

УДК 681.04

С.А. КОШМАН¹, А.А. СИОРА², KHERE ALI ABDULLAH³, В.А. КРАСНОБАЕВ¹¹Харьковский национальный технический университет
сельского хозяйства им. П. Василенко, Украина²Научно-производственное предприятие "Радий", Украина³Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОРОВ В СИСТЕМЕ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ

В данной статье описан один из способов повышения надёжности спецпроцессоров в системе остаточных классов, а также представлен пример расчёта для различных систем обработки информации.

надёжность, система счисления в остаточных классах, система обработки информации

Введение

Одним из основных требований, предъявляемых к современным системам обработки информации (СОИ), которые работают в реальном времени, являются обеспечение заданного уровня надёжности. Это связано, прежде всего, с тем, что выход из строя или даже кратковременный сбой в работе таких вычислительных систем (ВС) может привести к авариям или нанести серьёзный экономический ущерб.

Целью статьи является решение и анализ задачи оптимального резервирования архитектуры высокопроизводительных процессоров в системе остаточных классов (СОК).

Анализ последних исследований

Существует два основных метода повышения надёжности ВС, функционирующих в ПСС [1]: повышение надёжности отдельных логических элементов (использование новой элементной базы) и введение различных типов избыточности (применения различных видов резервирования, влияющих как на конструктивную, так и на функциональную надёжность ВС). Поскольку надёжность логических элементов ВС определяется уровнем развития технологии, то очевидно, что введение избыточности при использовании любой элементной базы являет-

ся наиболее эффективным путем повышения надёжности ВС. Один из эффективных практических методов повышения надёжности ВС является структурное резервирование, например, на уровне троированной мажоритарной структуры. Однако применение структурного резервирования в ПСС усложняет структуру вычислительного комплекса, повышает его энергопотребление, увеличивает массогабаритные и другие характеристики, что в конечном итоге повышает стоимость его создания и эксплуатации, а также ограничивает сферу его применения в различных технических системах. В связи с этими обстоятельствами возникает необходимость применения новых методов повышения надёжности ВС, и, в частности, методов основанных на применении кодов в СОК. Возможность повышения надёжности при этом обуславливается свойствами СОК (малоразрядность, равноправность и независимость остатков), что позволяет более эффективно применять структурное резервирование по сравнению с кодами в ПСС.

Основные материалы исследований

При применении резервирования возможна формулировка задачи оптимального резервирования в двух вариантах [2]:

1. Прямая задача оптимального резервирования. Требуется обеспечить вероятность безотказной работы СОО не менее заданной при минимальных затратах:

$$\begin{cases} V_{NE}^{(l)} \rightarrow \min; \\ P_{NE}^{(l)}(t) \geq P_{cra}^{(l)}(t) [t = const]. \end{cases} \quad (1)$$

2. Обратная задача оптимального резервирования. Требуется обеспечить максимально возможную вероятность безотказной работы СОО при заданных затратах:

$$\begin{cases} P_{NE}^{(l)}(t) [t = const] \rightarrow \max; \\ V_{NE}^{(l)} \leq V_{cra}^{(l)}. \end{cases} \quad (2)$$

где $P_{NE}^{(l)}(t)$ – вероятность безотказной работы l -байтовой СОО в СОК;

$P_{cra}^{(l)}(t)$ – заданное значение вероятности безотказной работы;

$V_{NE}^{(l)}$ – количество оборудования (“стоимость затрат”) СОО в СОК;

$V_{cra}^{(l)}$ – заданное количество оборудования.

Перечислим некоторые из известных методов решения задачи оптимального резервирования [3]:

- 1) метод динамического программирования;
- 2) модифицированный метод динамического программирования;
- 3) метод наискорейшего покоординатного спуска;
- 4) метод частной оптимизации с контролем ограничений;
- 5) метод “отражающего экрана”;
- 6) метод выбора наиболее “жесткого” ограничения.

Каждый из перечисленных методов имеет свои достоинства и недостатки. Поэтому рассмотрим наиболее удобный и сравнительно простой для проведения инженерных расчётов метод наискорейшего покоординатного спуска метода, которого состоит в следующем.

Это многошаговый процесс, который представлен на рис. 1.

1. Рассматривается система (рис. 1), состоящая

из n участков. В первую очередь необходимо для каждого i -го участка определить при различных кратностях резервирования m_i значения вероятности безотказной работы $P_i(t, m_i)$ для некоторого фиксированного интервала времени при соответствующем способе резервирования, который возможен для данного участка системы, по одной из известных формул теории надежности.

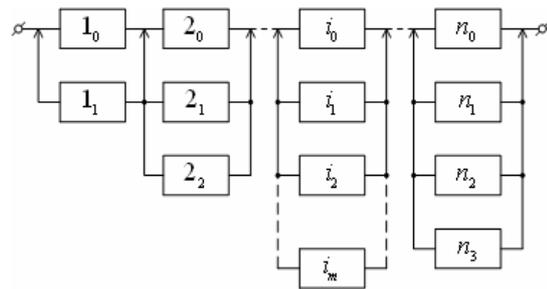


Рис. 1. Надежностная схема СОО

2. Составляется сводная таблица 1 значений $P_i(t, m_i)$ для всех практически возможных m_i и различных $i = 1, 2, \dots, n$ (для различных участков системы), полученных по указанным формулам.

Таблица 1

Сводная таблица переменных значений

m_i	$P_1(t)$	$P_2(t)$	...	$P_i(t)$	...	$P_n(t)$
0	$P_1(t, 0)$	$P_2(t, 0)$	...	$P_i(t, 0)$	...	$P_n(t, 0)$
1	$P_1(t, 1)$	$P_2(t, 1)$	...	$P_i(t, 1)$	...	$P_n(t, 1)$
2	$P_1(t, 2)$	$P_2(t, 2)$	...	$P_i(t, 2)$	...	$P_n(t, 2)$
...
m	$P_1(t, m)$	$P_2(t, m)$	...	$P_i(t, m)$	...	$P_n(t, m)$
...

3. На основании полученных значений $P_i(t, m_i)$, сведенных в табл. 1, и известных значений “стоимости” элементов ω_i рассчитывается $\gamma_i(m_i)$ по фор-

муле (3) для всех значений i и различных значений m_i , после чего составляется табл. 2.

$$\gamma_i(m_i+1) = \frac{P_i(t, m_i+1) - P_i(t, m_i)}{\omega_i P_i(t, m_i)} \quad (3)$$

4. Все значения $\gamma_i(m_i)$ табл. 2 перенумеровываются в каждом из столбцов в порядке убывания, а также далее нумеруем все значения $\gamma'(k)$ в порядке их убывания, и исследуется следующий многошаговый процесс.

Таблица 2

Сводная таблица полученных данных

m_i	γ_1	γ_2	...	γ_i	...	γ_n
0	—	—	...	—	...	—
1	$\gamma_1(1)$	$\gamma_2(1)$	...	$\gamma_i(1)$	...	$\gamma_n(1)$
2	$\gamma_1(2)$	$\gamma_2(2)$	...	$\gamma_i(2)$	...	$\gamma_n(2)$
...
m	$\gamma_1(m)$	$\gamma_2(m)$	...	$\gamma_i(m)$	...	$\gamma_n(m)$
...

На первом шаге:

— выбирается γ с номером 1 (максимальная из величин $\gamma_i(1)$);

— по таблице 1 отыскивается соответствующая величина $P_i(t, 1)$;

— вычисляется значение

$$P_c^{(1)}(t) = \frac{P_i(t, 1)}{P_i(t, 0)} P_c^{(0)}(t), \quad (4)$$

где $P_c^{(0)}(t) = \prod_{k=1}^n P_k(t, 0)$ — начальное значение вероятности безотказной работы исходной системы (без резервирования);

— вычисляется значение

$$W_c^{(1)} = W_c^{(0)} + \omega_i, \quad (5)$$

где $W_c^{(0)}$ — начальная "стоимость" системы;

ω_i — "стоимость" одного элемента, который предназначен для резервирования i -го участка.

На втором шаге:

— выбирается γ с номером 2 (максимальная среди оставшихся $\gamma_k(1)$ для $k \neq 1$ или $\gamma_i(2)$);

— по таблице 1 отыскивается соответствующая величина $P_k(t, 1)$ (или $P_i(t, 2)$, если номер 2 имеет $\gamma_i(2)$);

— вычисляется значение

$$P_c^{(2)}(t) = \frac{P_k(t, 1)}{P_k(t, 0)} P_c^{(1)}(t), \quad (6)$$

или

$$P_c^{(2)}(t) = \frac{P_i(t, 2)}{P_i(t, 1)} P_c^{(1)}(t), \quad (7)$$

если номер 2 имеет $\gamma_i(2)$;

— вычисляется значение

$$W_c^{(2)} = W_c^{(1)} + \omega_k, \quad (8)$$

или имеем

$$W_c^{(2)} = W_c^{(1)} + \omega_i, \quad (9)$$

если номер 2 имеет $\gamma_i(2)$.

Затем этот многошаговый процесс продолжается при использовании выражений

$$P_c^M(t) = \frac{P_i(t, m_i)}{P_i(t, m_i - 1)} P_c^{M-1}, \quad (10)$$

или

$$W_c^{(M)} = W_c^{(M-1)} + \omega_i, \quad (11)$$

при $m_i \geq 0$; $M \geq 0$.

Полученные данные сводятся в табл. 3.

Таблица 3

Совокупность промежуточных значений

M	m_1	m_2	...	m_n	$P_i^{(M)}(t)$	$W_c^{(M)}$
0	0	0	...	0	$P_i^{(0)}(t)$	$W_c^{(0)}$
1	1	0	...	0	$P_i^{(1)}(t)$	$W_c^{(1)}$
2	1	0	...	0	$P_i^{(2)}(t)$	$W_c^{(2)}$
3	1	1	...	0	$P_i^{(3)}(t)$	$W_c^{(3)}$
4	1	2	...	0	$P_i^{(4)}(t)$	$W_c^{(4)}$
5	1	3	...	0	$P_i^{(5)}(t)$	$W_c^{(5)}$
6	2	3	...	1	$P_i^{(6)}(t)$	$W_c^{(6)}$
...	...	...	...	1	...	...

Процесс прекращается на шаге

$$M \left(M = \sum_{i=1}^n m_i \right), \quad (12)$$

когда для первой задачи выполняется условие

$$P_c^{(M-1)}(t) < P_{\tilde{n}d}(t) \leq P_c^M(t), \quad (13)$$

а для второй задачи выполняется условие

$$W_c^M \leq W_{\tilde{n}d} \leq W_c^{(M+1)}. \quad (14)$$

Из табл. 4 видно, что независимо от того, какая задача решается, каков процесс решения, и условия выбора γ_i на каждом шаге автоматически обеспе-

чивается минимальная "стоимость" системы при решении первой задачи и максимально возможная вероятность безотказной работы системы при решении второй задачи.

Таблица 4

Таблица решений задачи оптимального резервирования

M	$P_i^{(M)}(t)$	$W_c^{(M)}$
0	$P_i^{(0)}(t)$	$W_c^{(0)}$
1	$P_i^{(1)}(t)$	$W_c^{(1)}$
2	$P_i^{(2)}(t)$	$W_c^{(2)}$
3	$P_i^{(3)}(t)$	$W_c^{(3)}$
4	$P_i^{(4)}(t)$	$W_c^{(4)}$
5	$P_i^{(5)}(t)$	$W_c^{(5)}$
6	$P_i^{(6)}(t)$	$W_c^{(6)}$
...

В соответствии с приведённой методикой в табл. 5 сведены данные, для однобайтового вычислительного устройства в СОК при интенсивности отказов $\lambda = 10^{-8}$ и временем работы $t = 1$ [час], расчёта вероятности безотказной работы $P_i^{(M)}(t)$ и "стоимости" системы $W_c^{(M)}$, а также из приведенной таблицы видно, какая надёжностная схема при этом получается.

Таблица 5

Предварительные результаты вычислений

Основания СОК				Произведение $P_{\tilde{N}E}^{(M)}(t)$	$W_c^{(M)}$ [y. e.]
$m_1 = 3$	$m_2 = 4$	$m_3 = 5$	$m_4 = 7$		
0,999999800000	0,999999800000	0,999999700000	0,999999700000	0,999999000000	10
0,999999800000	0,999999800000	0,999999999999	0,999999700000	0,999999300000	13
0,999999800000	0,999999800000	0,999999999999	0,999999999999	0,999999599999	16
1,000000000000	0,999999800000	0,999999999999	0,999999999999	0,999999799999	18
1,000000000000	1,000000000000	0,999999999999	0,999999999999	0,999999999999	20
1,000000000000	1,000000000000	1,000000000000	0,999999999999	0,999999999999	23
1,000000000000	1,000000000000	1,000000000000	1,000000000000	0,999999999999	26

При этом вероятность безотказной работы резервированной СОИ в СОК $P_{NI E}^{(M)}(t)$ определяется для каждого фиксированного интервала времени работы данной СОИ. В табл. 6 сведены результаты расчёта вероятностей безотказной

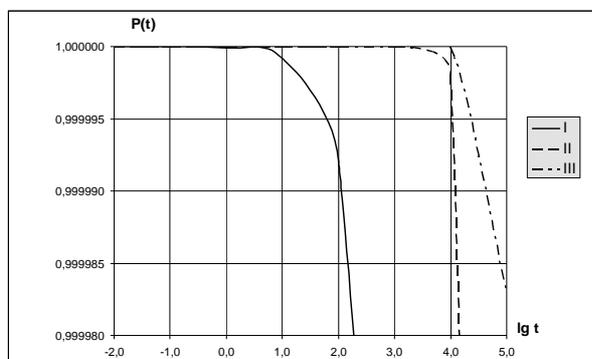
работы однобайтовой СОИ при $\lambda = 10^{-8}$ для резервированной одноканальной структуры СОИ в ПСС (I), для трехканальной мажоритарной структуры СОИ в ПСС (II), а также для СОИ в СОК (III).

Таблица 6

Вероятности безотказной работы для однобайтовой СОИ при $\lambda = 10^{-8}$

Время работы СОИ (t)	lg t	ПСС		СОК
		Одноканальная СОИ	Трёхканальная мажоритарная СОИ	
		I	II	
0,01	-2	0,999999992	1,000000000	1,000000000
0,1	-1	0,999999920	1,000000000	1,000000000
1	0	0,999999200	0,999999999	0,999999999
10	1	0,999992000	0,999999999	0,999999999
100	2	0,999920000	0,999999998	0,999999999
1000	3	0,999200032	0,999999808	0,999999983
10000	4	0,9992003199	0,9999980826	0,999998300
100000	5	0,9920319148	0,9998105407	0,999830161

В соответствии с данными из табл. 5 на рисунке 2 показаны графические зависимости вероятности безотказной работы от времени $P(t)$ для каждой структуры СОИ.

Рис. 2. Графики функции $y = P(t)$ для $l = 1, \lambda_y = 10^{-8}$

Выводы

Таким образом, полученные результаты расчёта и сравнительного анализа надёжности СОИ в СОК и СОИ в ПСС, полученные при решении задачи оптимального резервирования методом наискорейшего по координатному спуску, показали, что использование непозиционного кодирования позволяет достичь заданного уровня надёжности при меньшем допол-

нительно вводимом количестве оборудования, чем широко известный в ПСС метод мажоритарного троирования.

Литература

1. Краснобаев В.А. Методы повышения надёжности специализированных ЭВМ систем и средств связи. – МО СССР, 1990. – 172 с.
2. Шишенок Н.А., Репкин В.Ф., Барвинский Л.Л. Основы теории надёжности и эксплуатации радиоэлектронной техники. – М.: Сов. радио, 1964. – 552 с.
3. Кошман С.О. Дослідження методів оптимізації структур систем обробки інформації Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: Вісник ХНТУСГ. – Х.: ХНТУСГ, 2007. – Вип.57, т.2. – С. 111-116.

Поступила в редакцию 23.01.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.А. Фурман, Национальный технический университет сельского хозяйства им. Петра Василенка, Харьков.