

М.Ю. Управление архитектурой кибербезопасности АСУТП атомных электростанций // Проблемы управления. – 2018. – № 3. – С. 47-55.

4. *Cherdantseva Y., Burnap P., Blyth A., Elden P., Jones K., Soulsby H., Stoddart K.* A review of cyber security risk assessment methods for SCADA systems // *Computers & security*. – 2016. – Vol. 56. – P. 1-27.

5. Струков А.В., Ветлугин К.А. О методах количественного анализа кибербезопасности технических систем на основе логико-вероятностного подхода // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Том 9. №4. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN417.pdf> (дата обращения 15.10.2022).

6. *Salomatin A.A., Iskhakov A.Yu., Meshcheryakov R.V.* Formation of a Digital Footprint Based on the Characteristics of Computer Hardware to Identity APCS Users / *Proceedings International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. – Sochi, Russia: IEEE, 2021. – P. 314-320.

7. *Dong S., Farha F., Cui S., Ning H., Ma J.* CPG-FS: A CPU performance graph based device fingerprint scheme for devices identification and authentication / *Proc. of the 2019 IEEE Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing*. – IEEE, 2019. – P. 266-270.

8. *Takasu K., Saito T., Yamada T., Ishikawa T.* A survey of hardware features in modern browsers: 2015 Edition / *Proc. of the 2015 9th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*. – IEEE, 2015. – P. 520-524.

DOI: 10.25728/iccss.2022.72.91.029

Сомов С.К.

Показатели надежности распределенной системы с невосстанавливаемыми узлами

Аннотация: В работе выполнен анализ показателей надежности функционирования распределенных систем обработки данных, использующих оперативный резерв из нескольких копий массивов данных для повышения надежности обработки в узлах запросов к системе. Рассматривается ситуация, при которой система не восстанавливает оперативный резерв в случае его

разрушения. Для рассматриваемой ситуации получены аналитические выражения для некоторых показателей надежности работы распределенных систем.

Ключевые слова: распределенные системы, оперативное резервирование данных, показатели надежности работы распределенных систем

Для обеспечения высокой степени сохранности данных в распределенных системах обработки данных (РСОД), широко используется информационная избыточность в виде идентичных копий оперативного резерва, размещенных в узлах системы [1]. Оперативный резерв (ОР) представляет собой некоторое количество копий массивов данных, которые используются для повышения надежности обработки запросов к данным [2]. Использование ОР в узлах системы значительно снижает вероятность разрушения данных, но не исключает ее полностью. В результате разрушения ОР в некотором узле системы этот узел становится неработоспособным. Для восстановления работоспособности такого узла можно использовать один из методов восстановительного резервирования [3].

В данной работе рассматриваются показатели надежности функционирования РСОД, которая не использует восстановительное резервирование.

В данном случае в РСОД используется ОР, копии которого размещены в нескольких узлах системы. Причем при отказе узла он не восстанавливается, и будет находиться в неработоспособном состоянии. Функционирование такой РСОД можно рассматривать как процесс случайных переходов системы из одного состояния в другое. Такие переходы происходят при возникновении случайного события – потери работоспособности узла системы по причине разрушения ОР данного узла в процессе обработки запроса к данным. После отказа узла запросы к данным, ранее поступавшие для обработки в этот узел, равномерно распределяются между оставшимися в работоспособном состоянии узлами системы с оперативным резервом. При отказе всех узлов с ОР система переходит в состояние отказа и перестает обрабатывать поступающие запросы.

Предположим, что в M узлах РСОД размещен ОР. Множество всех состояний системы обозначим через H

$$H = \{H_0, H_1, \dots, H_N, H_{1,2}, \dots, H_{1,2,\dots,N}\} \quad (1)$$

Состоянию $H_{1,2,\dots,n}$ множества H соответствует такое состояние системы, при котором неработоспособны n узлов с ОР.

Последовательно пронумеровав элементы из H , получим множество S

$$H = S = \{S_0, S_1, \dots, S_N, S_{N+1}, \dots, S_M\}, \quad M = 2^N \quad (2)$$

Рассматриваемый случайный процесс переходов РСОД между состояниями множества S является однородным процессом, т.к. состояние РСОД в будущем не зависит от истории предыдущих переходов системы, а зависит только от текущего состояния системы [4, 5].

Тогда справедливо, что условная вероятность $P \left\{ \xi(t) = \frac{S_j}{\xi(u)} = S_j \right\}$ того, что в момент времени t РСОД находится в состоянии S_j при условии, что в момент времени u , система находилась в состоянии S_i , будет равна

$$\begin{aligned} P \left\{ \xi(t) = \frac{S_j}{\xi(t_1)} = S_{i_1}, \dots, \xi(t_n) = S_{i_n}, \xi(t_u) = S_i \right\} = \\ = \left\{ \xi(t) = \frac{S_j}{\xi(t_u)} = S_i \right\} = p_{ij}(t - u) \end{aligned} \quad (3)$$

при этом: $u > t_n > \dots > t_1; \quad t > u; \quad i, j \in \{0, 1, \dots, N\}$.

Величины переходных вероятностей p_{ij} случайного процесса переходов РСОД определяются в соответствии с формулой

$$p_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{при } (i < j) \text{ или } \xi(t) = S_j \neq S_i = \xi(t-1) \text{ и} \\ & |I_0(t)| = |I_0(t-1)| \\ \prod_{n \in R} \tau_n(S_i) \left[\prod_{n \in R} \beta_n(S_i) \right]^{-1} \prod_{n \in I_p(S_i)} \beta_n S_i & \\ -\text{в остальных случаях} & \end{cases} \quad (4)$$

В этой формуле используются обозначения:

$I_0(t)$ – множество номеров узлов, отказавших ко времени t .
 $I_p(S_i)$ – множество работоспособных узлов РСОД, которая находится в состоянии S_i . $\tau_n(S_i)$ – вероятность отказа за единицу времени узла n системы, которая находится в состоянии S_i . $R = [I_0(S_i) - I_0(S_j)]$ – множество узлов, отказавших за один шаг перехода РСОД между двумя состояниями. $I_p(S_i)$ – множество номеров работоспособных узлов системы, находящейся в состоянии S_i . $\beta_n(S_i) = \tau_n(S_i)$.

Так как в РСОД отказавшие узлы не восстанавливаются, то такую систему можно рассматривать как невосстанавливаемый объект. Данный объект имеет конечное множество работоспособных состояний и единственное состояние отказа всей системы. Такой процесс переходов системы между несколькими возможными состояниями можно трактовать как поглощающая цепь Маркова с дискретным временем.

Ниже на рисунке 1 показан граф переходов для системы, соответствующей сделанным предположениям.

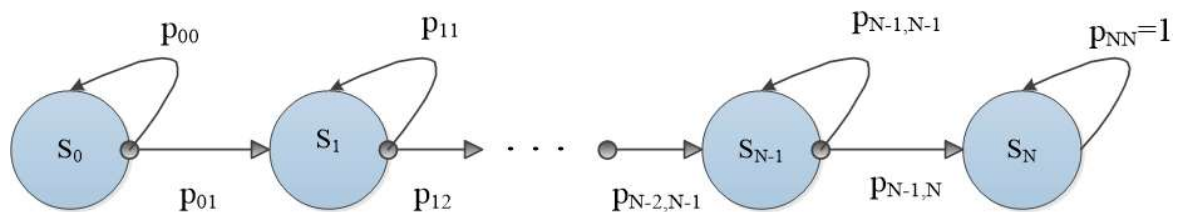


Рисунок 1 – Граф случайного процесса переходов системы во множестве состояний S

С учетом сделанных предположений о характере переходов РСОД между различными состояниями получены выражения для оценки следующих показателей надежности функционирования рассмотренной системы: T_1 – среднее время работы РСОД до отказа; $Q(t_0)$ и $Q(t, t + t_0)$ – вероятность отказа системы в интервалах времени $[0, t_0]$ и $[t, t + t_0]$; $P(t_0)$ и $P(t, t + t_0)$ – вероятность безотказной работы системы в интервалах времени $[0, t_0]$ и $[t, t + t_0]$.

Обозначим через $p_{ij}(n)$ вероятность перехода системы из состояния S_i в состояние S_j за n шагов. Тогда, используя формулу полной вероятности, получим, что эта вероятность будет вычисляться по формуле

$$p_{ij}(n) = \sum_{S_m \in S^1} p_{im} p_{mj}(n-1); \quad p_{mj}(0) = \delta_{mj} \quad (5)$$

Здесь S^1 множество невозвратных состояний системы, а $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$ и 0 при $i \neq j$.

Так система за единичный интервал времени выполнит один шаг процесса переходов, то на интервале $[0, t_0]$ система выполнит t_0 шагов. Тогда, учитывая, что $p_{0N}(n) = 0$ при $n < N$, получим, что вероятность $P(t_0)$ безотказной работы системы и вероятность $Q(t_0)$ отказа системы в интервале времени $[0, t_0]$ равны

$$P(t_0) = 1 - \sum_{n=N}^{t_0} p_{0N}(n); \quad Q(t_0) = \sum_{n=N}^{t_0} p_{0N}(n) \quad (6)$$

Вероятность $P(t, t + t_0)$ безотказной работы системы на интервале от t до $[t, t + t_0]$ в соответствии с формулой условной вероятности равна

$$P(t + t_0) = P(t + t_0)/P(t) \quad (7)$$

Тогда вероятность $Q(t + t_0)$ противоположного события – отказа системы на интервале времени $[t, t + t_0]$ равна

$$Q(t + t_0) = 1 - P(t + t_0)/P(t) \quad (8)$$

Предположив, что единичный интервал времени и параметры системы таковы, что вероятность одновременного отказа двух и более узлов системы равна нулю, получим, что, среднее время T_1 работы системы до отказа равно

$$T_1 = \sum_{j=0}^{N-1} p_{j,j+1}^{-1} = \sum_{j=0}^{N-1} (1 - p_{jj})^{-1} \quad (9)$$

Заключение

В работе представлена модель распределенной системы, которая использует оперативное резервирование для повышения надежности обработки запросов к данным. В случае разрушения оперативного резерва в узле он не восстанавливается, а узел остается неработоспособным. На основе данной модели получены аналитические выражения для расчета значений важных показателей надежности функционирования распределенных систем обработки данных. Полученные результаты целесообразно использовать при анализе эффективности размещения копий оперативного резерва по узлам распределенной системы.

Литература:

1. *Кульба В.В., Сомов С.К., Шелков А.Б.* Анализ влияния использования информационной избыточности на показатели надежности распределенных информационных систем // *Надежность.* – 2022. – Том 22. № 1. – С. 40-12.
2. *Сомов С.К.* Сохранность информации в распределенных системах обработки данных. – М.: ИПУ РАН, 2019. – 254 с.
3. *Микрин Е.А., Сомов С.К.* Анализ эффективности стратегий восстановления информации в распределенных системах обработки данных // *Информационные технологии и вычислительные системы* – 2016. – №3. – С. 5-19.
4. *Розанов Ю.А.* Введение в теорию случайных процессов. – М.: Наука, 1982. – 128 с.
5. *Кемени Д., Снелл Д.* Конечные цепи Маркова. – М.: Мир, 1970. – 271 с.