

УДК 629.7.05.017

В.А. КУЛАНОВ

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

ОБ ОЦЕНКЕ ДИВЕРСНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МИНИМАЛЬНЫХ ФОРМ ФУНКЦИЙ В РАЗЛИЧНЫХ БАЗИСАХ

Анализируются принципы многоверсионного проектирования цифровых систем обработки и управления на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Проводится оценка диверсности минимальных форм функций реализованных в различных базисах.

многоверсионное проектирование, метрики диверсности, единичные константные неисправности, минимальная нормальная форма функции (МНФ), МДНФ, МКНФ, неразличимые ошибки

Введение

Одним из наиболее распространенных методов повышения надежности цифровых систем обработки и управления (ЦСОУ) является метод, основанный на введении программно-аппаратной избыточности [1, 2].

Появление программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и рост количества эквивалентных вентилях на кристалле дает разработчику возможность реализации многоканальных ЦСОУ в одной микросхеме ПЛИС [3].

Недостатком при простом дублировании модулей являются риски отказов по общей причине (ООП) [4], которые могут возникать сразу в нескольких каналах, вследствие каких-либо внешних или внутренних факторов, и приводить к отказу всей системы. Такие отказы могут быть вызваны: дефектами, обусловленными неверной интерпретацией спецификации (алгоритма); дефектами, внесенными при проектировании и не выявленными при тестировании, а также физическими дефектами, возникающими в процессе эксплуатации ввиду внешних воздействий (электромагнитных помех, радиации, нарушения питания и т.д.).

Одним из ключевых решений, призванных снизить риски ООП, является применение многоверсионного подхода (введение версионной избыточно-

сти) при реализации резервных каналов [4 – 6].

Основная идея данного принципа заключается в использовании нескольких версий проектных решений, которые обеспечивают различную реакцию каждого из резервных каналов системы при проявлении дефектов. Это позволит мажоритарному элементу (контрольному модулю) выявить, а при определенных условиях парировать отказ [6].

Результат работы подобных систем, в таком случае, может быть следующим: все версии демонстрируют одинаково верный результат; выходные данные различных версий не совпадают (признак наличия ошибок в канале); все версии выдают одинаково неверный результат. В последнем случае речь идет о неразличимых дефектах, которые не могут быть выявлены мажоритарным элементом.

Актуальной задачей для различных приложений ЦСОУ (в первую очередь критических) является минимизация подобного рода дефектов для повышения отказоустойчивости всей системы.

Наряду с неразличимыми дефектами в системе могут присутствовать невыявляемые скрытые дефекты (U), т.е. такие типы константных неисправностей, которые не могут быть выявлены ни одним из существующих вариантов тестовых наборов. Это возможно, когда схемные реализации заданных функций являются избыточными [7].

Одними из наиболее сложных проблем построения цифровых систем обработки информации и управления на программируемой логике, при использовании многоверсионного подхода, являются способы внесения версионной избыточности, качественная и количественная оценка проектных решений, в частности, оценка степени независимости версий (метрик диверсности) и надежности многоверсионных ЦСОУ в целом.

Цель статьи – проанализировать существующие метрики диверсности при разработке многоверсионных ЦСОУ на ПЛИС, варианты реализаций версий на основе минимальных нормальных форм (МНФ) функций в различных базисах и провести оценку их диверсности.

Анализ метрик диверсности

Различные способы количественной оценки (расчета метрик) диверсности цифровых проектов предложены для систем обработки информации и управления на программируемой логике [8, 9], описываемых моделями комбинационных и последовательных автоматов.

В частности, одна из метрик диверсности (D) основана на расчете вероятности отсутствия неразличимых дефектов в системе при единичных константных неисправностях в каждом из резервных каналов [8]:

$$D = \frac{1}{m} \sum_{i,j} d_{i,j}, \quad (1)$$

где m – количество пар единичных дефектов;

$d_{i,j}$ – диверсность пары дефектов (f_i, f_j) , т.е. вероятность того, что результат работы двух версий, при наличии пары константных неисправностей в обоих каналах, будет одинаково неверным (неразличимый тип дефектов), т.е.

$$d_{i,j} = 1 - \frac{k_{i,j}}{2^n}, \quad (2)$$

где $k_{i,j}$ – количество входных тестовых наборов, которые детектируют обе пары дефектов (f_i, f_j) ;

n – количество входов цифровой схемы.

Недостатками подобного метода является то, что количество возможных вариантов пар единичных отказов (m), которые необходимо рассмотреть, может быть достаточно большим, а расчет подобной метрики диверсности относится к NP-полному классу задач [10].

Другой вариант расчета степени диверсности проектных решений основан на вычислении относительных показателей двух видов: метрики d_1 , характеризующей контролепригодность одного канала и метрики d_2 , характеризующей пару каналов (S_1 и S_2) с точки зрения различимости отказов [9]:

$$d_1 = \frac{m_1}{2^n N_1}; \quad (3)$$

$$d_2 = \frac{m_{12H}}{2^n N_1 N_2}, \quad (4)$$

где m_1 – количество обнаруженных дефектов в канале S_1 ;

N_1 – максимальное количество возможных дефектов в канале S_1 ;

n – количество входов цифровой схемы;

m_{12H} – количество неразличимых дефектов.

Поиск лучших, с точки зрения диверсности, пар заключается в переборе тупиковых форм логических функций при наличии единичных константных неисправностей с относительной оценкой количества различимых и неразличимых дефектов [9].

Недостатком данного метода является большое количество возможных вариантов реализации резервных каналов из-за большого количества тупиковых форм, трудность выбора оптимальной пары, а также расчет подобных метрик диверсности относится к NP-полному классу задач [10].

Версионная избыточность на основе МНФ

В известных работах описано большое количество моделей ошибок, которые разработчик использу-

ет для тестирования и отладки ЦСОУ на ПЛИС. Наибольшее распространение получил единичный константный тип неисправности (single stuck-at-fault model), когда только одна линия в схеме «залипает» на 0 или 1 (stuck-at-0, stuck-at-1) [7, 11].

Определим базовые критерии выбора варианта проектного решения:

- минимальное количество возможных единичных константных неисправностей (E);
- минимальное количество невыевляемых дефектов (U) в канале.

Максимальное количество единичных константных неисправностей (E_{max}) в схеме составляет :

$$E_{max} = 2n, \tag{5}$$

где n – количество цепей связи (линий) в схеме.

Одним из вариантов версионной избыточности является использование минимальных форм заданных функций (МДНФ, МКНФ) для реализации всех версий. Это дает возможность, во-первых, минимизировать количество рассматриваемых пар константных неисправностей (m), во-вторых, уменьшить количество константных неисправностей в схеме (E_{max}), с полным исключением невыевляемых дефектов (U).

Следует учитывать то, что существуют такие функции, которые могут иметь несколько минимальных форм, представленных как в одном, так и различных базисах. Общее количество рассматриваемых пар в данном случае будет составлять C_k^2 , где k – количество вариантов минимальных форм функции (МДНФ или МКНФ). Тогда множество пар вариантов решений

$$W = \{w_{\delta}\}_{\delta=1}^{C_k^2}, \tag{6}$$

где w_{δ} – пара МНФ.

Для выбора наилучшей пары необходимо провести оценку степени диверсности вариантов МНФ, представленных в различных базисах.

Оценка диверсности МНФ

Для разработки общей процедуры оценки степени диверсности проектных решений минимальных форм функций, а также выбора лучших вариантов, рассмотрим следующий пример.

В табл. 1 задана исходная функция (F), в которой необходимо отыскать все возможные варианты минимальной дизъюнктивной нормальной формы (МДНФ) и провести оценку их диверсности.

Получим в соответствии с таблицей булевы выражения, представленные в виде МДНФ. Воспользуемся для этого методом минимизаций функций по средствам карт Карно (рис. 1).

Таблица 1

Таблица истинности функции F

A	B	C	F
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

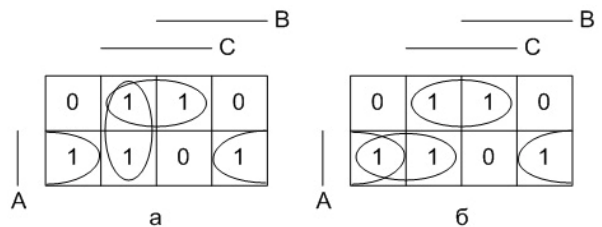


Рис. 1. Минимизация исходной функции по средствам карт Карно

Функции F_1 (рис. 1, а) и F_2 (рис. 1, б), согласно представленным картам Карно имеют следующий вид:

$$F_1 = A\bar{C}\bar{v}A\bar{C}v\bar{B}C = A \oplus C \vee \bar{B}C ;$$

$$F_2 = A\bar{C}\bar{v}A\bar{C}vA\bar{B} = A \oplus C \vee A\bar{B} .$$

Для получения третьего варианта воспользуемся законами алгебры логики для перехода в другой базис:

$$F_3 = \overline{A \oplus C \vee A\bar{B}} = \overline{A \oplus C} \& \overline{A\bar{B}} .$$

На основе полученных результатов построим соответствующие комбинационные схемы для каждой из версий (рис. 2).

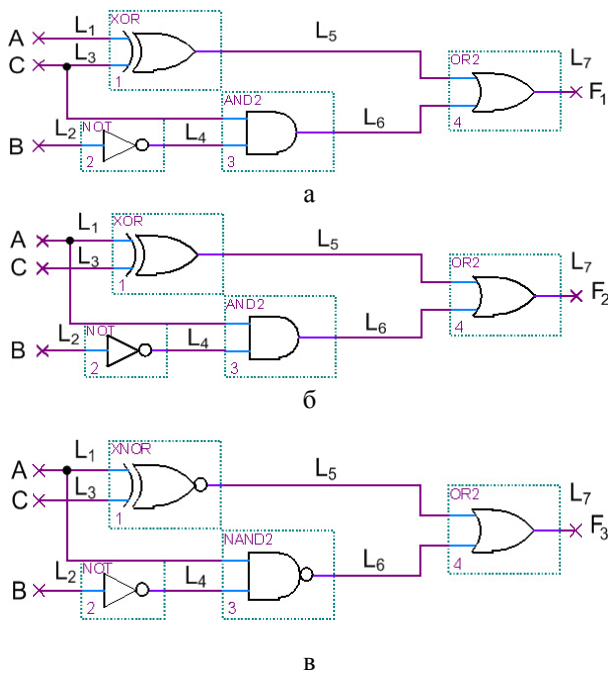


Рис. 2. Представление логических функций F_1, F_2, F_3 на уровне комбинационных схем

Для упрощения расчета степени диверсности заданных функций рассмотрим наихудший случай, когда в системе в обоих каналах присутствует одинаковый тип константной неисправности (рис. 2, табл. 2), т.е. линия связи L_n во всех версиях (F_1, F_2, F_3) принимает константное значение (0 или 1), что приводит к ошибочному результату. При простом дублировании резервных каналов данная неисправность будет неразличима (т.е. не может быть детектирована мажоритарным элементом).

Перед моделированием сделаем ряд допущений:

- на каждом шаге моделирования (в дискретный момент времени) в различных каналах возникает единственный идентичный тип неисправности (одна линия L_n принимает определенное константное значение во всех заданных функциях, например $L_5/0$ в F_1, F_2, F_3);
- расчет диверсности версий d_{ij} проводится согласно (2);
- результаты на выходе появляются мгновенно, т.е. не учитываются временные задержки.

Таблица 2

Соотношение возможного появления дефектов различных версий и места их локализации

Линия связи	Типы дефектов		
	F_1	F_2	F_3
$L_1/0$	$A/0$	$A/0$	$A/0$
$L_1/1$	$A/1$	$A/1$	$A/1$
$L_2/0$	$B/0$	$B/0$	$B/0$
$L_2/1$	$B/1$	$B/1$	$B/1$
$L_3/0$	$C/0$	$C/0$	$C/0$
$L_3/1$	$C/1$	$C/1$	$C/1$
$L_4/0$	$\bar{B}/0$	$\bar{B}/0$	$\bar{B}/0$
$L_4/1$	$\bar{B}/1$	$\bar{B}/1$	$\bar{B}/1$
$L_5/0$	$A \oplus C/0$	$A \oplus C/0$	$\overline{A \oplus C}/0$
$L_5/1$	$A \oplus C/1$	$A \oplus C/1$	$\overline{A \oplus C}/1$
$L_6/0$	$\bar{B} \& C/0$	$\bar{B} \& A/0$	$\overline{\bar{B} \& A}/0$
$L_6/1$	$\bar{B} \& C/1$	$\bar{B} \& A/1$	$\overline{\bar{B} \& A}/1$
$L_7/0$	$F_1/0$	$F_2/0$	$F_3/0$
$L_7/1$	$F_1/1$	$F_2/1$	$F_3/1$

Таблица 3

Оценка диверсности d_{ij} МДНФ заданной функции F

Линия связи	d_{ij}		
	$F_1 F_2$	$F_1 F_3$	$F_2 F_3$
$L_1/0$	1	1	1
$L_1/1$	1	1	1
$L_2/0$	1	1	1
$L_2/1$	1	1	1
$L_3/0$	1	1	1
$L_3/1$	1	1	1
$L_4/0$	1	1	1
$L_4/1$	1	1	1
$L_5/0$	0,75	0,25	0,25
$L_5/1$	1	0,25	0,25
$L_6/0$	1	0,5	0,5
$L_6/1$	1	0,5	0,5
$L_7/0$	1	1	1
$L_7/1$	1	1	1

Результаты моделирования работы версий представлены в табл. 3.

Согласно данной таблице, наилучшими вариантами реализации системы при многоверсионном подходе проектирования являются пары версий $F_1 F_3$ и $F_2 F_3$. Для пары версий $F_1 F_2$ вероятность появления неразличимых дефектов больше, т.е. диверсность меньше.

Таким образом, степень диверсности (d_{ij}) заданных функций в МДНФ будет выше в том случае, когда они реализованы в различных базисах.

Выводы

В статье проведен анализ существующих метрик диверсности, предложены дополнительные критерии отбора вариантов проектных решений, минимизирующих риски ООП.

Исследован вариант внесения версионной избыточности за счет использования минимальных форм функции.

Проведена оценка и расчет степени диверсности пар проектных решений, представленных в МДНФ и различных базисах.

Экспериментально установлено, что при построении резервных каналов на основе МНФ (МДНФ или МКНФ) степень диверсности версий будет больше в том случае, если МНФ реализуют в различных базисах. Кроме того, показано, что из всего множества возможных пар МНФ (МДНФ или МКНФ) может существовать такая пара, степень диверсности (D) которой выше, чем у остальных.

В дальнейшем необходимо разработать аналитический метод оценки диверсности цифровых проектов, исследовать методы синтеза (генерации) вариантов проектных решений, обладающих большей степенью диверсности.

Литература

1. Tamir Y., Sequin C.H. Reducing common mode failures in duplicate modules // Proc. ICCD. – 1984. – P. 302-307.
2. Kharchenko V., Prokhorova J., Ostroumov S., Kulanov V. Fault-tolerant SOPC-based approaches with multi-version IP // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 9(27). – С. 71-77.
3. Mitra S., Saxena N.R., McCluskey J. Common-Mode Failures in Redundant VLSI Systems: A Survey // IEEE Trans. on Reliability. – Sep. 2000. – Vol. 49, No. 3. – P. 285-295.
4. Avizienis A., Kelly J.P. Fault Tolerance by Design Diversity: Concepts and Experiments // IEEE Computer, August, 1984. – P. 67-80.
5. Mitra S., McCluskey J. Design of Redundant Systems Protected Against Common-Mode Failures // 19 IEEE VLSI Test Symposium (VTS'01). – Los Angeles, CA. – Apr. 30-May 3, 2001. – P. 190-195.
6. Харченко В.С., Жихарев В.Я., Илюшко В.М., Нечипорук Н.В. Многоверсионные системы, технологии и проекты / Под ред. д-ра техн. наук, проф. В.С. Харченко. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2003. – 486 с.
7. Al-Asaad H., Hayes J.P. Logic design verification via simulation and automatic test pattern generation // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – December 2000. – Vol. 16, No. 6. – P. 575-589.
8. Mitra S., Saxena N.R., McCluskey J. A Design Diversity Metric and Reliability Analysis for Redundant Systems // Proc. 1999 Int. Test Conf. – Atlantic City, NJ. – Sep. 28-30, 1999. – P. 662-671.
9. Харченко В.С., Тарасенко В.В. Абстрактные модели и элементы синтеза многоверсионных автоматов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 7(18). – С. 52-55.
10. Garey M., Johnson D. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NPCompleteness // W.H. Freeman and Company. – 1979. – P. 40-45.
11. McCluskey J., Tseng C.W. Stuck-at Faults vs. Actual Defects // Proc. Intl. Test Conf. – 2000. – P. 336-343.

Поступила в редакцию 14.02.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.М. Романкевич, Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев.