

Таким образом, в настоящей работе получены следующие результаты:

- 1) с помощью имитационных экспериментов показано, что при беспriorитетной дисциплине обслуживания заявки разных типов могут иметь разные средние значения времени ожидания в очереди, а также разные вариации этого времени;
- 2) получена численная оценка нижней границы для показателей ожидания низконагружающих потоков заявок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bolch G., Greiner S., Meer H., Triverdi K. Queueing networks and Markov chains: modeling and performance evaluation with computer science applications. NY: John Wiley & Sons, 1998.
2. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. М.: Мир, 1979. 600 с.
3. Соснин В. В. Свойства беспriorитетной дисциплины обслуживания в системах вида GI/G/1 // Тр. 5-й Всерос. науч.-практ. конф. „Имитационное моделирование. Теория и практика“ (ИММОД 2011). СПб, 2011. Т. 2. С. 355—360.

#### Сведения об авторе

**Владимир Валерьевич Соснин**

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра вычислительной техники; E-mail: vsosnin@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
вычислительной техники

Поступила в редакцию  
23.12.13 г.

УДК 681.3

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

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ В КЛАСТЕРАХ ПРИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ АКТИВНОСТИ ИСТОЧНИКОВ ЗАПРОСОВ

Предложено решение задачи динамической оптимизации перераспределения запросов через сеть в общедоступный кластер, выполняемой с целью минимизации среднего времени пребывания запросов и позволяющей учитывать задержки отображения числа активных узлов, формирующих запросы.

**Ключевые слова:** отказоустойчивость, распределение запросов, кластер, оптимизация, адаптация.

**Введение.** Распределенные вычислительные системы должны характеризоваться минимальными задержками обслуживания при максимальных надежности, отказоустойчивости и производительности системы [1—3]. Эффективность распределенных компьютерных систем достигается при их адаптации к отказам, к изменениям параметров потоков запросов и состояний очередей узлов [3—5], в том числе в результате динамического перераспределения запросов между узлами компьютерной системы [4—9].

Адаптивное перераспределение запросов в реальном времени приводит, с одной стороны, к балансировке загрузки и росту эффективности системы (уменьшению среднего времени пребывания запросов), а с другой — к ее падению из-за дополнительных задержек, связанных с отображением состояний узлов. Это и определяет необходимость оптимизации процесса перераспределения запросов в вычислительных системах, включая объединение через распределенную инфраструктуру множества ресурсов, доступных из любой точки системы.

**Постановка задачи.** Рассмотрим распределенную компьютерную систему (рис. 1), состоящую из  $n+1$  вычислительных узлов нижнего уровня и  $m$  серверов, объединяемых в общедоступный кластер на верхнем уровне. Кластер обеспечивает возможность адаптации системы к отказам и перегрузкам отдельных компьютерных узлов нижнего уровня. Перераспределение нагрузки между узлами нижнего уровня не предусматривается. Связь между компьютерами кластеров осуществляется через  $N$  резервированных коммутационных узлов.

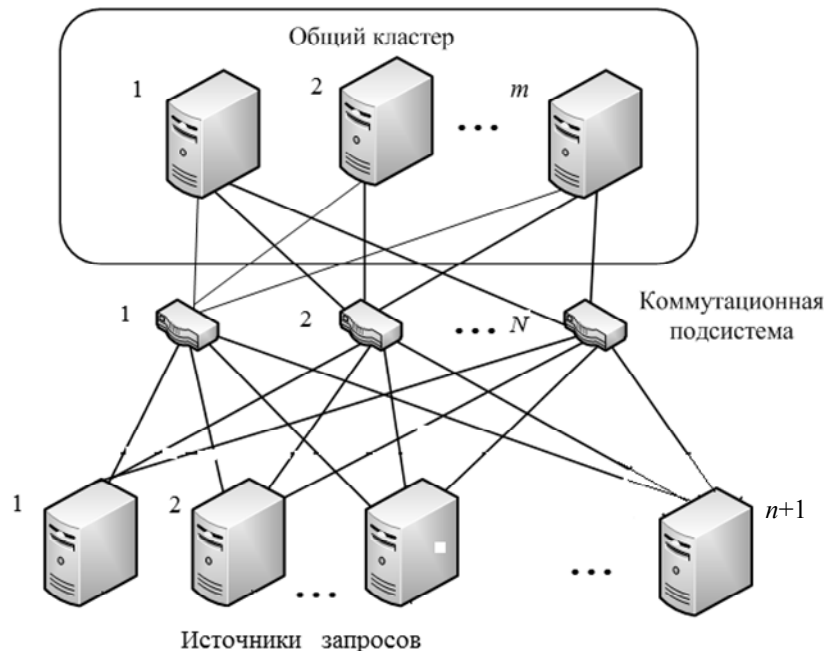


Рис. 1

Для решения задачи оптимизации необходимо найти долю запросов, перераспределяемых от каждого узла нижнего уровня через сеть в кластер, при которой достигается минимальное среднее время пребывания запросов в системе. Задача оптимизации процесса распределения запросов может решаться до начала функционирования системы с учетом априорных сведений о средних характеристиках потока запросов (статическая оптимизация) или динамически в процессе функционирования с учетом текущих измеряемых (наблюдаемых) состояний узлов и характеристик входного потока.

При оптимизации будем считать, что задано среднее время выполнения запросов в компьютерных узлах нижнего уровня, в коммутационных узлах и в серверах общедоступного кластера  $v_0, v_1, v_2$  [6].

Выделим некоторый узел нижнего уровня, обслуживающий поток запросов. Будем считать, что каждый из  $n$  остальных компьютерных узлов нижнего уровня может находиться либо в активном состоянии, когда в нем формируется поток запросов с интенсивностью  $\Lambda$ , либо в пассивном (запросы не формируются). Будем считать известным среднее время нахождения узла нижнего уровня в активном  $t_1$  и пассивном состоянии  $t_2$ .

При статической оптимизации определяется доля перераспределяемых через сеть запросов вне зависимости от числа активных узлов нижнего уровня в момент распределения запросов, а при динамической эта доля определяется с учетом активности компьютерных узлов нижнего уровня.

При динамической оптимизации необходимо определить число активных узлов нижнего уровня в момент распределения запросов, что приведет к дополнительным временным издержкам.

**Оптимизация распределения запросов**

*Вариант 1.* Оптимизация по среднему значению активных компьютерных узлов (источников запросов).

Критерием оптимизации служит минимальное среднее время пребывания запросов при среднем числе активных узлов  $K$  [6]:

$$\min_g \left\{ g \left( \frac{v_0}{1-g\Lambda v_0} \right) + (1-g) \left( \frac{2v_1}{1-\frac{(1-g)(1+K)2\Lambda v_1}{N}} + \frac{v_2}{1-\frac{(1-g)(1+i)\Lambda v_2}{m}} \right) \right\}.$$

При оптимизации определяется доля запросов  $g$ , обслуживаемых в сформировавшем их узле, и их доля  $1-g$ , перераспределяемая в общедоступный кластер, с учетом ограничений:

$$g\Lambda v_0 < 1, \left[ \frac{(1-g)(1+K)2\Lambda v_1}{N} \right] < 1, \left[ \frac{(1-g)(1+i)\Lambda v_2}{m} \right] < 1, \tag{1}$$

где  $K = \sum_{i=1}^n i C_n^i k^i (1-k)^{n-i}$ ,  $k = t_1 / (t_1 + t_2)$ ,  $C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$ .

*Вариант 2.* Оптимизация по математическому ожиданию среднего времени пребывания запросов с учетом вероятности активности  $i$  узлов нижнего уровня при  $i = \overline{0, \dots, n}$  в случае усредненной доли  $g$  перераспределяемых через сеть запросов [6] при ограничениях (1):

$$\min_g \left( \sum_{i=1}^n C_n^i k^i (1-k)^{n-i} \left[ g \left( \frac{v_0}{1-g\Lambda v_0} \right) + (1-g) \left( \frac{2v_1}{1-\frac{(1-g)(1+i)2\Lambda v_1}{N}} + \frac{v_2}{1-\frac{(1-g)(1+i)\Lambda v_2}{m}} \right) \right] \right).$$

*Вариант 3.* Адаптивная оптимизация с определением в процессе функционирования системы доли перераспределяемых запросов исходя из числа активных узлов нижнего уровня в момент распределения запросов.

Доля перераспределяемых через сеть запросов  $g_i$  определяется для каждого значения  $i$  числа активных узлов нижнего уровня. Оптимизация проводится с учетом задержек, связанных с определением числа активных узлов по критерию:

$$\min_{g_i} \left[ g_i \left( \frac{v_0}{1-g_i\Lambda v_0} \right) + (1-g_i) \left( \frac{2v_1}{1-\frac{(1-g_i)(1+i)2\Lambda v_1 + (\lambda i + \mu(n-i))v_3}{N}} + \frac{v_2}{1-\frac{(1-g_i)(1+i)\Lambda v_2}{m}} \right) \right],$$

при ограничениях:

$$g_i\Lambda v_0 < 1, \left[ \frac{(1-g_i)(1+i)2\Lambda v_1 + (\lambda i + \mu(n-i))v_3}{N} \right] < 1, \left[ \frac{(1-g_i)(1+i)\Lambda v_2}{m} \right] < 1,$$

где  $\lambda=1/t_1$ ,  $\mu=1/t_2$ ,  $v_3$  — среднее время передачи пакета, сообщающего об изменении активности узлов. Процедура определения изменений активности узлов может быть совмещена с процедурами доступа к сети [7—11].

**Пример оптимизации.** Проведем оптимизацию распределения запросов для  $n=10$  шт.,  $N=1$  шт.,  $m=6$  шт.;  $v_0=0,15$  с,  $v_1=0,005$  с,  $v_2=0,15$  с.

В результате расчетов (в системе MathCad 15) установлено, что для вариантов 1 и 2 оптимальны значения  $g=0,556$  и  $0,598$ .

Для варианта 3 зависимость оптимальной доли  $g_i$  от числа активных узлов нижнего уровня  $i$  при  $v_3=0,015$  представлена кривой 1 на рис. 2, кривые 2 и 3 соответствуют среднему времени пребывания запросов при оптимизации по вариантам 1 и 2; кривые 4 и 5 — среднему времени пребывания при адаптивной оптимизации при  $v_3=0,015$  и  $0,045$ .

Зависимость среднего времени пребывания запросов от числа активных узлов нижнего уровня  $i$  при статической  $T_1(i)$  [6] и динамической оптимизации  $T_2(i)$  определяется как

$$T_1(i) = g \left( \frac{v_0}{1 - g\Lambda v_0} \right) + (1 - g) \left( \frac{2v_1}{1 - \frac{(1-g)(1+i)2\Lambda v_1}{N}} + \frac{v_2}{1 - \frac{(1-g)(1+i)\Lambda v_2}{m}} \right),$$

$$T_2(i) = g_i \left( \frac{v_0}{1 - g_i\Lambda v_0} \right) + (1 - g_i) \left( \frac{2v_1}{1 - \frac{(1-g_i)(1+i)2\Lambda v_1 + (\lambda i + \mu(n-i))v_3}{N}} + \frac{v_2}{1 - \frac{(1-g_i)(1+i)\Lambda v_2}{m}} \right).$$

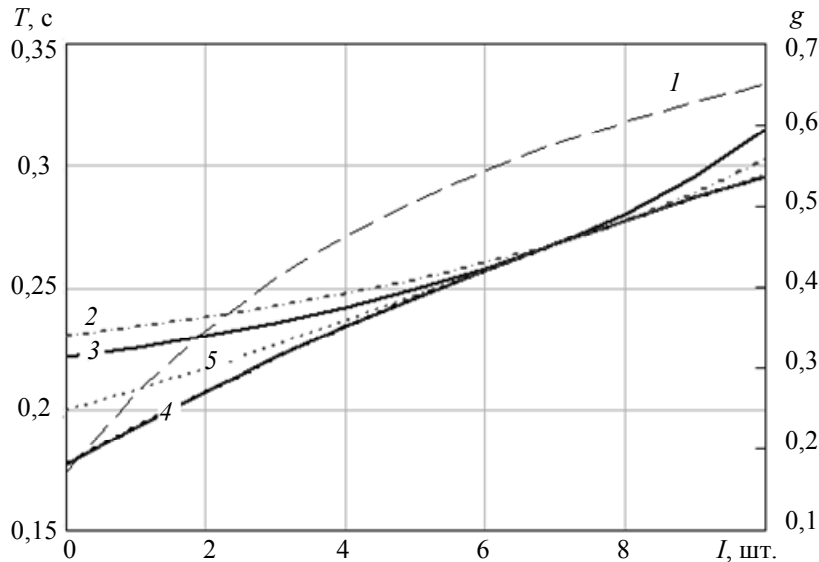


Рис. 2

Из рис. 2 видно, что при адаптивной оптимизации по мере роста суммарной интенсивности формируемого потока запросов возрастает и доля запросов, перераспределяемых через сеть в общедоступный кластер. Проведенные расчеты показали эффективность адаптивной оптимизации, причем эта эффективность может снижаться при возрастании временных издержек на определение числа активных узлов нижнего уровня. Граница этой эффективности может быть найдена из неравенства

$$\sum_{i=1}^n C_n^i k^i (1-k)^{n-i} T_2(i) \leq \sum_{i=1}^n C_n^i k^i (1-k)^{n-i} T_1(i).$$

**Заключение.** Поставлена и решена задача динамической оптимизации перераспределения запросов через сеть с учетом задержек определения числа активных узлов, формирующих запросы.

Показано существование границы эффективности динамической оптимизации при перераспределении запросов в зависимости от задержек, связанных с определением числа активных узлов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clark T. The New Data Center. New technologies are radically reshaping the data center. Brocade Bookshelf, San Jose, 2010.
2. Shooman M. Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis, and Design. John Wiley & Sons, Inc., 2002.
3. Алиев Т. И. Задачи синтеза систем с потерями // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 10. С. 57—63.
4. Богатырев В. А. Мультипроцессорные системы с динамическим перераспределением запросов через общую магистраль // Изв. вузов. Приборостроение. 1985. № 3. С. 33—38.

5. Богатырев В. А. К повышению надежности мультимикропроцессорных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 1982. № 8. С. 93—96.
6. Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., Golubev I. Yu. Optimization and the process of task distribution between computer system cluster // Automatic Control and Computer Sciences. 2012. Vol. 46. N 3. С. 103—111.
7. Богатырев В. А. Счетно-эстафетный метод множественного доступа с динамическим отображением конфигурации локальных сетей магистральной топологии // Автоматика и вычислительная техника. 1992. № 2. С. 50—54.
8. Богатырев В. А. Маркерные методы доступа к распределенным ресурсам вычислительных систем // Автоматика и вычислительная техника. 2000. № 5. С. 71—80.
9. Богатырев В. А. Интервально-сигнальный метод динамического распределения запросов с балансировкой нагрузки системы // Автоматика и вычислительная техника. 2000. № 6. С. 73—81.
10. Богатырев В. А. Интервально-сигнальный приоритетный метод множественного доступа к магистрали // Электронное моделирование. 1990. № 3. С. 14—17.
11. Богатырев В. А. Децентрализованное кодовое управление динамическим распределением запросов к рассредоточенным ресурсам отказоустойчивых вычислительных систем // Информационные технологии. 2000. № 5. С. 13—17.

**Сведения об авторах**

- Владимир Анатольевич Богатырев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра вычислительной техники;  
E-mail: Vladimir.bogatyrev@gmail.com
- Анатолий Владимирович Богатырев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра вычислительной техники;  
E-mail: Vladimir.bogatyrev@gmail.com
- Станислав Владимирович Богатырев** — Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра безопасности информационных систем; младший научный сотрудник;  
E-mail: Vladimir.bogatyrev@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
вычислительной техники

Поступила в редакцию  
23.12.13 г.