

## АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ АДАПТАЦИЕЙ МНОГОЯРУСНОЙ АМРС ПО ТЕКУЩЕМУ КРИТЕРИЮ КОРРЕЛЯЦИИ ОТКАЗОВ ВЫСОКОИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЕЁ ЯРУСОВ

к.т.н. А.П. Зенин

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

*Рассматривается вопрос влияния зависимости (корреляции) отказов, возникающей среди элементов высокоинтегрированной элементной базы при использовании её естественной (внутрикристалльной) избыточности для реализации резервированных структур. Предложены метод и средство снижения ее влияния на безотказность многоярусной адаптивной мажоритарно - резервированной структуры.*

Применение высокоинтегрированной элементной базы в цифровых системах управления летательных комплексов (ЦСУ ЛК) вносит существенные особенности в реализацию методов и средств обеспечения их надежности. Помимо расширения возможностей в использовании традиционных способов резервирования за счет вводимой (искусственной) структурной избыточности для реализации функциональной избыточности, децентрализованного управления и т. д., высокоинтегральная элементная база СБИС, ПЛМ, БМК может использовать для резервирования так называемую естественную (внутреннюю) избыточность своих кристаллов и матриц. При этом резервированные структуры реализуются на внутрикристалльном уровне, обеспечивая эффект раздельного резервирования элементарных устройств без дополнительных аппаратных затрат и, соответственно, без увеличения габаритно - весовых характеристик аппаратуры ЛК. Эта естественная избыточность БИС, СБИС, БМК, ПЛМ и т.д. обусловлена стандартным характером их построения, при котором фиксированная разрядность и число ячеек приводит к наличию свободных полей, зон и линеек в них.

Наибольшими возможностями повышения надежности и реализации на высокоинтегрированной базе обладают регулярные резервированные структуры, среди которых следует выделить многоярусные адаптивные мажоритарно - резервированные структуры (МАМРС), нашедшие широкое применение в ЦСУ ракетно - космических комплексов благодаря своим свойствам отказоустойчивости и, особенно, сбоеустойчивости [1]. Уникальная устойчивость к сбоям МАМРС достигается за счет поразрядного поканального мажорирования цифровой информации на промежуточных мажоритарных участках последовательного канала обработки информации, которые называются "ярусами". Отказоустойчивость МАМРС реализуется с помощью адаптивных мажоритарных органов (АМО) ярусов, которые не только выпол-

няют перестройку мажоритарно - резервированной структуры яруса в одно-канальную конфигурацию (ОКФ) при отказе 2-х его каналов. АМО также отключают мажоритарный элемент (МЭ) от выходов резервированных каналов яруса, соединяя их с входами одноименных каналов последующего яруса, чем формируют его “транзитную” конфигурацию (ТКФ). Подключая МЭ обратно к выходам яруса из его ТКФ, такие АМО осуществляют ярусно - пороговую адаптацию МАМРС, изменяя число каналов в ярусах и число МЭ в структуре.

Разработаны структурные схемы таких АМО, а также устройств контроля и реконфигурации, которые управляют этим АМО [2, 3]. Оптимальное для максимизации показателя безотказности число АМО (число ярусов)  $K_0^B$  определяется в результате решения “Задачи оптимальной декомпозиции” (ЗОД) и составляет значение от нескольких десятков до нескольких сотен в зависимости от характеристик системы [2, 4].

Однако увеличение числа мажоритарных ярусов по требованию безотказности при реализации МАМРС на высокоинтегрированной базе вызывает проявление зависимости отказов между элементами ярусов когда МЭ становится не препятствием, а её “переносчиками”.

Такая зависимость отказов, получившая название корреляции отказов МАМРС, проявляется в том, что отказы одних резервированных элементов приводят к изменению интенсивности отказов (обычно – к увеличению) других, вследствие их взаимной однотипности, близости и связности, снижая эффект мажоритарного резервирования.

Известные практические методы учета корреляции сводятся к определению коэффициента корреляции усредненного по всем ярусам, а затем на него делится оптимальное по безопасности число ярусов. Например, в [1] значение коэффициента принимается равное 2, уменьшая число ярусов МАМРС с 126 до 63. Такой метод приводит к потерям безотказности, так как разные ярусы могут иметь различные величины корреляции. В статье предлагается индивидуализировать ярусы по корреляции, исключая из них МЭ, только в местах сильного проявления корреляции отказов.

Сущность предлагаемого метода заключается в разбиении множества элементов (для нас – ярусов) системы на группы непересекающихся множеств (групп ярусов), в которых элементы “близки” друг к другу в смысле “близости” переходов ошибок от одного к другому [5]. В качестве меры близости предлагается принять вероятность  $a_{ij}$  того, что отказ элемента  $i$  - го яруса через его МЭ приводит к увеличению интенсивности отказов элементов  $j$  - го яруса. Для МАМРС множество проявлений корреляции отказов между ярусами в этом случае представляется матрицей корреляционных вероятностей  $a_{ij}$  ( $\|A\|$ ) размерностью  $K_0^B \times K_0^B$  (где  $K_0^B$  - число ярусов МАМРС, определенное ЗОД для повышения безотказности).

Корреляционная “близость” ярусов устанавливается путем сравнения вероятностей  $a_{ij}$  с определенным граничным значением  $a^Г$ . Если  $a_{ij} \geq a^Г$ ,

то ярусы  $i$  и  $j$  считаются сильнокоррелируемыми и могут быть объединены в одну группу, из ярусов которых “исключается” МЭ путем включения его АМО в ТКФ, в результате чего образуется один “укрупнённый” ярус с общим АМО на выходе. В итоге такого “группирования” ярусов в местах проявления сильной корреляции исходное число ярусов (АМО)  $K_0^B$  МАМРС уменьшается на количество  $\Delta K_k$  “исключенных” мажоритарных органов ( $K_0^K = K_0^B - \Delta K_k$ ). Если корреляция отказов соседних ярусов находится в допустимых пределах ( $a_{ij} < a^\Gamma$ ), то они считаются независимыми, оставляя МЭ на своих местах. В этом случае степень “опознания” корреляции и, следовательно, степень группирования ярусов зависит от величины  $a^\Gamma$ , которая наряду с величинами  $a_{ij}$ , выступает в качестве исходных данных. Конкретные значения  $a^\Gamma$  и  $a_{ij}$  определяются для конкретной системы путем её схемотехнического анализа, с помощью статистических данных или путем имитационного моделирования.

Основное содержание и порядок “Методики определения оптимального числа ярусов МАМРС по показателю корреляции отказов” состоит в следующем.

1. Для получения исходных данных решается ЗОД, определяя число  $K_0^B$  ярусов МАМРС, оптимальное по показателю безотказности. Все ярусы оснащаются АМО, реализующие ТКФ.

2. В качестве исходных данных определяются величины корреляционных вероятностей (КВО) отказов  $a_{ij}$  и  $a^\Gamma$ . Составляется матрица  $\|A\|$  размерностью  $K_0^B$ .

3. На основании матрицы  $A$  и значения  $a^\Gamma$  составляется матрица  $B$  размерностью  $K_0^B$  по правилу:

$$b_{ij} = a_{ij}, \quad \text{если } a_{ij} \geq a^\Gamma; \quad b_{ij} = 0, \quad \text{если } a_{ij} < a^\Gamma. \quad (1)$$

4. На основании матрицы  $B$  по её  $i$ -м строкам составляются группы  $B_1, B_2, \dots, B_i, \dots, B_{K_0^B}$  в количестве  $K_0^B$ , где  $B_i$  – группа, составленная из КВО ярусов, которым соответствуют значения  $b_{ij}$  (при  $a_{ij} \geq a^\Gamma$ ) в  $i$ -й строке  $B$ .

5. С целью исключения повторений одних и тех же ярусов в различных группах ( $B_i \cap B_j = \emptyset$ ) и однозначного их распределения, для каждого яруса во всех группах  $B_i$ , где он повторяется, вычисляется функционал  $F$ :

$$F = \sum_{v=1}^n \frac{1}{L_v} \sum_{i,j \in R_v, i \neq j} a_{ij}, \quad (2)$$

где  $n$  – количество групп, в которые объединяются сильнокоррелируемые ярусы;  $L_v$  – число ярусов в  $v$ -й группе;  $R_v$  –  $v$ -ая группа ярусов.

6. Из полученных значений функционалов  $F_{ij}$  для первого яруса (и далее  $j$  -  $x$ ) по всем группам  $B_i$  выбирается его максимальное значение

$$F_1^{\max} = \max_{B_i} F_{i1}, \quad (3)$$

которое соответствует той группе, где этот ярус обладает наибольшим значением корреляции, чем и определяется его место в группе.

7. Аналогичным образом определяются однозначные места остальных ярусов в их совместном группировании, которое соответствует выбранному значению  $\mathbf{a}^\Gamma$ .

8. Если значение  $\mathbf{a}^\Gamma$  не может быть выбрано оптимальным, то предусмотрена итерационная процедура поиска оптимального значения  $\mathbf{a}^\Gamma$ , которая в данной статье не приводится.

9. После получения  $\mathbf{n}$  таких групп ярусов их размещение в многоярусной структуре в зависимости от корреляции решается следующим образом:

- если в одну группу попадают мажоритарно - связанные ярусы, то в них исключается МЭ (АМО переключаются в состояние ТКФ), объединяя эти ярусы в один укрупненный (объединенный) с одним АМО на выходе;

- если в группу попали ярусы, мажоритарно не связанные между собой, то МЭ “остаются” в этих ярусах (АМО переключаются в мажоритарную конфигурацию (МКФ));

- если мажоритарно - связанные ярусы находятся в разных группах, то АМО остаются в их структурах.

10. В результате такого «выборочного» исключения МЭ из структуры определенного числа ярусов их общее число  $K_0^B$  МАМРС уменьшается на значение  $\Delta K_k$  в местах проявления корреляции отказов, снижая её влияние на мажоритарное резервирование и безотказность системы в целом. Переключение определенных АМО ярусов либо в ТКФ (для объединения ярусов), либо в МКФ, либо в ОКФ, где произошёл отказ 2-х каналов, реализуется подачей на управляемый коммутатор АМО двухразрядного управляющего сигнала из устройства контроля и управления реконфигурацией системы [3], производя “настройку” АМО многоярусной структуры по показателю корреляции.

Анализ влияния корреляции отказов в МАМРС предполагает, что реконфигурация её структуры по ОКФ для парирования отказов 2-х каналов в трёхканальном ярусе изменяет корреляционное взаимодействие ярусов. Эти изменения проявляются в изменении значений КВО  $\left\{ a_{ij}^* \right\}$ , что может быть

отражено новой матрицей  $\left\| \mathbf{A}^* \right\|$ . Значит, каждому  $\Psi$  - му отказу 2-х каналов в

каком - либо ярусе может соответствовать своя корреляционная матрица  $\mathbf{A}_\Psi$ , которой должно соответствовать новое число ярусов  $K_0^{K\Psi}$  или новое распределение (группирование) мажоритарных органов в многоярусной структуре системы. Такое “перегруппирование” выполняется с помощью переключения АМО в состояния “ТКФ – МКФ – ОКФ” по соответствующим ярусам, что может быть реализовано в виде “карты настройки” АМО, которая содержит

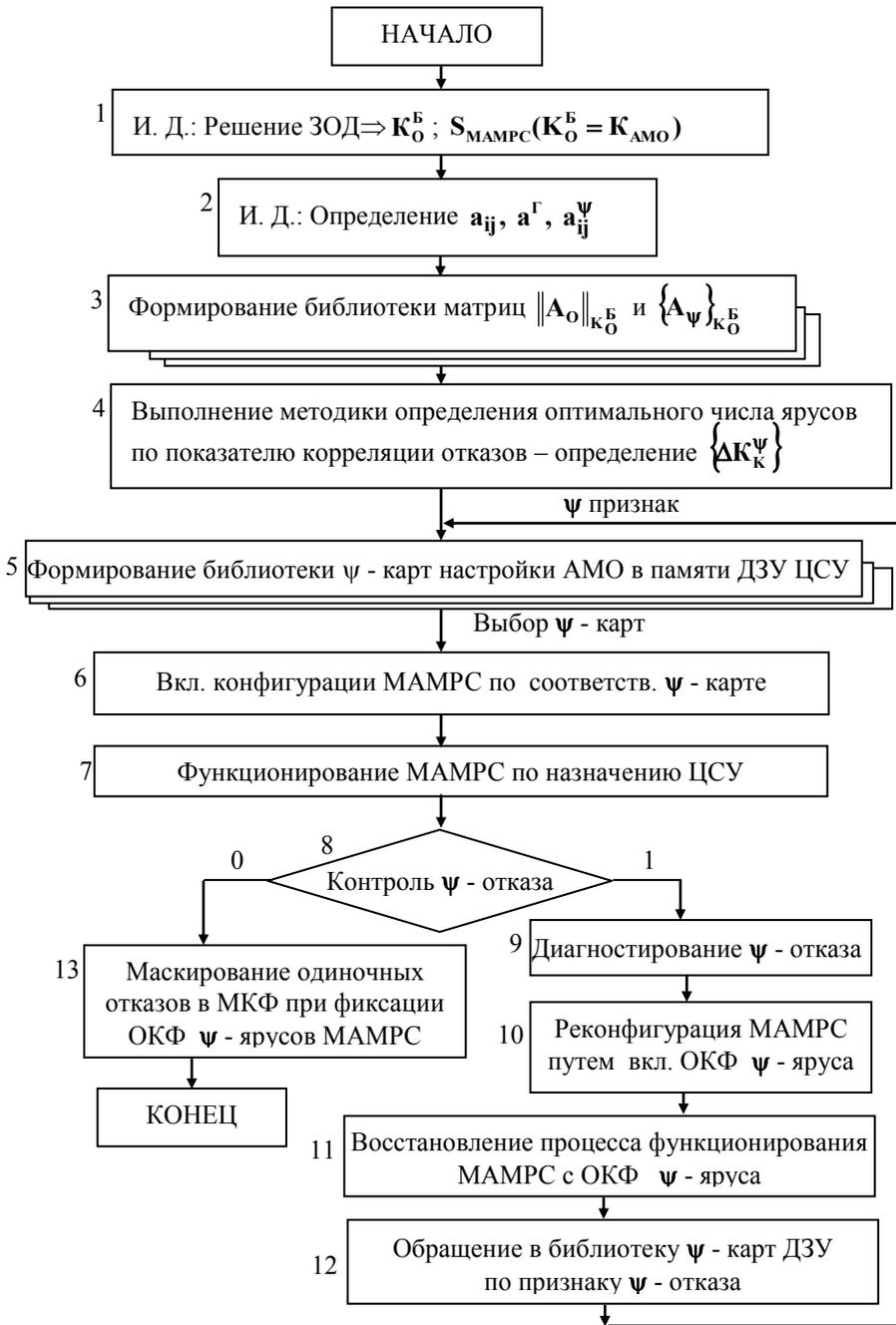


Рис. 1. Алгоритм управления ярусно-пороговой адаптацией МАМРС по текущему показателю корреляции отказов

позиционные коды управляющих сигналов для коммутаторов АМО.

Следовательно, каждому  $\Psi$  - му отказу для каждого яруса с помощью своей матрицы  $A_{\Psi}$  может быть составлена соответствующая “карта настройки” АМО МАМРС по  $\Psi$  - му отказу.

Если для конкретной МАМРС ЦСУ составить библиотеку таких “карт настройки” её АМО для всех возможных  $\Psi$  - отказов (отказов 2-х каналов по всем ярусам) то её можно хранить в памяти ДЗУ ЦСУ. Тогда при диагностировании  $\Psi$  - отказа МАМРС по его признаку из памяти библиотеки считывается соответствующая “карта настройки” АМО. Управляющие сигналы из линейки этой карты подаются на АМО и производят их переключение, меняя расположение или количество мажоритарных органов МАМРС, чем реализуется новая степень адаптации МАМРС по текущему показателю корреляции отказов элементов её ярусов.

На рис. 1 предложен формализованный алгоритм управления такой адаптацией МАМРС по текущему показателю корреляции отказов, который реализует управление ярусно - пороговой адаптацией по двум параметрам структуры:

- числу каналов (порогу АМО) – ярусов для обеспечения безотказности МАМРС ЦСУ;
- по количеству и распределению АМО в многоярусной структуре для снижения влияния корреляции отказов на её безотказность.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кривоносов А. И. Методические вопросы проектирования и эксплуатации СЦВМ. – Х.: НПО “Хартрон”, 1989. – 162 с.
2. Харченко В. С., Зенин А. П. Методы многопараметрической адаптации бортовых управляющих и вычислительных систем с отдельным мажоритарным резервированием // *Космічна наука і технологія*. – 1999. – Т. 5, № 5/6. – С. 81 - 91.
3. Зенин А. П., Харченко В. С. и др. Адаптивная мажоритарно - резервированная система с контролем и управляемой реконфигурацией / Заявка на выдачу патента Украины № 93005327 от 10.02.94.
4. Зенин А. П. О методике декомпозиции адаптивных МРС, оптимальной по показателям безотказности и ремонтпригодности // *Сб. научных статей ХВУ*. – Х.: ХВУ. – 1993. – С. 23 – 28.
5. Гаппарян Ю. М., Арутюнян Г. А. К вопросу оптимального резервирования логических схем // *Вопросы радиоэлектроники. Серия Э.В.Т.* – 1982. – № 414. – С. 125 - 137.

Поступила 28.03.2002

**ЗЕНИН Андрей Петрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры ХВУ. В 1981 году окончил ХВВКУ. Область научных интересов – надежность и отказоустойчивость резервированных цифровых СУ.