

УДК 004.052

Н.П. БЛАГОДАРНЫЙ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского "ХАИ", Украина

## МОДЕЛЬ САМОДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОДНОРОДНЫХ ПРОЦЕССОРНЫХ СРЕД В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

*Предлагается модель самодиагностирования однородных процессорных сред (высокоинтегрированного элементного базиса цифровых систем) в реальном масштабе времени. Определяются условия совмещения встроенного контроля процессорных модулей и диагностирования межмодульных связей однородной процессорной среды. Обосновываются оценки эффективности использования временной избыточности в функционировании цифровых систем для самодиагностирования однородных процессорных сред в реальном масштабе времени. В общем случае имеет место попеременное нахождение цифровых систем (ЦС) реального времени (ЦС РВ) в процессе эксплуатации на активных временных интервалах.*

**Ключевые слова:** цифровая система, однородная процессорная среда, отказоустойчивость, встроенный контроль, самодиагностирование.

### Введение

Современный период развития цифровых систем (ЦС) характеризуется интенсивным поиском новых принципов обработки информации и новых архитектур. Практические успехи в изготовлении СБИС и неразрезных пластин делают реальным построение широкой номенклатуры цифровых систем путем использования в качестве элементного базиса однородных процессорных сред (ОПС) [1-3]. Однородные процессорные среды в общем случае состоят из матрицы однотипных элементарных вычислителей – процессорных модулей (ПМ) [1, 4 - 6]. Функциональные характеристики процессорных модулей изменяются в широких пределах и в ряде образцов ОПС сравнимы с характеристиками процессоров современных микроЭВМ [3]. С применением ОПС сложность ЦС переходит рубеж, за которым определяющей характеристикой их становится не производительность, а способность безотказно функционировать на в процессе эксплуатации. Имеет место парадокс, связанный с созданием и использованием ЦС, построенных с использованием высокоинтегрированного элементного базиса. С одной стороны, утрата работоспособности одного или нескольких ПМ не может заметно повлиять на общую производительность ОПС и ЦС на ее основе. С другой, единственная неисправность, если она не будет обнаружена и своевременно устранена, может вывести из строя всю систему вследствие распространения по ней неверной информации [3]. Хотя роль отдельного ПМ в составе ОПС – незначительна, но ответственность каждого из них за правильное функцио-

нирование ЦС в целом огромна. Безотказность функционирования ОПС достигается введением в их состав резервных ПМ и средств реконфигурации (встроенного контроля рабочих ПМ, диагностирования резервных ПМ и межмодульных связей, замещения отказавших модулей резервными и восстановления искаженной информации) [1, 6].

### 1. Постановка задачи

В общем случае имеет место попеременное нахождение ЦС реального времени (ЦС РВ) в процессе эксплуатации на активных временных интервалах длительностью  $t_a$  ( $t_a = t_{i0} - t_{in}$ ,  $i = 1, 2, \dots$ ) и на пассивных временных интервалах длительностью  $t_{\Pi}$  ( $t_{\Pi} = t_{n(i+1)} - t_{oi}$ ). Отказы ОПС на активных временных интервалах наступают в следующих случаях [4]:

– в течение временного интервала  $\Delta t_a$  (допустимый временной интервал поиска и устранения отказавшего ПМ) в ОПС не могут быть устранены последствия отказов (сбоев) ПМ  $V_{ij}$ ,  $V_{ij} \in V_n(t_{Hi})$ , ( $V_n(t_{Hi})$  — множество используемых ПМ перед началом активного временного интервала);

– на текущем активном временном интервале ( $t_{ni}$ ,  $t_{oi}$ ) не обеспечивается постоянное значение коэффициента пропускной способности  $K_s(t)$  ОПС, т.е.

$$\forall t \in (t_{H_i}, t_{o_i}) : K_s(t) = \text{const}, K_s(t) \geq K_{\text{тр.}}$$

$$(K_s(t) = |V_n(t)|/|V|, \quad (1)$$

где  $V_n(t)$  – множество используемых ПМ,  $V$  – множество ПМ ОПС [8].

Для обеспечения эффективного функционирования ЦС РВ необходимо [1, 4]:

1) на пассивных временных интервалах:

– определять оценки текущего и необходимого уровней отказоустойчивости (мощность множества  $(V_p(t_{hi}))$  резервных ПМ, достаточную для маскирования  $l(t_a)$  отказов (сбоев) рабочих ПМ, за время, не превышающее  $\Delta t_a$ ;

– выбрать вариант размещения множества  $V_p(t_{hi})$  резервных ПМ на множестве модулей  $V \setminus V_o(t_{hi})$ , обеспечивающее маскирования  $l(t_a)$  отказов (сбоев) рабочих ПМ, за время, не превышающее  $\Delta t_a$  (здесь  $V_o(t)$  – множество отказавших ПМ));

– осуществлять деградацию (редеградацию) ОПС, обеспечивающую максимизацию значения  $K_S^{11}(t_{hi})$  [4].

2) на активных временных интервалах [6]:

– при отказе (сбое) рабочего ПМ осуществлять локальную(глобальную) реконфигурацию ОПС;

– оперативно возвращать во множество ПМ  $V \setminus V_o(t_{hi})$  процессорные модули, восстановленные после сбоев;

– оперативно восстанавливать искаженную информацию после выполнения реконфигурации.

На активных временных интервалах применения ЦС средства самодиагностирования рабочих ПМ  $V_{ij}, V_{ij} \in V_u(t_{hi})$ , за время  $\tau_q^a$  должны:

– обнаруживать отказы (сбои) ПМ  $V_{ij}$  (осуществлять встроенный самоконтроль (ВСК));

– перед осуществлением локальной реконфигурации (ЛР) ОПС производить проверку исправности резервного ПМ  $V_{ek}, V_{ek} \in \Gamma_\pi(V_{ij})$ , используемого для замены ПМ  $V_{ij}, V_{ij} \in V_0(t)$ ;

– формировать сигнал оповещения средствам управления верхнего уровня ЦС на проведение глобальной реконфигурации (ГР) (при  $\Gamma_\pi(V_{ij}) = \emptyset$ ) [1, 4].

На пассивном временном интервале за время  $\tau_q^n$  средствами самодиагностирования ОПС должно уточняться состояние отказавших (подверженных действиям сбоев) ПМ  $V_{ij}, V_{ij} \in V_0(t_{H_{i+1}})$ .

Для высокоинтегрированных ОПС, состоящих их сотен и более ПМ, наиболее приемлемыми методами самодиагностирования являются [4]:

– на активных временных интервалах  $(t_{H_i}, t_{O_i})$ ,  $i = 1, 2, \dots$ , применения ЦС РВ – комбинированное самодиагностирование (встроенный самоконтроль (ВСК) рабочих ПМ и диагностирование рабочими ПМ резервных ПМ);

– на пассивных временных интервалах  $(t_{O_i}, t_{H_{i+1}})$ ,  $i = 1, 2, \dots$ , – диагностирование ОПС внешними средствами.

Волновое функционирование ОПС и возможная деградация ее структуры в процессе применения по назначению [1, 4] обуславливают рост временной избыточности в функционировании ПМ  $V_{ij}; V_{ij} \in V_u(t)$ . Уровень временной избыточности увеличивается с каждым шагом деградации ОПС [1, 3]. Его использования должно служить важным резервом совершенствования диагностирования ЦС РВ. В известных работах по диагностированию ОПС [2 – 6] влияние уровня временной избыточности на значение вероятности  $P_g(t, \tau < \tau_g)$  успешного диагностирования ОПС за время  $\tau < \tau_g$  не исследовано. Поэтому актуален поиск методов использования временной избыточности ПМ  $V_{ij}; V_{ij} \in V_u(t)$ , для организации самодиагностирования множества ПМ  $\Gamma_\pi(V_{ij})$  и связей  $\{(V_{ij}; V_{lk}), V_{lk} \in \Gamma_\pi(V_{ij})\}$  с целью обеспечения требуемого значения  $P_g(t, \tau < \tau_g)$  при меньших затратах ресурсов на процедуры реконфигурации ЦС РВ.

## 2. Решение задачи

Обозначим состояние ПМ  $V_{ij}$ , маркером  $M_{ij}$ , принимающий значения 0 или 1. При исправности ПМ  $V_{ij}, V_{ij} \in V_u(t) \cup V_p(t)$ , маркер  $M_{ij}$  его состояния должен быть нулевым ( $M_{ij} = 0$ ), а при отказе – единичным ( $M_{ij} = 1$ ). При наступлении отказа ПМ  $V_{ek}, V_{ek} \in V_0(t)$ , должна осуществляться локальная реконфигурация, либо, при  $\Gamma_\pi(V_{ij}) = \emptyset$ , глобальная реконфигурация ОПС [1]. Перед ЛР (ГР) необходимо получение оценки состояния резервного ПМ, заменяющего модуль  $V_{sr}, V_{sr} \in \Gamma(V_{ek}) \cap V_p(t)$ . Эта оценка может быть получена путем опроса (проверки состояния) всех модулей множества  $\Gamma(V_{ek})$  (тривиальный метод [3, 4]). Тривиальный метод прост в реализации, но обладает низким быстродействием. Наличие в средствах управления, диагностирования и реконфигурации (СУДР) ПМ  $V_{ek}$  априорной информации о состоянии резервных ПМ  $V_{sr}, V_{sr} \in \Gamma(V_{ek}) \cap V_p(t)$ , ведет уменьшению времени  $\tau_q^a$  диагностирования на активном временном интервале.

При наличии в ПМ встроенных средств контроля для проверки рабочих ПМ нет необходимости использовать методы групповой диагностики [2, 3]. Однако, рост числа и сложности межмодульных связей, а также необходимость диагностирования резервных ПМ обуславливает целесообразность комбинированного самодиагностирования ОПС (встроенного контроля рабочих ПМ и диагностиро-

вания резервных ПМ и межмодульных связей). Для самодиагностирования ОПС (матричных спецпроцессоров (МСП)) на активных временных интервалах целесообразно средствами рабочих ПМ реализовывать алгоритм контроля и диагностирования, приведенный на рис. 1, где через F обозначен результат контроля состояния ПМ (F = 1 – результат отрицательный, имеет место отказ ПМ, F = 0 – результат положительный, ПМ исправен). Диагностирование состояния резервных ПМ целесообразно осуществлять только при отказе рабочего ПМ и перед предстоящей реконфигурацией ОПС (МСП).

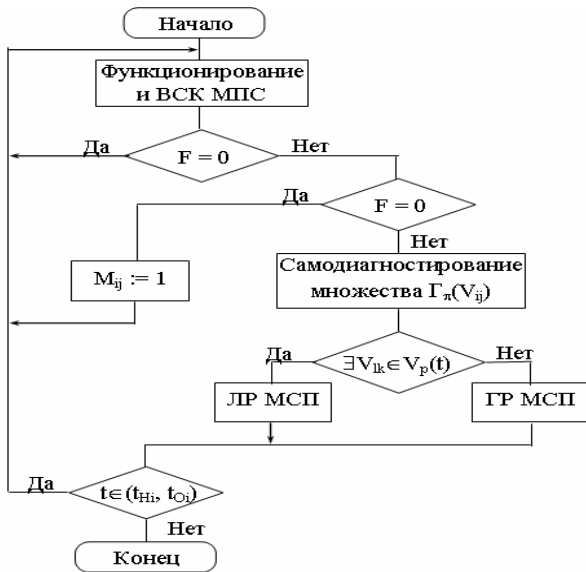


Рис. 1. Граф-схема функционирования ОПС с комбинированным самодиагностированием

Набор связей ПМ  $V_{ij}, V_{ij} \in V_u(t)$ , в общем случае включает (рис. 2) множества входных (вертикальных и горизонтальных) и выходных (вертикальных и горизонтальных) связей, соответственно

$$\{BVx_j\}_j^{ПBVx} = 1; \{ГVx_j\}_j^{ПГVx} = 1;$$

$$\{BVix_j\}_j^{ПBVix} = 1; \{ГVix_j\}_j^{ПГVix} = 1.$$

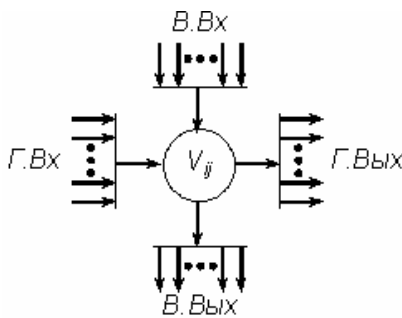


Рис. 2. Набор связей ПМ  $V_{ij}$

Величина глубины диагностирования межмодульных связей в общем случае пропорциональна времени диагностирования [4]. Поэтому в условиях ограничений на время диагностирования  $\tau_g(t)$  можно говорить о подмножестве  $V'_0(t)$  ПМ, подозреваемых на отказ (сбой). Подверженные потокам сбоев ПМ, должны после окончания сбоев, оперативно выводиться из множества  $V_0(t)$  и вводиться во множество  $V_u(t) \cup V_p(t)$ . От мощности множества  $|V'_0(t)|$  ПМ, подозреваемых на отказ (сбой) в момент времени t, в существенной мере зависит время реконфигурации и восстановления вычислительного процесса в ОПС.

При отказе ПМ  $V_{lk}, V_{lk} \in V_u(t)$ , и отсутствии смежных отказавших резервных ПМ возможны ЛР и восстановление ОПС за один такт. При наличии смежных ПМ  $V_{nm}, V_{nm} \in \Gamma(V_{lk}) \cap V_p(t)$ , подозреваемых на отказ, потребуется  $\ell, \ell = |V'_0(t)| + 1$ , тактов реконфигурации и восстановления, либо глобальная реконфигурация [1]. Диагностирование ПМ  $V_{ij}, V_{ij} \in V_p(t)$ , должно осуществляться путем подачи на их входы контрольной информации со стороны рабочих ПМ  $V_{lk}, V_{lk} \in V_u(t) \cap \Gamma^{-1}(V_{ij})$ , с последующей проверкой реакции [4].

Соглашение 1. Контроль реализации ПМ функций  $f_i$  обработки и коммутации  $f_i \in \{f_i\}_i^\sigma$  реализуется встроенными средствами контроля процессорных модулей.

Соглашение 2. Информация о наборе функций  $\{f_\ell^\neq\}_{\ell \in \ell_t}$ , реализуемых ПМ  $V_{ij}$  в текущий момент времени t, имеется в смежных ПМ  $V_{lk}$

$$V_{lk} \in \Gamma_\pi(V_{ij}) \cup \Gamma_\pi^{-1}(V_{ij}).$$

Соглашение 3. Проверка исправности множества связей  $\{ГVix\}$  и  $\{BVix\}$  осуществляется средствами ПМ  $V_{lk}, V_{lk} \in V_u(t)$ . Проверка исправности связей  $\{ГVx\}$  и  $\{BVx\}$  осуществляется средствами ПМ  $V_{lk}, V_{lk} \in \Gamma_\pi^{-1}(V_{ij})$ .

Таким образом, модулем  $V_{lk}, V_{lk} \in V_u(t)$ , должно непрерывно решаться уравнение контроля

$$f(\{f_i\}_{i \in \ell_t}, BVix_k, ГVix_n) = 0, \quad (2)$$

где k, n - коды текущей настройки коммутаторов K3, K4;  $f(\dots)$  - функция результатов контроля.

При выполнении равенства  $f(\dots) = 0$  должно приниматься решение об исправном функционировании ПМ. В противном случае ( $f(\dots) \neq 0$ ) на схему управления ПМ  $V_{lk}, V_{lk} \in V_u(t)$ , выдается сообще-

ние об ошибке. При получении этого сообщения должно вырабатываться решение о замене отказавшего ПМ исправным резервным ПМ (осуществляться реконфигурация ОПС).

Оценим временные затраты на контроль исправности связей между ПМ  $V_{ij}$  и  $V_{lk}, V_{lk} \in \Gamma_{\pi}(V_{ij})$ . Фрагмент организации такого контроля приведен на рис. 3.

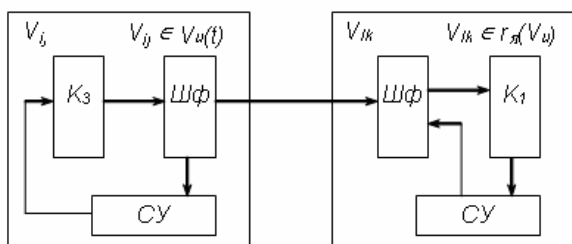


Рис. 3. Фрагмент организации контроля межмодульных связей ( $V_{ij}, V_{lk}$ )

В процессе обмена информацией между ПМ должны принимать участие коммутаторы ( $K_i$ ), шинные формирователи (ШФ) и системы управления модулей  $V_{ij}$  и  $V_{lk}$  [3].

Временная диаграмма процесса установления межмодульной связи и проверки ее исправности приведена на рис. 4, где использованы следующие обозначения:  $t_n$  – время настройки ПМ  $V_{ij}$  на контроль связи;  $t_{пер}$  – интервал передачи информации по линии связи ( $V_{ij}, V_{lk}$ );  $t_{фк}$  – время обработки информации на приемном конце (в ПМ  $V_{lk}$ ) и формирования квитанции;  $t_{перк}$  – время передачи квитанции по линии связи ( $V_{lk}, V_{ij}$ );  $t_{пр}$  – время принятия решения об исправности линии связи ( $V_{ij}, V_{lk}$ ).

Значения  $t_n, t_{пер}, t_{фк}, t_{перк}, t_{пр}$  определим из следующих выражений:

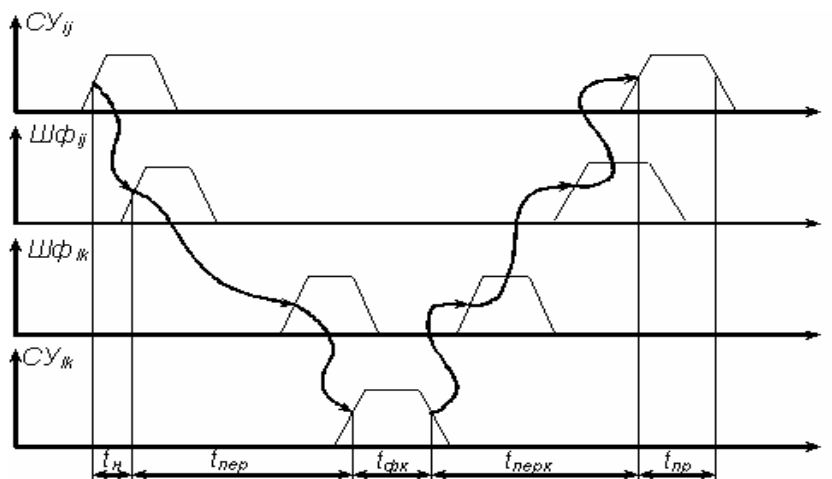


Рис. 4. Временная диаграмма

$$t_n = t_{зк} + t_{зф} \cong (\log_2 |\Gamma(V_{ij})| + 1)\Delta t,$$

$$t_{пер} = \ell_{max} \Delta t + \ell \Delta t,$$

$$t_{перк} = \ell_{max} \Delta t + \ell_k \Delta t,$$

$$t_{фк} = (\ell_c + \ell_k) \Delta t,$$

$$t_{пр} = \ell_k \Delta t,$$

где  $\ell_c, \ell_k$  – длина контрольного сообщения и квитанции о его прохождении;  $t_{зк}, t_{зф}$  – время задержки срабатывания коммутатора и формирователя в ПМ;  $\Delta t$  – длина такта времени функционирования ПМ.

Длительность интервала контроля и диагностирования межмодульных связей ( $V_{ij}, V_{lk}$ ) определим следующим выражением

$$\forall V_{lk} \in \Gamma(V_{ij}): t_k = \max(t_{ник} + t_{перик} + t_{фик} + t_{перк} + t_{пр}) =$$

$$= (\log_2 |\Gamma(V_{ij})| + 2(\ell_{max} + \ell_a) + 3\ell_k) \Delta t.$$

Таким образом, ПМ  $V_{ij}, V_{ij} \in V_u(t)$ , должен диагностировать резервные ПМ, входящие в  $\Gamma_{\pi}(V_{ij})$  и линии связи между процессорными модулями ( $V_{ij}, V_{lk}$ ),  $V_{lk} \in \Gamma_{\pi}(V_{ij})$ . Алгоритм решения этой задачи должен включать следующие этапы.

1. Определение подмножества  $\Gamma^1(V_{ij})$  модулей, подлежащих диагностированию

$$\Gamma^1(V_{ij}) = \Gamma(V_{ij}) \cap V_p(t).$$

2. Формирование кортежа модулей  $\langle V_1(V_{ij}), V_2(V_{ij}), \dots, V_{|r'(V_{ij})|} \rangle$ , подвергается диагностированию модулем  $V_{ij}$ .

3.  $\ell_i = 1$ .

3.1. Проверить исправность связи  $(V_{ij}, V_{\ell}(V_{ij}))$ .

Если связь исправна, то перейти к п.3.2, иначе – к п.3.3.

3.2. Если ПМ  $V_{\ell}(V_{ij})$  в текущем диагностическом интервале находился в резерве ( $V_{\ell}(V_{ij}) \in V_p(t)$ ) (не подвергался проверкам на рабочих наборах), то:

3.2.1. Проверить исправность ПМ  $V_{\ell}(i, j)$  на рабочем наборе.

3.2.2. Результаты контроля (квитанцию) передать ПМ  $V_{ij}$ . Если  $S_{V_{\ell}}(V_{ij}) = 0$ , то переход к п. 3.3.

3.2.3. Идентифицировать ПМ  $V_{\ell}(V_{ij})$  как отказавший

$$V_0(t) := V_0(t) \cup V_{\ell}(V_{ij}).$$

3.3. Если  $\ell < |r'(V_{ij})|$ , то  $\ell := \ell + 1$ . Перейти к п. 3.1.

3.4. Конец.

Выполнение алгоритма необходимо для всех ПМ  $V_{ij}, V_{ij} \in V_u(t)$ .

Для разработки метода комбинированного самодиагностирования процессорных сред реального времени, необходимо ответить на вопрос: как часто необходимо выполнять алгоритм диагностирования множества ПМ  $r'(V_{ij})$ ? Для получения ответа на этот вопрос обратимся к задаче, решаемой системой самодиагностирования: обеспечить СУ ПМ  $V_{ij}$  достоверной информацией о фактических наборах функций, реализуемых ПМ  $V_{\ell k}, V_{\ell k} \in r'(V_{ij})$  и состоянии связей  $\{V_{ij}, V_{\ell k}\}$ . Достоверная информация будет тогда, когда множества  $\Gamma(V_{ij})$  и  $\{(V_{ij}, V_{\ell k})\}$  будут содержать такое количество  $\ell_a^c$  скрытых отказов, что максимальное время  $t_{\max}$  восстановления вычислений в МСП при возникновении отказа ПМ  $V_{ij}, V_{ij} \in V_u(t)$ , либо связи  $V_{ij}, V_{ij} \in V_u(t)$ , не превышает допустимого времени  $\tau_q$ ,  $t_B \leq \tau_q$ .

Входными параметрами алгоритма поиска мощности допустимого множества скрытых отказов являются:

– мощности множеств

$$\Gamma_{\pi}^1(V_{ij}), \{(V_{ij}, V_{\ell k}), V_{\ell k} \in \Gamma_{\pi}(V_{ij})\};$$

– интенсивности потоков отказов  $\lambda_0$  и сбоев  $\lambda_c$  ПМ и линий связи,

– интенсивности потоков  $\mu_c$  восстановления сбоев,

– временные характеристики методов реконфигурации и восстановления информации в МСП.

Пусть на элементы множеств  $\Gamma_{\pi}^1(V_{ij})$  и  $\{(V_{ij}, V_{\ell k}), V_{\ell k} \in \Gamma_{\pi}^1(V_{ij})\}$  воздействует поток отказов и сбоев с интенсивностью  $\lambda_{c0}$ ,

$$\lambda_{c0} = |\Gamma^1(V_{ij})| (\lambda_0^* + \lambda_c^*) + \left| \{(V_{ij}, V_{\ell k}), V_{\ell k} \in \Gamma^1(V_{ij})\} \right| (\lambda_0^{**} + \lambda_c^{**}),$$

где  $\lambda_0^*, \lambda_c^*$  – соответственно, интенсивности потока отказов и сбоев ПМ;  $\lambda_0^{**}, \lambda_c^{**}$  – интенсивности потоков отказов и сбоев межмодульной линии связи.

Тогда отказы элементов множеств  $r'(V_{ij})$  и  $\{(V_{ij}, V_{\ell k}), V_{\ell k} \in r'(V_{ij})\}$ , будут возникать через интервалы времени  $T_0$

$$T_0 \cong \frac{1}{\lambda_{c0}},$$

а время  $t_{gn}$  диагностирования средствами ПМ  $V_{ij}$  модулей множества  $\Gamma^1(V_{ij})$  и связей  $\{(V_{ij}, V_{\ell k}), V_{\ell k} \in \Gamma^1(V_{ij})\}$ , определится выражением

$$t_{gn} = \left| \{(V_{ij}, V_{\ell k}), V_{\ell k} \in \Gamma^1(V_{ij})\} \right| t_k + |\Gamma^1(V_{ij})| t_k. \quad (3)$$

Если эту проверку осуществлять с интервалом  $T_0$ , то в подмножествах ПМ и связей  $\{(V_{ij}, V_{\ell k}), V_{\ell k} \in \Gamma^1(V_{ij})\}$  будет существовать не более одного  $\ell_c$  спрятанного отказа  $\ell_c \leq 1$ . Аналогично, при осуществлении проверки с интервалом  $iT_0, \ell_c \leq i$ . Следовательно, время диагностирования  $t_g(\ell_c)$ , допускающее наличие в подмножествах  $\Gamma^1(V_{ij})$  и  $\{(V_{ij}, V_{\ell k}), V_{\ell k} \in \Gamma^1(V_{ij})\}$   $\ell_c$  скрытых отказов, определится выражением

$$t_q(\ell_c) = \frac{t_{q1}}{\ell_c}. \quad (4)$$

С учетом выражения (4) среднее время  $t_B(\ell_c)$  восстановления функционирования ОПС при отказе ПМ  $V_{ij}, V_{ij} \in V_u(t)$ , определится как

$$\overline{t_p}(\ell_c) = \frac{t_{q1}}{\ell_c} + (\overline{t_{\Pi}} + \overline{t_B})(\ell_c + 1), \quad (5)$$

где  $\bar{t}_\Pi$  – среднее время замены ПМ (реконфигурации ОПС);  $\bar{t}_B$  – среднее время восстановления информации в ОПС после замены ПМ  $V_{ij}, V_{ij} \in V_u(t)$ .

Второе слагаемое в выражении (5) обусловлено худшим вариантом выбора резервного ПМ  $V_{lk}, V_{lk} \in r'(V_{ij})$ , то есть исправным окажется только  $(\ell_c + 1)$ -й ПМ, выбранный для замены ПМ  $V_{ij}$ . Определим оптимальное значение  $\ell_c$ . С этой целью найдем производную от  $\bar{t}_p(\ell_c)$  и приравняем ее к нулю

$$\frac{d}{d\ell_c} \left( \frac{t_{gl}}{\ell_c} + (\bar{t}_\Pi + \bar{t}_B)(\ell_c + 1) \right) = 0.$$

Произведя превращения, получим

$$-\frac{t_{gl}}{\ell_c^2} + \bar{t}_\Pi + \bar{t}_B = 0, \quad \ell_{c\text{opt}} = \sqrt{\frac{t_{gl}}{\bar{t}_\Pi + \bar{t}_B}}. \quad (6)$$

На рис. 6 приведены графики зависимостей  $t_g(\ell_c), (\bar{t}_\Pi + \bar{t}_B)(\ell_c + 1)$  и  $t_p(\ell_c)$ , показывающие, что при  $\ell_c = \ell_{c\text{opt}}$  время на реконфигурацию ОПС при отказе ПМ  $V_{ij}, V_{ij} \in V_u(t)$ , будет минимальным и, следовательно, при  $t_q(\ell_c) \leq \Delta t_a / \ell_{0c}(t_a)$  будет обеспечиваться требуемый уровень отказоустойчивости ЦС РВ.

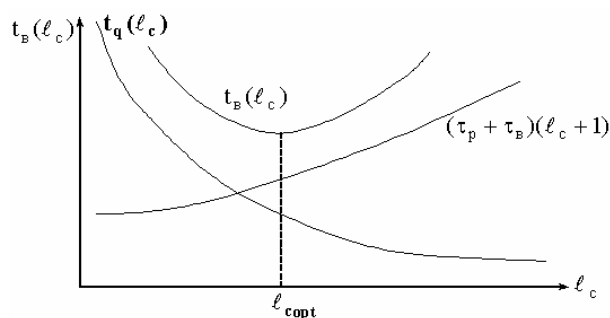


Рис. 5. Графики временных затрат на реконфигурацию МСП при наличии отказов процессорных модулей и межмодульных связей

Распространим полученные результаты на все множество  $V_u(t)$  ПМ ОПС. Процесс диагностирования требует приостановки функционирования ОПС, следовательно, диагностирование множеств ПМ и связей, образующих реконфигурационное пространство ПМ  $V_{ij}, V_{ij} \in V_u(t)$ , должно быть максимальным образом распараллелено и проводиться с интервалом  $T_q^{\text{пс}} = \ell_{c\text{opt}} T_0$ .

## Выводы

1. Цикл диагностирования ПМ и связей должен включать: проверку исправности всех резервных ПМ  $V_p^i, V_p^i \in V_p(t)$ ; проверку исправности всех резервных связей  $E_w^p$ ; выдачу в ПМ  $V_{ij}, V_{ij} \in V_u(t)$ , информации о состоянии модулей множества  $\Gamma^1(V_{ij}), V_{ij} \in V_u(t)$ . Для этого перед началом применения МСП по назначению необходимо выполнение комплекса подготовительных операций:

а) определение реконфигурационного пространства рабочих ПМ  $\Gamma^1(V_{ij}), V_{ij} \in V_u(t)$ ;

б) определение максимальной мощности реконфигурационного пространства  $W_{\text{ПС}}$

$$W_{\text{ПС}} = \max_{V_{ij} \in V_u(t)} |\Gamma(V_{ij})|;$$

в) определение времени  $t_{\text{гл}}$  диагностирования реконфигурационного пространства ПМ

$$V_{ij}, V_{ij} \in V_u(t);$$

г) определение среднего времени  $T_{\text{ПС}}$  наработки на отказ элементов множества  $\Gamma(V_{ij}), V_{ij} \in V_u(t)$ ,

$$T_{\text{ПС}}^W = \min_{V_{ij} \in V_u(t)} T_{\text{ПС}}(W(V_{ij}));$$

д) пребывания, при избранных процедурах восстановления, допустимого числа  $\ell_c$  скрытых отказов элементов множеств  $\Gamma^1(V_{ij}), V_{ij} \in V_u(t)$ , в соответствии с выражением (6);

е) определение длительности  $T_\Pi$  межпроверочного периода элементов множеств  $\Gamma^1(V_{ij}), V_{ij} \in V_u(t)$ .

$$T_\Pi = \ell_c T_{\text{ПС}}^W.$$

2. Если полученные результаты (оценки  $t_q(\ell_c^c), \ell_c, T_{\text{ПС}}$ ) удовлетворяют ограничениям, накладываемым на функционирование ОПС в реальном масштабе времени ( $T_\Pi > T_{\text{ПС}}$ ), то возможна тривиальная реализация диагностирования МСП [3]. Алгоритм функционирования ОПС с тривиальной реализацией диагностирования приведенный на рис. 3 (режим временного разделения процессов функционирования и диагностирования).

3. Если длительность  $t_a$  активного временного интервала  $t_a = t_{oi} - t_{ni}$  больше времени  $T_\Pi$ , ( $t_a > T_\Pi$ ) или длительность пассивного интервала

$t_{\Pi}, t_{\Pi} = t_{n(i+1)} - t_{0i}$  меньше, чем  $t_{gl} (t_{\Pi} < t_{gl})$ , то безотказное функционирование ОПС в реальном масштабе времени не может быть обеспечено. Это обусловлено ростом числа скрытых отказов ПМ  $V_{lk}, V_{lk} \in \Gamma^1(V_{ij}), V_{ij} \in V_u(t)$ , и увеличением времени на процессы реконфигурации ОПС после отказов ПМ  $V_{ij}, V_{ij} \in V_u(t)$ .

### Литература

1. *A Reconfigurability of Fault-Tolerant Systems: the Measures, Algorithms and Modeling Technique [Text] / V.S. Kharchenko, V.V. Gostishchev, N.P. Blagodarny, V.A. Melnikov // Успехи современной радиоэлектроники. – 2002. – №5. – С. 62 – 72.*

2. Курейчик, В.М. Контролепригодное проектирование и само-тестирование СБИС: Проблемы

и перспективы [Текст] / В.М. Курейчик, С.И. Родзин. – М.: Радио и связь, 1994. – 176 с.

3. Димитриев, Ю.К. Самодиагностика модульных вычислительных систем [Текст] / Ю.К. Димитриев. – Н-ск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1993. – 293 с.

4. Методика самодиагностирования vlsi-архитектур с циклическим режимом функционирования [Текст] / Н.П. Благодарный и др. // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2008. – № 6 (33). – С. 171–176.

5. Аксенова, Г.П. Метод параллельно-последовательного самотестирования в интегральных схемах типа FPGA [Текст] / Г.П. Аксенова, В.Ф. Халчев // АИТ. – 2007. – № 1. – С. 163 – 174.

6. Аксенова, Г.П. Контролепригодная архитектура для самотестирования в программируемых логических матричных структурах FPGA [Текст] / Г.П. Аксенова // АИТ. – 2010. – №4. – С. 152–163.

Поступила в редакцию 15.02.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. компьютерных систем С.В. Листровой, Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Украина.

## МОДЕЛЬ САМОДІАГНОСТУВАННЯ ОДНОРІДНИХ ПРОЦЕСОРНИХ СЕРЕДОВИЩ У РЕАЛЬНОМУ МАШТАБІ ЧАСУ

*М.П. Благодарний*

Пропонується модель самодіагностування однорідних процесорних середовищ (високоінтегрованого елементного базису цифрових систем) у реальному масштабі часу. Визначаються умови поєднання вбудованого контролю процесорних модулів і діагностування міжмодульних зв'язків однорідного процесорного середовища. Обґрунтовуються оцінки ефективності використання часової надмірності у функціонуванні цифрових систем для самодіагностування однорідних процесорних середовищ в реальному масштабі часу. У загальному випадку має місце поперемінне знаходження цифрових систем (ЦС) реального часу (ЦС РЧ) в процесі експлуатації на активних тимчасових інтервалах

**Ключові слова:** цифрова система, однорідне процесорне середовище, відмовостійкість, вбудований контроль, самодіагностування.

## MODEL OF SELF-DIAGNOZING HOMOGENIOUS PROCESSOR ENVIRONMENTS IN REAL TIME SCALE

*N.P. Blagodarnyy*

A model of self-diagnosing homogeneous processor environments (highly integrated element basis of digital systems) in real time scale is offered. The conditions of processor modules internal control combining and intermodule connections of homogeneous processor environment diagnosing are defined. Evaluation of temporal redundancy effectiveness of digital systems operating for self-diagnosing homogeneous processing environments in real time scale are justified. In the general case we have to find alternate digital systems (DS) real time (DS RT) during the operation on the active intervals

**Keywords:** digital system, homogeneous processor environment, fault tolerance, embedded control, self-diagnosing.

**Благодарный Николай Петрович** – канд. техн. наук, доц., доц. каф. электротехники и мехатроники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е.Жуковского “ХАИ”, e-mail: blag53@mail.ru.