

В. А. БОГАТЫРЕВ, А. В. БОГАТЫРЕВ, С. В. БОГАТЫРЕВ

## ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПРОСОВ МЕЖДУ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ КЛАСТЕРАМИ ПРИ ИХ ДЕГРАДАЦИИ

Предложена модель многокластерной системы и определены оптимальные доли запросов, перераспределяемых через сеть между кластерами в процессе их деградации при различной организации распределения запросов.

*Ключевые слова:* отказоустойчивость, распределение запросов, кластер, оптимизация, среднее время пребывания запросов.

**Введение.** Высокая отказоустойчивость, надежность, производительность и защищенность распределенных компьютерных систем, в том числе в сфере сервиса, достигается в результате резервирования и кластеризации ресурсов при оптимизации вычислительного процесса с использованием аппарата теорий массового обслуживания, надежности и принятия решений [1—5].

В распределенных вычислительных системах, в том числе в центрах коммутации, хранения и обработки данных [6—12], объединяющих ряд кластеров, консолидация ресурсов, высокая надежность и производительность может поддерживаться в результате перераспределения запросов внутри кластеров и между ними [12, 13]. Исследования эффективности межкластерного перераспределения запросов, в частности при изменяющейся интенсивности потока запросов, приведенные в работах [14—16], ограничены разделением кластеров на две группы, причем запросы, поступающие в кластеры первой группы, могут перераспределяться через сеть в общедоступные кластеры, относящиеся ко второй группе. Перераспределение запросов к кластерам второй группы и между кластерами первой группы не предусматривается даже в процессе деградации (накопления отказов) системы.

**Объект и задачи исследования.** Рассмотрим распределенную компьютерную систему, содержащую два кластера из  $n$  и  $m$  узлов, соединенные через сеть, которая в исходном состоянии (без накопления отказов) содержит  $L$  резервированных коммутационных узлов, работающих в режиме разделения нагрузки. Запросы, поступающие в первый кластер с интенсивностью  $\lambda$ , через сеть могут перераспределяться на обслуживание во второй кластер, в который также непосредственно или через сеть поступает отдельный входной поток запросов с интенсивностью  $\beta\lambda$ , при этом возможно перераспределение запросов к второму кластеру в первый.

Цель исследования — построение модели и оптимизация процесса перераспределения запросов между кластерами, направленного на снижение отрицательных последствий роста задержек запросов при накоплении отказов узлов кластеров.

В рамках проводимых исследований решаются следующие задачи:

— построение модели массового обслуживания, отражающей перераспределения запросов через сеть при накоплении отказов с учетом возможности перераспределения запросов между любыми кластерами;

— определение системы влияния долей перераспределяемых через сеть запросов на среднее время их пребывания в системе при обеспечении балансировки нагрузки узлов различных кластеров и при минимизации задержек обслуживания запросов, поступающих в различные кластеры;

— определение оптимальных долей запросов, перераспределяемых через сеть между кластерами в процессе их деградации при различной организации распределения запросов

с учетом достижения компромисса по снижению среднего времени пребывания запросов, формируемых в различных кластерах.

**Модель перераспределения запросов к одному кластеру.** Среднее время пребывания запросов при перераспределении их  $g$ -й доли через сеть только от одного кластера, при исправности  $i$  и  $j$  узлов в первом и втором кластерах и в случае исправности  $l$  коммутационных узлов на основе модифицированной модели [14] вычисляется как

$$T_1 = g_{ij} \left( \frac{v_0}{1 - g_{ij} \lambda v_0 / i} \right) + (1 - g_{ij}) \left[ \frac{2v_1}{1 - ((1 - g_{ij}) + b) 2\lambda v_1 / l} + \frac{v_0}{1 - ((1 - g_{ij}) + \beta) \lambda v_0 / j} \right], \quad (1)$$

где  $v_0$  — среднее время выполнения запроса в узле кластера;  $v_1$  — среднее время обслуживания запроса через сеть;  $1 - g_{ij}$  — доля запросов к первому кластеру, перераспределяемых через сеть во второй кластер; если запросы, предназначенные для обслуживания во втором кластере, поступают в него через сеть, то  $b = \beta$ , если же они поступают во второй кластер непосредственно, то  $b = 0$ .

Эффективность перераспределения запросов во многом определяется выбором правил перераспределения. Рассмотрим вариант определения доли перераспределяемых запросов, исходя из баланса загруженности серверов с учетом числа исправных узлов в обоих кластерах. Перераспределение от первого кластера во второй при условии исправности в них  $i$  и  $j$  узлов обеспечивает баланс нагрузки, если  $(g_{ij} / i) \leq ((1 - g_{ij}) + \beta) / j$ , откуда  $g_{ij} = i(1 + \beta) / (i + j)$ , если  $i(1 + \beta) / (i + j) \leq 1$ , иначе  $g_{ij} = 1$ .

Среднее время пребывания запросов, поступающих в первый кластер ( $T_1$ ), а затем перераспределяемых во второй кластер с вероятностью  $1 - g_{ij}$ , вычисляется по формуле (1). Среднее время пребывания запросов, поступающих во второй кластер непосредственно ( $T_2$ ) либо через сеть ( $T_{21}$ ), вычисляется соответственно как

$$T_2 = \frac{v_0}{1 - ((1 - g_{ij}) + \beta) \lambda v_0 / j}, \quad T_{21} = \frac{2v_1}{1 - (2\lambda v_1 / l)(1 - g_{ij} + \beta)} + \frac{v_0}{1 - (\lambda v_0 / j)(1 - g_{ij} + \beta)}.$$

Определим доли перераспределяемых запросов к первому кластеру, исходя из минимизации среднего времени их пребывания. В этом случае для каждого числа работоспособных узлов в первом и втором кластерах определяется оптимальное значение  $1 - g_{ij}$ . При минимизации средних задержек запросов к первому кластеру по критерию  $\min(T_1)$  требуется учесть ограничения

$$(g_{ij} \lambda v_0 / i < 1) \wedge (((1 - g_{ij}) + \beta) 2\lambda v_1 / l < 1) \wedge (((1 - g_{ij}) + \beta) \lambda v_0 / j < 1). \quad (2)$$

Приведенный критерий не предусматривает минимизацию среднего времени пребывания запросов, первоначально адресуемых во второй кластер. При необходимости компромисса по минимизации среднего времени пребывания запросов, направляемых в первый и второй кластеры (с возможным перераспределением запросов только от первого ко второму кластеру), оптимизация проводится по аддитивному критерию  $A = \min(\alpha T_1 + (1 - \alpha) T_2)$  при ограничениях (2); коэффициенты  $\alpha$  и  $(1 - \alpha)$ ,  $0 \leq \alpha \leq 1$ , определяются критичностью задержек запросов, первоначально направляемых в первый и второй кластеры.

**Модель перераспределения запросов к двум кластерам.** Если предполагается возможность перераспределения запросов к первому и второму кластерам, то среднее время пребывания запросов, направляемых в оба кластера, вычисляется как

$$T_1 = \frac{g_{ij}v_0}{1 - (g_{ij} + (1 - d_{ij})\beta)\lambda v_0 / i} +$$

$$+ (1 - g_{ij}) \left[ \frac{2v_1}{1 - ((1 - g_{ij}) + (1 - d_{ij})\beta)2\lambda v_1 / l} + \frac{v_0}{1 - ((1 - g_{ij}) + \beta d_{ij})\lambda v_0 / j} \right];$$

$$T_2 = \frac{d_{ij}v_0}{1 - (\beta d_{ij} + (1 - g_{ij}))\lambda v_0 / j} +$$

$$+ (1 - d_{ij}) \left[ \frac{2v_1}{1 - ((1 - g_{ij}) + (1 - d_{ij})\beta)2\lambda v_1 / l} + \frac{v_0}{1 - ((1 - d_{ij})\beta + g_{ij})\lambda v_0 / i} \right],$$

где  $1 - d_{ij}$  — доля запросов ко второму кластеру, перераспределяемых через сеть.

Оптимизация проводится по аддитивному критерию  $A$  при условии

$$((g_{ij} + (1 - d_{ij})\beta)\lambda v_0 / i < 1) \wedge (((1 - g_{ij}) + (1 - d_{ij})\beta)2\lambda v_1 / l < 1) \wedge (((1 - g_{ij}) + \beta d_{ij})\lambda v_0 / j < 1). \quad (3)$$

**Примеры оптимизации.** Для случая перераспределения запросов только к первому кластеру определим оптимальную долю перераспределяемых через сеть запросов в зависимости от числа  $i$  сохранных после отказов узлов и исправности  $j=m=10$  узлов второго кластера. Оптимизация проводится по аддитивному критерию  $A$  при условии (3). Для оптимизации в системе компьютерной математики MathCAD 15 воспользуемся блоком “Given — Minimize (T, g)”. При расчетах предположим, что  $n=10$ ,  $m=10$ ,  $v_0 = 0,15$  с,  $v_1 = 0,01$  с,  $\beta = 0,6$ ,  $\lambda = 15 \text{ с}^{-1}$ ,  $\alpha = 0,6$  с. Результаты расчетов представлены на рис. 1, где кривая 1 соответствует оптимальной доли запросов, выполняемых первым кластером, без их перераспределения через сеть, при  $j=10$ ; 2 — среднему времени пребывания запросов, поступающих в первый кластер и перераспределяемых на обслуживание во второй кластер с вероятностью  $(1 - g_{ij})$ ; 3 и 4 — среднему времени пребывания запросов, поступающих в первый кластер, при их перераспределении во второй кластер с вероятностями  $(1 - g)=0,2$  и  $(1 - g)=0$  соответственно без учета реального числа отказавших узлов; 5 — среднему времени пребывания  $T_2$  запросов во втором кластере при оптимальной доле  $(1 - g_{ij})$  перераспределяемых запросов; 6 и 7 — среднему времени  $T_2$  при  $(1 - g)=0,2$  и  $(1 - g)=0$  соответственно.

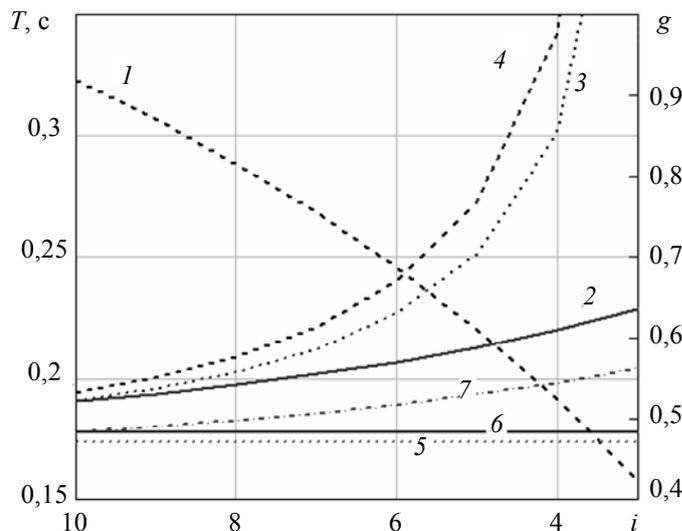


Рис. 1

Для случая перераспределения запросов к двум кластерам определим оптимальные доли перераспределяемых через сеть запросов в зависимости от числа  $i$  узлов, сохранных после

отказов узлов первого кластера. Результаты расчетов для  $v_0 = 0,15$  с,  $v_1 = 0,01$  с,  $\beta = 0,5$ ,  $\lambda = 15$  с<sup>-1</sup>,  $\alpha = 0,5$  с представлены на рис. 2, где кривые 1 и 2 соответствуют оптимальным долям запросов, выполняемых первым и вторым кластерами, без их перераспределения через сеть, при работоспособности  $j=5$  узлов второго кластера; установлено, что при  $j=10$  и  $\beta=0,5$  перераспределение от второго кластера нецелесообразно, а оптимальной доли запросов, выполняемых первым кластером без их перераспределения через сеть, соответствует кривая 3; зависимости  $T(i)$  для запросов, поступающих в первый и второй кластеры, при  $j=10$  соответствуют кривые 4, 5, а при  $j=5$  — кривые 6, 7.

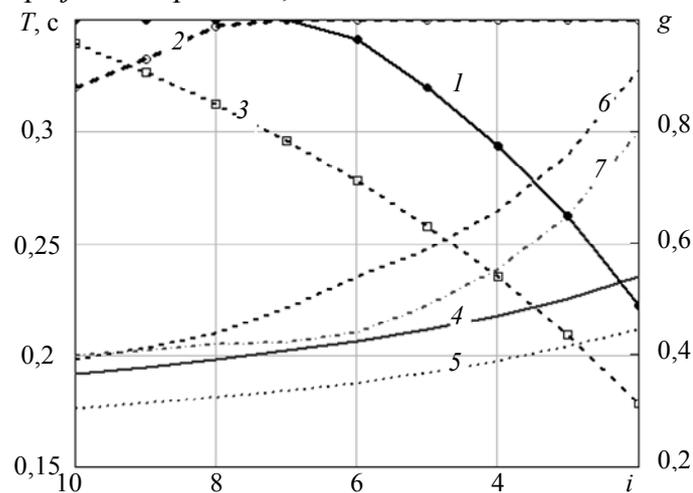


Рис. 2

**Заключение.** Предложена модель многокластерной системы с перераспределением запросов между кластерами через сеть, учитывающая процесс деградации системы при накоплении отказов. Проведенные расчеты подтверждают эффективность использования межкластерного перераспределения запросов в целях снижения влияния накопления отказов на увеличение задержек обслуживания запросов в системе кластеров.

Приведенные результаты показывают наличие оптимальной доли запросов, перераспределяемых через сеть, при ее зависимости от соотношения отказавших узлов различных кластеров. Установлено, что при изменении соотношения числа отказавших узлов требуется соответствующее адаптивное изменение долей перераспределяемых запросов, причем отклонение этих величин от оптимальных значений приводит к росту задержек обслуживания запросов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колбанёв М. О., Татарникова Т. М., Воробьёв А. И. Модель обработки клиентских запросов // Телекоммуникации. 2013. № 9. С. 42—47.
2. Пуха Г. П. Методология формирования и реализации систем интеллектуальной поддержки принятия решений. СПб: СММО-Пресс, 2012. 337 с.
3. Попова Е. В. Выбор варианта системы защиты информации по критерию обеспечения конкурентоспособности предприятия // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 2 (90). С. 150—160.
4. Головкин Ю. Б., Миронов В. В., Ахметшин Р. Р. Концепция объектно-ориентированных иерархических ситуационных моделей автоматизированного управления // Управление сложными техническими системами: Межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2000.
5. Щеглов К. А., Щеглов А. Ю. Способ задания и хранения прав доступа субъектов к файловым объектам // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 12. С. 45—49.
6. Колбанёв М. О., Татарникова Т. М., Воробьёв А. И. Модель балансировки нагрузки в вычислительном кластере центра обработки данных // Информационно-управляющие системы. 2012. Т. 3. № 58. С. 37—41.

7. Колбанёв М. О., Нестеренко В. Д., Воробьёв А. И. Анализ характеристик инфокоммуникационной системы с неординарным потоком заявок на обслуживание // Тр. учебных заведений связи. 2006. № 175. С. 81—92.
8. Богатырев В. А. Ускоренный метод децентрализованного кодового управления множественным доступом с контролем канала // Управляющие системы и машины. 2000. № 1. С. 92—96.
9. Поляков В. И., Немолочнов О. Ф., Зыков А. Г., Меженин А. В. Неравенства-отношения и выбор альтернативных решений управления вычислительными процессами // Информационные технологии. 2012. № 5. С. 16—19.
10. Поляков В. И., Скорубский В. И. Преобразование моделей алгоритмов // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 10. С. 41—46.
11. Коришунов И. Л., Котельникова В. Н., Уткин В. В. Структура и основные направления деятельности сетевого ресурсного центра для обучения персонала сферы Олимпийского гостеприимства в г. Сочи // Современные технологии обучения персонала для сферы обслуживания крупномасштабных мероприятий. СПб: СПбГУСЭ, 2012. С. 242—267.
12. Богатырев В. А. К оценке эффективности динамического распределения запросов в отказоустойчивых управляющих вычислительных системах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2002. № 9. С. 10—12.
13. Богатырев В. А. К сегментации магистрали многомашинных вычислительных систем динамического распределения запросов // Электронное моделирование. 1995. № 2. С. 27—32.
14. 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. N 3. P. 103—111.
15. Богатырев В. А., Богатырев С. В., Богатырев А. В. Функциональная надежность вычислительных систем с перераспределением запросов // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 10. С. 53—57.
16. Богатырев В. А., Богатырев А. В., Голубев И. Ю., Богатырев С. В. Оптимизация распределения запросов между кластерами отказоустойчивой вычислительной системы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 3 (85). С. 77—82.

#### *Сведения об авторах*

- |   |  |
|---|--|
| <b>Владимир Анатольевич Богатырев</b>   | — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра вычислительной техники, Санкт-Петербург; Санкт-Петербургский государственный экономический университет, кафедра прикладных информационных технологий;<br>E-mail: Vladimir.bogatyrev@gmail.com |
| <b>Анатолий Владимирович Богатырев</b>  | — аспирант; Университет ИТМО, кафедра вычислительной техники, Санкт-Петербург; E-mail: Vladimir.bogatyrev@gmail.com  |
| <b>Станислав Владимирович Богатырев</b> | — ООО АйТи Хаус, Санкт-Петербург; главный инженер;<br>E-mail: Vladimir.bogatyrev@gmail.com   |

Рекомендована кафедрой  
прикладных информационных  
технологий СПбГЭУ

Поступила в редакцию  
28.04.14 г.