

УДК 681.3

ОПТИМИЗАЦИЯ КЛАСТЕРА С ОГРАНИЧЕННОЙ ДОСТУПНОСТЬЮ КЛАСТЕРНЫХ ГРУПП

В.А. Богатырев, С.В. Богатырев, А.В. Богатырев

Определены состав и число (кратность резервирования) кластерных групп различной функциональной комплектации, обеспечивающие минимальную стоимость реализации системы при заданных требованиях по ее надежности.

Ключевые слова: кластер, оптимизация, надежность, сервер.

Введение

В настоящее время для достижения высокой надежности и отказоустойчивости серверных систем широко используются кластерные архитектуры. При значительном числе серверов их объединение в кластеры может проводиться через многоуровневую коммуникационную подсистему древовидной топологии [1], содержащую коммутаторы верхнего и нижнего уровней (КВУ и КНУ). Серверные узлы разделены на отдельные кластерные группы (сегменты кластера) (рис. 1).

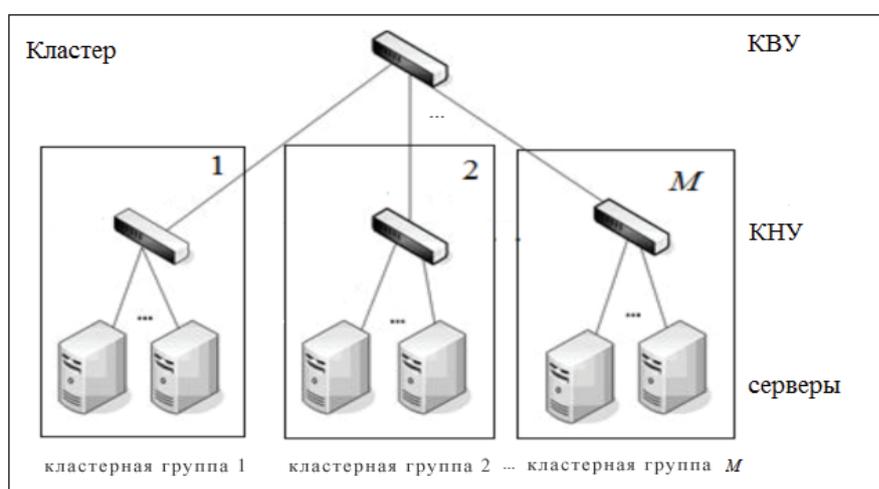


Рис. 1. Вычислительная система кластерной архитектуры с выделением групп серверов

При функциональной и/или параметрической неоднородности серверов надежность и эффективность кластерных систем зависит не только от кратности резервирования серверных и коммуникационных узлов, но и от вариантов объединения функционально неоднородных серверов в кластерные группы [2–10]. Исследованию эффективности вариантов объединения функционально неоднородных серверов в кластерные группы посвящена предлагаемая работа, в которой основное внимание уделено вариантам формирования кластерных групп, характеризуемых неполным функциональным набором серверов в каждой группе (сегменте), в результате чего возникает неполнота доступности групп для различных функциональных запросов.

Формирование кластерных групп функционально неоднородных серверов

При наличии n типов серверов по функциональному назначению возможны варианты формирования кластерных групп с объединением:

- однотипных по функциональному назначению серверов [3];
- разнотипных по функциональному назначению серверов всех n типов (полнофункциональные кластерные группы серверов);
- разнотипных по функциональности серверов при их неполном функциональном наборе в каждой кластерной группе, с функциональной непересекаемостью различных кластерных групп [4];
- разнотипных по функциональности серверов при их неполном функциональном наборе в каждой кластерной группе, с функциональной пересекаемостью различных кластерных групп [4].

В последнем случае кластерные группы (сегменты) имеют ограниченную (неполную) доступность для различных функциональных запросов.

Выбор рациональных вариантов объединения серверов по кластерным группам должен проводиться с учетом минимизации времени обслуживания запросов различных функциональных типов, макси-

зации надежности и сглаживания деградационного влияния отказов серверного и коммуникационного оборудования на снижение функциональности, надежности и производительности системы.

Для решения задачи оптимального (рационального) построения серверной системы кластерной архитектуры требуется оценка ее надежности при различных вариантах объединения разнородных по функциональности серверов в кластерные группы. В работе анализируются кластерные системы с объединением в кластерные группы разнотипных по функциональному назначению серверов при допустимости неполного набора функциональных типов серверов в группах.

Надежность систем с функциональной неоднородностью кластерных групп

Выбор рациональных вариантов компьютерных систем кластерной архитектуры требует оценки надежности с учетом вариантов комплектования кластерных групп функционально неоднородными серверами.

В соответствии с [8] каждую кластерную группу (рис. 1), включающую коммутационный узел нижнего уровня и подключенные к нему разнотипные по функциональному назначению серверы, будем рассматривать как многофункциональный модуль, для которого $(\forall i)(\forall j)[(i \neq j) \rightarrow \Phi_i \cap \Phi_j = \Omega]$, где $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ – ресурсы модуля, задействованные при выполнении функций f_1, f_2, \dots, f_n , а Ω – базовое оборудование общее при выполнении всех функций [4–7]. Отказ базового оборудования Ω приводит к отказу всего многофункционального модуля. Для исследуемого объекта к оборудованию Ω отнесем КНУ, а к оборудованию $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ – серверы разной функциональности (назначения).

В соответствии с [7] будем считать заданными возможные варианты комплектования кластерных групп по функциональному назначению серверов, характеризуемые матрицей $\|a_{ij}\|_{n \times M}$, элемент которой $a_{ij} = 1$, если группа j -го типа комплектации содержит сервер, реализующий i -ю функцию, иначе $a_{ij} = 0$, $j=1, 2, \dots, M$. Матрица $\|\varphi_{ij}\|_{n \times m}$, характеризующая функциональные возможности серверных групп системы, формируется из матрицы $\|a_{ij}\|$ с учетом числа (кратности резервирования) групп каждого варианта функциональной комплектации m_1, m_2, \dots, m_M .

В работе [7] предложена оценка надежности (вероятности безотказной работы) систем из многофункциональных модулей, а адаптация этой оценки к кластерным системам, в которых в качестве многофункциональных модулей рассматриваются кластерные группы, включающие коммутаторы и разнотипные по функциональности серверы, проведена в работе [8]:

$$P(m_1, m_2, \dots, m_M) = P_{s0} \sum_{k_1=0}^{m_1} \sum_{k_2=0}^{m_2} \dots \sum_{k_M=0}^{m_M} C_{m_1}^{k_1} C_{m_2}^{k_2} \dots C_{m_M}^{k_M} P_{s1}^{\sum_{j=1}^M k_j} (1 - P_{s1})^{\sum_{j=1}^M m_j - \sum_{j=1}^M k_j} \times \prod_{i=1}^n (1 - (1 - p_i)^{k_1 a_{i1} + k_2 a_{i2} + \dots + k_M a_{iM}}), \quad (1)$$

где k_1, k_2, \dots, k_M – число кластерных групп различной функциональной комплектации при исправности входящих в их состав КНУ (возможно, резервированных); p_i – вероятность работоспособности сервера функционального назначения i -го типа; $P_{s0} = 1 - (1 - p_{s0})^{l_0}$, $P_{s1} = 1 - (1 - p_{s1})^{l_1}$ – вероятности исправности групп коммутационных узлов верхнего и нижнего уровня при кратности их резервирования l_0 и l_1 и вероятности работоспособности одного КВУ и КНУ, равной p_{s0} и p_{s1} .

Выбор функциональной комплектации кластерных групп

Рассмотрим системы, компонуемые из серверных групп, функциональная комплектация которых представлена матрицами $\|a_{ij}\|$ вида A_1, A_2, A_3, A_4 :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Если кратности серверных групп, представляемых столбцами матрицы A_1 равны $m_1 = 8, m_2 = 8$, матриц A_2, A_3 равны $m_1 = 8, m_2 = m_3 = 4$, а матрицы A_4 – $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 4$, то матрицы $\|\varphi_{ij}\|_{n \times m}$ имеют соответственно вид S_1, S_2, S_3, S_4 :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Во всех приведенных случаях общее число кластерных групп равно 16, а серверов – 32, т.е. затраты на реализацию систем одинаковы. Результаты расчета надежности (вероятности работоспособности) рассматриваемых кластерных систем при $p_{s0} = p_{s1} = p$, $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p^2$ представлены на рис. 2. На рис. 2 кривая 1 соответствует надежности систем, комплектация серверных групп которых представлена матрицами S_1, S_4 , а кривые 2, 3 – матрицами S_2, S_3 ; кривая 4 отражает разницу $DP(p)$ вероятностей работоспособности систем, представленных матрицами S_1, S_4 .

Расчеты подтверждают, что надежность исследуемых систем зависит не только от надежности и кратности резервирования серверов, но и от вариантов их объединения в серверные группы. Расчеты показывают предпочтительность комплектации кластерных групп серверами разного функционального назначения, для которой разница построчных сумм матриц $\| \phi_{ij} \|$ минимальна. При выполнении этой рекомендации предпочтительней является распределение серверов по группам, при котором число комбинаций расположения единиц в строках минимально.

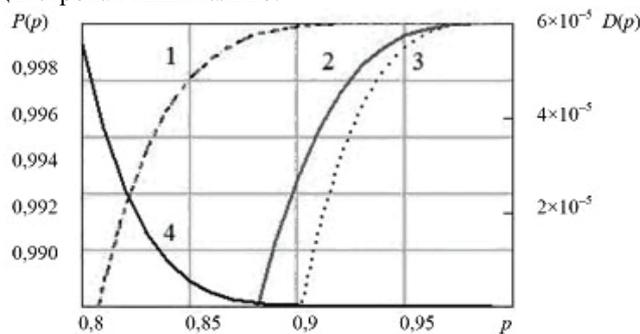


Рис. 2. 1 – вероятность безотказной работы систем $P(p)$ с матрицами S_1, S_4 ; 2, 3 – то же для матриц S_2, S_3 ; 4 – разница $DP(p)$ вероятностей безотказной работы систем с матрицами S_1, S_4

Оптимизация кратности резервирования серверных групп

В работе [7] поставлена и решена задача оптимизации, для которой при заданном наборе типов многофункциональных модулей (отличающихся функциональной комплектацией), представленном матрицей $\| a_{ij} \|$, требуется определить состав и число m_1, m_2, \dots, m_M модулей каждого типа комплектации, обеспечивающих максимум надежности системы при ограничении на стоимость ее реализации C_0 :

$$P(m_1, m_2, m_3, m_4) \rightarrow \max, C(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M) \leq C_0.$$

В работе [8] представленные модели [7] уточнены при рассмотрении в качестве многофункционального модуля группы функционально разнотипных серверов, объединяемых через коммутатор.

В отличие от постановки задачи оптимизации по [7], определим состав и число m_1, m_2, \dots, m_M кластерных групп различной функциональной комплектации, обеспечивающих минимум стоимость реализации системы при выполнении заданных требований по надежности P_0 :

$$C(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M) \rightarrow \min \text{ и } P(m_1, m_2, m_3, m_4) \geq P_0.$$

Для структур по рис. 1 стоимость реализации системы вычисляется как

$$C(m_1, m_2, \dots, m_M) = c_0(1 + \sum_{j=1}^M m_j) + \sum_{i=1}^n c_i (\sum_{j=1}^M a_{ij} m_j),$$

где c_0 – стоимость коммутатора, c_i – стоимость i -го типа сервера, M – число типов комплектации кластерных групп. Надежность системы определяется по формуле (1).

Поиск минимума $C(m_1, m_2, \dots, m_M)$ проводится на основе перебора возможных значений (m_1, m_2, \dots, m_M) . При этом задаем начальное значение стоимости системы максимально возможным C_{\max} (например, $a=1000$), а затем при переборе (m_1, m_2, \dots, m_M) , если текущее значение стоимости меньше значения переменной a и удовлетворяет ограничению по надежности P_0 , присваиваем переменной a текущее значение стоимости, иначе остается старое значение. Реализация такого поиска с использованием средств системы Mathcad-14 приведена ниже:

$$g2(P_0) := \begin{cases} a \leftarrow 1000 \\ \text{for } m1 \in 1..5 \\ \text{for } m2 \in 1..5 \\ \text{for } m3 \in 1..5 \\ \text{for } m4 \in 1..5 \\ a \leftarrow \text{if}(C(m1, m2, m3, m4, P_0) \leq a, C(m1, m2, m3, m4, P_0), a) \end{cases}$$

При этом

$$C(m_1, m_2, \dots, m_M, P_0) = \begin{cases} c_0(1 + \sum_{j=1}^M m_j) + \sum_{i=1}^n c_i (\sum_{j=1}^M a_{ij} m_j), & \text{if } P(m_1, m_2, \dots, m_M) \geq P_0, \\ C_{\max}, & \text{if } P(m_1, m_2, \dots, m_M) < P_0. \end{cases}$$

В результате оптимизации структуры кластера при выбранной функциональной комплектации кластерных групп можно определить минимум средств и кратность резервирования различных кластерных групп, обеспечивающих заданную надежность кластера.

Приведем пример оптимизации при стоимости узлов $c_2 = 6, c_3 = 2, c_4 = 2, c_0 = 1$ (условных единиц, у.е.) и вероятности их исправности $p_{s0} = p_{s1} = 0,9; p_1 = p_3 = 0,7; p_2 = p_4 = 0,9$. При заданной предельной надежности системы $P_0 = 0,9995$ и комплектации кластерных групп в соответствии с матрицей A_1 требуется 8 и 10 групп, представленных соответственно первым и вторым столбцами, при этом затраты на построение системы равны 154 у.е.

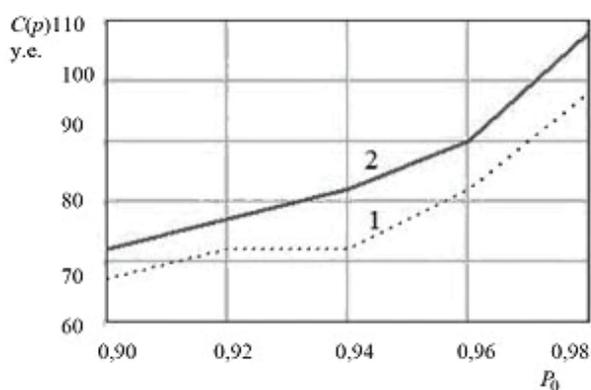


Рис. 3. Зависимость минимальной стоимости реализации системы от требований ее надежности P_0 :

1 – при комплектации системы, представленной матрицей A_1 , 2 – то же для матрицы A_4 .

Зависимость минимальной стоимости реализации системы от требований по ее надежности P_0 при комплектации групп серверов, представляемых матрицами A_1, A_4 отображена кривыми 1 и 2 на рис. 3. Расчеты (рис. 3) показывают, что требуемый уровень надежности в зависимости от исходной функциональной комплектации кластерных групп может быть достигнут при различных затратах на ее построение.

Заключение

Таким образом, на основе адаптации модели надежности вычислительных систем из многофункциональных модулей [7] проведена оценка надежности и оптимизация структуры компьютерных систем кластерной архитектуры при объединении серверов различного функционального назначения в кластерные группы. Полученные результаты могут использоваться при разработке компьютерных систем кластерной архитектуры, в частности, при определении оптимальных вариантов объединения серверов различного функционального назначения в кластерные группы, при минимизации стоимости реализации системы, при обеспечении требуемого уровня ее надежности.

Литература

1. Ретана Ф. Принципы проектирования корпоративных IP-сетей. – М.: Вильямс, 2002. – 368 с.
2. Богатырев В.А. Оптимизация отказоустойчивых кластеров с неполнодоступностью узлов и неоднородностью потока запросов // Информационные технологии. – 2008. – № 2. – С. 30–36.
3. Богатырев В.А. Оптимальное резервирование системы разнородных серверов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 12. – С. 30–36.
4. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Объединение резервированных серверов в кластеры высоконадежной компьютерной системы // Информационные технологии. – 2009. – № 6. – С. 41–47.
5. Богатырев В.А. Надежность вариантов размещения функциональных ресурсов в однородных вычислительных сетях // Электронное моделирование. – 1997. – № 3. – С. 21–29.
6. Богатырев В.А. Отказоустойчивость распределенных вычислительных систем динамического распределения запросов и размещение функциональных ресурсов // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2006. – № 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/56860.html>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 1.02.2010).
7. Богатырев В.А. Метод оценки надежности вычислительных систем при функциональной неоднородности компьютерных узлов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – № 12. – С. 20–22.
8. Богатырев В.А. Оценка надежности и оптимизация комплектации вычислительных систем при резервировании функционально неоднородных компьютерных узлов // Информационные технологии. – 2007. – № 5. – С. 41–47.
9. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Надежность компьютерных систем при объединении серверов в кластерные группы // Информационные технологии моделирования и управления. – 2009. – № 4. – С. 548–552.
10. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Критерии оптимальности многоустойчивых отказоустойчивых компьютерных систем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 5. – С. 92–97.

- Богатырев Владимир Анатольевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, Vladimir.bogatyrev@gmail.com
- Богатырев Станислав Владимирович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, realloc@gmail.com
- Богатырев Анатолий Владимирович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, ganglion@gmail.com