

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ АРХИТЕКТУР АДАПТИВНЫХ МАЖОРИТАРНО - РЕЗЕРВИРОВАННЫХ ЦИФРОВЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

И.В. Пискачева

(представил д.т.н., проф. В.С. Харченко)

В статье приведена систематизация и исследование аналитических моделей оценки надежности четырехканальных многоверсионных мажоритарно - резервированных архитектур.

В сложных вычислительных системах жесткого реального времени, к которым относятся цифровые управляющие и вычислительные системы (ЦУВС), отказоустойчивость обеспечивается с помощью резервирования аппаратуры, резервирования (копирования) системных и прикладных задач, а также использованием дополнительных аппаратных средств (АС) и программного обеспечения (ПО), управляющих восстановлением вычислительного процесса и процесса управления после проявления физических неисправностей, проектных и интерактивных ошибок. Эти дополнительные средства осуществляют контроль совпадения результатов выполнения копии программы в резервированных каналах ЦУВС, обнаружение рассогласований, вызванных отказами АС и ошибками ПО, и восстановление вычислительного процесса [1].

Программное обеспечение, как и аппаратные средства, должно быть отказоустойчивым до отказа некоторой кратности и постепенно деградировать при более высокой кратности отказа [2, 3]. Для обеспечения отказоустойчивости ПО можно применять метод динамической избыточности: наличие нескольких неидентичных копий модулей программы, выполняющих одну и ту же функцию, но реализующих различные алгоритмы или создаваемые разными разработчиками. Результаты реализации сравниваются в мажоритарном элементе. Введение средств контроля позволяет скомпенсировать неполную отлаженность программного обеспечения.

Наличие нескольких вариантов программ (многоверсионность) позволяет улучшить надежность ПО как за счет повышения уровня ее правильности при разработке, так и за счет повышения устойчивости функционирования при эксплуатации.

Рассмотрим необслуживаемые ЦУВС, в которых может применяться многоверсионное мажоритарное резервирование как неадаптивное, так и с различными схемами адаптации. Проведем систематизацию воз-

можных вариантов адаптации четырехканальных многоверсионных мажоритарно - резервированных архитектур (МРА) (табл. 1).

Адаптация МРА происходит следующим образом: после возникновения отказа программной или (и) аппаратной компоненты и сравнения результатов в мажоритарном элементе (МЭ) происходит отключение неисправного канала. Могут быть различные варианты адаптации четырехканальных МРА.

Таблица 1

Варианты адаптации четырехканальных МРА

Кол-во отказавших каналов	Количество работающих каналов											
	4 - канальные МРА				Адаптивные МРА						Неадаптивные МРА	
					4441	4411	4331	4311	4111	433	2 из 4	3 из 4
0					4	4	4	4	4	4	4	4
1					4	4	3	3	1	3	4	4
2					4	1	3	1	1	3	4	0
3					1	1	1	1	1	0	0	0
4					0	0	0	0	0	0	0	0

Оценим надежность адаптивных многоверсионных мажоритарно - резервированных архитектур (МРА) при следующих допущениях:

- аппаратные и программные отказы независимы;
- аппаратные средства всех каналов равнонадежны и имеют вероятности безотказной работы (ВБР) p_1 ;
- их программные средства также равнонадежны и ВБР принимаются равными p_2 ;
- потоки отказов аппаратных и программных средств имеют экспоненциальное распределение с параметрами (интенсивностями отказов λ_1, λ_2 , т.е. $p_1 = e^{-\lambda_1 t}$, $p_2 = e^{-\lambda_2 t}$;
- программные версии выполняются параллельно.

Анализ всех состояний четырехканальных архитектур, учитывающих все возможные события при работе каналов и их отказах, вызванных физическими дефектами аппаратуры и программными дефектами, позволил получить формулы для расчета вероятностей безотказной работы всех возможных адаптивных и неадаптивных МРА.

Введем следующие обозначения:

P4441ad4, P4411ad4, P4331ad4, P4311ad4, P4111ad4, P433ad4, P4441ad22, P4411ad22, P4331ad22, P4311ad22, P4111ad22, P433ad22, P4441ad31, P4411ad31, P4331ad31, P4311ad31, P4111ad31, P433ad31,

P4441ad1111, P4411ad1111, P4331ad1111, P4311ad1111, P4111ad1111, P433ad1111 – вероятности безотказной работы адаптивных тривиальных, двухверсионных, трехверсионных и четырехверсионных четырехканальных МРА со схемами адаптации 4441, 4411, 4331, 4311, 4111, 433 соответственно;

Рскр, Рк, Ру – вероятности безотказной работы средств контроля и реконфигурации, коммутации, управления (СКР, СК, СУ) соответственно;

Рмэ23, Рмэ24 – вероятности безотказной работы мажоритарного элемента, работающего по схеме «2 из 3» и «2 из 4» соответственно;

Рср11 – вероятности безотказной работы схемы сравнения для выбора одного из двух каналов.

Математические модели четырехканальных одноверсионных (4) и четырехверсионных (1111) архитектур со схемой адаптации 4441 при принятых допущениях имеют вид:

$$P_{4441ad4} = ((3 \cdot p_1^4 - 8 \cdot p_1^3 + 6 \cdot p_1^2) \cdot P_{mэ24} + 4 \cdot p_1 \cdot (1 - p_1)^3 \cdot P_{ср11}) \times p_2 \cdot P_{скр} \cdot P_k \cdot P_u;$$

$$P_{4441ad1111} = ((3 \cdot p_1^4 \cdot p_2^4 - 8 \cdot p_1^3 \cdot p_2^3 + 6 \cdot p_1^2 \cdot p_2^2) \cdot P_{mэ24} + 4 \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot (1 - p_1 \cdot p_2)^3 \cdot P_{ср11}) \cdot P_{скр} \cdot P_k \cdot P_u.$$

Полученные аналитические зависимости позволили исследовать все возможные архитектуры с разными схемами адаптации четырехканальных МРА и получить графические зависимости.

Как показано на рис. 1, введение многоверсионности приводит к уменьшению чувствительности архитектуры и изменению надежности программного обеспечения. При малой надежности программного обеспечения ($p_2 = 0.9$) применение одноверсионной четырехканальной МРА не позволяет достигнуть высоких значений вероятности безотказной работы (0.9), тогда как четырехверсионные архитектуры существенно повышают вероятности безотказной работы (0.995).

Результаты исследования четырехканальных одноверсионных МРА приведены в табл. 2, четырехверсионных МРА – в табл. 3.

Анализ адаптивных четырехканальных четырехверсионных архитектур (табл. 3) показал, что при высокой надежности аппаратных средств и программного обеспечения или относительно малом времени непрерывной работы лучше адаптивные схемы не применять. При уменьшении вероятности безотказной работы аппаратных средств, программного обеспечения или большой длительности бесперебойной работы необходимо вводить схемы адаптации, причем, лучшей схемой адаптации является 4441.

При высокой надежности АС и ПО целесообразно применять неадаптивные четырехканальные многоверсионные архитектуры. При снижении ВБР ПО высоких показателей надежности можно достигнуть только при применении схем адаптации.

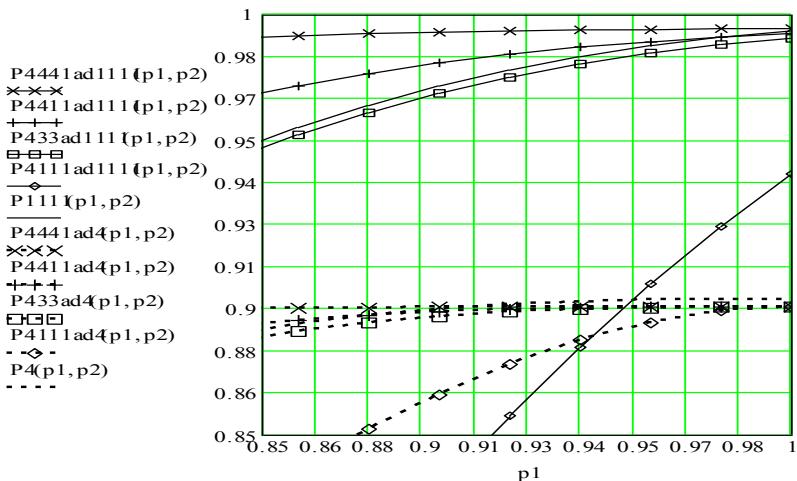


Рис. 1. Графики зависимости ВБР одноверсионных и четырехверсионных четырехканальных МРА от ВБР АС одного канала при $p_2 = 0.9$; $R_k = R_y = R_{m23} = R_{срk} = R_{ср11} = 0.999$; $R_{m24} = 0.998$

Таблица 2

Приоритетные ряды одноверсионных четырехканальных МРА с различными схемами адаптации

Значения показателей надежности	Интервалы переменной	Приоритетные ряды						
		1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_{срk} = R_k = R_y = R_{m23} = R_{ср11} = 0.999$ $R_{m24} = 0.998$ $p_2 = 0.999$	$p_1 = 0.5 \dots 0.88$	4331	4441	4311	4411	4	433	4111
	$p_1 = 0.88 \dots 0.901$	4331	4441	4	4411	4311	433	4111
	$p_1 = 0.901 \dots 0.92$	4	4331	4441	4411	4311	433	4111
	$p_1 = 0.92 \dots 0.936$	4	4311 4411	433	4331 4441	4111	-	-
	$p_1 = 0.98 \dots 1$	4	4311 4411	433	4111	4331 4441	-	-
$R_{срk} = R_k = R_y = R_{m23} = R_{ср11} = 0.999$ $R_{m24} = 0.998$ $p_2 = 0.9$	$p_1 = 0.5 \dots 0.88$	4331	4441	4311	4411	4	433	4111
	$p_1 = 0.88 \dots 0.901$	4331	4441	4	4311	4411	433	4111
	$p_1 = 0.901 \dots 0.92$	4	4331 4441	4311 4411	433	4111	-	-
	$p_1 = 0.92 \dots 0.935$	4	4311 4411	4331 4441	433	4111	-	-
	$p_1 = 0.935 \dots 0.98$	4	4311 4411	433	4331 4441	4111	-	-
	$p_1 = 0.98 \dots 1$	4	433 4441 433	4111	4331 4441	-	-	-

Значения показателей надежности	Интервалы переменной	Приоритетные ряды						
		1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_{скр} = R_K = R_Y = R_{мэ23} = R_{ср11} = 0.999$ $R_{мэ24} = 0.998$ $p1 = 0.999$	$p2 = 0.5 \dots 1$	4	4311 4411 433 4111	4331 4441	-	-	-	-
$R_{скр} = R_K = R_Y = R_{мэ23} = R_{ср11} = 0.999$ $R_{мэ24} = 0.998$ $p1 = 0.9$	$p2 = 0.5 \dots 1$	4	4331 4441	4311 4411	433	4111	-	-
$\lambda_K = \lambda_Y = \lambda_{мэ23} = \lambda_{скр} = 10^{-8} 1/ч$ $\lambda_{мэ24} = 1.5 \times 10^{-8} 1/ч$ $\lambda_1 = \lambda_2 = 10^{-6} 1/ч$	$t = 0 \dots 9.7 \cdot 10^4 ч$	4	4331 4441	4311 4411	433	4111	-	-
	$t = 9.7 \cdot 10^4 \dots 1.45 \cdot 10^5 ч$	4331 4441	4	4311 4411	433	4111	-	-
	$t = 1.45 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^5 ч$	4331 4441	4311 4411	4	433	4111	-	-

Таблица 3

**Приоритетные ряды схем адаптации четырехканальных
четырёхверсионных мажоритарно - резервированных архитектур**

Значения показателей надежности	Интервалы переменной	Приоритетные ряды						
		1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_{скр} = R_K = R_Y = R_{мэ23} = R_{ср11} = 0.999$ $R_{мэ24} = 0.998$ $p2 = 0.999$	$p1 = 0.5 \dots 0.882$	4331	4441	4311	4411	1111	433	4111
	$p1 = 0.882 \dots 0.908$	4331	4441	1111	4411	4311	433	4111
	$p1 = 0.908 \dots 1$	1111	4331 4441	4311 4411	433	4111	-	-
$R_{скр} = R_K = R_Y = R_{мэ23} = R_{ср11} = 0.999$ $R_{мэ24} = 0.998$ $p2 = 0.9$	$p1 = 0.5 \dots 0.98$	4331	4441	4311	4411	1111	433	4111
	$p1 = 0.98 \dots 1$	4331	4441	1111	4311	4411	433	4111
$\lambda_K = \lambda_Y = \lambda_{мэ23} = \lambda_{скр} = 10^{-8} 1/ч$ $\lambda_{мэ24} = 1.5 \times 10^{-8} 1/ч$ $\lambda_1 = \lambda_2 = 10^{-6} 1/ч$	$t = 0 \dots 3.24 \cdot 10^4 ч$	1111	4331 4441	4311 4411	433	4111	-	-
	$t = 3.24 \cdot 10^4 \dots 4.8 \cdot 10^4 ч$	4331 4441	1111	4311 4411	433	4111	-	-

Введение многоверсионности в четырехверсионные мажоритарно - резервированные архитектуры позволяет добиться значительного повышения надежности системы за счет значительного уменьшения влияния на нее надежности программных средств. Наивысшего значения вероятности безотказной работы можно достигнуть с применением четырехканальной четырехверсионной и двухверсионной МРА.

Правильный выбор и применение схем адаптации в многоверсионных четырехканальных архитектурах в цифровых управляющих и вычислительных системах позволяет повысить вероятность безотказной работы до 0,999 и выше. Использование схем адаптации целесообразно только при необходимости длительного времени непрерывной работы в необслуживаемом режиме, при средствах контроля, реконфигурации, коммутации и управления близких к идеальным и относительно малой вероятности безотказной работы программного обеспечения и аппаратных средств одного канала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мамедли Э.М., Соболев Н.А. Механизмы операционных систем, обеспечивающие отказоустойчивость в управляющих многомашинных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. – 1995. – №5. – С. 7 - 61 .
2. Харченко В.С. Теоретические основы теории дефектоустойчивых цифровых систем с версионной избыточностью. – Х.: МО Украины, 1996. – 506 с.
3. Березюк Н.Т., Гапунин А.Я., Подлесный Н.И. Живучесть микропроцессорных систем управления. – К.: Техника, 1988. – 143 с.
4. Кривоносов А.И., Благодарный Н.П., Харченко В.С. и др. Принципы построения и оценка надежности бортовых управляющих вычислительных систем с мажоритарной архитектурой // Космічна наука і технологія. – 1995. – №1. – С. 67 - 73.
5. Харченко В.С., Пискачева И.В. Систематизация и выбор многоверсионных мажоритарных архитектур бортовых ЦВМ // Технологии приборостроения. – 1999. – №3. – С. 25 - 31.

Поступила 25.03.2002

ПИСКАЧЕВА Ирина Викторовна, мл. научный сотрудник научного центра при ХВУ. Окончила ХПИ в 1980 году. Область научных интересов – методы и средства обеспечения живучести, надежности и безопасности.
