УДК 004.05

**В.В. ГРОЛЬ, В.А. РОМАНКЕВИЧ, М.С. МИЛАД, Е.Р. ПОТАПОВА**

***Национальный технический университет Украины «КПИ», Украина***

# О ВЗАИМНОМ ТЕСТИРОВАНИИ КОМПОНЕНТОВ В МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ

*Предлагаются алгоритмы распределения на этапе проектирования компонентов многопроцессорных систем на подмножества с целью оптимизации выполнения процедур самотестирования в соответствии с требованиями минимизации временных либо аппаратурных затрат. На основании анализа особенностей процедур самотестирования, выполняемых в многопроцессорных системах, в работе сформулированы критерии оптимального распределения ПЭ на подмножества, которые ставятся в соответствие компонентам системы и осуществляют оценку их (этих компонентов) технического состояния.*

***Ключевые слова:*** *многопроцессорная система, самотестирование, взаимное тестирование.*

## Введение

Область применения многопроцессорных систем (МС) постоянно расширяется, так как системы такого класса используются не только не только для производства различного рода вычислений, но и для управления сложными объектами [1]. За счет своих функциональных возможностей и универсальности они позволяют повысить такие важные характеристики систем обработки информации, как производительность и достоверность работы. Как правило, данные системы снабжены функциями самотестирования и реконфигурации с целью повышения отказоустойчивости и живучести. Один из возможных подходов к организации самопроверок в МС может быть основан на предположении, что процесс функционирования системы реализован в виде последовательности дискретных интервалов времени, называемых кадрами. При этом в каждом кадре выполняется:

а) основная (системная, рабочая) функция всеми процессорными элементами (ПЭ) системы;

б) самопроверка и определение технического состояния МС.

Для обеспечения заданных значений достоверности тестирования состояние каждого ПЭ (исправен/неисправен) может оцениваться $1 \leq k \leq (n-1)$ других ПЭ, n – общее количество процессорных модулей МС. Иными словами, k является параметром, величина которого определяется, например, допустимой кратностью неисправностей, при которой МС сохраняет свою работоспособность [2,3]. Очевидно, что нахождение оптимального значения k представляет собой отдельную актуальную и достаточно сложную задачу, подходы к решению которой рассматриваются в данной работе.

## 1. Процедура самотестирования

В общем виде длительность $t_{op}$ каждого цикла (кадра) можно представить в виде суммы

$$t_{op} = t_{sys} + t_{tst}, \qquad (1)$$

в которой $t_{sys}$ – временной интервал выполнения рабочих функций, $t_{tst}$– интервал проведения процедур самотестирования. В свою очередь $t_{tst} = t_{ts} + t_{tr} + t_{ev}$, причем $t_{ts}$ – время выполнения теста каждым ПЭ, $t_{tr}$ – время передачи результатов самоконтроля в «тестирующие» ПЭ, $t_{ev}$ – время оценки «тестирующими» элементами результатов испытаний. Допустим, что величины $t_{ts}$ и $t_{ev}$ в основном определяются характеристиками системы тестирования (выполняется либо самотестирование каждого ПЭ, либо осуществляется взаимное тестирование элементов (величина $t_{ts}$) и имеет место независимость либо координация ПЭ в выработке суждения о состоянии «тестируемых» ПЭ (величина $t_{ev}$)). Предположим также, что $t_{tr}$ (для «тестирующего» элемента) зависит только от длины пути между тестирующим $a_i$ и тестируемым $a_j$ элементами, т.е.:

$$\forall i, j = 1..n, i \neq j \quad \left( t_{tr} = \sum_{j=1}^{m} t_1 \cdot l_{ij} \right), \qquad (2)$$

где $t_1$ – время передачи тестовой информации для непосредственно связанной пары ПЭ, $l_{ij}$ – число элементов в цепочке $a_i - a_j$.

Соотношение (2) записано в предположении, что каждый ПЭ тестируется некоторыми k элементами и, в свою очередь, участвует в проверке $1 \leq m \leq (n-1)$ элементов МС.

В общем случае если каждый ПЭ $a_i$ тестирует $m_i$ элементов $(0 \leq m_i \leq (n-1))$, тогда величину $t_{ev}$ можно оценить следующим образом:

$$\forall\ i = 1..n \quad \left( t_{ev} = \sum_{j=1}^{m_i} t_{t_1} \right),$$

где: $t_{t1}$ – время оценки состояния одного ПЭ. Предполагая, что $\forall i = 1..n \ (t_{t1} = const)$ получим, что

$$\forall i=1..n\ (t_{ev}= m_i \cdot t_{t1}). \qquad (3)$$

## 2. Алгоритмы разделения ПЭ на подмножества

Очевидной целью (критерием эффективности) при организации системы самотестирования МС (точнее, при распределении n ПЭ на подмножества «тестирующих» элементов) является $t_{tst} \to min$. Тогда последовательность действий по нахождению оптимального (при котором $t_{tst}$=min) распределения ПЭ на «тестирующие» подмножества можно представить в виде алгоритма 1.

Алгоритм 1.

1. Реализовать n-разрядную $C_{n-1}^{k}$-значную пересчетную схему CNT, поставить в соответствие каждому ее разряду один из ПЭ (обозначим состояние CNT = $\langle C_1\, C_2 \dots C_n \rangle$ ), причем

$$\forall\ i = 1..n(C_i \in (1.\ 2,\ ...,\ C_{n-1}^{k})), \qquad (4)$$

пронумеровать сочетания (n-1,k) в соответствии с числовым рядом (см. условие (4)), j=1,2,3,… $C_{n-1}^{k}$ ), установить CNT в исходное состояние CNT =<111…1>, выделить память $M_{dis}$ для хранения получаемых распределений ПЭ.

2. В соответствии с состоянием CNT сформировать n сочетаний (n-1,k), причем для любого i = 1…n сочетание формируется для ПЭ с индексом 1,2,…i-1,i+1,…n-1.

3. Вычислить сумму $t_s = t_{tr} + t_{ev}$ на основании соотношений (2) и (3), проверить: CNT = 1?

да: присвоить переменной Q значение суммы $t_s$, перейти к п.4.

нет: проверить: $t_s \geq Q$?

да: перейти к п.4.

нет: присвоить Q = $t_s$ , сохранить распределение в $M_{dis}$, перейти к п.4.

4. Присвоить CNT = CNT + 1, проверить: CNT = <1…1>?

да: перейти к п. 5.

нет: перейти к п. 2.

5. Конец алгоритма.

В результате выполнения алгоритма 1 в памяти $M_{dis}$ будет находиться «оптимальное» распределение ПЭ подмножеств (n подмножеств мощности k каждое), которое сопровождается наибольшим быстродействием при выполнении диагностических процедур (получено абсолютно минимальное значение $t_s$). Согласно алгоритму 1 время его работы может быть охарактеризовано числом $\left(C_{n-1}^{k}\right)^{n}$. Очевидно, что в связи с этим данный метод оптимизации целесообразен (практически реализуем) только для МС относительно небольшой размерности. В противном случае решение этой проблемы может быть достигнуто на пути использования статистических методов самотестирования сложных МС. В этом варианте алгоритм 1 может быть достаточно просто адаптирован для статистического метода. При этом в отличие от алгоритма 1, приводящего к получению абсолютно минимального значения $t_s$ (и, следовательно к максимальному быстродействию процедур самотестирования МС), статистический метод позволяет найти распределение ПЭ, сопровождающееся относительно минимальным значением времени затрат на выполнение диагностических процедур в МС. Из анализа соотношения (1) следует, что взаимно зависящие значения $t_{tr}$ и $t_{ev}$ могут определяться такими параметрами МС, как степень связности ПЭ, быстродействие каналов межпроцессорного обмена, выбор метода тестирования элементов и т.п. Так, например, при сочетании слабой степени связности ПЭ, последовательного метода обмена и метода сигнатурного анализа получаем, что $t_{tr} >> t_{ev}$ и $t_{st} \simeq t_{ts} + t_{tr}$. Тогда $(t_{tr} = min) \to (t_{st} = min)$ при $t_{ts} = const$.

Пусть МС (ее топология) описана квадратной матрицей $M_1$ связности (инцидентности) размерности n , причем компоненты $M_1$ $b_{ij}$ заданы условием: $\forall$ i,j = 1…n, i $\neq$ j ($b_{ij}$ = 1, если ПЭ $a_i$ и $a_j$ связаны непосредственно, и $b_{ij}$ = 0 при отсутствии такой связи). На основе матрицы $M_1$ можно составить также квадратную n-размерную матрицу путей $M_2$, содержащую компоненты $d_{ij}$, такие, что $\forall$ i, j = 1..n, i $\neq$ j ($d_{ij} = |l_{ij}|$), где $l_{ij}$ – подмножество ПЭ в цепочке от $a_i$ к $a_j$, $2 \leq d_{ij} \leq$ n. Если, как было указано выше, каждый ПЭ тестируется подмножеством k некоторых ПЭ, то в качестве критерия оптимальности системы самотестирования ОМС будет минимальность суммарной длины всех путей тестирования, то есть согласно модифицированному соотношению (2) получим:

$$\left(\forall i = 1..n\left(\sum\nolimits_{j=1}^{k} d_{ij} = min\right)\right) \to \left(t_{tr} = min\right).$$

Следует отметить при этом, что если существует несколько путей между $a_i$ и $a_j$ (обозначим эти пути, как $\ell_{ij}^{1}, \ell_{ij}^{2}, ..., \ell_{ij}^{n}$), то условимся выбирать путь $\ell_{ij} = min\left(\ell_{ij}^{1}, \ell_{ij}^{2}, ..., \ell_{ij}^{r}\right)$. Последовательность действий при формировании подмножеств тестирующих ПЭ для всех n элементов ОМС можно описать следующим алгоритмом.

Алгоритм 2.

1. Установить: счетчик ПЭ i = 1, счетчик длины цепочки j = 1, счетчик номера текущего элемента

$s = 1$, переменную для хранения текущей суммы длин путей $c_{min} = n+1$, массив подмножеств тестирующих ПЭ $ar[n, k] = 0$.

2. Проверить: $j = i$?
да: перейти к п. 5,
нет: перейти к п. 3.

3. Проверить: $ar[i, s] = 0$?
да: перейти к п. 4,
нет: перейти к п. 5.

4. Проверить: $d_{ij} < c_{min}$ ($d_{ij}$ получаем из матрицы $M_2$)?
да: присвоить $c_{min} = j$, перейти к п. 5,
нет: перейти к п. 5.

5. Присвоить: $j = j + 1$, проверить: $j = n + 1$?
да: перейти к п. 6,
нет: перейти к п. 2.

6. Присвоить: $ar[i, s] = c_{min}$.

7. Присвоить: $s = s+1$, проверить: $s = k + 1$?
да: перейти к п. 8,
нет: присвоить: $i = i + 1$, $j = 1$, $c_{min} = n + 1$, перейти к п. 2.

8. Присвоить: $i = i +1$, проверить: $i = n +1$?
да: перейти к п. 9,
нет: присвоить: $c_{min} = n + 1$, $j = 1$, перейти к п. 2.

9. Конец алгоритма.

Результатом работы алгоритма 2 будет заполненный массив $ar[n,k]$, содержащий для каждого $a_i$, $i = 1..n$, подмножество тестирующих элементов при минимальной (суммарной) длине цепочек передачи диагностической информации. Масштабным коэффициентом для оценки временных затрат на нахождение оптимального разбиения ПЭ на «тестирующие» подмножества в соответствии с алгоритмом 2 может служить величина $n \cdot (n - 1)$, что позволяет ожидать получение значительного выигрыша по сравнению с алгоритмом 1.

## 3. Альтернативный критерий распределения ПЭ

Вариантом результата анализа соотношения (1), приводящего к алгоритму 2, является ситуация, когда $tev >> ttr$. Это может иметь место, например, если диагностическая информация передается между ПЭ в параллельном формате, коэффициент связности ПЭ в МС приближается к топологии «каждый с каждым», а тестовые последовательности формируются в тестируемых ПЭ. Тогда $tst \cong tts + tev$ и $(tev - min) - (tst - min)$. Если принять что: а) $ttr \cong 0$, б) все ПЭ структурно тождественны, в) затраты (как временные, так и в смысле объема памяти тестовых программ) для всех ПЭ ОМС одинаковы, то можно предварительно записать общее условие:

$$\forall\ i=1..n\ (|Di| = K), \qquad (5)$$

где Di – подмножество ПЭ, тестируемых элементом $a_i$, K–целое положительное число $1 << K << (n-1)$. Постоянство величины K для всех ai вызвано очевидным соображением о минимальности общих затрат (временных и затрат памяти) всех ПЭ при равномерном распределении тестовой нагрузки по всем ПЭ ОМС. Покажем, что при этих ограничениях справедливо равенство $K = k$. Для его доказательства рассмотрим следующие соображения. Очевидно, что справедливо условие:

$$\forall\ i=1..n,\ i \# j \quad (|Di \cap Dj| \geq 1).$$

Так как каждый ПЭ тестирует K различных элементов (согласно условию (5)), то число путей тестирования NK при этом составит величину $NK = K \cdot n$. Если учесть условие (ограничение) вида:

$$\forall i = 1..n\left(\left|m_i\right| = k\right) \qquad (6)$$

где $m_i$ – подмножество ПЭ, тестирующих каждый элемент ai, то число Nk различных путей тестирования в этом случае будет $Nk = k \cdot n$. Из очевидного равенства $NK = Nk$ следует, что $K = k$. При этом возникает задача нахождения такого разбиения ПЭ на n подмножеств, которое удовлетворяло бы как условию (5), так и условию (6). Используя как основу набор имен (идентификаторов) ПЭ $<a_1\ a_2\ a_3\ \ldots\ a_{n-1}\ a_n>$ (отметим, что нумерация ПЭ при этом может быть произвольной), можно построить матрицу-циркулянт $M_c$:

$$M_c = \begin{Vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & \cdots & a_{n-1} & a_n \\ a_n & a_1 & a_2 & \cdots & a_{n-2} & a_{n-1} \\ a_{n-1} & a_{n-2} & a_1 & \cdots & a_{n-3} & a_{n-2} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ a_2 & a_3 & a_4 & \cdots & a_n & a_1 \end{Vmatrix}.$$

На основании известных свойств циркулянтов [4] можно записать условие $\forall i, j = 1..n\left(\left|r_i\right| = \left|c_j\right| = 1\right)$, где $r_i$, $c_j$ – наборы, соответствующие строке i и столбцу j матрицы Mc, которые имеют вид $<b_1\ b_2\ \ldots\ b_n>$, $b_s = 1$ ($s = 1\ldots n$) для некоторого (любого из n) элемента строки (столбца) матрицы Mc (остальные $n - 1$ элементов набора нулевые). Из последнего условия следует, что любое подмножество (в виде матрицы $M_k$) из k строк (столбцов) матрицы $M_c$, будет содержать точно k одноименных элементов. Кроме того, если каждой строке (столбцу) матрицы $M_k$ поставить в соответствие элемент одного из столбцов (строк), не включенного в состав матрицы $M_k$, то этот элемент не будет содержаться в соответствующей строке (столбце) матрицы $M_k$. На основании вышеизложенного можно предложить следующую последовательность действий при распределении n ПЭ на подмножества, удовлетворяющие условиям (5) и (6).

1. На основе набора имен ПЭ (в произвольной последовательности) сформировать матрицу-циркулянт $M_c$.

2. Выбрать некоторое (любое) подмножество k строк (столбцов) матрицы $M_c$ (величина $1 << k << (n - 1)$ задана a priori).

3. Из остальных $n - k$ строк (столбцов) выбрать также любую строку (столбец), элементы которой (которого) будут определены в качестве имен тестируемых ПЭ.

Очевидно, что при этом условие (6) соблюдено и система тестирования МС будет оптимизирована по критерию минимальности временных и аппаратурных затрат с учетом приведенных выше допущений и ограничений.

## Выводы

На основании анализа особенностей процедур самотестирования, выполняемых в многопроцессорных системах, в работе сформулированы критерии оптимального распределения ПЭ на подмножества, которые ставятся в соответствие компонентам системы и осуществляют оценку их (этих компонентов) технического состояния. Предлагаемые алгоритмические средства могут найти практическое применение в ходе проектирования реконфигурируемых многопроцессорных вычислительных и управляющих систем, обладающих улучшенными показателями достоверности функционирования.

## Литература

*1. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры [Текст] / И.А. Каляев, И.И. Левин, Е.А. Семерников, В.И. Шмойлов; под общ. ред. И.А. Каляева. – Ростов: ЮНЦ РАН, 2008. – 320 с.*

*2. Каравай, М.Ф. Минимизированное вложение произвольных гамильтоновых графов в отказоустойчивый граф и реконфигурация при отказах. II. Решетки и k-отказоустойчивость"[Текст] / М.Ф. Каравай // Автомат. и телемеханика. – 2005. – № 2. – С. 175 – 189.*

*3. Аксенова, Г.П. Метод параллельно-последовательного самотестирования в интегральных схемах типа FPGA / Г.П. Аксенова, В.Ф. Халчев // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 1. – С. 163 – 174.*

*4. Белманн, Р. Введение в теорию матриц / Р. Белманн. – М.: Мир, 1969. – 368 с.*

*Поступила в редакцию 12.02.2012*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.П. Кондратенко, Черноморский государственный им. Петра Могилы, Николаев, Украина

### ПРО ВЗАЄМНЕ ТЕСТУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ В БАГАТОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМАХ

***В.В. Гроль, В.О. Романкевич, Мораведж Сейед Мілад, К.Р. Потапова***

Пропонуються алгоритми розподілу на етапі проектування компонентів багатопроцесорних систем на підмножини з метою оптимізації виконання процедур самотестування у відповідності до вимог мінімізації часових або апаратурних витрат. На основі аналізу особливостей процедур самотестування, які виконуються в багатопроцесорних системах, в роботі сформульовані критерії оптимального розподілення ПЕ на підмножини, які ставляться у відповідність компонентам система та виконують оцінку їх (цих компонентів) технічного стану.

**Ключові слова:** багатопроцесорна система, самотестування, взаємне тестування.

### ABOUT RECIPROCAL TESTING OF COMPONENTS IN MULTIPROCESSOR SYSTEMS

***V.V. Grol, V.A. Romankevich, Moravej Seyed Milad, E.R. Potapova***

An algorithm of distribution at design stage of multiprocessor systems' to subsets aimed to optimization of self test procedures according to demand of minimization of both time and hardware cost proposed. Based on the analysis of the characteristics of self-testing procedures performed in multiprocessor systems, the criteria formulated in the optimal allocation of PE into subsets that are mapped to components of the system and carry out an assessment of their (the components), the technical condition.

**Key words**: multiprocessor system, self testing, reciprocal testing.

**Гроль Владимир Васильевич** – д-р техн. наук, с.н.с., проф. каф. специализированных компьютерных систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина, e-mail: romankev@scs.ntu-kpi.kiev.ua.

**Романкевич Виталий Алексеевич** – канд. техн. наук, доц., доц. каф. специализированных компьютерных систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина, e-mail: romankev@scs.ntu-kpi.kiev.ua.

**Милад Мораведж Сейед** – аспирант каф. специализированных компьютерных систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина, e-mail: romankev@scs.ntu-kpi.kiev.ua.

**Потапова Екатерина Романовна** – канд. техн. наук, доц. каф. специализированных компьютерных систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина, e-mail: romankev@scs.ntu-kpi.kiev.ua.