

ПОКАЗАТЕЛИ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ И РЕКОНФИГУРОПРИГОДНОСТИ СБИС - СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

к.т.н. Н.П. Благодарный
(представил д.т.н., проф. В.С. Харченко)

В статье разрабатываются и исследуются комплексные и частные показатели отказоустойчивости и реконфигуропригодности СБИС - систем реального времени, определяются области их использования.

Требования к надежностным характеристикам (отказоустойчивости) СБИС - систем реального времени не могут быть удовлетворены без наличия избыточности использования скользящего резервирования [1,2]. Небольшая кратность ($0,1 \div 0,5$) скользящего резервирования интенсифицирует поиск путей улучшения использования резервного оборудования при замене отказавших элементов исправными (реконфигурации) [2].

Важнейшим инструментом определения путей обеспечения отказоустойчивости СБИС - систем являются показатели отказоустойчивости и реконфигуропригодности. Их адекватность структуре и условиям применения СБИС-систем позволяет априори определять [3]:

- требования к средствам реконфигурации;
- рациональные пути их построения и использования при обеспечении отказоустойчивости.

Известные показатели [2]:

- вероятность $P_{БР}(t)$ безотказной работы;
- средняя наработка T до отказа;
- d - безотказность;
- коэффициент разрежения отказов;
- вероятность $P_{ур}(x)$ успешной реконфигурации СБИС - системы при отказе x элементов не в полной мере учитывают структурные особенности и условия применения СБИС - систем, либо не учитывают их. Например, показатель $P_{БР}(t)$ не учитывает влияния расположения отказавших элементов на отказоустойчивость, возможность деградации (снижения качества функционирования) СБИС - системы.

Указанные обстоятельства ограничивают область применения известных показателей и обуславливают актуальность разработки комплексных и частных показателей отказоустойчивости и реконфигуро-

пригодности, адекватно отражающих процессы обеспечения отказоустойчивости в СБИС - системах реального времени [4].

Разработку и анализ таких показателей будем осуществлять, исходя из следующих допущений [2]:

- СБИС - система состоит из матрицы N^2 процессорных элементов (ПЭ);
- резервные ПЭ объединены в l резервных строк и w резервных столбцов;
- работоспособность системы сохраняется при n^2 исправных процессорных элементов из N^2 ;
- система функционирует в реальном масштабе времени;
- отказоустойчивость достигается путем перестройки структуры при отказах (подключения вместо отказавших ПЭ исправных резервных ПЭ) либо ее деградации (уменьшения числа ПЭ в рабочей конфигурации при отсутствии резервных ПЭ или невозможности их использовать для замены отказавших).

Комплексный показатель $R(t)$ отказоустойчивости должен включать следующие взвешенные вероятности:

- вероятность наличия x отказавших ПЭ из-за производственных дефектов - $Q_{gv}(x)$;
- вероятность успешной реконфигурации системы при наличии x дефектов к моменту t_0 начала эксплуатации - $P_{yP_v}(x, t_0)$;
- вероятность отказа i ПЭ на временном интервале (t_0, t) использования СБИС - системы - $Q_{0vj}(x, i)$;
- вероятность их успешной реконфигурации - $P_{yP_{vj}}(x, i, t)$.

При этом

$$R(t) = \sum_{x=0}^{\Delta N} \sum_{S_v} P(S_v) Q_{gv}(x) P_{yP_v}(x, t_0) \times \sum_{i=0}^{\Delta N-x} \sum_{S_{vj}} P(S_{vj}) Q_{0vj}(x, i, t) P_{yP_{vj}}(x, i, t), \quad (1)$$

где $\Delta N = (l+w)N$ - объем резервного оборудования (число резервных процессорных элементов);

$S_v \in MS(x), S_{vj} \in MS_v(x, i)$ - состояния системы (с x отказавшими ПЭ из-за производственных дефектов и i отказавшими ПЭ при эксплуатации);

$P(S_v)P(S_{vj})$ - вероятности состояний $S_v(S_{vj})$ системы;

$$\begin{aligned}
|\mathbf{MS}(\mathbf{x})| &= C_{N^2}^x; \\
|\mathbf{MS}(\mathbf{x}, i)| &= C_{N^2}^x C_{N^2-x}^i; \\
\sum_{S_v} P(S_v) &= 1; \quad \sum_{S_{vj}} P(S_{vj}) = 1.
\end{aligned}$$

При допустимой деградации СБИС-системы показатель $\mathbf{R}(t)$ преобразуется в показатель $\mathbf{R}'(t)$:

$$\begin{aligned}
\mathbf{R}'(t) &= \sum_{x=0}^{\Delta N} \sum_{S_v} P(S_v) Q_{gv}(x) P_{yP_v}(x, t_0) \frac{\prod(S_v)}{\prod_{\max}} \times \\
&\times \sum_{i=0}^{\overline{\Delta N}-x} \sum_{S_{vj}} P(S_{vj}) Q_{0vj}(x, i) P_{yP_{vj}}(x, i, t) \frac{\prod(S_{vj})}{\prod_{\max}}, \quad (2)
\end{aligned}$$

где $\overline{\Delta N} = \Delta N + N^2 - n^2$ - максимально допустимое число ПЭ, используемых для замены отказавших ПЭ;

$\prod_{\max}, \prod(S_{vj})$ - значения производительности СБИС - системы соответственно при $\alpha = 0$ и при нахождении в состоянии S_{vj} .

Компоненты $P_{yP_v}(x, t_0)$ и $P_{yP_{vj}}(x, i, t)$ выражения (2) целесообразно использовать в качестве комплексных показателей реконфигуро-пригодности. Их значения определим суммами взвешенных произведений следующих величин:

- вероятностей достоверного контроля $D_v(D_{vj})$ в состояниях S_v и S_{vj} соответственно;

- коэффициентов $K_{P\Pi_v}(x)$ ($K_{P\Pi_{vj}}(x, i)$) реконфигуро-пригодности перед началом (в процессе) применения СБИС - системы;

- вероятностей завершения процессов диагностирования и реконфигурации за допустимое время

$$\tau_{др}^* (\tau_{др}^{**}) - P_v(\tau_{др} < \tau_{др}^*) (P_{vj}(\tau_{др} < \tau_{др}^{**}));$$

- вероятностей безотказной работы средств диагностирования и реконфигурации - $P_{др_v}(t_0)(P_{др_{vj}}(t))$.

Следовательно,

$$P_{yP_v}(x, t_0) = \sum_{S_v} P(S_v) D_v K_{yP_v}(x) P_v(\tau_{др} < \tau_{др}^*) P_{БСР_v}(t_0); \quad (3)$$

$$P_{УР}(x, i, t_0) = \sum_{S_{vj}}^{\Delta} P(S_{vj}) \times \sum_{S_{vj}} P(S_{vj}) D_{vj} K_{УР_{vj}}(x, i) P_{vj}(\tau_{др} < \tau_{др}^{**}) P_{БСР_{vj}}(t). \quad (4)$$

Из выражений для $P_{УР_v}(x, t_0)$ и $P_{УР_{vj}}(x, i, t_0)$ выделим важные для теории и практики отказоустойчивых СБИС-систем частные показатели реконфигуропригодности, имеющие самостоятельное значение. Коэффициенты $K_{РП_v}(x) (K_{РП_{vj}}(x, i))$ оценивают совершенство используемого алгоритма реконфигурации. При $x \approx i \ll \Delta N$ можно записать, что

$$K_{РП_v}(x) \approx K_{РП_{vj}}(x, i) \cong K_{РП}(F) = \frac{K_S(F)}{K(F)}, \quad (5)$$

где $F = x + 1$ - число отказавших ПЭ; $K(F)$ - общее число комбинаций из F отказавших ПЭ; $K_S(F)$ - число комбинаций из F отказавших ПЭ, маскируемых при использовании S -го алгоритма реконфигурации.

Усреднение значений $K_{РП}(F)$ позволяет получить интегральную оценку $I_{РП}$ реконфигуропригодности

$$I_{РП} = \sum_{F=0}^{\overline{\Delta N}} P(F) K_{РП}(F). \quad (6)$$

В ряде случаев [4] алгоритм реконфигурации наряду с использованием показателей $K_{РП}(F)$ и $I_{РП}$ удобно характеризовать коэффициентом $K_{ИРП}$ использования реконфигурационного пространства

$$K_{ИРП} = \frac{1}{(N^2 + (l+w)N - 1) N^2} \sum_{i=0}^{N^2} |V_P(i)|, \quad (7)$$

где $|V_P(i)|$ - мощность множества резервных ПЭ, которые могут замещать отказавший ПЭ.

Сравнительный анализ показателей (1) – (7) показывает, что:

а) показатель $R'(t)$ в сравнении с известными показателями позволяет получить наиболее полную оценку отказоустойчивости СБИС-систем реального времени, допускающих деградацию;

б) реконфигуропригодность СБИС-систем реального времени целесообразно оценивать вектором $\langle P_{УР}(x, t_0), P_{УР}(x, i, t) \rangle$, позволяющим в компактной форме описывать свойства реконфигуропригодности широкого класса цифровых систем;

в) статическая компонента процесса реконфигурации описывается показателями $K_{РП}(F), I_{РП}, K_{ИРП}$. Их значения инвариантны свойствам

контролепригодности, диагностируемости и скорости замены отказавших ПЭ резервными;

г) диагностическая компонента процесса реконфигурации описывается значениями $\tau_{др}^*$, $\tau_{др}^{**}$, а также суммами взвешенных значений $P_v(\tau_{ih} < \tau_{др}^*) (P_{vj}(\tau_{др} < \tau_{др}^{**}))$.

Комплексный показатель $P_{ур}(x, i, t)$ реконфигуропригодности целесообразно в процессе синтеза отказоустойчивых СБИС-систем дополнять показатели $I_{рп}$ и $K_{ирп}$ с целью облегчения выбора наилучшего алгоритма реконфигурации. Как следует из (7), рост мощности $|V_p(i)|$ увеличивает значения $K_{ирп}$ и $K_{рп}(F)$, а также приводит к уменьшению значений $P(\tau_{др} < \tau_{др}^{**}) P_{БСР}(t)$. Следовательно, существует значение $K_{ирп}$, обеспечивающее максимальное значение $P_{ур}(x, i, t)$.

Предложенные показатели $R'(t)$ и $P_{ур}(x, i, t)$ комплексно учитывают структурные особенности резервного оборудования и динамику его использования в процессе обеспечения отказоустойчивости СБИС-систем реального времени, что их выгодно отличает от известных показателей [1,2]: $P_{Брт}(x, n^2)$, $R(t)$, $P_{ур}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харченко В.С., Литвиненко В.Г., Краснобаев В.А. Методы и алгоритмы реконфигурации систолических матричных систем с фиксированной размерностью и деградацией структуры // Кибернетика и системный анализ. – 1992. – № 4. – С. 72 - 79.
2. Харченко В.С., Благодарный Н.П. О реконфигуропригодности цифровых систем // Электронное моделирование. – 1998. – № 6. – С. 81 - 93.
3. Кун С. Матричные процессоры на СБИС: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 672 с.
4. Благодарный М.П. Композиція реконфігурації, динамічного синтезу та реактивації у відказостійких процесорних середовищах реального часу // Ракетно - космічна техніка. – Харків, ХВУ. – 1999. – Вип.1. – С. 46 - 48.

Поступила 24.01.2001

БЛАГОДАРНЫЙ Николай Петрович, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры Харьковского военного университета. В 1976 году окончил Харьковское высшее командное училище. Область научных исследований – отказоустойчивые цифровые системы.