

## НАДЕЖНОСТЬ МУЛЬТИКЛАСТЕРНЫХ СИСТЕМ С ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОТОКОВ ЗАПРОСОВ

В. А. БОГАТЫРЕВ<sup>1</sup>, С. В. БОГАТЫРЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: Vladimir.bogatyrev@gmail.com

<sup>2</sup>Компания „Самсунг-электроник“, Сеул, Корея

Рассмотрена распределенная компьютерная система, содержащая связанные через сеть локальные кластеры, на каждый из которых поступает отдельный поток запросов. Исследованы возможности повышения надежности систем в результате перераспределения запросов между любой парой кластеров, проводимого с целью адаптации системы к накоплению отказов серверов и к изменениям потоков запросов. Условия работоспособности системы заданы с учетом ее критичности к перегрузкам серверов и к превышениям предельно допустимого времени ожидания запросов в очередях.

**Ключевые слова:** надежность, мультикластерная система, перераспределение запросов, кластер, допустимое время ожидания

**Введение.** Для распределенных вычислительных систем [1—3] различного назначения [4—8] требуется обеспечивать безопасность [9, 10], надежность [11, 12] и производительность. Высокие надежность и производительность могут поддерживаться при консолидации ресурсов [13], достигаемой, в частности, в результате адаптивного распределения запросов внутри кластеров [14, 15]. Дополнительно повысить надежность мультикластерных систем позволяет межкластерное перераспределение запросов через сеть [16—18].

Перераспределение запросов позволяет минимизировать среднее время ожидания [17], а для систем реального времени — повысить вероятность своевременного и безошибочного обслуживания запросов [19, 20] вследствие адаптации к отказам, ошибкам и изменениям трафика.

Исследовалась эффективность межкластерного перераспределения запросов [16—18] в системах с выделенными группами локальных и общедоступных кластеров, причем в этих статьях рассматривался случай, когда запросы от локальных кластеров могут перераспределяться через сеть только в общедоступный кластер, а балансирование нагрузки между локальными кластерами не предусмотрено.

Целью настоящей работы является исследование возможностей повышения надежности мультикластерных систем за счет перераспределения запросов между любыми кластерами, в том числе запросов, критичных не только к перегрузкам серверов (нарушениям стационарности обслуживания), но и к превышению предельно допустимого времени ожидания.

**Постановка задачи и объект исследования.** Рассмотрим распределенную компьютерную систему (рис. 1), содержащую связанные через сеть локальные кластеры, на каждый из которых поступает отдельный поток запросов. Адаптировать систему к отказам и перегруженности серверов можно, через сеть перераспределяя запросы между любыми кластерами.

Показателем надежности подобной системы является коэффициент готовности системы, функционирующей в стационарном режиме обслуживания потока запросов [11].

Для систем, критичных ко времени обслуживания, показателем надежности служит коэффициент готовности к обеспечению вероятности непревышения заданного времени ожидания запросов в очередях [11].

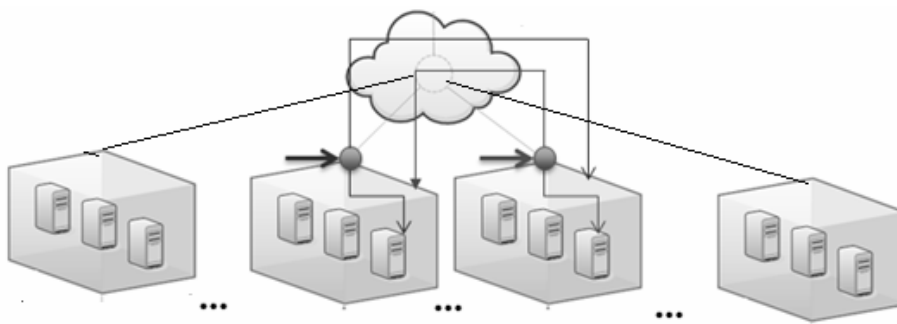


Рис. 1

**Оценка готовности с учетом требования стационарности режима обслуживания.**

Готовность кластерной системы определяется вероятностью пребывания в момент поступления запроса в одном из работоспособных состояний при условии обеспечения в нем стационарного режима обслуживания запросов. Предполагая, что передача запроса через сеть требует намного меньше времени, чем его выполнение в сервере, возможными перегрузками сети будем пренебрегать. Кроме того, предположим, что перераспределение запросов через сеть позволяет сбалансировать загрузку всех узлов системы вне зависимости от расположения последних.

Вероятность работоспособного состояния системы, предусматривающей перераспределение запросов между двумя кластерами, определим как

$$P = (1 - P_c)P_1 + P_cP_2, \tag{1}$$

где  $P_c$  — вероятность работоспособности сети,  $P_2$  и  $P_1$  — вероятность работоспособности системы кластеров соответственно с перераспределением и без перераспределения запросов через сеть

$$P_1 = \left[ \sum_{i=1}^n \delta_i C_n^i p^i (1-p)^{n-i} \right] \left[ \sum_{j=1}^m \delta_j C_m^j p^j (1-p)^{m-j} \right]. \tag{2}$$

Перераспределение возможно при условии, что в каждом кластере работоспособен хотя бы один узел, используемый для передачи или приема запросов через сеть:

$$\delta_i = \begin{cases} 1, & \text{если } (\Lambda v / i) < 1, \\ 0, & \text{если } (\Lambda v / i) \geq 1, \end{cases} \quad \delta_j = \begin{cases} 1, & \text{если } (\beta \Lambda v / j) < 1, \\ 0, & \text{если } (\beta \Lambda v / j) \geq 1, \end{cases}$$

$$P_2 = \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \delta_{ij} C_n^i C_m^j p^{i+j} (1-p)^{n+m-i-j} \right], \tag{3}$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } (\Lambda v(1+\beta) / (i+j)) < 1, \\ 0, & \text{если } (\Lambda v(1+\beta) / (i+j)) \geq 1. \end{cases}$$

Здесь  $p$  — вероятность работоспособности узла (для восстанавливаемых систем коэффициент готовности узла);  $\Lambda$  — интенсивность потока запросов к одному кластеру;  $v$  — время выполнения запроса в сервере кластера;  $m$  и  $n$  — число узлов (серверов) в кластерах;  $\beta$  — коэффициент, учитывающий соотношение интенсивностей потоков, поступающих на разные кластеры.

Зависимость вероятности работоспособности системы от интенсивности потока запросов при условии стационарности обслуживания представлена на рис. 2. Рис. 2, а соответствует диапазону  $\Lambda=200\text{—}800 \text{ с}^{-1}$ , рис. 2, б —  $\Lambda=50\text{—}300 \text{ с}^{-1}$ , кривые 1 и 2 соответствуют системам с перераспределением и без перераспределения запросов. Расчеты выполнены (здесь и в дальнейшем) при  $m=n=5$ ,  $v=0,01 \text{ с}$ ,  $p=0,95$ ,  $P_c=0,95$ .

На рисунке видно, что перераспределение запросов между кластерами позволяет повысить надежность системы с адаптацией к изменениям потоков нагрузки и накоплению отказов в разных кластерах.

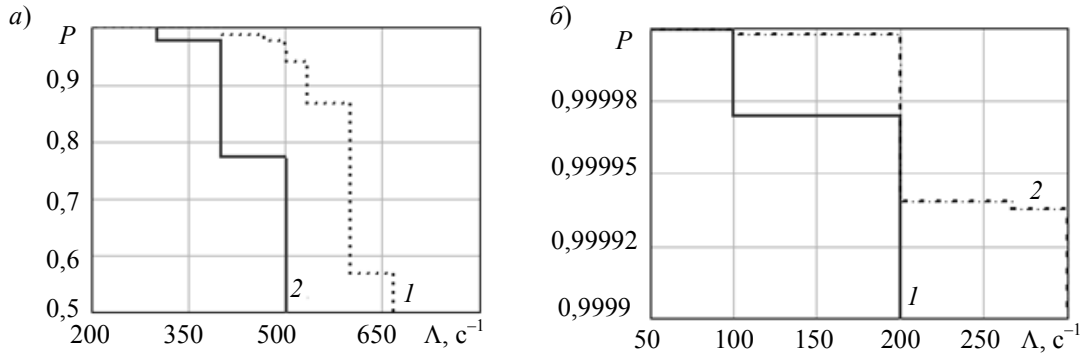


Рис. 2

**Оценка готовности с учетом требования своевременности обслуживания.** Для систем, предусматривающих возможность перераспределения запросов через сеть между двумя кластерами, вероятность работоспособности можно определить по формулам (1)—(3). Для систем, критичных ко времени обслуживания, при оценке коэффициента готовности следует обеспечивать вероятность непревышения заданного времени ожидания запросов в очередях. Условие своевременности обслуживания запросов, формируемых в первом и во втором кластерах, без их перераспределения через сеть задается формулами:

$$\delta_i = \begin{cases} 1, & \text{если } \left(1 - \frac{1}{i} \Lambda v \exp\left(-t\left(\frac{1}{v} - \frac{\Lambda}{i}\right)\right)\right) \geq p_0, \\ 0, & \text{если } \left(1 - \frac{1}{i} \Lambda v \exp\left(-t\left(\frac{1}{v} - \frac{\Lambda}{i}\right)\right)\right) < p_0, \end{cases}$$

$$\delta_j = \begin{cases} 1, & \text{если } \left(1 - \frac{1}{j} \Lambda v \beta \exp\left(-t\left(\frac{1}{v} - \frac{\Lambda \beta}{j}\right)\right)\right) \geq p_0, \\ 0, & \text{если } \left(1 - \frac{1}{j} \Lambda v \beta \exp\left(-t\left(\frac{1}{v} - \frac{\Lambda \beta}{j}\right)\right)\right) < p_0, \end{cases}$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } \left(1 - \frac{\Lambda v (1 + \beta)}{i + j} \exp\left(-t\left(\frac{1}{v} - \frac{\Lambda (1 + \beta)}{i + j}\right)\right)\right) \geq p_0, \\ 0, & \text{если } \left(1 - \frac{\Lambda v (1 + \beta)}{i + j} \exp\left(-t\left(\frac{1}{v} - \frac{\Lambda (1 + \beta)}{i + j}\right)\right)\right) < p_0, \end{cases}$$

$p_0$  — вероятность того, что время ожидания запросов в системе не превышает предельно допустимого значения  $t$ .

Зависимость вероятности работоспособности системы с перераспределением запросов от интенсивности их потока с учетом требования своевременности обслуживания представлена на рис. 3. Кривые 1—4 на рис. 3, а соответствуют системам с перераспределением запросов через сеть для предельно допустимого времени ожидания запросов в системе  $t=0,005, 0,010, 0,015, 0,020$  с; кривые 1—4 на рис. 3, б — случаям, когда  $p_0=0,995, 0,990, 0,950, 0,900$  при  $t=0,01$  с.

Выигрыш по надежности системы  $D = P_1 - P_2$  в результате перераспределения через сеть запросов в системах, критичных к задержкам в очередях, представлен на рис. 4 для  $t=0,01$  (1), 0,015 (2), 0,03 (3) с.

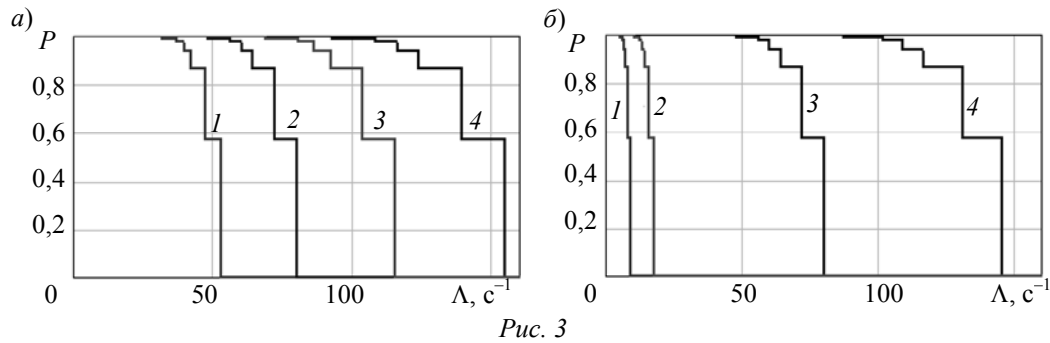


Рис. 3

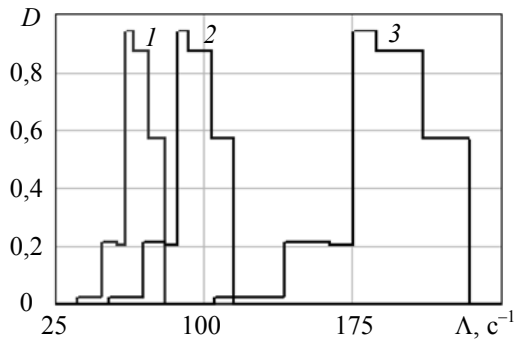


Рис. 4

Приведенные расчеты подтверждают, что перераспределение запросов между кластерами позволяет повысить надежность системы при заданных требованиях к вероятности своевременного обслуживания.

Расчеты проведены в предположении, что перераспределение запросов через сеть обеспечивает идеальную консолидацию ресурсов при достижении их сбалансированной загруженности. В реальной системе на эффективность перераспределения запросов влияет выбор доли запросов, перераспределяемых через сеть, зависящий от интенсивности потоков запросов и от соотношения работоспособных серверов в кластерах.

Условие своевременности обслуживания запросов при их возможном перераспределении между кластерами задается как:

$$\delta_{ij} = 1, \text{ если } (b_{ij} \geq p_0) \wedge (a_{ij} \geq p_0); \text{ иначе } \delta_{ij} = 0.$$

Вероятность того, что задержки в очередях не превосходят  $t$ , для потоков запросов, формируемых первым и вторым кластерами, задается как:

$$b_{ij} = g \left( 1 - \frac{\Lambda v (g + \beta(1-d))}{i} \exp \left( -t \left( \frac{1}{v} - \frac{\Lambda (g + \beta(1-d))}{i} \right) \right) \right) +$$

$$+ (1-g) \left( 1 - \frac{\Lambda v ((1-g) + \beta d)}{j} \exp \left( -(t-u) \left( \frac{1}{v} - \frac{\Lambda ((1-g) + \beta d)}{j} \right) \right) \right),$$

$$a_{ij} = (1-d) \left( 1 - \frac{\Lambda v (g + \beta(1-d))}{i} \exp \left( -(t-u) \left( \frac{1}{v} - \frac{\Lambda (g + \beta(1-d))}{i} \right) \right) \right) +$$

$$+ d \left( 1 - \frac{\Lambda v ((1-g) + \beta d)}{j} \exp \left( -t \left( \frac{1}{v} - \frac{\Lambda ((1-g) + \beta d)}{j} \right) \right) \right),$$

где  $g$  и  $d$  — доли потоков запросов, формируемых и направляемых на обслуживание соответственно в первый и второй кластеры, без их перераспределения через сеть,  $u$  — средняя задержка передачи запроса через сеть.

Зависимость вероятности работоспособности системы с задаваемыми долями ( $g, d$ ) от их интенсивности с учетом вероятностно-заданного требования своевременности обслуживания представлена на рис. 5, а, а от долей потока запросов  $g$  — на рис. 5, б (при задаваемых значениях  $d$ ). На рис. 5, а при  $t=0,01$  с кривые 1—4 соответствуют системам для долей ( $g, d$ ), равных: (0,5; 0,5); (0,8; 0,8); (0,1; 0,1); (0,95; 0,1). На рис. 5, б кривые 1—3 соответствуют доли запросов  $d= 0,5; 0,1; 0,9$ , формируемых и выполняемых во втором кластере. Графики на рис. 5 отражают влияние на уровень надежности системы долей перераспределяемых между кластерами запросов и существование их оптимальных значений, позволяющих достичь максимума надежности системы в результате перераспределения потоков между кластерами.

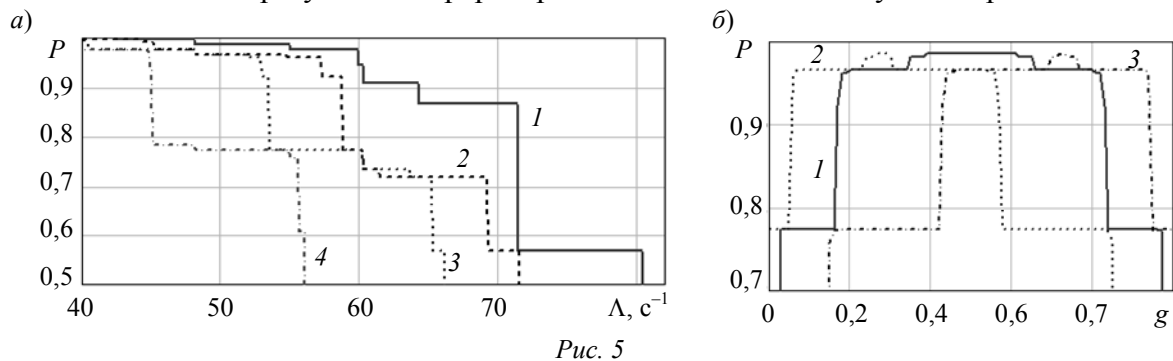


Рис. 5

Исследованы возможности повышения надежности мультикластерных компьютерных систем, содержащих связанные через сеть локальные кластеры, на каждый из которых поступает отдельный поток запросов, за счет перераспределения запросов между любой парой кластеров.

Предложен подход к оценке надежности мультикластерных систем с перераспределением запросов между любыми кластерами при условиях работоспособности системы, заданных с учетом критичности к перегрузкам кластеров и к превышениям предельно допустимого времени ожидания запросов в очередях.

Показана эффективность перераспределения запросов между кластерами для повышения надежности мультикластерных систем. Установлено влияние на надежность системы долей перераспределяемых между кластерами запросов и существование их оптимальных значений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верзун Н. А., Колбанёв М. О., Омелян А. В. Регулируемый множественный доступ в беспроводной сети умных вещей // Омский науч. вестн. 2016. № 4(148). С. 147—151.
2. Татарникова Т. М., Елизаров М. А. Имитационная модель виртуального канала // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16, № 6. С. 1120—1127. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1120-1127.
3. Tatarnikova T., Kolbanev M. Statement of a task corporate information networks interface centers structural synthesis // IEEE EUROCON 2009. St. Petersburg, 2009. Art. no. 5167903. P. 1883—1887. DOI: 10.1109/EURCON.2009.5167903.
4. Aleksanin S. A., Zharinov I. O., Korobeynikov A. G., Perezyabov O. A., Zharinov O. O. Evaluation of chromaticity coordinate shifts for visually perceived image in terms of exposure to external illuminance // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. Vol. 10, N 17. P. 7494—7501.
5. Aliev T. I. The synthesis of service discipline in systems with limits // Communications in Computer and Information Science. 2016. Vol. 601. P. 151—156. DOI: 10.1007/978-3-319-30843-2\_16.
6. Пуха Г. П., Попов П. В., Чемиринко В. П., Жидков А. М. Интеллектуальная поддержка принятия решений в интересах управления связью ВМФ. СПб: ВУНЦ ВМФ „ВМА“, 2015. 280 с.

7. Головкин Ю. Б., Гусаренко А. С. Применение нечетких гиперграфов в моделях генерации web-компонентов // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 9. С. 47—53.
8. Кориунов И. Л. Состояние и концепция развития информационных технологий в сфере сервиса // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 9. С. 7—10.
9. Колбанёв М. О., Татарникова Т. М. Физические ресурсы информационных процессов и технологий // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2014. Т. 14, № 6. С. 113—122.
10. Колбанёв М. О., Кориунов И. Л., Левкин И. М., Микадзе С. Ю. К вопросу информационно-экономической безопасности // Геополитика и безопасность. 2015. Т. 31, № 3. С. 87—91.
11. Богатырев В. А. Информационные системы и технологии. Теория надежности. М.: Юрайт, 2016. 318 с.
12. Богатырев В. А., Богатырев С. В. Резервированная передача данных через агрегированные каналы в сети реального времени // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 9. С. 735—740.
13. Максимцев И. А., Колбанёв М. О., Кориунов И. Л., Левкин И. М., Микадзе С. Ю. О технологических основаниях новой доктрины информационной безопасности Российской Федерации // Новые горизонты глобального мира: сб. научн. тр. СПб: Балт. гос. техн. ун-т, 2015. С. 270—281.
14. Bogatyrev V. A. An interval signal method of dynamic interrupt handling with load balancing // Automatic Control and Computer Sciences. 2000. Vol. 34, N 6. P. 51—57.
15. Bogatyrev V. A. Protocols for dynamic distribution of requests through a bus with variable logic ring for reception authority transfer // Automatic Control and Computer Sciences. 1999. Vol. 33, N 1. P. 57—63.
16. Богатырев В. А., Богатырев А. В., Богатырев С. В. Перераспределение запросов между вычислительными кластерами при их деградации // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 9. С. 54—58.
17. Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., Golubev I. Yu. Optimization and the process of task distribution between computer system clusters // Automatic Control and Computer Sciences. 2012. Vol. 46, N 3. P. 103—111. DOI: 10.3103/S0146411612030029.
18. Богатырев В. А., Богатырев А. В., Голубев И. Ю., Богатырев С. В. Оптимизация распределения запросов между кластерами отказоустойчивой вычислительной системы // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 3(85). С. 77—82.
19. Богатырев В. А., Богатырев А. В. Модель резервированного обслуживания запросов реального времени в компьютерном кластере // Информационные технологии. 2016. Т. 22, № 5. С. 348—355.
20. Богатырев В. А., Богатырев А. В. Надежность функционирования кластерных систем реального времени с фрагментацией и резервированным обслуживанием запросов // Информационные технологии. 2016. Т. 22, № 6. С. 409—416.
21. Богатырев В. А., Богатырев А. В. Функциональная надежность систем реального времени // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 4(86). С. 150—151.
22. Богатырев В. А., Богатырев С. В. Критерии оптимальности многоустойчивых отказоустойчивых компьютерных систем // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2009. № 5(63). С. 92—98.

#### Сведения об авторах

- Владимир Анатольевич Богатырев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра вычислительной техники; E-mail: Vladimir.bogatyrev@gmail.com
- Станислав Владимирович Богатырев** — Компания „Самсунг-электроник“, Сеул; старший инженер; E-mail: realloc@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
информационных систем и технологий  
СПбГЭУ

Поступила в редакцию  
29.06.16 г.

**Ссылка для цитирования:** Богатырев В. А., Богатырев С. В. Надежность мультикластерных систем с перераспределением потоков запросов // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 2. С. 171—177.

**RELIABILITY OF MULTI-CLUSTER SYSTEMS WITH REDISTRIBUTION OF THE FLOW OF REQUESTS****A. Bogatyrev<sup>1</sup>, S. V. Bogatyrev<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: Vladimir.bogatyrev@gmail.com*<sup>2</sup>*Samsung-Electronics, Seoul, Korea*

Distributed computer system under consideration consists of local clusters connected through a network; each cluster receives a separate flow of requests. The possibilities of increasing the reliability of the multi-cluster systems as a result of redistribution of requests between any pair of clusters aimed at adaptation of the system to server failures accumulation and to changes in the flow of requests. Conditions of the system performance are specified with the account for its critical dependence on servers' overload and to excess of maximum allowable waiting time of requests in the queue.

**Keywords:** reliability, multi-cluster system, the redistribution of inquiries, cluster, allowable waiting time

**Data on authors**

- Vladimir A. Bogatyrev** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Computation Technologies; E-mail: Vladimir.bogatyrev@gmail.com  
**Stanislav V. Bogatyrev** — Samsung-Electronics, Seoul; Senior Engineer; E-mail: realloc@gmail.com

**For citation:** *Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V.* Reliability of multi-cluster systems with redistribution of the flow of requests // Journal of Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, N 2. P. 171—177 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-2-171-177