

5. Балдин А. В., Брешенков А. В. Анализ проблемы проектирования реляционных баз данных на основе использования информации табличного вида и разработка модели методики проектирования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 150 с.

Статья поступила в редакцию 23.01.2007



Александр Владимирович Брешенков родился в 1955 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1982 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Компьютерные системы, комплексы и сети” МГТУ им.Н.Э. Баумана. Автор 70 научных работ в области САПР ЭВМ и баз данных.

A.V. Breshenkov (b. 1955) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1982. D. Sc. (Eng.), assoc. professor of "Computer Systems, Complexes and Networks" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 70 publications in the field of systems of automated design and data bases.

УДК 681.323

Ле Куанг Минь, А. С. Романовский

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ АКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ОТКАЗОВ В ИЕРАРХИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Проанализирована эффективность применения методов активной защиты от отказов в управляющих иерархических вычислительных системах реального времени. Получены выражения для вероятности безотказной работы системы с различными конфигурациями. Даны рекомендации по построению отказоустойчивых вычислительных систем.

При построении централизованных систем управления, связи и сбора информации большое распространение получили иерархические вычислительные системы (ИВС). Системы этого класса широко применяются в качестве управляющих вычислительных комплексов в различных областях техники.

В монографии [1] рассмотрены основы анализа и синтеза отказоустойчивых ВС реального времени на основе активной защиты (АЗ) от отказов, а также теоретические основы, идеи и методы АЗ от отказов модульных ВС. Активная защита необходима для достижения требуемого уровня отказоустойчивости ИВС в условиях незначительного резерва времени и ограниченной эффективности средств обнаружения неисправностей при условии, что объем резервного оборудования не

должен превышать объем основного оборудования, а также для обеспечения заданного уровня адаптации ВС к сбоям и отказам составных элементов и программ без существенного увеличения средств контроля и диагностики. В связи с этим весьма актуальна проблема оценки эффективности применения методов АЗ от отказов в ИВС.

На примере отказоустойчивой ИВС рассмотрим исходную трехуровневую систему со структурой типа 1-2-2, т.е. ИВС, в которой на первом уровне находится один процессор управления, на втором — два процессора управления, на третьем уровне находятся четыре процессора обработки данных [1].

Рассмотрим три варианта повышения надежности ИВС без восстановления с сохранением ее производительности:

- 1) применение традиционного аппаратурного резервирования;
- 2) введение дополнительных ветвей в структуру системы для организации АЗ;
- 3) комбинированный вариант.

Конфигурации ИВС, соответствующие первому исследуемому варианту, приведены на рис. 1.

Предположим, что все процессоры управления и обработки ИВС — однородные, режим дублирования — нагруженный.

Обозначим вероятность безотказной работы каждого процессора как $p = p(t)$, вероятность отказа процессора — $q = 1 - p$, вероятность правильного обнаружения отказа в паре как α_1 .

С учетом введенных обозначений выражение для вероятности безотказной работы систем из двух процессоров (основного и дублирующего) можно записать следующим образом:

$$P_D = 2\alpha_1 pq + p^2. \quad (1)$$

После преобразования выражения (1) получим соотношение

$$P_D = 1 - (1 - p)[1 - p(2\alpha_1 - 1)].$$

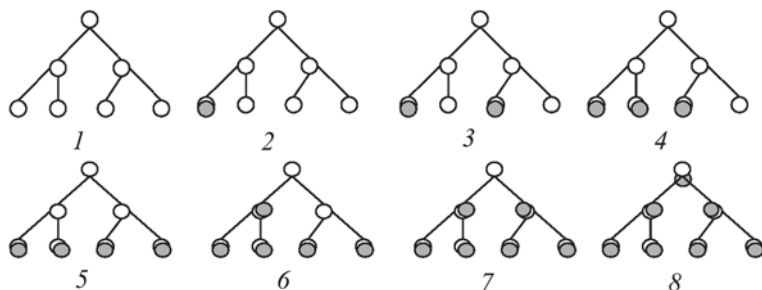


Рис. 1. Конфигурации ИВС с дублированием:

1 — исходная конфигурация; 2... 8 — конфигурации с дублированием

Для конфигураций системы с дублированием процессоров выражение для вероятности безотказной работы ИВС запишем в виде

$$P_{\text{ИВС}} = \prod_{i=0}^N P_i = P^{N-d} P_{\text{д}}^d = P^{N-d} (1 - (1 - p)[1 - (2\alpha_1 - 1)])^d, \quad (2)$$

где P_i — вероятность безотказной работы i -го элемента (процессора) ИВС; N — число процессоров в ИВС; d — число пар дублированных процессоров в системе.

Используя уравнение (2), получаем выражения для вероятности безотказной работы каждой конфигурации ИВС, приведенной на рис. 1:

$$P_{[1]} = p^7;$$

$$P_{[2]} = p^6 p_{\text{д}} = p^6 (1 - (1 - p)[1 - (2\alpha_1 - 1)]);$$

$$P_{[3]} = p^5 p_{\text{д}}^2 = p^5 (1 - (1 - p)[1 - (2\alpha_1 - 1)])^2;$$

$$P_{[4]} = p^4 p_{\text{д}}^3 = p^4 (1 - (1 - p)[1 - (2\alpha_1 - 1)])^3;$$

$$P_{[5]} = p^3 p_{\text{д}}^4 = p^3 (1 - (1 - p)[1 - (2\alpha_1 - 1)])^4;$$

$$P_{[6]} = p^2 p_{\text{д}}^5 = p^2 (1 - (1 - p)[1 - (2\alpha_1 - 1)])^5;$$

$$P_{[7]} = p p_{\text{д}}^6 = p (1 - (1 - p)[1 - (2\alpha_1 - 1)])^6;$$

$$P_{[8]} = p_{\text{д}}^7 = (1 - (1 - p)[1 - (2\alpha_1 - 1)])^7.$$

Конфигурации, соответствующие второму из рассматриваемых вариантов построения отказоустойчивых ИВС с АЗ, приведены на рис. 2.

Определим выражение для вероятности безотказной работы ИВС с конфигурацией 9 (см. рис. 2). Число нерезервированных процессоров в системе, не охваченных АЗ, — 5. Следовательно, вероятность безотказной работы этой части системы составляет p^5 .

Рассчитаем вероятность безотказной работы части системы, охваченной одноуровневой АЗ и состоящей из трех процессоров. Полагаем, что используется наиболее гибкая дисциплина АЗ, т.е. АЗ с переназначением контролирующего процессора и неприоритетным кон-

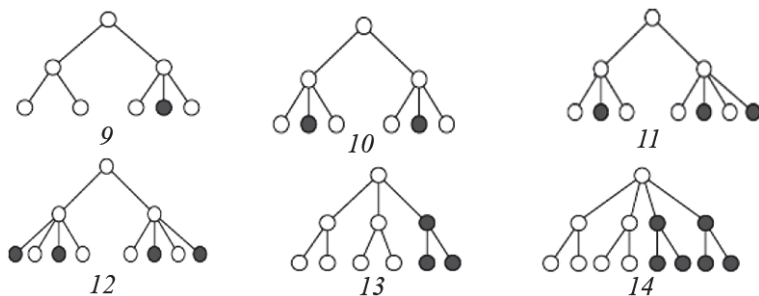


Рис. 2. Конфигурации ИВС с АЗ

тролем. Очевидно, что вероятность $P_ч$ безотказной работы этой части системы равняется суммарной вероятности работы всех трех процессоров и работы двух процессоров из трех:

$$P_ч = p^3 + 3\alpha_{1A3}(1-p)p^2,$$

где α_{1A3} – вероятность правильного обнаружения отказа одноуровневой АЗ. Окончательное выражение для вероятности безотказной работы ИВС с конфигурацией 9 запишем в виде

$$P_{[9]} = p^5[p^3 + 3\alpha_{1A3}(1-p)p^2],$$

для ИВС с конфигурацией 10 как

$$P_{[10]} = p^3[p^3 + 3\alpha_{1A3}(1-p)p^2]^2.$$

Обозначим вероятность правильного обнаружения отказа для двухуровневой АЗ как α_{2A3} . Предположим, что после первого отказа двухуровневая АЗ трансформируется в одноуровневую, также что одноуровневая АЗ является следствием трансформации в нее двухуровневой АЗ, а изначальная двухуровневая АЗ создана с использованием наиболее гибких дисциплин АЗ, т.е. как АЗ с переназначением контролирующих процессоров и неприоритетным контролем. С учетом введенных предположений и обозначений, получим следующие выражения для вероятности безотказной работы ИВС с конфигурациями 11–14:

$$P_{[11]} = p^3[p^3 + 3\alpha_{1A3}(1-p)p^2][p^4 + 4\alpha_{2A3}(1-p)p^3 + 6\alpha_{1A3}(1-p)^2p^2];$$

$$P_{[12]} = p^3[p^4 + 4\alpha_{2A3}(1-p)p^3 + 6\alpha_{1A3}(1-p)^2p^2]^2;$$

$$P_{[13]} = p[s^3 + \alpha_{1A3}C_3^1(1-s)s^2];$$

$$P_{[14]} = p[s^4 + 4\alpha_{2A3}(1-s)s^3 + 6\alpha_{1A3}(1-s)^2s^2],$$

где $s = 1 - \sum_{i=1}^3 C_3^i(1-p)^i p^{3-i}$.

Конфигурации, соответствующие комбинированному варианту построения отказоустойчивых ИВС, приведены на рис. 3.

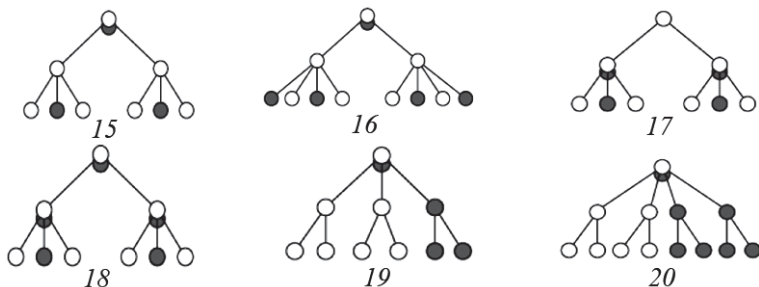


Рис. 3. Конфигурации ИВС с АЗ и дублированием

С учетом введенных предположений и обозначений запишем выражения для вероятности безотказной работы ИВС с конфигурациями 15–20:

$$\begin{aligned}
 P_{[15]} &= p_{\text{д}} p^2 [p^3 + 3\alpha_{1A3}(1-p)p^2]^2; \\
 P_{[16]} &= p_{\text{д}} p^2 [p^4 + 4\alpha_{2A3}(1-p)p^3 + 6\alpha_{1A3}(1-p)^2 p^2]^2; \\
 P_{[17]} &= p_{\text{д}}^2 p [p^3 + 3\alpha_{1A3}(1-p)p^2]^2; \\
 P_{[18]} &= p_{\text{д}}^3 [p^3 + 3\alpha_{1A3}(1-p)p^2]^2; \\
 P_{[19]} &= p_{\text{д}} [s^3 + 3\alpha_{1A3}(1-s)s^2]; \\
 P_{[20]} &= p_{\text{д}} [s^4 + 4\alpha_{2A3}(1-s)s^3 + 6\alpha_{1A3}(1-s)^2 s^2].
 \end{aligned}$$

Значения вероятности безотказной работы ИВС с конфигурациями 1–20 приведены в таблице. При расчете вероятностей $P_{[i]}$ ($i = 1 \dots 20$) были использованы следующие исходные данные: распределение вероятности безотказной работы каждого процессора в системе соответствует экспоненциальному закону $P(t) = \exp(-\lambda t)$, где интенсивность отказа $\lambda = 7 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$ [2], $\alpha_{1A3} = 0,8$, $\alpha_{2A3} = 1 - (1 - \alpha_{1A3})^2 = 0,96$, $\alpha_1 = 0,8$; время непрерывной работы ИВС равно 61 320 ч (7 лет).

Проанализировав приведенные в таблице значения, выявили преимущество применения АЗ по сравнению с традиционным резервированием при одинаковом числе избыточных процессоров. При том же объеме избыточной аппаратуры, что и при дублировании, АЗ охватывает контролем бóльшую часть системы (либо с большей вероятностью обнаружения отказа), повышая тем самым наблюдаемость системы и обеспечивая так называемое виртуальное резервирование – резервирование основных процессоров при наличии хотя бы одного избыточного, повышающего управляемость системы. Конфигурация 18 с пятью избыточными процессорами, обеспечивающая вероятность безотказной работы ИВС 0,8945, является одной из наиболее эффективных конфигураций.

На рис. 4 приведены графики зависимости от времени вероятности безотказной работы ИВС с конфигурациями 1, 14, 18 и 20.

Рассмотрим случаи применения троирования (рис. 5) в ИВС с конфигурацией 18.

Обозначим $P_{\text{тр}}$ – вероятность работы трех процессоров в случае троирования, α_2 – вероятность правильного обнаружения отказа в трех процессорах в случае троирования. Предположим, что после обнаружения отказа одного процессора троирование преобразуется в дублирование с вероятностью правильного обнаружения отказа в паре α_1 .

Вероятность безотказной работы ИВС

№ конфигурации	Число избыточных процессоров	Время непрерывной работы, г						
		1	2	3	4	5	6	7
1	0	0,9580	0,9177	0,8792	0,8422	0,8068	0,7729	0,7405
2	1	0,9615	0,9244	0,8888	0,8545	0,8215	0,7897	0,7591
3	2	0,9650	0,9312	0,8985	0,8669	0,8363	0,8068	0,7783
4	3	0,9686	0,9380	0,9083	0,8795	0,8515	0,8243	0,7979
5	4	0,9721	0,9449	0,9183	0,8923	0,8669	0,8422	0,8180
6	5	0,9757	0,9518	0,9283	0,9053	0,8826	0,8604	0,8386
7	6	0,9793	0,9587	0,9385	0,9184	0,8986	0,8791	0,8598
8	7	0,9829	0,9658	0,9487	0,9318	0,9149	0,8981	0,8814
9	1	0,9779	0,9559	0,9340	0,9121	0,8904	0,8689	0,8476
10	2	0,9745	0,9493	0,9246	0,9003	0,8765	0,8531	0,8301
11	3	0,9771	0,9546	0,9324	0,9106	0,8892	0,8681	0,8474
12	4	0,9798	0,9599	0,9403	0,9210	0,9020	0,8833	0,8649
13	3	0,9824	0,9641	0,9453	0,9259	0,9061	0,8860	0,8657
14	6	0,9907	0,9811	0,9710	0,9605	0,9495	0,9381	0,9263
15	3	0,9780	0,9563	0,9347	0,9134	0,8924	0,8716	0,8511
16	5	0,9834	0,9669	0,9506	0,9344	0,9184	0,9025	0,8867
17	4	0,9816	0,9633	0,9450	0,9267	0,9086	0,8905	0,8725
18	5	0,9852	0,9703	0,9553	0,9402	0,9250	0,9098	0,8945
19	4	0,9747	0,9479	0,9201	0,8913	0,8619	0,8321	0,8021
20	7	0,9944	0,9883	0,9816	0,9744	0,9667	0,9585	0,9496

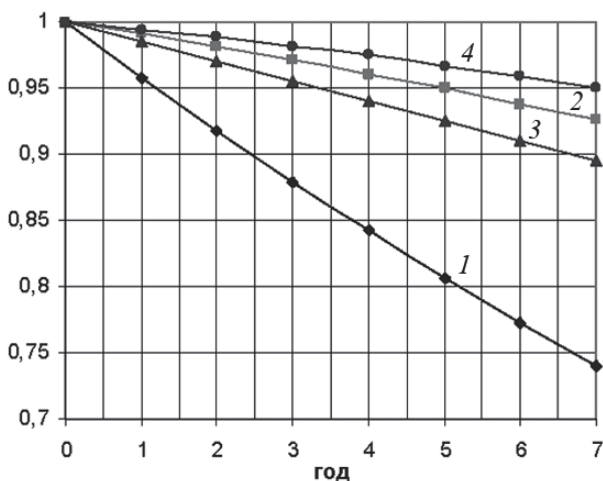


Рис. 4. Графики зависимости вероятности безотказной работы ИВС с конфигурацией 1, 14, 18 и 20 от времени (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно)

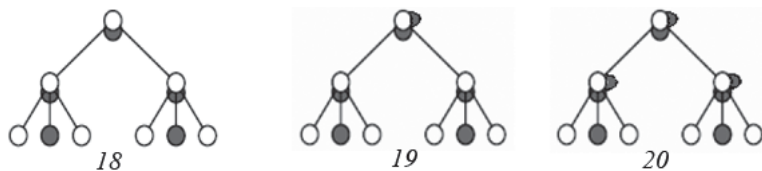


Рис. 5. Конфигурации ИВС с АЗ и дублированием (18, 21) и троированием (22)

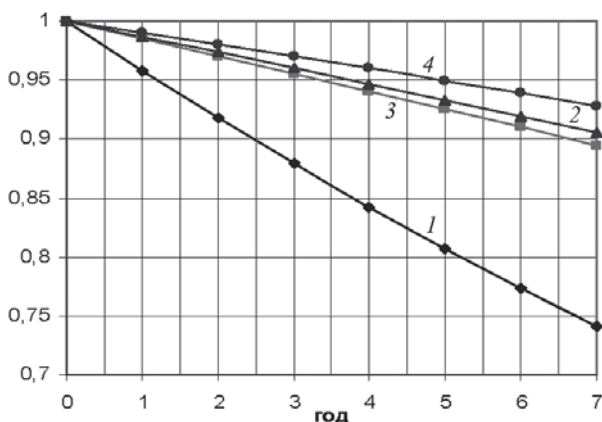


Рис. 6. Графики зависимости вероятности безотказной работы ИВС с конфигурациями 1, 18, 21 и 22 от времени (кривые 1... 4 соответственно)

С учетом введенных предположений и обозначений получим

$$P_{\text{тр}} = 1 - 3(1 - \alpha_1)pq^2 - 3(1 - \alpha_2)p^2q - q^3.$$

Выражения для вероятности безотказной работы ИВС с конфигурациями 21–22 можно записать следующим образом:

$$P_{[21]} = p_{\text{тр}}p_d^2[p^3 + 3\alpha_{1\text{АЗ}}(1 - p)p^2]^2;$$

$$P_{[22]} = p_{\text{тр}}^3[p^3 + 3\alpha_{1\text{АЗ}}(1 - p)p^2]^2.$$

На рис. 6 приведены графики зависимости от времени вероятности безотказной работы ИВС с конфигурациями 1, 18, 21 и 22.

Конфигурации 14, 18, 20, 21 и 22 обеспечивают вероятность безотказной работы системы в течение 7 лет эксплуатации не менее 0,9, при этом вероятность безотказной работы системы без применения каких-либо методов повышения надежности (например, конфигурация 1, см. рис. 1) равна 0,7405.

Таким образом, можно сделать вывод, что в заданных условиях для повышения надежности ИВС наиболее рациональным подходом является использование традиционного резервирования (дублирования, троирования) на уровне процессоров управления совместно с АЗ на уровне процессоров обработки данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ш у б и н с к и й И. Б. Активная защита от отказов управляющих модульных вычислительных систем. – СПб.: Наука, 1993. – 284 с.
2. И ы у д у К. А. Расчет надежности вычислительных и управляющих машин и систем летательных аппаратов. – М.: Изд-во МАИ, 1978. – 55 с.

Статья поступила в редакцию 19.03.2007

Ле Куанг Минь родился в Социалистической Республике Вьетнам в 1978 г., окончил магистратуру в Санкт-Петербургском Государственном политехническом университете в 2004 г. Аспирант кафедры “Компьютерные системы и сети” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор четырех научных работ в области обеспечения отказоустойчивости вычислительных систем.

Le Quang Ming (b. 1978, Socialist Republic Vietnam) graduated from the Saint-Petersburg State Polytechnic University in 2004. Post-graduate of “Computer Systems and Networks” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 4 publications in the field of providing fail-safety of computing systems.



Александр Сергеевич Романовский родился в 1944 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1969 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Компьютерные системы и сети”, начальник сектора НИИ ИСУ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор свыше 100 научных работ в области цифровой обработки сигналов.

A.S. Romanovskiyy (b. 1944) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Computer Systems and Networks” department, head of sector of the Research Institute for Information and Control Systems of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 80 publications in the field of systems of providing fail-safety of computing systems.

ЖУРНАЛ “ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА имени Н.Э. БАУМАНА”

Журнал “Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана” в соответствии с постановлением Высшей аттестационной комиссии Федерального агентства по образованию Российской Федерации включен в перечень периодических и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Подписку на журнал “Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана” можно оформить через агентство “Роспечать”.

Подписка по каталогу “Газеты, журналы” агентства “Роспечать”

Индекс	Наименование серии	Объем выпуска	Подписная цена (руб.)	
		Полугодие	3 мес.	6 мес.
72781	“Машиностроение”	2	250	500
72783	“Приборостроение”	2	250	500
79982	“Естественные науки”	2	250	500

Адрес редакции журнала “Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана”:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Тел.: (495) 263-62-60; 263-60-45. Факс: (495) 261-45-97. E-mail: press@bmstu.ru