper can be used in the computer systems design including the systems providing information services.

#### Keywords

multi-channel queuing system, reliability, redundant queries, multiplicity of redundancy

#### Acknowledgements

The research was carried out as a part of Research Engineering No 610481 "Development of methods and facilities for system engineering design of information and control computer systems with distributed architecture"

### Введение

К современным вычислительным системам предъявляются высокие требования по безопасности, производительности, отказоустойчивости, функциональной и структурной надежности, достигаемые при резервировании ресурсов и их консолидации [1–7]. Под функциональной надежностью [8] понимается свойство системы сохранять устойчивость вычислительного процесса при своевременном безошибочном выполнении поступающих в систему запросов в условиях отказов, сбоев и ошибок.

Для структурно избыточных компьютерных систем устойчивость вычислительного процесса (функциональная надежность) может поддерживаться при динамическом распределении запросов [9–18], в том числе при направлении резервных копий, поступающих в систему запросов на обслуживание в несколько узлов (каждая копия выполняется отдельным узлом). Системотехническое проектирование систем обработки данных базируется на использовании математического аппарата теории массового обслуживания, теории надежности [6, 18–24].

Модели с резервированным обслуживанием запросов разными узлами для кластера  $n$  одноканальных систем с индивидуальными очередями, функционирующих в условиях сбоев, отказов и ошибок вычислений, исследованы в работе [8]. Модели систем с резервированным обслуживанием запросов для многоканальной системы с общей очередью предложены в работах [18, 19]. В моделях [18, 19], если число занятых приборов в момент поступления запроса меньше некоторого порогового значения, то запрос копируется, а его копии обслуживаются всеми свободными приборами. Если число занятых приборов в момент поступления запроса не меньше этого порогового значения, то запрос обслуживается одним прибором. В работе [19] описана модель дисциплины обслуживания, при которой, когда имеются свободные приборы (процессоры), все они загружаются на широковещательное (резервированное) выполнение копий запроса. Однако в работах [18, 19] не рассматривается влияние ненадежности многоканальных систем на среднее время резервированного выполнения запроса, при котором требуется безошибочное обслуживание хотя бы одной его копии.

В настоящей работе предложены модели резервированного обслуживания запросов в многоканальных системах массового обслуживания при требовании безошибочного обслуживания хотя бы одной копии каждого из запросов.

### Постановка задачи исследования

Рассмотрим многоканальную систему обслуживания с  $n$  приборами и бесконечной общей очередью в предположении, что входящий поток запросов – простейший с интенсивностью  $\lambda$ , а обслуживание

экспоненциально со средним временем обслуживания запросов  $v$ . При выполнении запроса возможны ошибки, вероятности которых одинаковы для всех обслуживающих приборов. Предполагается, что возможно резервирование обслуживания запроса на  $k$  приборах, при требовании безошибочности его выполнения хотя бы в одном из них. Модель строится в предположении независимости возникновения ошибок в приборах, принимающих к обслуживанию копии запросов.

Цель работы – исследование эффективности резервированного обслуживания запросов в условиях ненадежности вычислений.

### Оценка среднего времени ожидания запросов в многоканальных системах с применением и без применения резервированного обслуживания запросов

Среднее время ожидания для многоканальных систем без резервированного обслуживания запросов типа  $M/M/n$  вычисляется по известным формулам [20, 21]:

$$t = P_0 \frac{v}{n(1-\rho)}, \quad (1)$$

где  $v$  – среднее время выполнения запроса,  $n$  – число обслуживающих приборов,  $\rho = \lambda v / n$  – коэффициент загрузки системы,  $\lambda$  – интенсивность потока запросов, а  $P_0$  – вероятность того, что заявка попадет в очередь, определяемая как

$$P_0 = \frac{(n\rho)^n}{n!(1-\rho)} \left( \sum_{s=0}^{n-1} \frac{(n\rho)^s}{s!} + \frac{(n\rho)^n}{n!(1-\rho)} \right)^{-1}.$$

При резервировании запросов каждая его копия одновременно распределяется на выполнение в один из  $k$  приборов, при этом будем пренебрегать возможным разбросом времени выполнения копий запроса в разных приборах. Учитывая, что выполнение каждого запроса требует ресурсов  $k$  приборов, эффективная каналность рассматриваемой системы по обслуживанию разных запросов, по существу, уменьшается с  $n$  до  $n/k$  каналов. Такое представление системы ограничено условием, что  $n/k$  – целое. Рассматривая процесс резервированного обслуживания  $k$  копий по обслуживанию одной копии в одном из  $k$  приборов, формулу (1) для оценки среднего времени ожидания преобразуем к виду

$$t_{\text{рез}} = P_{0_{\text{рез}}} \frac{vk}{n(1-\rho_{\text{рез}})}, \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{рез}} = \lambda vk / n$ , а вероятность того, что запрос попадет в очередь, определяется как

$$P_{0_{\text{рез}}} = \frac{\left(\frac{n}{k}\rho_{\text{рез}}\right)^{\frac{n}{k}}}{\left(\frac{n}{k}\right)!(1-\rho_{\text{рез}})} \left( \sum_{s=0}^{\frac{n}{k}-1} \frac{\left(\frac{n}{k}\rho_{\text{рез}}\right)^s}{s!} + \frac{\left(\frac{n}{k}\rho_{\text{рез}}\right)^{\frac{n}{k}}}{\left(\frac{n}{k}\right)!(1-\rho_{\text{рез}})} \right)^{-1}.$$

На рис. 1 представлен график зависимости среднего времени ожидания от интенсивности поступления заявок. Расчет проведен в системе компьютерной математики Mathcad-15 при числе обслуживающих приборов в системе  $n = 8$  шт., среднем времени выполнения запроса  $v = 1$  с, кратности резервированного обслуживания запросов  $k = 1, 2, 4$ .

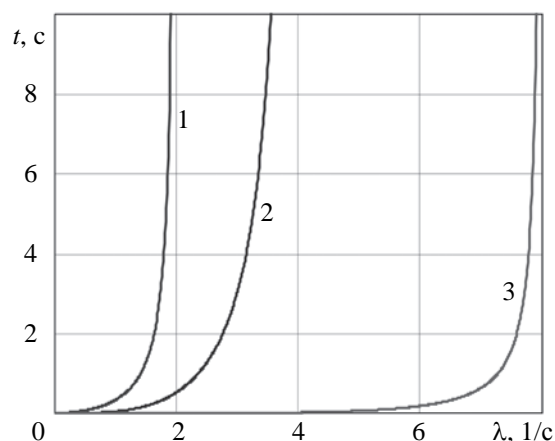


Рис. 1. Зависимость среднего времени ожидания от интенсивности поступления заявок  $\lambda$ . Кривые 1–3 соответствуют кратности резервирования запросов  $k = 4, 2, 1$

Кривая 1 (рис. 1) соответствует среднему времени ожидания с резервированным выполнением запросов при кратности резервирования  $k = 4$ , кривая 2 – при  $k = 2$ , а кривая 3 – при  $k = 1$ . Из представленного графика следует, что среднее время ожидания при резервировании запросов в условиях безошибочности вычислений возрастает.

Представленная оценка является верхней для резервированного обслуживания запросов, так как не учитывает возможность снижения среднего времени их пребывания при резервированном обслуживании в результате того, что процесс обслуживания является вероятностным, а это может привести к тому, что в одном из каналов время выполнения копии может оказаться меньше, чем в других каналах.

**Эффективность резервированного обслуживания с учетом задержек обслуживания запросов в условиях ненадежности вычислений**

Эффективность обслуживания запросов с учетом задержек обслуживания запросов и возможности их ошибочных выполнений оценим как

$$b = (t_{\text{макс}} - t)P,$$

где  $t_{\text{макс}}$  – максимально допустимое время ожидания запроса;  $t$  – среднее время ожидания запроса;  $P$  – вероятность безошибочного выполнения запроса;  $(t_{\text{макс}} - t)$  – средний запас времени ожидания. Показатель  $b$  соответствует математическому ожиданию среднего запаса времени ожидания безошибочно выполняемых запросов.

Вероятность безошибочного нерезервированного выполнения запроса  $P_{\text{перез}} = e^{-\lambda_0 v}$ , где  $\lambda_0$  – суммарная интенсивность ошибок и отказов. Вероятность безошибочного выполнения резервированного запроса хотя бы в одном из  $k$  узлов, принимающих запрос к обслуживанию, вычисляется как

$$P_{\text{рез}} = 1 - (1 - e^{-\lambda_0 v})^k.$$

Для определения области целесообразности резервированного обслуживания запросов проведены расчеты со следующими исходными данными: число приборов в системе  $n = 8$  шт.; кратность резервированного обслуживания запросов  $k = 2$ ; среднее время выполнения запроса  $v = 1$  с. Интенсивность ошибок  $\lambda_{01} = 10^{-2}$  1/с,  $\lambda_{02} = 3 \times 10^{-2}$  1/с и  $\lambda_{03} = 5 \times 10^{-2}$  1/с; максимально допустимое время ожидания запроса  $t_{\text{макс}} = 2$  с.

На рис. 2 представлен график зависимости эффективности  $b$  от интенсивности запросов  $\lambda$ .

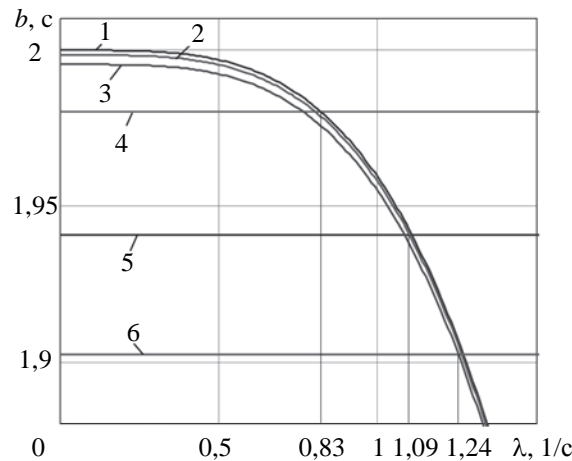


Рис. 2. Зависимость эффективности системы от интенсивности запросов  $\lambda$ . При интенсивности ошибок  $\lambda_{01} = 10^{-2}$  1/с,  $\lambda_{02} = 3 \times 10^{-2}$  1/с,  $\lambda_{03} = 5 \times 10^{-2}$  1/с кривые 1–3 соответствуют резервированному обслуживанию запросов ( $k = 2$ ), а кривые 4–6 – их нерезервированному обслуживанию ( $k = 1$ )

При интенсивности ошибок  $\lambda_{01} = 10^{-2}$  1/с,  $\lambda_{02} = 3 \times 10^{-2}$  1/с и  $\lambda_{03} = 5 \times 10^{-2}$  1/с кривые 1–3 (рис. 2) соответствуют критерию эффективности системы  $b$  для резервированного обслуживания запросов ( $k = 2$ ), а кривые 4–6 – без резервированного обслуживания. Расчеты показывают, что резервирование запросов дает выигрыш в эффективности системы при небольшой интенсивности запросов (загрузке). Полученные зависимости позволяют найти границу целесообразности (эффективности) резервированного обслуживания запросов. Так, при интенсивности ошибок  $\lambda_{03} = 5 \times 10^{-2}$  1/с резервированное обслуживание запросов целесообразно для интенсивности запросов  $\lambda < 1,09$  1/с.

Из рис. 2 видно, что при росте интенсивности ошибок границы эффективности резервирования запросов увеличиваются. Рост интенсивности запросов приводит к увеличению эффективности  $b$  при резервированном выполнении запросов.

Таким образом, для повышения эффективности системы целесообразно адаптивное изменение кратности резервирования запросов в зависимости от интенсивности потока запросов.

### Эффективность предоставления резервированного обслуживания в системах предоставления информационных услуг

Выбор дисциплины обслуживания в системах информационного сервиса во многом определяется экономической эффективностью предоставления информационных услуг. Эффективность информационного сервиса охарактеризуем прибылью от безошибочного предоставления информационных услуг, получаемую в единицу времени (интенсивность получения прибыли):

$$D = \lambda [c_0 P - c_1 (1 - P)],$$

где  $\lambda$  – интенсивность потока запросов;  $P$  – вероятность безошибочного выполнения запроса;  $c_0$  – прибыль от безошибочного выполнения запроса;  $c_1$  – штраф при его ненадлежащем обслуживании (обслуживание с ошибкой).

На рис. 3 приведен график зависимости прибыли предоставления информационных услуг  $D$ , при  $c_0 = 1$  у.е. и  $c_1 = 25$  у.е. от интенсивности поступления запросов  $\lambda$ .

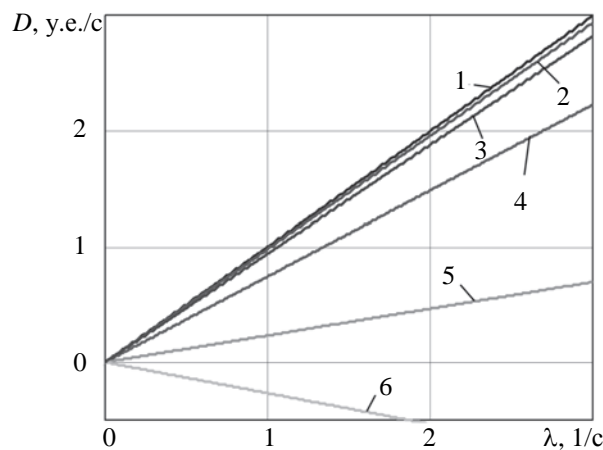


Рис. 3. Зависимость прибыли предоставления информационных услуг  $D$  от интенсивности запросов  $\lambda$ . Прибыли от предоставления информационных услуг  $D$  с резервированным выполнением запросов соответствуют кривые 1–3, а без их резервированного выполнения – кривые 4–6

На рис. 3 при интенсивности ошибок  $\lambda_{01} = 10^{-2}$  1/с,  $\lambda_{02} = 3 \times 10^{-2}$  1/с и  $\lambda_{03} = 5 \times 10^{-2}$  1/с кривые 1–3 соответствуют прибыли от предоставления информационных услуг  $D$  с резервированным выполнением запросов, а кривые 4–6 – прибыли от предоставлении информационных услуг  $D$  при их нерезервированном выполнении.

Из рис. 3 видна эффективность резервированного обслуживания запросов, оцениваемая по прибыли, получаемой в единицу времени, без учета влияния задержек и перегруженности узлов.

Прибыль от предоставления информационных услуг может зависеть от задержек обслуживания запросов, в этом случае эффективность обслуживания определим как:

$$A = \lambda [sP - c_1 (1 - P)],$$

где  $s$  – нормированная прибыль от обслуживания запроса в зависимости от задержки относительно предельно допустимого значения времени ожидания  $t_{\text{макс}}$

$$s = \frac{(t_{\text{макс}} - t)c_0}{t_{\text{макс}}},$$

при этом средние времена ожидания в многоканальных системах  $t$  с и без резервированного обслуживания запросов вычисляются соответственно по формулам (2) и (1).

На рис. 4 приведен график зависимости эффективности предоставления информационных услуг  $A$  при  $c_0 = 1$  у.е. и  $c_1 = 25$  у.е. от интенсивности запросов  $\lambda$ .

На рис. 4 при интенсивности ошибок  $\lambda_{01} = 10^{-2}$  1/с,  $\lambda_{02} = 3 \times 10^{-2}$  1/с и  $\lambda_{03} = 5 \times 10^{-2}$  1/с кривые 1–3 соответствуют эффективности предоставления информационных услуг  $A$  с резервированным

выполнением запросов, а кривые 4–6 соответствуют эффективности предоставления информационного сервиса без резервирования обслуживания. Из приведенного графика видно, что экономическая эффективность резервированного обслуживания запросов  $A$  при формировании стоимости услуг в зависимости от задержки их предоставления выше, чем эффективность такого обслуживания без резервированного выполнения запросов лишь до определенного порога интенсивности потока запросов. Также при увеличении интенсивности ошибок разница эффективности предоставления информационных услуг  $s$  и без резервированного обслуживания запросов увеличивается.

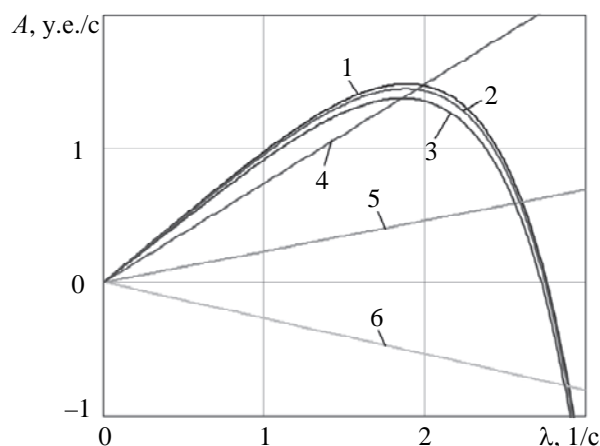


Рис. 4. Зависимость эффективности предоставления информационных услуг  $A$  от интенсивности поступления заявок  $\lambda$ . При интенсивности ошибок  $\lambda_{01} = 10^{-2}$  1/с,  $\lambda_{02} = 3 \times 10^{-2}$  1/с,  $\lambda_{03} = 5 \times 10^{-2}$  1/с кривые 1–3 соответствуют резервированному, а кривые 4–6 – нерезервированному выполнению запросов

#### Заключение

Проведено исследование возможностей повышения эффективности обслуживания при резервировании выполнения копий запросов в разных приборах многоканальной системы в условиях ненадежности вычислений.

Показано, что для многоканальных систем обслуживания, функционирующих в условиях отказов и ошибок, существует область эффективности резервированного обслуживания запросов.

Определен порог интенсивности потока запросов, ниже которого резервированное обслуживание запросов становится целесообразным.

Показана возможность повышения эффективности системы на основе адаптивного изменения кратности резервирования запросов в зависимости от интенсивности потока запросов.

#### References

1. Aysan H. *Fault-Tolerance Strategies and Probabilistic Guarantees for Real-Time Systems*. Vasteras, Sweden, Malardalen University, 2012, 190 p.
2. Kopetz H. *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*. Springer, 2011, 396 p. doi: 10.1007/978-1-4419-8237-7
3. Sorin D.J. *Fault Tolerant Computer Architecture*. Morgan & Claypool, 2009, 103 p.
4. Koren I., Krishna C.M. *Fault Tolerant Systems*. San Francisco, Morgan Kaufmann Publishers, 2009, 378 p.
5. Gatchin Yu.A., Zharinov I.O., Korobeynikov A.G. Mathematical estimation models of information security system infrastructure at the enterprise. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 2 (78), pp. 92–95. (in Russian)
6. Vorobyov A.I., Kolbanev M.O., Tatarnikova T.M. Assessment of probabilistic-temporal characteristics of the process of I&R service rendering. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, vol. 57, no. 9, pp. 15–18. (In Russian)
7. Shcheglov K.A., Shcheglov A.Yu. The reservation methods capabilities to enhance integral information and operational security level of modern informational systems. *Informacionnye Tehnologii*, 2015, vol. 21, no. 7, pp. 521–527. (In Russian)
8. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. Optimization of redundant routing requests in a clustered real-time systems. *Informacionnye Tehnologii*, 2015, vol. 21, no. 7, pp. 495–502. (In Russian)
9. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. Functional reliability of a real-time redundant computational process in cluster architecture systems. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2015, vol. 49, no. 1, pp. 46–56. doi: 10.3103/S0146411615010022

10. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Estimation of reliability of execution of real-time queries. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, vol. 57, no. 4, pp. 46–48.
11. Bogatyrev V.A. Nadezhnost' variantov razmeshcheniya funktsional'nykh resursov v odnorodnykh vychislitel'n. *Engineering Simulation*, 1997, no. 3, pp. 21–29.
12. Bogatyrev V.A. An interval signal method of dynamic interrupt handling with load balancing. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2000, vol. 34, no. 6, pp. 51–57.
13. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Requests redistribution between computing clusters under degradation. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, vol. 57, no. 9, pp. 54–58.
14. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Clusters optimization with the limited availability of clusters groups. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 1 (71), pp. 63–67.
15. Bogatyrev V.A. The reliability evaluation method for computation systems under discontinuity of computer nodes. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2006, no. 12, pp. 20–22.
16. Bogatyrev V.A. Reliability of the multilevel duplicated failure-safe communication system. *Herald of computer and information technologies*, 2008, no. 4, pp. 24–32.
17. Bogatyrev V.A. Reliability estimation and optimal redundancy in computer cluster systems. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2006, no. 10, pp. 18–21.
18. Dudin A.N., Sung B. Unreliable multi-server system with controllable broadcasting service. *Automation and Remote Control*, 2009, vol. 70, no. 12, pp. 2073–2084. doi: 10.1134/S0005117909120145
19. Lee M.H., Dudin A.N., Klimenok V.I. The SM/V/N queueing system with broadcasting service. *Mathematical Problem in Engineering*, 2006, vol. 2006, art. 98171. doi: 10.1155/MPE/2006/98171
20. Aliev T.I. *Osnovy Modelirovaniya Diskretnykh Sistem* [Basics of Discrete Systems Modeling]. St. Petersburg, NRU ITMO Publ., 2009, 363 p.
21. Kleinrock L. *Queueing Systems*. NY, Wiley Interscience, 1975.
22. Aliev T.I., Rebezova M.I., Russ A.A. Statistical methods for monitoring travel agencies. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2015, vol. 49, no. 6, pp. 321–327. doi: 10.3103/S0146411615060024
23. Cherkesov G.N. Faulttolerance and survivability of critical systems. *Design and Technology of Electronic Means*, 2015, no. 1, pp. 15–24.
24. Shubinskii I.B. *Functional Safety of Information Systems: Analysis Methods*. Moscow, Zhurnal Nadezhnost' Publ., 2012, 295 p.

- |                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| <b>Богатырев Владимир Анатольевич</b> | – доктор технических наук, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Vladimir.bogatyrev@gmail.com |
| <b>Сластихин Иван Александрович</b>   | – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Stopgo89@gmail.com                                     |
| <b>Vladimir A. Bogatyrev</b>          | – D.Sc., Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Vladimir.bogatyrev@gmail.com                     |
| <b>Ivan A. Slastikhin</b>             | – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Stopgo89@gmail.com                                   |