

## РЕЗЕРВИРОВАННОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ЗАПРОСОВ, КРИТИЧНЫХ К ЗАДЕРЖКАМ ОЖИДАНИЯ, В ДВУХУРОВНЕВЫХ СИСТЕМАХ

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

Для двухуровневых вычислительных систем кластерной архитектуры с последовательным выполнением запросов (сначала в узлах кластера нижнего, а затем — верхнего уровня) исследованы возможности резервированного обслуживания копий запросов, критичных к задержкам выполнения. Предложена аналитическая модель для оценки вероятности своевременного выполнения запроса при соблюдении двух условий: суммарное время ожидания в узлах верхнего и нижнего уровней не превышает заданного предельно допустимого значения; за время пребывания запросов в узлах обоих уровней не происходит ошибок и сбоев. Определена эффективность резервированного обслуживания запросов, критичных к суммарной задержке ожидания в очередях узлов нижнего и верхнего уровней. Определены область эффективного применения подхода к резервированному обслуживанию копий запросов и оптимальная кратность копирования запросов, позволяющая максимизировать вероятность их своевременного выполнения.

**Ключевые слова:** кластер, двухуровневая система, вероятность своевременного обслуживания, резервирование, кратность резервирования, система массового обслуживания

При проектировании компьютерных систем ответственного назначения требуется обеспечить высокую структурную и функциональную отказоустойчивость, надежность и безопасность при поддержке высокой доступности к ресурсам хранения и обработки данных [1—6].

Эффективность функционирования вычислительных систем во многом зависит от дисциплины обслуживания, в том числе от назначения приоритетов и распределения запросов [7—9].

Чтобы обеспечить надежность и эффективность вычислительных систем, требуется консолидировать ресурсы обработки и хранения данных при их объединении в кластеры [10].

Высокая надежность и устойчивость функционирования кластерных систем достигается не только при структурном резервировании их ресурсов, но и при резервировании процессов обслуживания запросов. При „широковещательном обслуживании с копированием запроса“ [11, 12] для запросов, поступающих в кластер при наличии незанятых каналов обслуживания, происходит, по сути, резервированное выполнение копий этих запросов. Такой подход, как показано в [11, 12], позволяет снизить среднее время ожидания запросов, но не обеспечивает надежность обслуживания всех запросов, а не только поступающих в случайные моменты, когда в наличии свободные каналы обслуживания (серверы).

Методы организации резервированного обслуживания запросов (вне зависимости от числа занятых каналов в момент их поступления), а также соответствующие аналитические модели предложены и исследованы в работах [13—16]. Возможности резервированного обслуживания для компьютерных систем кластерной архитектуры, критичных к времени ожидания (что важно для систем реального времени), с реализацией очередей запросов в каждом узле исследованы в работах [12—17], а с общей очередью на кластер — в [18]. Резервированные передачи при многопутевой маршрутизации рассмотрены в [19].

Организация резервированного обслуживания связана с необходимостью разрешения технического противоречия: повышается надежность вычислений при необходимости безошибочного выполнения хотя бы для одной копии каждого запроса, но возрастает загрузка узлов, увеличиваются задержки вычислений, а возможно, и нарушается стационарность обслуживания. В то же время, с учетом стохастичности обслуживания, резервированное обслуживание может обеспечить сокращение ожидания хотя бы в одном узле и тем самым повысить вероятность выполнения в требуемый срок хотя бы одной копии запроса. Для разрешения этого противоречия необходимо определить зависимость оптимальной кратности резервирования вычислительного процесса от параметров входного потока и условий обслуживания. Решению этих задач для одноуровневых кластеров посвящены работы [13—17].

Типовым решением при построении центров хранения и обработки данных является организация двухуровневых систем кластерной архитектуры с выделением уровней серверов и систем хранения. Ввиду недостаточной исследованности возможностей резервированного обслуживания запросов в двухуровневых кластерах в настоящей статье ставится задача построения соответствующей аналитической модели. Необходимо выявить возможности повышения эффективности систем при организации резервированного обслуживания запросов сначала в узлах кластера нижнего, а затем — верхнего уровня.

Рассмотрим вычислительную систему кластерной архитектуры, содержащую в кластерах нижнего и верхнего уровней соответственно  $n$  и  $m$  узлов. Для каждого поступающего в систему запроса могут создаваться копии, каждая из которых обслуживается сначала одним из  $n$ , а затем одним из  $m$  узлов. При интенсивности потока запросов  $\Lambda$  и создании  $k$  копий каждого запроса ( $k$  — кратность резервирования запросов) суммарная интенсивность поступления копий запросов на обслуживание в узлы кластера нижнего уровня определяется как  $k\Lambda/n$ , а верхнего — как  $k\Lambda/m$ .

Копии запроса обслуживаются независимо различными узлами сначала кластера нижнего, а затем — верхнего уровня. Каждый узел кластера представим системой массового обслуживания типа  $M/M/1$  [20]. Считается, что резервированное обслуживание выполнено своевременно, если хотя бы для одной из  $k$  копий суммарное время ожидания в очередях (узлах нижнего и верхнего кластера) не превышает предельно допустимого значения  $t_0$ .

После выполнения в узле нижнего уровня запрос передается на обслуживание в назначенный для этого узел верхнего уровня, даже если время пребывания в очереди узла нижнего уровня  $t_0$ .

При построении модели значение  $t_0$  разобьем на  $N$  одинаковых интервалов:  $t=t_0/N$ . Выделим моменты начала отсчета интервалов ожидания  $i=0, 1, \dots, N$ . При этом момент времени  $i=0$  соответствует поступлению копии запроса при незанятом узле и соответственно передаче на обслуживание без ожидания в очереди.

Вероятность того, что время ожидания некоторой копии запросов в узле кластера нижнего уровня соответствует  $i$ -му ( $i=1, 2, \dots, N$ ) интервалу, отсчитываемому от момента времени  $t(i-1)$  до  $it$ , найдем как:

$$B_i = 1 - \frac{k\Lambda}{n} v_1 \exp\left(-it \left( v_1^{-1} - \frac{k\Lambda}{n} \right)\right) - b_i, \quad b_i = \begin{cases} 1 - \frac{k\Lambda}{n} v_1 \exp\left(-t(i-1) \left( v_1^{-1} - \frac{k\Lambda}{n} \right)\right), & \text{if } i \geq 1, \\ 0, & \text{if } i = 0, \end{cases}$$

где  $v_1$  — среднее время выполнения копии запроса в узле кластера нижнего (первого) уровня.

Вероятность  $B_i$  при  $i=0$  соответствует вероятности поступления копии запроса в узел при его занятости

$$B_0 = 1 - \frac{k\Lambda}{n} v_1.$$

Вероятность того, что суммарное время ожидания некоторой копии запроса в очередях узлов кластеров верхнего и нижнего уровней меньше  $t_0$ , определим как:

$$r = \sum_{i=0}^N B_i \left( 1 - \frac{k\Lambda}{m} v_2 \exp \left( - (t_0 - it) \left( \frac{1}{v_2} - \frac{k\Lambda}{m} \right) \right) \right),$$

где  $v_2$  — среднее время выполнения запросов в узлах кластера верхнего уровня.

При независимом выполнении каждой копии в узлах верхнего и нижнего уровней вероятность того, что суммарное время ожидания хотя бы для одной из  $k$  копий будет меньше допустимого предела  $t_0$ , вычислим как

$$R = 1 - (1 - r)^k.$$

Таким образом, определена вероятность своевременного обслуживания хотя бы одной из  $k$  создаваемых копий в предположении безотказности и безошибочности выполнения запросов.

Вероятность безошибочного и своевременного выполнения некоторой копии запроса (когда время ожидания в очередях узлов кластеров верхнего и нижнего уровней меньше предельно допустимого значения  $t_0$ ) определяется как

$$r = \exp(-\lambda_1 T_1 - \lambda_2 T_2) \sum_{i=0}^N B_i \left( 1 - \frac{k\Lambda}{m} v_2 \exp \left( - (t_0 - it) \left( \frac{1}{v_2} - \frac{k\Lambda}{m} \right) \right) \right),$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — суммарная интенсивность сбоев и ошибок в узлах кластеров верхнего и нижнего уровня соответственно, а  $T_1$  и  $T_2$  — среднее время пребывания запроса в узлах нижнего и верхнего уровня, вычисляемое (при представлении узлов кластера системами массового обслуживания типа  $M/M/1$ ) как

$$T_1 = v_1 / (1 - k\Lambda v_1 / n), \quad T_2 = v_2 / (1 - k\Lambda v_2 / m).$$

Если значения интенсивности сбоев и ошибок при ожидании в очереди узла и при вычислениях в нем различаются, то вероятность безошибочного и своевременного выполнения некоторой копии запроса рассчитывается как

$$r = \exp(-\lambda_{11} w_1 - \lambda_{21} w_2 - \lambda_{10} v_1 - \lambda_{20} v_2) \sum_{i=0}^N B_i \left( 1 - \frac{k\Lambda}{m} v_2 \exp \left( - (t_0 - it) \left( \frac{1}{v_2} - \frac{k\Lambda}{m} \right) \right) \right),$$

где  $\lambda_{10}$ ,  $\lambda_{11}$  и  $\lambda_{20}$ ,  $\lambda_{21}$  — суммарная интенсивность сбоев и отказов в узлах кластера нижнего и верхнего уровня при вычислениях и при ожидании в очереди соответственно, а  $w_1$  и  $w_2$  — среднее время ожидания в очередях узлов верхнего и нижнего уровня:

$$w_1 = v_1^2 (k\Lambda / n) / (1 - k\Lambda v_1 / n), \quad w_2 = v_2^2 (k\Lambda / m) / (1 - k\Lambda v_2 / m).$$

Таким образом, получена оценка вероятности своевременного обслуживания запроса с учетом того, что за среднее время пребывания запросов в узлах верхнего и нижнего уровней кластера ошибок и сбоев не возникает. Уточним вероятность своевременного безошибочного выполнения копии запроса с учетом того, что время ожидания запроса в узлах кластера может отличаться от среднего значения. При расчете предельно допустимое время ожидания  $t_0$  разделим на  $N$  интервалов, что позволяет вычислить искомую вероятность как:

$$r = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1-i} \left\{ \left[ 1 - \Lambda_1 v_1 \exp\left(-\frac{it_0}{N}(v_1^{-1} - \Lambda_1)\right) \right] - b_i \left[ 1 - \Lambda_1 v_1 \exp\left(-\frac{t_0}{N}(i-1)(v_1^{-1} - \Lambda_1)\right) \right] \right\} \times \\ \times \left[ \left[ 1 - \Lambda_2 v_2 \exp\left(-\frac{jt_0}{N}(v_2^{-1} - \Lambda_2)\right) \right] - a_j \left[ 1 - \Lambda_2 v_2 \exp\left(-\frac{t_0}{N}(j-1)(v_2^{-1} - \Lambda_2)\right) \right] \right] S_{ij},$$

где  $b_i = \begin{cases} 1, & \text{if } i \geq 1, \\ 0, & \text{if } i = 0, \end{cases} \quad a_j = \begin{cases} 1, & \text{if } j \geq 1, \\ 0, & \text{if } j = 0, \end{cases} \quad \Lambda_1 = k\Lambda/n, \quad \Lambda_2 = k\Lambda/m,$

$$S_{ij} = \exp\left(-\lambda_1\left(v_1 + \frac{it_0}{N}\right)\right) \exp\left(-\lambda_2\left(v_2 + \frac{jt_0}{N}\right)\right).$$

Если значения суммарной интенсивности сбоев и ошибок при ожидании в очередях узлов и при вычислениях в нем различаются, то

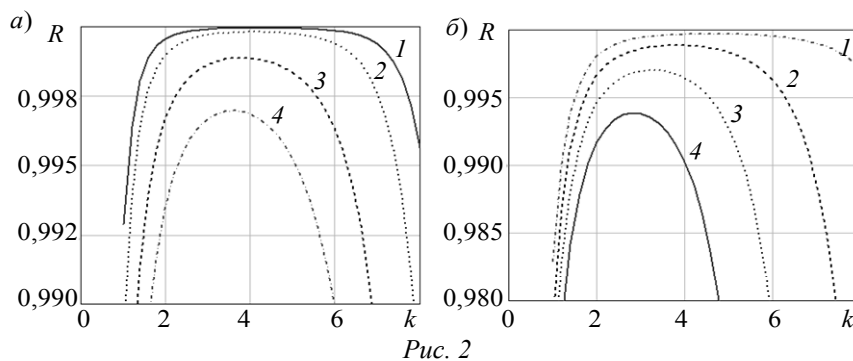
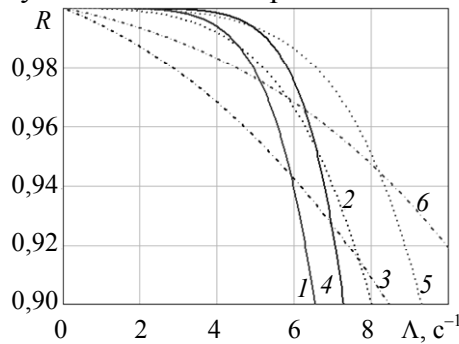
$$S_{ij} = \exp\left(-\lambda_{10}v_1 - \lambda_{20}v_2 - \lambda_{11}\frac{it_0}{N} - \lambda_{21}\frac{jt_0}{N}\right).$$

Определим эффективность резервированного обслуживания запросов в двухуровневом кластере с  $n=m=10$  узлов, среднее время выполнения копий запросов в которых равно  $v=0,3$  с. Расчет проведем для идеального случая в предположении безошибочности вычислений безотказными узлами. Резервированное обслуживание копий запросов в этом случае используется только для повышения вероятности выполнения запросов в установленные сроки. Заметим, что в общем случае резервированное обслуживание позволяет также увеличить надежность вычислительного процесса при отказах узлов и ошибках вычислений.

На рис. 1 представлена зависимость вероятности  $R$  непревышения допустимого времени  $t_0$  от интенсивности поступления запросов  $\Lambda$  ( $t_0=2v$ : 1—3,  $t_0=3v$  с: 4—6;  $k=3$  (1, 4), 2 (2, 5), 1 (3, 6)).

На рис. 2 приведена зависимость вероятности  $R$  от кратности формируемых копий запросов  $k$  (а: 1 —  $t_0=4v$ , 2 —  $3v$ , 3 —  $2v$ , 4 —  $1,5v$  с при  $\Lambda = 3 \text{ с}^{-1}$ ; б: 1 —  $\Lambda = 2,2$ ; 2 — 3; 3 — 3,5; 4 —  $4 \text{ с}^{-1}$  при  $t_0=2v$  с).

Расчеты показали существование области эффективности и оптимальной кратности резервированного обслуживания. При этом эффективность и кратность копирования запросов возрастают при уменьшении загруженности узлов и снижении требований по допустимым задержкам  $t_0$ .



Предложена аналитическая модель двухуровневой вычислительной системы, обеспечивающей последовательное выполнение запросов сначала в узлах кластера нижнего, а затем верхнего уровня и определена эффективность резервированного обслуживания запросов, критичных к суммарной задержке ожидания в очередях узлов обоих уровней.

Проанализировано влияние кратности резервированного обслуживания на вероятность своевременного выполнения запросов с учетом их последовательного резервированного выполнения сначала в кластере нижнего, а затем верхнего уровней.

Показано существование области эффективного резервированного обслуживания копий запросов в двухуровневых кластерах и оптимальной кратности резервирования копий запросов в зависимости от загрузки системы и ограничений на допустимое суммарное время ожидания в очередях узлов кластеров.

Предложенная модель может быть использована при оценке функциональной надежности и выборе дисциплин обслуживания в двухуровневых вычислительных системах, критичных к задержкам обслуживания запросов, в том числе в системах реального времени.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Советов Б. Я., Колбанёв М. О., Татарникова Т. М. Технологии инфокоммуникации и их роль в обеспечении информационной безопасности // Геополитика и безопасность. 2014. № 1(25). С. 69—77.
2. Гатчин Ю. А., Жаринов И. О., Коробейников А. Г. Математические модели оценки инфраструктуры системы защиты информации на предприятии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2(78). С. 92—95.
3. 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 J. of Engineering and Applied Sciences, IET. 2015. Vol. 10, N 17. P. 7494—7501.
4. Korobeynikov A. G., Fedosovsky M. E., Maltseva N. K., Baranova O. V., Zharinov I. O., Gurjanov A. V., Zharinov O. O. Use of Information Technologies in Design and Production Activities of Instrument-Making Plants // Indian J. of Science and Technology, IET. 2016. Vol. 9, N 44. P. 104708.
5. 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.
6. Aliev T. I., Sosnin V. V. Characteristics of Priority Queues with High Utilization Parameter // Distributed computer and communication networks: control, computation, communications (DCCN-2016), IET. 2016. Vol. 3. P. 45—55.
7. Муравьева-Витковская Л. А., Калинин И. В., Махаревс Э. Оценка характеристик функционирования корпоративных информационных систем с неоднородной нагрузкой // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15, № 5(99). С. 863—868.
8. Алиев Т. И., Муравьева-Витковская Л. А. Приоритетные стратегии управления трафиком в мультисервисных компьютерных сетях // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 6. С. 44—48.
9. Алиев Т. И., Махаревс Э. Дисциплины обслуживания на основе матрицы приоритетов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 6(94). С. 91—97.
10. 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.
11. Dudin A. N., Sun' B. A multiserver MAP/PH/N system with controlled broad-casting by unreliable servers // Autom. Control Comput. Sci. 2009. Vol. 43, N 5. P. 247—256.
12. Lee M. H., Dudin A. N., Klimenok V. I. The SM/V/N queueing system with broadcasting service // Math. Probl. in Engineer. 2006. Vol. 2006. Art. no. ID 98171. 18 p.
13. Богатырев В. А., Богатырев А. В. Функциональная надежность резервированного вычислительного процесса реального времени в системах кластерной архитектуры // Автоматика и вычислительная техника. 2015. Т. 49, № 1. С. 64—77.
14. Богатырев В. А., Богатырев С. В. Надежность мультикластерных систем с перераспределением потоков запросов // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 2. С. 171—177.

15. Богатырев В. А., Богатырев А. В. Модель резервированного обслуживания запросов реального времени в компьютерном кластере // Информационные технологии. 2016. Т. 22, № 5. С. 348—355.
16. 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.
17. Богатырев В. А., Богатырев С. В. Резервированное обслуживание в кластерах с уничтожением неактуальных запросов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2017. № 1(151). С. 21—28.
18. Богатырев В. А., Сластихин И. А. Эффективность резервированной передачи данных через агрегированные каналы // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 5. С. 370—376.
19. Богатырев В. А., Паришутин С. А. Модели многопутевой отказоустойчивой маршрутизации при распределении запросов через сеть // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 12. С. 23—28.
20. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем: Учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.

#### 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-электроникс“, Сеул; старший инженер; E-mail: realloc@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
вычислительной техники

Поступила в редакцию  
03.07.17 г.

**Ссылка для цитирования:** Богатырев В. А., Богатырев С. В. Резервированное обслуживание запросов, критичных к задержкам ожидания, в двухуровневых системах // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 10. С. 945—950.

### RESERVED SERVICE OF REQUESTS, CRITICAL TO WAITING DELAYS, IN TWO-LEVEL SYSTEMS

V. 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

The possibility of reserved service of copies of requests critical to delay is studied for duplex computer system of cluster architecture with sequential execution of queries (first at the cluster nodes lower, then at the upper level). An analytical model is presented for estimation of probability of timely service of requests for the case when the total waiting time for upper- and low-level nodes does not exceed a preset limiting value, and no errors and crashes occur during the stay of the queries requests critical to delay both levels. Effectiveness of reserved service is evaluated for requests critical to summarized waiting delay in the upper- and low-level nodes. Areas of effective application of the proposed approach to reserved service copies of requests are described, and optimal multiplicity of the requests copying is determined.

**Keywords:** cluster, two-level system, the probability of timely service, reservation, reservation multiplicity, queuing system

#### 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. Reserved service of requests, critical to waiting delays, in two-level systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 10. P. 945—950 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-10-945-950