

УДК 004.75

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАПРОСОВ В СИСТЕМЕ КЛАСТЕРОВ ПРИ СОЧЕТАНИИ АНАЛИТИЧЕСКОГО И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

И.Ю. Голубев, В.А. Богатырев

Предложена многоэтапная процедура оптимизации распределения потока запросов между кластерами вычислительной системы, использующая аналитическое и имитационное моделирование. Процедура позволяет найти оптимальную долю перераспределяемого потока запросов при различных законах распределения интервалов между поступающими в систему запросами и времени их обслуживания.

Ключевые слова: распределение нагрузки, имитационное моделирование, кластер, оптимизация.

Введение

Основными требованиями, предъявляемыми к распределенным вычислительным системам, являются их надежность, отказоустойчивость и производительность [1]. Высокая отказоустойчивость и производительность распределенных систем достигается в результате эффективного распределения запросов (нагрузки) между их узлами [2–8]. В распределенных вычислительных системах, объединяющих множество кластеров, перераспределение запросов может осуществляться между узлами как одного, так и различных кластеров, соединенных через сеть. Во втором случае увеличиваются издержки на межмашинный обмен, но возрастают возможности балансировки загрузки и сохранения работоспособности при накоплении отказов, что обуславливает актуальность оптимизации процесса распределения запросов и разработки соответствующих процедур оптимизации.

Λ

Постановка задачи

Цель представленной работы – разработка процедуры оптимизации распределения запросов между кластерами вычислительной системы при различных законах распределения интервалов между поступающими в систему запросами и времени их обслуживания.

Структура исследуемой распределенной вычислительной системы кластеров представлена на рис. 1.

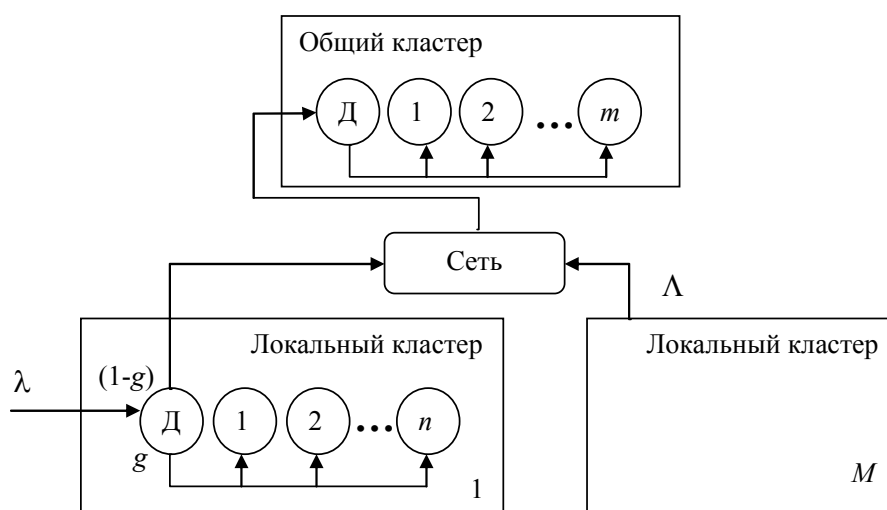


Рис. 1. Структура распределенной вычислительной системы

В системе имеется M локальных кластеров (по n серверов в каждом) и группа из m общедоступных серверов (общий кластер), обеспечивающая возможность адаптации системы к перегрузкам отдельных локальных кластеров в случае отказов входящих в их состав серверов или к возрастанию потока запросов к локальным кластерам. Компьютеры кластеров связывает сеть, включающая N резервированных коммутационных узлов (маршрутизаторов или коммутаторов). Распределение потока запросов осуществляется диспетчерами (D), направляющими запросы на выполнение внутри кластера или через сеть в общий кластер.

Ставится задача оптимизации процесса распределения потока запросов между кластерами при различных законах распределения интервалов между поступающими в систему запросами и времени их обслуживания. В результате оптимизации распределения запросов для заданной структуры системы требуется найти их долю g_i , перераспределяемую через сеть в общий кластер, при которой достигается минимум времени пребывания запросов T в системе кластеров. Поиск проводится для заданных вариантов значений интенсивностей запросов (λ_i) и их вероятностей (b_i).

Оптимизация процесса распределения запросов

При проектировании вычислительных систем применяется как аналитическое, так и имитационное моделирование. Результаты аналитического моделирования при законах распределения интервалов между поступающими в систему запросами и времени их обслуживания общего вида могут иметь существенную погрешность, а имитационное моделирование не ориентировано на решение оптимизационных задач и требует значительного времени и ресурсов компьютера для проведения имитационных экспериментов [9].

Для решения оптимизационной задачи, если законы распределения интервалов между поступающими в систему запросами и времени их обслуживания – не экспоненциальные, предлагается комбинированный подход, предполагающий совместное применение аналитических и имитационных моделей.

В рамках комбинированного подхода разработана процедура оптимизации распределения запросов, включающая следующие этапы:

- предварительное определение оптимальной доли перераспределяемых через сеть запросов в предположении простейшего потока запросов и экспоненциального распределения времени обслуживания с использованием аналитического моделирования;
- уточнение результатов оптимизации на основе проведения имитационных экспериментов в области значений, полученных в ходе аналитического моделирования.

Если законы распределения интервалов между поступающими в систему запросами и времени их обслуживания известны, то эксперименты проводятся в условиях соответствующих законов распределения; в противном случае эксперименты проводятся при варьировании законов распределения нагрузочных параметров; решение определяется по среднему результату или по известным критериям принятия решений.

Аналитическая модель системы с перераспределением запросов

При оптимизации на основе аналитического моделирования воспользуемся результатами работы [4], в которой показана эффективность динамической оптимизации процесса перераспределения запросов между кластерами вычислительной системы.

Критерий оптимальности определен как

$$T = \min_{(g_i)} \sum_{i=0}^h b_i T(g_i, \lambda_i),$$

$$T(g_i, \lambda_i) = g_i \left(\frac{v_0}{1 - g_i \lambda_i v_0 / n} \right) + (1 - g_i) \left(\frac{2v_1}{1 - ((1 - g_i) + \beta) 2\lambda_i v_1 / N} + \frac{v_2}{1 - ((1 - g_i) + \beta) \lambda_i v_2 / m} \right).$$

Здесь h – число возможных значений интенсивности входного потока; v_0, v_1, v_2 – средние времена выполнения запросов в серверах локального кластера, в коммутационных узлах и в серверах общего кластера. Нагрузка общедоступного кластера от множества локальных кластеров моделировалась потоком запросов с интенсивностью $\Lambda_i = \beta \lambda_i$, N – число (кратность резервирования) коммутационных узлов в сети, через которые возможно перераспределение запросов.

Оптимизация проводилась для $i = 0, 1, \dots, h$ и при условии стационарности:

$$(g_i \lambda_i v_0 / n < 1) \wedge (((1 - g_i) + \beta) 2\lambda_i v_1 / N < 1) \wedge (((1 - g_i) + \beta) \lambda_i v_2 / m < 1).$$

В предположении простейшего потока запросов и экспоненциального распределения времени обслуживания определяется зависимость значений доли перераспределяемых через сеть запросов g_i от интенсивности запросов λ_i , при которой среднее время пребывания запросов в системе минимально [4].

В результате оптимизации на аналитической модели найден [4] вектор значений доли перераспределяемых запросов (0,721; 0,494; 0,456; 0,446; 0,446; 0,451).

Построение имитационной модели

На втором этапе оптимизации в среде AnyLogic 6 построена имитационная модель рассматриваемой системы, изображенная на рис. 2.

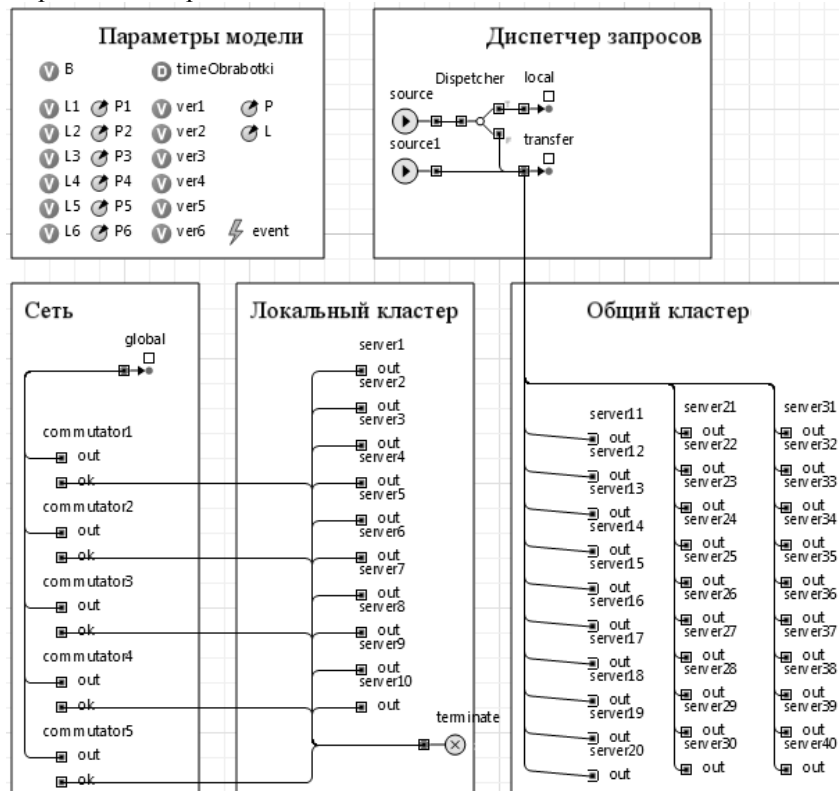


Рис. 2. Создание имитационной модели

Серия оптимизационных экспериментов проведена в области значений, полученных в результате аналитического моделирования, при следующих законах распределения интервалов между поступающими в систему запросами: экспоненциальный закон; равномерный закон; закон Эрланга 2-го порядка; гиперэкспоненциальный закон (с коэффициентом вариации 1,202).

Оптимизация проведена для $n = 10$ шт., $N = 5$ шт., $m = 30$ шт.; $v_0 = 10$ с, $v_1 = 1$ с, $v_2 = 10$ с, $\beta = 1$. Варианты возможных значений интенсивностей запросов и их вероятности представлены векторами (0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,1) и (0,1; 0,1; 0,15; 0,15; 0,2; 0,3), а вероятности соответствия закона распределения интервалов между поступающими в систему запросами моделируемому закону – (0,2; 0,25; 0,25; 0,3).

Сравнение аналитической и имитационной моделей

Результаты анализа моделей при экспоненциальном распределении интервалов между поступающими в систему запросами и времени их обслуживания представлены на рис. 3, а, б. Кривые 1 соответствуют интенсивности входного потока $0,1 \text{ с}^{-1}$, кривые 2 – $0,3 \text{ с}^{-1}$, кривые 3 – $0,5 \text{ с}^{-1}$, кривые 4 – $0,7 \text{ с}^{-1}$, кривые 5 – $0,8 \text{ с}^{-1}$. Из представленных графиков видно, что существует оптимальное значение доли запросов (g), перераспределяемых через сеть на выполнение в общий кластер, и для построенных моделей оно совпадает.

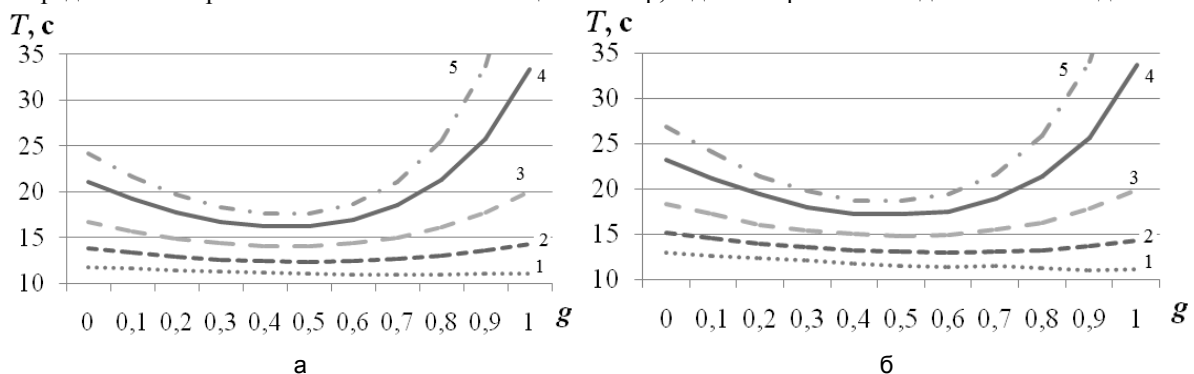


Рис. 3. Среднее время пребывания запроса в системе: аналитическая модель (а) и имитационная модель (б). Кривые 1–5 соответствуют интенсивности входного потока $0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,8 \text{ с}^{-1}$.

Результаты второго этапа оптимизации представлены в таблице. Согласно критерию Гермейера, оптимальным является решение в строке 4.

№	Вектор значений доли перераспределяемых запросов (g_i)	Среднее время пребывания запросов в системе T , с				Результат (критерий Гермейера)
		Закон распределения интервалов между поступающими в систему запросами				
		Экспоненциальный	Равномерный	Эрланга	Гиперэкспоненциальный	
1	(0,716; 0,508; 0,454; 0,453; 0,447; 0,464)	20,985	20,748	20,786	21,433	6,4299
2	(0,72; 0,484; 0,464; 0,47; 0,445; 0,458)	21,101	20,722	20,917	21,378	6,4134
3	(0,738; 0,576; 0,452; 0,455; 0,457; 0,459)	21,013	20,807	20,76	21,369	6,4107
4	(0,724; 0,505; 0,485; 0,467; 0,468; 0,475)	21,052	20,739	20,883	21,367	6,4101

Таблица. Результаты второго этапа оптимизации

На рис. 4 показаны отклонения ϵ результатов, полученных в ходе имитационных экспериментов, от результатов аналитического моделирования: кривая 1 соответствует серии экспериментов для экспоненциального закона распределения интервалов между поступающими в систему запросами; кривая 2 – для равномерного закона; кривая 3 – для закона Эрланга, кривая 4 – для гиперэкспоненциального закона.

Максимальное отклонение результатов аналитического и имитационного моделирования при рассмотренных законах распределения интервалов между поступающими в систему запросами на всей рассматриваемой области значений интенсивности входящего потока запросов составило 16,6%, а среднее отклонение – 2,9% (0,082 и 0,015 в абсолютных значениях соответственно). Сужение области поиска оптимального значения до двух максимальных отклонений (0,164) на этапе уточнения результатов позволило сократить время, затраченное на имитационное моделирование, в 6 раз.

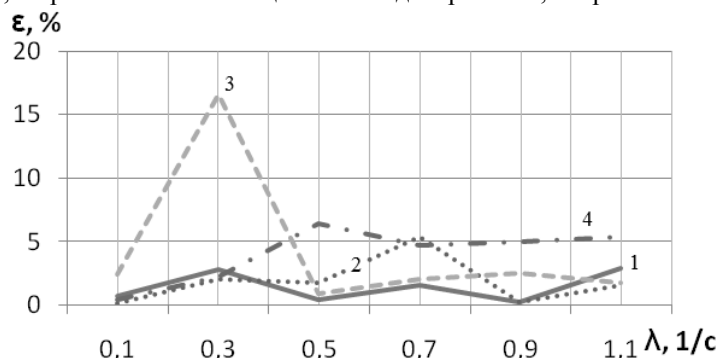


Рис. 4. Отклонения результатов имитационного моделирования. Кривые 1–4 соответствуют экспоненциальному, равномерному, эрланговскому, гиперэкспоненциальному законам распределения интервалов между поступающими в систему запросами

Заключение

Предложена процедура оптимизации процесса распределения потока запросов между кластерами вычислительной системы при различных законах распределения интервалов между поступающими в систему запросами и времени их обслуживания.

Предложенная процедура оптимизации предусматривает выполнение этапа оптимизации на основе аналитического моделирования для простейшего входного потока и экспоненциального распределения времени обслуживания и уточнение результатов моделирования на основе имитационных экспериментов при реальных законах распределения интервалов между поступающими в систему запросами и длительности их обслуживания.

Литература

1. Таненбаум Э., Ван Стеен М. Распределенные системы. Принципы и парадигмы. – СПб: Питер. – 2003. – 877 с.
2. Gaeta M., Kononov M., Shorgin S. Development of mathematical models and methods of task distribution in distributed computing system // Reliability: Theory & Applications. – 2006. – V. 1. – № 4. – P. 16–21.

3. Богатырев В.А., Богатырев С.В. К анализу и оптимизации серверных систем кластерной архитектуры с балансировкой нагрузки // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 2. – С. 4–9.
4. 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. – V. 46. – № 3. – P. 103–111.
5. Богатырев В.А. К повышению надежности вычислительных систем на основе динамического распределения функций // Изв. вузов. Приборостроение. – 1981. – С. 62–64.
6. Богатырев В.А. Децентрализованное динамическое распределение запросов в многомашинных вычислительных системах // Электронное моделирование. – 1994. – Т. 16. – № 3. – С. 38.
7. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Критерии оптимальности многоустойчивых отказоустойчивых компьютерных систем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 5 (63). – С. 92–97.
8. Богатырев В.А. Оптимальное резервирование системы разнородных серверов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 12. – С. 30–36.
9. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО. – 2009. – 363 с.

Голубев Иван Юрьевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, www.golubev@mail.ru

Богатырев Владимир Анатольевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, Vladimir.bogatyrev@gmail.com