

---

УДК 519.74018

**А. М. Романкевич**, д-р техн. наук,  
**В. А. Романкевич**, канд. техн. наук,  
**Мораведж Сейед Милад**, аспирант (Иран)  
Национальный технический ун-т Украины «КПИ»  
(Украина, 03056, Киев, проспект Победы, 37  
тел. (044) 454-90-32, E-mail: romankev@scs.ntu-kpi.kiev.ua)

## **О повышении надежности реконфигурируемых отказоустойчивых многопроцессорных систем управления сложными объектами**

Проблема повышения вероятности безотказной работы отказоустойчивых реконфигурируемых многопроцессорных систем управления сложными объектами возникает на этапе проектирования системы в случае, когда в результате расчета установлено, что необходимый уровень надежности не достигнут. Предложено решение проблемы путем организации устойчивости системы к некоторым отказам процессоров более высокой кратности. Описана методика определения допустимого множества векторов состояния отказоустойчивых многопроцессорных систем (ОМС), которые можно блокировать, используя резервы производительности системы. Приведен алгоритм выбора множества векторов состояния ОМС, блокирование которых приводит к решению поставленной задачи.

Проблема підвищення ймовірності безвідмовної роботи відмовостійких реконфігурованих багатопроцесорних систем управління складними об'єктами виникає на етапі проектування системи у випадку, коли в результаті розрахунку встановлено, що необхідний рівень надійності не є досягнутим. Запропоновано вирішувати проблему шляхом організації стійкості системи до деяких відмов процесорів більш високої кратності. Описано методику визначення припустимої множини векторів стану відмовостійких багатопроцесорних систем (ВБС), які можна блокувати, використовуючи резерви продуктивності системи. Наведено алгоритм вибору множини векторів стану ВБС, блокування яких приводить до розв'язання поставленої задачі.

*К л ю ч е в ы е с л о в а: отказоустойчивые многопроцессорные системы, реконфигурируемость, надежность, производительность.*

Одним из важнейших параметров систем обработки информации является надежность, и требования к ней постоянно растут. Это приводит к тому, что специалистам все чаще приходится строить отказоустойчивые многопроцессорные системы (ОМС), что позволяет одновременно решать и другую важнейшую задачу — повышение производительности системы.

Отказоустойчивые реконфигурируемые многопроцессорные системы способны сами себя тестировать, обнаруживать неисправные модули, исключать их из работы, реконфигурироваться и продолжать выполнение всех функций в полном объеме [1—3]. Понятно, что такие системы должны иметь как структурную, так и временную избыточность [4]. Расчет надежности ОМС представляет определенные трудности как теоретические, так и практические, поскольку стандартные методы расчета надежности безызбыточных систем в данном случае непригодны. Это касается, в первую очередь, систем управления, поскольку вычислительные многопроцессорные системы, как правило, являются однородными, и расчет их надежности значительно проще. ОМС управления сложными объектами состоят из нескольких подсистем, каждая из которых имеет свою степень отказоустойчивости, различное число процессоров, отличающихся один от другого как по производительности, так и по надежности, различные шины и др. ОМС, устойчивую к любому отказу процессоров, кратность которого не превышает некоторой фиксированной величины  $m$ , назовем базовой и обозначим  $K(m, n)$ , где  $n$  — число процессоров в системе.

Как бы ни был сложен расчет надежности таких систем, на этапе проектирования он выполняется, и если надежность оказывается недостаточной, приходится принимать определенные меры. Под надежностью будем понимать один из важнейших ее параметров — вероятность безотказной работы за определенный промежуток времени, который обозначим  $P_{б.р}$ .

**Пути повышения надежности ОМС.** Помимо традиционных методов повышения надежности (схемные, конструктивные, на этапах изготовления и при эксплуатации, применение помехоустойчивого кодирования и др.) для повышения надежности отказоустойчивых многопроцессорных систем обязательно требуется использование структурной и временной избыточности. Эта задача может быть решена несколькими способами, среди которых выделим следующие:

1. Переход к новой архитектуре. Это, безусловно, наиболее радикальный путь, требующий от разработчика максимальных усилий.

2. Добавление к прежней архитектуре одного или нескольких процессоров, что может обеспечить

повышение степени отказоустойчивости, например, до уровня  $m + 1$ ;  
увеличение вероятности  $P_{б.р}$  при том же значении  $m$  (например, дублированием);

повышение надежности в результате использования различных методов структурной и временной избыточности.

3. Замена одного или нескольких процессоров с улучшением их характеристик (увеличением вероятности безотказной работы, производи-

тельности, оптимизации тестирования и самотестирования и др.), что обеспечивает либо прямое увеличение  $P_{б,р}$  системы, либо увеличение временной избыточности и связанные с этим возможности.

4. Использование внутренних резервов (если таковые имеются), в частности обеспечение устойчивости к некоторым отказам повышенной кратности (этот путь наименее трудоемкий).

5. Комбинация перечисленных способов.

**Увеличение  $P_{б,р}$  ОМС блокированием некоторого множества векторов состояния системы.** Очевидно, более привлекательным для разработчика является четвертый способ повышения надежности, не связанный с изменением структуры ОМС. Суть его в следующем.

Пусть выполнена разработка базовой ОМС  $K(m, n)$  (устойчивой к любым  $m$ -кратным отказам из  $n$  процессоров). В результате расчета вероятности  $P_{б,р}$  любым методом установлено, что она немного меньше требуемой величины. Если запас производительности позволяет, можно сделать систему устойчивой к некоторому множеству  $(m + 1)$ -кратных отказов. При этом ОМС претерпевает качественные изменения — она перестает быть базовой. Это влечет за собой изменение общей архитектуры ОМС, а именно изменение ее программного обеспечения: усложняется реконфигурирование системы. Следует заметить, что этим способом радикального увеличения значения  $P_{б,р}$  достичь невозможно. Однако его преимущества несомненны. Фактически суть задачи сводится к поиску нужного множества  $(m + 1)$ -кратных отказов.

**Основные обозначения.** Для формализации задачи введем следующие определения и обозначения:

$K(m, n)$  — ОМС, содержащая  $n$  процессоров и устойчивая к отказам не более  $m$  из них;

$S$  — производительность проектируемой ОМС,  $S = \sum_{i=1}^n s_i$ ;

$s_i$  — производительность  $i$ -го процессора;

$S^*$  — требуемая производительность ОМС;

$P_{б,р}$  — вероятность безотказной работы ОМС за время  $t$  согласно расчету;

$p(x_i)$  — вероятность безотказной работы  $i$ -го процессора за время  $t$ ;

$P_{б,р}^*$  — требуемая величина  $P_{б,р}$  за время  $t$ ;

$w$  — вектор состояния ОМС;

$\alpha_i$  — компонента вектора, соответствующая состоянию  $i$ -го процессора (0 — отказ, 1 — работоспособность);

$W$  — множество векторов состояния, содержащих  $m + 1$  нулевую компоненту;

$W_s$  — подмножество множества  $W$  векторов, которые можно блокировать, исходя из  $S$ ;

$W_p$  — подмножество множества  $W_s$  векторов, которые следует блокировать;

$P_w$  — вероятность появления вектора  $w$ ;

$h_i$  — группа процессоров, имеющих одинаковые значения  $s_i$ ,  $i = 1 \dots r$ ;

$a_i$  — число процессоров, входящих в группу  $h_i$ ;

$A_i$  — вектор, компонентами которого являются некоторые числа  $a_i^* \leq a_i$ ;

$A$  — множество векторов  $A_i$ , компоненты которых удовлетворяют определенному условию.

**Формальная постановка задачи.** Описанную выше задачу теперь представим в следующем виде: увеличить  $P_{б,р}$  проектируемой ОМС на величину  $\Delta P = P_{б,р}^* - P_{б,р}$  блокированием векторов некоторого множества  $W_p$ . Под блокированием вектора  $w$  будем понимать организацию продолжения функционирования ОМС при появлении отказов  $m + 1$  процессоров, соответствующих нулевым компонентам вектора  $w$ .

**Векторы, которые можно блокировать.** Прежде чем решать сформулированную задачу, определим, какие векторы состояния ОМС  $w \in W$  и какое их количество можно блокировать. Если можно блокировать любой вектор, то, очевидно, система может быть трансформирована в  $(m + 1)$  отказоустойчивую —  $K(m + 1, n)$ . Если нельзя блокировать ни одного вектора, значит, ОМС работает на пределе своих возможностей и рассматриваемый подход неприменим. Следовательно, блокировать можно такой вектор состояния ОМС, при котором суммарная производительность процессоров, оставшихся работоспособными, достаточна для решения всех функциональных задач, стоящих перед системой.

Согласно принятым обозначениям определим резерв производительности:  $\Delta S = S - S^*$ . Расположим процессоры системы в порядке возрастания  $s_i$ . При этом обнаруживается, что какие-то процессоры имеют одинаковую производительность. Объединим их в группы. Пусть получилось  $r$  групп,  $h_1, h_2, \dots, h_r$ , и в группе  $h_i$  имеется  $a_i$  процессоров производительностью  $s_i$ . Обозначим через  $A_i$  вектор, компонентами которого являются числа  $a_i^*$ , удовлетворяющие условиям

$$0 \leq a_i^* \leq a_i, \quad \sum_{i=1}^r a_i^* = m+1. \quad (1)$$

\*В литературе опубликовано много работ о k-out-of-n системах, где так или иначе использованы векторы  $w \in W$ . Однако эти работы относятся к расчету, а не к повышению надежности k-out-of-n систем, векторы  $w$  не выбираются, а заданы, и между ними предполагается наличие определенной зависимости (функциональной или алгоритмической), т.е. поставленная выше задача отсутствует.

Фактически  $a_i^*$  — это число процессоров из группы  $h_i$ , причем соответствующие им компоненты вектора  $w \in W$  принимают нулевое значение.

Строим некоторое множество  $A$  векторов  $A_q$ , при этом  $A_q \in A$ , если

$$\sum_{i=1}^r a_i^* s_i \leq \Delta S. \quad (2)$$

Вектор состояния  $w \in W$  можно блокировать ( $w \in W_S$ ) тогда и только тогда, когда

$$S_w \geq S^*. \quad (3)$$

Здесь  $S_w = \sum_{i=1}^n \alpha_i s_i$ , где  $\alpha_i$  — компоненты вектора  $w$ . Фактически  $S_w$  является суммарной производительностью работоспособных процессоров.

Мощность множества  $W_S$  запишем в виде

$$|W_S| = \sum_{A_q \in A} \prod_{j=1}^r C_{a_j}^{a_j^*}. \quad (4)$$

Если вектор, содержащий  $m + 1$  нулевых компонент, соответствующих процессорам с максимальными значениями  $s_i$ , удовлетворяет условию (3), это означает, что резерв производительности позволяет блокировать любой вектор  $w \in W$ , и, следовательно, ОМС может стать  $K(m + 1, n)$  без увеличения числа процессоров. В частности, это относится к ОМС  $K(m, n)$  с одинаковыми процессорами, где доступно блокирование даже одного вектора с  $m + 1$  нулевой компонентой. Если вектор  $w \in W$  с нулевыми компонентами, соответствующими процессорам с минимальными значениями  $s_i$ , не удовлетворяет условию (3), то это означает, что к проектируемой ОМС рассматриваемый подход неприменим. Последнее легко проверяется: ОМС не поддается рассматриваемой трансформации, если  $\sum_{i=1}^{m+1} s_i < \Delta S$ , где  $i$  —

номера процессоров с наименьшими значениями производительности. В то же время, понятно, что всегда должно быть  $\Delta S \geq \sum_{j=1}^m s_j$ , где  $j$  — номера

процессоров с наибольшими значениями производительности, ибо в противном случае ОМС не была бы устойчивой к любым  $m$ -кратным отказам.

**Пример.** Пусть разрабатываемая ОМС содержит 20 процессоров и является базовой 2-отказоустойчивой, т.е.  $K(2, 20)$ . Возникает необходимость повысить ее надежность блокированием некоторого множества векторов состояния с тремя нулевыми компонентами.

Определим мощность множества  $W_s$ . Пусть по величине  $s_i$  процессоры разбиты на четыре группы  $h_1, \dots, h_4$  (предполагаем, что производительность измеряется в некоторых относительных единицах):

	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$
$a_i$	1	6	8	5
$s_i$	5	4	3	2

Пусть производительность, необходимая для функционирования ОМС, составляет  $S^* = 54$ . Учитывая, что  $S = \sum_{i=1}^{20} s_i = 63$ , находим  $\Delta S = 63 - 54 = 9$ .

Строим множество  $A$  векторов  $A_q$ :

	$a_1^*$	$a_2^*$	$a_3^*$	$a_4^*$
$A_1$	1	0	0	2
$A_2$	0	1	1	1
$A_3$	0	1	0	2
$A_4$	0	0	3	0
$A_5$	0	0	2	1
$A_6$	0	0	1	2
$A_7$	0	0	0	3

Их компоненты  $a_i^*$  удовлетворяют, с одной стороны, условиям (1), а с другой, — условию (2). Теперь с учетом (4) находим число векторов  $w \in W$ , которые можно блокировать:

$$|W_s| = 1 \cdot C_5^2 + 6 \cdot 8 \cdot 5 + 6 \cdot C_5^2 + C_8^3 + C_8^2 \cdot 5 + 8 \cdot C_5^2 + C_5^3 = 596.$$

Как видим, выбор достаточно велик — больше половины множества  $W$  векторов с тремя нулевыми компонентами:  $C_{20}^3 = 1140$ .

**Векторы, которые следует блокировать.** Из множества  $W_s$  выберем некоторое подмножество  $W_p$  векторов, которые следует блокировать:

$$w \in W_p, \quad \sum_{w \in W_p} P_w \geq \Delta P. \quad (5)$$

Выбор  $W_p \subset W_s$  не всегда однозначен. Сложность проблемы выбора разработчик может оценить по формуле (4), руководствуясь определенными критериями. Среди них наиболее простым и практически важным является критерий минимума  $|W_p|$ .

В этом случае можно построить последовательность векторов из  $W_s$ , упорядочивая их по убыванию величины  $P_w$ . Полагаем

$$P_w = \prod_{i=1}^n \tilde{p}_i(x_i),$$

где

$$\tilde{p}_t(x_i) = \begin{cases} p_t(x_i), & \text{если } x_i = 1 \text{ в векторе } w, \\ 1 - p_t(x_i), & \text{если } x_i = 0 \text{ в векторе } w. \end{cases}$$

Величина  $P_t(x_i)$  должна быть известна или рассчитана стандартными методами при известных времени  $t$  и интенсивности отказов  $\lambda$ . Далее выбираем множество  $W_p$  добавлением на каждом шаге по одному вектору из последовательности, начиная с первого, пока не будет достигнуто равенство по условию (5). Однако могут быть и другие критерии, требующие отдельного исследования, например сложность организации реконфигурирования системы, необходимого для блокирования того или иного вектора. Критерием может быть также сложность модели (например, *GL*-модели [5]) поведения ОМС в потоке отказов, получаемая после ее трансформации, связанной с блокированием векторов из  $W_p$ . Если расчет  $P_{б,р}$  выполнен на основе статистических экспериментов с подобной моделью [6], то ее усложнение может повлиять на точность расчета.

**Алгоритм решения поставленной задачи.**

1. Распределяем процессоры проектируемой ОМС по группам  $h_1, h_2, \dots, h_r$ . В каждую группу входит  $a_i$  процессоров, имеющих одинаковую производительность  $s_i$ .

2. Строим множество  $A$  векторов  $A_q = (a_1^*, a_2^*, \dots, a_r^*)$ , где  $0 \leq a_i^* \leq a_i$ , при этом  $A_q \in A$ , если

$$\sum_1^r a_i^* s_i \leq \Delta S.$$

3. Определяем множество  $W_s$  векторов состояния ОМС, которые можно блокировать, учитывая, что  $w \in W_s$ , если

$$S_w = \sum_{i=1}^n \alpha_i s_i \geq S^*,$$

где  $\alpha_i$  — компоненты вектора  $w \in W$ .

4. Определяем мощность множества  $W_s$  по (4).

5. Используя определенный критерий и неравенство (5), выбираем из множества  $W_s$  подмножество  $W_p$  векторов, которые действительно надо блокировать.

6. Если сумма вероятностей векторов множества  $W_s$  оказывается недостаточной для увеличения  $P_{б,р}$  на  $\Delta P$ , рекомендуется выбрать один из упомянутых выше путей повышения надежности, выполнить новый расчет  $P_{б,р}$  проекта и перейти к п. 1.

**Вывод.** Блокирование некоторого множества векторов состояния системы с повышенной кратностью отказов повышает надежность ОМС без изменения ее структуры и множества процессоров.

A problem of raising probability of failure-free work of failure-resistant reconfigurable multiprocessor systems for control of complex object arises at the stage of the system designing in case when it is established by calculations that a necessary level of reliability has not been achieved. It is proposed to solve the problem by organizing the system resistance to some failures of processor of a higher multiplicity. A procedure of determining the admissible set of vectors of failure-resistant multiprocessor systems (FMS), which may be blocked using the system productivity reserves has been described. An algorithm of choice of a set of FMS state vectors which blocking leads to the solution of the set problem has been presented.

1. *Многоверсионные системы, технологии, проекты* / В. С. Харченко, В. Я. Жихарев, В. М. Илюшко, Н. В. Нечипорук. — Харьков : Национальный Аэрокосмический ун-т «Харьковский авиационный ин-т», 2003. — 486 с.
2. *Иьуду К. А.* Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем. — М. : Высшая школа, 1989. — 216 с.
3. *Каляев И. А., Левин И. И., Семерников Е. А., Шмойлов В. И.* Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры / Под общ. ред. И. А. Каляева. — Ростов/Д : Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. — 320 с.
4. *Черкесов Г. Н.* Надежность технических систем с временной избыточностью. — М. : Сов. Радио, 1974. — 296 с.
5. *Романкевич В. А., Потапова Е. Р., Бахтари Хедаятоллах.* Иерархическая модель поведения ОМС в потоке отказов // Электрон. моделирование. — 2008. — 30, № 4. — С. 75—84.
6. *Гроль В. В., Романкевич В. А., Фесенюк А. П.* Об оценке погрешности расчета надежности отказоустойчивых многопроцессорных систем // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. — 2009. — № 5. — С. 56—59

Поступила 12.02.10;  
после доработки 29.03.10

*РОМАНКЕВИЧ Алексей Михайлович, д-р техн. наук, профессор кафедры специализированных компьютерных систем Национального технического университета Украины «КПИ». В 1961 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — самопроверяемые схемы, псевдослучайное тестирование цифровой аппаратуры, отказоустойчивые многопроцессорные системы.*

*РОМАНКЕВИЧ Виталий Алексеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры специализированных компьютерных систем Национального технического университета Украины «КПИ», который окончил в 1996 г. Область научных исследований — модели поведения отказоустойчивых многопроцессорных систем в потоке отказов, методы повышения надежности таких систем.*

*МОРАВЕДЖ Сейед Милад — аспирант кафедры специализированных компьютерных систем Национального технического университета Украины «КПИ», который окончил в 2009 г. Область научных исследований — надежность отказоустойчивых многопроцессорных систем.*