

УДК 004.72

## МОДЕЛЬ БАЛАНСИРОВКИ НАГРУЗКИ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КЛАСТЕРЕ ЦЕНТРА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

**М. О. Колбанёв,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики

**Т. М. Татарникова,**

доктор техн. наук, доцент

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

**А. И. Воробьёв,**

аспирант

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Предлагается модель сервиса балансировки нагрузки, который реализуется на центральном узле вычислительного кластера центра обработки данных. Сервис позволяет регулировать поступающую нагрузку таким образом, чтобы в кластере не возник дисбаланс в загруженности узлов кластера и таким образом не сказывалось влияние на характеристики производительности центра обработки данных.

**Ключевые слова** — вычислительный кластер, центр обработки данных, запрос пользователя, регулятор нагрузки, модель балансировки нагрузки в кластере, общий информационный ресурс.

### Введение

Современной тенденцией развития телекоммуникаций помимо концепции сетей следующего поколения и мультисервисных сетей связи является отделение услуг от сетевого оборудования. Типичным примером является сеть Интернет, где пользователей интересует не услуга связи как таковая, а доступ к информации или определенному сервису [1].

Одним из растущих сегментов рынка телекоммуникаций становится предоставление услуг хостинга. Под хостингом понимается размещение интернет-приложений на серверах в центрах обработки данных (ЦОД). Поставщиков таких услуг называют сервис-провайдерами.

Для построения и эксплуатации ЦОД требуются значительные вложения и квалифицированный персонал, решение вопросов, связанных с эффективностью функционирования и безопасностью системы.

Благодаря наличию доступных глобальных коммуникаций эту услугу можно приобрести без затрат на разработку собственной информационной инфраструктуры. Поэтому большинство ком-

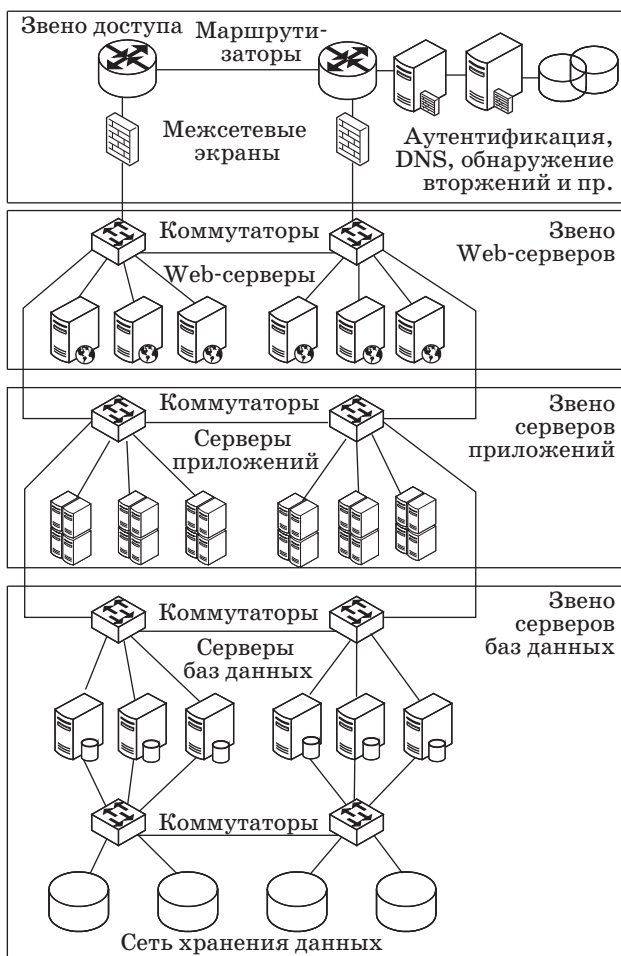
паний делают выбор в пользу ИТ-аутсорсинга, т. е. передают интернет-приложения в поддержку сервис-провайдерам или берут их в аренду. Такой вид аутсорсинга означает, что центр обработки данных располагается у поставщика услуги, а потребитель приобретает в единоличное пользование информационное пространство, к которому получает полностью прозрачный доступ [2].

### Структура центра обработки данных

Вычислительные мощности ЦОД реализуются в виде кластеров с балансировкой нагрузки.

Сервис балансировки нагрузки предназначен для последовательного выполнения следующих задач:

- приема запросов от клиентов;
- выбора сервера в кластере, который будет обрабатывать запрос клиента;
- перенаправления запроса на выбранный сервер;
- приема ответа от сервера на клиентский запрос;
- перенаправления ответа сервера на запрос клиенту.



■ Рис. 1. Структура ЦОД

Обычный способ предоставления сервиса клиенту — это обслуживание его запросов. Обслужить запрос — это значит получить запрос и выслать ответ на него запрашивающей стороне [3].

Запросы пользователей поступают на сервис балансировки (распределитель) нагрузки, который направляет их на обработку в соответствующий кластер, где запросы распределяются между серверами в соответствии со своим алгоритмом. Согласно принципам работы сети Интернет, запрос, отправляемый на определенный адрес, может получить только один компьютер в сети. Таким образом, для того чтобы запросы, направляемые на адрес сервера, могли обрабатываться кластером, должен быть запущен сервис балансировки нагрузки [4].

Типичная структура ЦОД показана на рис. 1.

### Модель сервиса балансировки нагрузки в кластере

Предположим, что имеется поток запросов к некоторому информационному ресурсу, все за-

просы ведут себя статистически одинаково, причем каждый из них требует некоторого числа операций от ресурса, кластер серверов и систем хранения данных, обслуживающих  $M$  пользователей.

Представим модель кластера ЦОД как систему массового обслуживания (СМО). Исследуем данную систему с точки зрения пользователя (рис. 2).

Пусть имеется замкнутая сеть с общим числом  $M$  пользователей, каждый из которых генерирует исходящий от него запрос с интенсивностью  $\lambda$  требований в секунду всякий раз, когда требование находится у пользователя, т. е. все требования характеризуются средним временем размышления  $1/\lambda$  секунд, которое получается из произвольного закона распределения. Каждое, таким образом, генерируемое требование поступает в ЦОД и перемещается от ресурса к ресурсу в соответствии с переходными вероятностями  $r_{ij}$  и возвращается на терминал пользователя. В этот момент рассматриваемый пользователь переходит к генерированию нового требования.

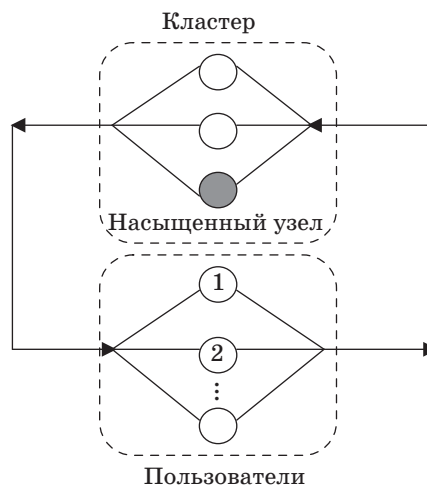
Обозначим через  $T$  среднее время прохождения через кластер ЦОД и через  $1/\lambda$  — среднее время пребывания у пользователя. Таким образом, среднее время цикла равно  $T + 1/\lambda$ , а средняя пропускная способность системы составляет  $\lambda' = M/(T + 1/\lambda)$  требований в секунду.

Аналогично пусть  $N$  — среднее число требований в кластере ЦОД и  $M'$  — среднее число требований в терминальном узле. На основании формулы Литтла имеем

$$T = \frac{N}{\lambda'}$$

Учитывая, что  $M = N + M'$ , получаем

$$T = \frac{M}{\lambda'} - \frac{M'}{\lambda'}$$



■ Рис. 2. Представление кластера ЦОД в виде сети СМО

Кроме того, если применить формулу Литтла к терминальному узлу, имеем  $1/\lambda = M'/\lambda'$ , и, таким образом:

$$T = \frac{M}{\lambda'} - \frac{1}{\lambda}.$$

Рассмотрим насыщенный узел  $S$ , или узкое место в ЦОД, который на рис. 2 заштрихован.

Пусть  $\mu_i x_i$  — относительное число посещений  $i$ -го узла кластера при циркуляции требований в сети, где  $\mu_i$  — производительность  $i$ -го узла кластера. Тогда насыщенным будет узел, в котором отношение  $x_s/m_s$  принимает наибольшее значение из всех  $x_i/m_i$  в кластере. Для рассматриваемого случая  $\mu_s x_s/\mu_N x_N$  — среднее число посещений узкого места на каждое поступление требований в кластер.

Чтобы найти  $x_i$ , необходимо решить систему уравнений

$$\mu_i x_i = \sum_{j=1}^N \mu_j x_j r_{ij}, \quad i = \overline{1, N}.$$

Чтобы найти число насыщающих требований  $M^*$ , предположим, что  $M^*$  должно быть равно максимальному числу идеально спланированных заданий, не дающих никаких взаимных помех. Для каждого из  $m_s$  обслуживающих приборов в насыщенном узле можно спланировать максимальное число заданий, равное необходимому времени обслуживания задания в одном цикле, деленному на время обслуживания задания в насыщенном узле за цикл. Общее время обслуживания за цикл равно  $\sum_{i=1}^N (\mu_i x_i/\mu_N x_N)(1/\mu_i)$ , т. е.

сумме по всем узлам произведений числа посещений узла на цикл на среднее время обслуживания на посещение. Время пребывания в насыщенном узле равно  $(\mu_s x_s/\mu_N x_N)(1/\mu_s)$ . Так как имеется  $m_s$  таких обслуживающих приборов, отношение общего времени обслуживания за цикл ко времени пребывания в насыщенном узле за цикл может быть умножено на  $m_s$ , что в итоге дает

$$M^* = \frac{m_s}{x_s} \sum_{i=1}^N x_i.$$

Исходя из приведенного анализа, рассмотрим задачу балансировки нагрузки в кластере. Цель — выяснить, как улучшается характеристика кластера ЦОД в целом, если устранить в нем узкое место путем увеличения интенсивности обслуживания в насыщенном узле. Легко предположить, что в результате этого какой-нибудь другой узел, например  $S'$ , станет узким местом кластера.

Данная характеристика имеет существенное значение для определения эффективности функ-

ционирования ЦОД, так как позволяет оценить выигрыш в улучшении характеристик ЦОД при использовании более мощных аппаратных средств и (или) совершенных методов управления потоками информации [5].

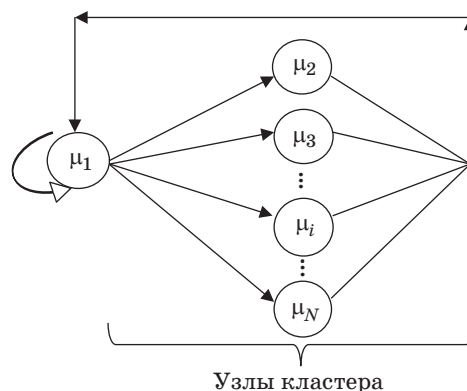
Формально постановку задачи балансировки нагрузки проведем с использованием модели замкнутой СМО с центральным обслуживающим прибором (рис. 3). Она позволяет отразить архитектуру кластера, представленного на рис. 2.

Данная модель позволяет описать работу мультипрограммной вычислительной системы с фиксированным числом узлов, в которую допускаются точно  $K$  заданий. Эти задания циркулируют в системе бесконечно долго, коллективно используя  $N$  ресурсов. Центральный обслуживающий прибор представляет собой корневой узел кластера, предоставляющий сервис балансировки нагрузки, а остальные  $N - 1$  узлов — периферийные узлы, собственно выполняющие обработку клиентских запросов. В такой системе запросы циркулируют между узлами кластера, требуя обращения сначала к корневому узлу, а затем к некоторому периферийному узлу кластера, после этого опять требуя обслуживания в центральном узле, а затем вновь обращения к какому-нибудь периферийному узлу кластера и т. д. Следовательно, все время задания возвращаются в корневой узел кластера. Переходные вероятности задаются матрицей  $r_{ij}$

$$r_{ij} = \begin{cases} p_j, & i = 1, 1 \leq j \leq N \\ 1, & 2 \leq i \leq N, j = 1 \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases},$$

где  $\sum_{j=1}^N p_j = 1$ .

В реальной мультипрограммной ситуации задания, в конце концов, покидают систему, и в моменты их ухода в систему по одному поступают новые задания. Это обстоятельство учтено в мо-



■ Рис. 3. Модель СМО с центральным обслуживающим прибором

дели возможностью прямого возвращения задания с вероятностью  $p_1$  в корневой узел, что означает уход старого задания и поступление вместо него нового задания. Таким образом, число заданий в системе остается постоянным и равным  $K$ . В модели с центральным обслуживающим прибором в каждом узле находится один обслуживающий прибор ( $m = 1$ ), а время обслуживания в  $i$ -м узле распределено по показательному закону с параметром  $\mu$ . Пусть матрица  $\mathbf{R}$  является матрицей переходных вероятностей  $\mathbf{R} \|r_{ij}\|$  между узлами сети. Тогда случай с центральным обслуживающим прибором можно описать следующей простой матрицей:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} p_1 & p_2 & p_3 & \dots & p_N \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

Задача сводится к решению уравнения  $\lambda = \lambda \mathbf{R}$ . Для рассматриваемой матрицы решение имеет вид

$$\mu_i x_i = \begin{cases} \mu_1, & i = 1, \\ \mu_1 p_1, & i = 2, 3, \dots, N \end{cases}.$$

Общее решение для любой замкнутой марковской СМО с однолинейными СМО в узлах дается равенством

$$p(k_1, k_2, \dots, k_n) = \frac{1}{G(K)} \prod_{i=1}^N x_i^{k_i},$$

включающим  $x_1$ . В частном случае рассматриваемой модели с центральным обслуживающим прибором получаем

$$p(k_1, k_2, \dots, k_N) = \frac{1}{G(K)} \prod_{i=1}^N \left( \frac{\mu_1 p_i}{\mu_i} \right)^{k_i},$$

где

$$G(K) = \sum_{k \in A} \prod_{i=2}^N \left( \frac{\mu_1 p_i}{\mu_i} \right)^{k_i}.$$

Следовательно, имеем явное решение, выражаемое через параметры системы  $\mu_i$  и  $p_i$ . Пусть теперь  $A_i$  — стационарная вероятность того, что  $i$ -й узел не пуст. Можно показать, что

$$A_i = \begin{cases} \frac{G(K-1)}{G(K)}, & i = 1, \\ \frac{\mu_1 p_i}{\mu_i} A_1, & i = 2, 3, \dots, N. \end{cases} \quad (1)$$

Из (1) получаем  $A_1 \mu_1 p_1 = A_i \mu_i$  ( $i > 2$ ), т. е. интенсивность, с которой задания поступают в  $i$ -й узел, равна интенсивности, с которой они поки-

дают этот узел. Тогда для сбалансированной системы

$$\frac{d}{d\mu_i} A_1 \mu_1 p_1 = \frac{d}{d\mu_j} A_1 \mu_1 p_1, \quad 1 \leq i, j \leq N. \quad (2)$$

Следовательно, сбалансированная система (система без узких мест) — это такая система, для которой выполняется равенство (2).

### Результаты моделирования

Определим, как влияет отсутствие сервиса балансировки нагрузки в кластере на производительность центра обработки данных.

Пусть вычислительный кластер состоит из пяти узлов и узкое место в нем — 2-й узел.

Результаты моделирования при разном коэффициенте загрузки  $\rho$  приведены в табл. 1.

Увеличение вычислительной мощности насыщенного узла кластера позволяет сохранить выполнение равенства (2). В табл. 2 приведены результаты, показывающие, во сколько раз необходимо увеличить производительность  $\mu$  насыщенного узла кластера при сохранении поступающей на вход нагрузки, если отсутствует сервис балансировки нагрузки.

### Заключение

Необходимым условием сбалансированной работы вычислительного кластера ЦОД является равенство (2). Это равенство показывает, что мера, определяющая, насколько узкое место создается в  $i$ -м узле, пропорциональна скорости из-

■ Таблица 1. Время обработки запроса пользователя

$\rho$	Кластер без сервиса балансировки нагрузки	Кластер с сервисом балансировки нагрузки
0,1	0,072	0,065
0,2	0,093	0,072
0,3	0,135	0,081
0,4	0,260	0,093
0,5	Равенство (2) не выполняется	0,110
0,6	Равенство (2) не выполняется	0,135
0,7	Равенство (2) не выполняется	0,176

■ Таблица 2. Сравнение кластеров по производительности

$\rho$	Кластер без сервиса балансировки нагрузки	Кластер с сервисом балансировки нагрузки
0,5	$2,25\mu$	$\mu$
0,6	$2,7\mu$	$\mu$
0,7	$3,5\mu$	$\mu$

менения производительности в зависимости от роста интенсивности обслуживания в этом узле. При этом производительность определяется как среднее число заданий, обслуживаемых за единицу времени, и равна  $A_1\mu_1\rho_1$ .

Для устранения возможности появления узкого места необходим сервис балансировки нагрузки:

— с ростом нагрузки наличие узкого места не позволяет кластеру в целом справиться с поступающими запросами пользователя, в то время как кластер с сервисом балансировки нагрузки продолжает функционировать (см. табл. 1);

— устранение узкого места возможно, если использовать более мощные аппаратные средства (см. табл. 2).

## Литература

1. Воробьев А. И., Колбанев М. О., Матяшов П. А. Модель в мультисервисной сети абонентского доступа // Абонентский доступ в сетях следующего поколения / Вторая Всерос. конф.: Тез. докл. — СПб., 2005. С. 12–16.
2. Воробьев А. И., Татарникова Т. М. Применение генетического алгоритма для решения задачи обеспечения отказоустойчивости вычислительного кластера // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2011. № 1(9). С. 3–9.
3. Шепета А. П., Евсеев Г. С., Бакин Е. А. Нижняя граница длительности периода сбора информации в сенсорной сети // Информационно-управляющие системы. 2011. № 6. С. 64–67.
4. Осипов Д. С., Грошев Ф. В. О скорости передачи данных в одной системе множественного доступа // Информационно-управляющие системы. 2012. № 1. С. 67–75.
5. Вишневикий В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. — М.: Техносфера, 2003. — 512 с.

## ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (80x@mail.ru).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*