

## Задача определения оптимальной отказоустойчивости распределенных систем обработки информации

*А. Н. Скоба, В. К. Михайлов, Айеш Ахмед Нафеа Айеш, С. М. Логанчук*

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
им. М. И. Платова, Новочеркасск*

**Аннотация:** В данной статье, в терминах языка сетей массового обслуживания, сформулирована задача нахождения оптимального значения среднего времени реакции системы на запросы всех пользователей для распределенных систем обработки информации, реализованных на базе архитектуры «файл-сервер», двухуровневой и трехуровневой архитектуры «клиент-сервер» при фиксированной стоимости простоя, включающей стоимость простоя пользователей, стоимость простоя канала передачи данных и стоимость простоя обслуживающих узлов. Представлен алгоритм решения данной оптимизационной задачи.

**Ключевые слова:** распределенная система обработки информации, архитектура «файл-сервер», двухуровневая архитектура «клиент-сервер», трехуровневая архитектура «клиент-сервер» пространство состояний, среднее время реакции системы, стоимость потерь, стационарные вероятности.

По мере того, как информационные технологии все глубже проникают во все сферы человеческой жизни, применение распределенных систем обработки информации (СОИ) также существенным образом расширяется (банковские системы, биллинговые системы, интернет-компании, системы продажи и бронирования билетов и т.д.). Вследствие чего, сложность самих распределенных СОИ также возрастает и актуальной становится задача обеспечения требуемых показателей надежности данных систем.

Проведенный анализ публикаций, посвященных проблемам обеспечения надежности распределенных СОИ показал: 1) т.к. распределенные СОИ выполняют следующие ключевые функции, такие как обработка, хранение, защита и передача данных, то и надежность таких систем напрямую зависит от надежности серверов баз данных (файловых серверов), каналов передачи данных, серверов приложений и надежности самого программного обеспечения [1,2] ; 2) наряду с понятием «абсолютной» (полной) надежности системы, в настоящее время достаточно широко

---

используется такой термин, как ее отказоустойчивость. Он предоставляет распределенной СОИ возможность продолжать выполнять намеченные функции при локальных сбоях, например, при отказе одного сервера [3,4]; 3) для вычисления надежностных характеристик распределенных СОИ, в настоящее время традиционно используется ее представление в виде случайного графа, что в дальнейшем предполагает применение методов полного перебора состояний элементов, прямого перебора простых цепей, разложения булевых функций, объединения простых цепей двудольных графов и т.д. Данные методы расчета являются сложными и довольно трудоемкими. Так объем трудозатрат в этих методах пропорционален  $2^n$ , где  $n$  – общее число структурных элементов входящих в граф, представляющий анализируемую распределенную СОИ [4,5].

В данной статье для вычисления надежностных характеристик работы распределенной СОИ предлагается использовать аппарат экспоненциальных сетей массового обслуживания (СеМО), что позволяет естественным образом связать надежностные характеристики работы системы (коэффициенты отказоустойчивости) с ее технико-эксплуатационными характеристиками (среднее время реакции системы на запросы пользователей) и, в конечном итоге, свести задачу к расчету стационарных вероятностей состояний СеМО.

#### Математическая модель решения задачи

Имеется распределенная СОИ, реализованная на базе сетевой архитектуры «файл-сервер» с экспоненциальным входным потоком заявок и экспоненциальным временем обслуживания заявок в узлах сети. Математическая модель функционирования данной распределенной СОИ, разработанная с использованием аппарата экспоненциальных СеМО, представлена в работе [6]. Пусть  $i$  – й файл-сервер данной распределенной СОИ характеризуется коэффициентом отказоустойчивости  $K_{отк}^{(i)}$ . Это

означает, что в произвольный момент времени с вероятностью  $K_{отк}^{(i)}$  все файлы  $R_j(j = \overline{1, d})$  (фрагменты распределенной базы данных – РБД), которые физически размещены на  $i$ -м файл-сервере  $U_i(i = \overline{1, n})$  будут недоступны для обработки поступающих запросов  $Q_l(l = \overline{1, q})$ . При этом будем предполагать: 1) все значения  $K_{отк}^{(i)}(i = \overline{1, n})$  являются достаточно малыми величинами и тогда одновременный отказ двух и более серверов можно приближенно считать невозможным событием; 2) при отказе одного сервера, в целом, распределенная СОИ может выполнять свои основные функции (остается работоспособной). Это связано с понятием отказоустойчивости распределенной СОИ [4,5], а также с особенностью конструирования исходных данных для моделирования (файлы  $R_j(j = \overline{1, d})$  распределяются по серверам  $U_i(i = \overline{1, n})$  с помощью генератора равновероятного выбора [7], что практически исключает вариант, когда большая часть фрагментов РБД оказалась бы размещенной на одном сервере).

В результате получаем множество функциональных состояний распределенной СОИ:  $\overline{S} = \{S_i, i = \overline{0, n}\}$ , где состояние  $S_i$  возникает в случае отказа  $i$ -го сервера и имеет вероятность  $P_i = K_{отк}^{(i)}$ , а функциональное состояние  $S_0$ , которое наблюдается с вероятностью  $P_0 = 1 - \sum_{i=1}^n K_{отк}^{(i)}$  – все серверы распределенной СОИ – работоспособны. Согласно [6] пространство состояний случайного процесса, описывающего функционирование распределенной СОИ на базе сетевой архитектуры «файл-сервер» имеет вид:

$$\overline{E} = \{E_i(\bar{i}_{1r}^{(1)}, \bar{i}_{sr}^{(2)}, \bar{i}_{sr}^{(3)}), i = \overline{1, \rho}\}, \text{ где } \bar{i}_{1r}^{(1)} = \begin{cases} 1, & \text{если } r\text{-й пользователь } (r = \overline{1, n}) \\ & \text{находится в активном состоянии} \\ & \text{(формирует запрос);} \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$\{\bar{i}_{sr}^{(2)}, s = \overline{2, n+1}, r = \overline{1, n}\}$  – описывает очередь к каналу и состояние канала

передачи данных;

$\{\bar{i}_{sr}^{(3)}, s = \overline{n+2, 2n+1}, r = \overline{1, n}\}$  – описывает очередь к серверам и состояние

серверов.

С учетом этого

$$K_{omk}^{(i)} = \sum_{\substack{\bar{i}_{sr}^{(k)} \in \bar{E}(\bar{N}, 2n+1) \\ \bar{i}_{kr}^{(3)} = \bar{0}}} P_k(\bar{i}_{1r}^{(1)}, \bar{i}_{sr}^{(2)}, \bar{i}_{sr}^{(3)}), \bar{N} = (\bar{i}_{1r}^{(1)}, \bar{i}_{sr}^{(2)}, \bar{i}_{sr}^{(3)}). \quad \text{Согласно}$$

$$[8,9]: P_k(\bar{i}_{1r}^{(1)}, \bar{i}_{sr}^{(2)}, \bar{i}_{sr}^{(3)}) = \frac{G_k(\bar{N})}{G(\bar{N})} \left[ G(\bar{N} - \bar{i}_{kr}^{(3)}) - \sum_{r=1}^n x_{kr} G(\bar{N} - \bar{1}_{kr} - \bar{i}_{kr}^{(3)}) \right], \text{ где}$$

$G(\bar{N})$  – нормализующая константа, для вычисления которой может быть использована итерационная процедура:

$$G_m(\bar{N}) = G_{m-1}(\bar{N}) + \sum_{r=1}^n x_{mr} G_m(\bar{N} - \bar{1}_{mr}), \quad (1)$$

где  $x_{mr} = \frac{e_{mr}}{\mu_{mr}}$  ( $m = \overline{1, 2n+1}, r = \overline{1, n}$ ) [6],  $\bar{1}_{mr}$  – вектор размерности равной  $|\bar{N}|$ , в

$m$ -ой координате которого ( $m = \overline{1, 2n+1}$ ) на  $r$ -м месте стоит 1, а все остальные значения координат равны 0. Предполагается также, что  $G_m(\bar{N}) = 1$ , если  $\bar{N} = \bar{0}$  и  $G_m(\bar{N} - \bar{1}_{mr}) = 0$ , если хотя бы одна из координат вектора  $\bar{N} - \bar{1}_{mr} < 0$ . Значение нормализующей константы  $G_m(\bar{N})$  получается по формуле (1) при  $m = 2n + 1$ .

Введем в рассмотрение множество матриц  $\{Z_k, k = \overline{0, n}\}$ , так что  $Z_0 = X$  (начальное размещение файлов  $R_j (j = \overline{1, d})$  по серверам  $U_i (i = \overline{1, n})$

распределенной СОИ), а  $Z_k = \left\| z_{ji}^{(k)}, j = \overline{1, d}, i = \overline{1, n} \right\|, k = \overline{1, n}$ , при этом

$$z_{ji}^{(k)} = \begin{cases} x_{ji}, & \text{если } j \neq k; \\ 0, & \text{если } j = k. \end{cases}$$

Тогда среднее время реакции распределенной СОИ на все запросы пользователей с учетом влияния отказоустойчивости отдельных серверов будет иметь вид:

$$\bar{T} = \sum_{k=1}^n K_{отк}^{(k)} \cdot \bar{T}(Z_k), \text{ где } \bar{T}(Z_k) - \text{среднее время реакции распределенной}$$

СОИ на запросы пользователей при размещении фрагментов РБД по серверам, заданным матрицей  $Z_k$ . Расчет величины  $\bar{T}(Z_k) (k = \overline{1, n})$  подробно изложен в работе [6].

#### Решение задачи оптимальной отказоустойчивости

Введем в рассмотрение обобщенный показатель отказоустойчивости работы распределенной СОИ:

$$E_0 = \frac{\bar{T}_0}{\bar{T}} = \frac{\bar{T}_0}{\sum_{i=1}^n K_{отк}^{(i)} \bar{T}(Z_i)}, \quad (2)$$

где  $\bar{T}_0$  – среднее время реакции распределенной СОИ на запросы пользователей при условии полной работоспособности всех ее серверов. Тогда задача оптимальной отказоустойчивости работы распределенной СОИ будет иметь вид:

$$E_0 \rightarrow \max. \quad (3)$$

Для решения задачи (3) может быть использован следующий итерационный алгоритм. Т.к.  $\bar{T}_0 - const$ , то решение задачи (3) сводится к минимизации  $\bar{T}$ .

1. Положим  $k = 1, E^{(k)} = E_0$  в формуле (2).

2. Находим  $\bar{T}(Z_s) = \max_i \{\bar{T}(Z_i)\}$ . С использованием разработанного ранее эвристического алгоритма, изложенного в работе [10], решаем задачу минимизации  $\bar{T}(Z_s)$  путем оптимального перераспределения  $s$  – м пользователем файлов в матрице  $Z_s$ . (На концептуальном уровне данная задача сводится к задаче комбинаторной оптимизации с булевыми переменными). В результате получаем новую матрицу  $Z_s'$  и новое значение  $\bar{T}(Z_s')$  ( $\bar{T}(Z_s') \leq \bar{T}(Z_s)$ ).

3. Полагаем  $k = k + 1$ . Если  $k < n$ , то вычисляем новое значение  $E^{(k)}$ , находим новое множество  $\{\bar{i}\} = \{\bar{i}\} \setminus \{s\}$  и переходим на п.2. Если же  $k = n$ , то полученное значение  $E^{(k)}$  и будет решением задачи (3).

*Замечание.* Приведенную выше процедуру решения задачи (3) можно так же использовать для распределенных СОИ, реализованных на базе других сетевых архитектур: двухуровневой и трёхуровневой архитектуры «клиент-сервер».

### Литература

1. Ahmed W., Yong Wei Wu, "A survey on reliability in distributed systems", Journal of Computer and System Sciences, vol. 79, no. Elsevier, pp. 1243-1255, 2013.
2. Melhart B. and White S., "Issues in Defining, Analyzing, Refining, and Specifying System Dependability Requirements", ECBS, IEEE Computer Society, Edinburgh, Scotland, pp. 334-340, 2000.
3. Nicol D., Saunders W., Trivedi K., "Model-based evaluation: from dependability to security", IEEE Trans. Dependable Secure Computing (IDSC), vol. 1, № 1, pp. 48-65, 2004.

4. Varekova P., and Cerna I., "Automated Computing of the Maximal Number of Handled Clients for Client-Server Systems", Theoretical Computer Science, vol. 260, pp. 243-259, 2010.

5. Мейкшан В.И., Мейкшан Л.И. Анализ качества функционирования распределенной информационной системы при ограниченной надежности ее элементов // Труды ИВМиМГ СОРАН. – Сер. Информатика. – Вып.5. – Новосибирск, 2005. – С. 79-88.

6. Скоба А.Н., Состина Е.В. Математическая модель оптимального размещения распределённой базы данных по узлам ЛВС на базе файло-серверной архитектуры. // Инженерный вестник Дона. 2015. №2. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2881.

7. Михайлов В.К., Скоба А.Н., Айеш Ахмед Нафеа Айеш. Программный комплекс для решения задач оптимального размещения информационных ресурсов и моделирования влияния основных интегральных показателей на реактивность распределённых систем обработки информации // Изв. вузов. Электромеханика. 2018. Т. 61. №6. С.102-109.

8. Жожикашвили В.А., Вишневский В.М. Сети массового обслуживания. Теория и применение к сетям ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 192с.

9. Вишневский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003.- 512 с.

10. Скоба А.Н., Айеш Ахмед Нафеа Айеш, Михайлов В.К. Эвристический алгоритм решения задачи оптимального размещения информационных ресурсов // Инженерный вестник Дона. 2018. №1. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4744.

## References

1. Ahmed W., Yong Wei Wu, "A survey on reliability in distributed systems", J. of Com. and Sys. Sciences, vol. 79, no. Elsevier, pp. 1243-1255, 2013.
2. Melhart B. and White S., "Issues in Defining, Analyzing, Refining, and Specifying System Dependability Requirements", ECBS, IEEE Computer Society, Edinburgh, Scotland, pp. 334-340, 2000.
3. Nicol D., Saunders W., Trivedi K., "Model-based evaluation: from dependability to security", IEEE Trans. Dependable Secure Computing (IDSC), vol. 1, № 1, pp. 48-65, 2004.
4. Varekova P., and I. Cerna I., "Automated Computing of the Maximal Number of Handled Clients for Client-Server Systems", Theoretical Computer Science, vol. 260, pp. 243-259, 2010.
5. Mejkshan V. I., Mejkshan L. I. Analiz kachestva funkcionirovaniya raspredelennoj informacionnoj sistemy pri ogranichennoj nadezhnosti ee elementov. [Analysis of quality of functioning of a distributed information system with limited reliability of its elements]. Trudy` IVMiMG SORAN. Ser. Informatika, vol. 5, Novosibirsk, pp. 79-88, 2005.
6. Skoba A.N., Sostina E.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015. №2 URL:ivdon.ru/ru/ magazine/archive/n2y2015/2881.
7. Mikhaylov V.K., Skoba A.N., Ayesh Achmed Nafea Ayesh. Izv. vuzov. E`lektromexanika, 2018. T. 61. №6. pp. 102-109.
8. Zhozhikashvili V.A., Vishnevskij V.M. Seti massovogo obsluzhivaniya. Teoriya i primenenie k setyam E`VM [Queueing networks. Theory and its network application]. M.: Radio i svyaz', 192p, 1988.
9. Vishnevskij V.M. Teoreticheskie osnovy` proektirovaniya komp`yuterny`x setej [Theoretical foundations of computer network design]. M.: Texnosfera, 512p, 2003.





10. Skoba A.N., Ayesh Achmed Nafea Ayesh. Inzhenernyj vestnik Dona 2018. №1. URL:[ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4744](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4744).