

УДК 621.192

Н.П. БЛАГОДАРНЫЙ, Д.С. ТРОНЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

## САМОДИАГНОСТИРОВАНИЕ ВЫСОКОИНТЕГРИРОВАННЫХ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Рассматривается структура программируемых логических интегральных микросхем (ПЛИС), а также математические модели конфигурируемой матрицы логических блоков ПЛИС, предлагается усовершенствованный метод самодиагностирования цифровых систем реального времени, построенных на базе программируемых микросхем с более эффективным использованием аппаратной избыточности. Повышается эффективность использования ресурсов ПЛИС за счет того, что часть незадействованных ячеек используются при конфигурировании ДМ, а часть остается в горячем резерве.

**Ключевые слова:** отказоустойчивость, самодиагностирование, вычислительный модуль, диагностический модуль, ПЛИС.

## Введение

В современных областях критического применения (космическая и авиационная промышленность, атомная энергетика и т.д.) при построении цифровых систем (ЦС) в качестве элементной базы все чаще используют высокоинтегрированные программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС, англ. – FPGA). Эти схемы обладают рядом преимуществ перед заказными и полужаказными микросхемами: меньшая стоимость (особенно при малых партиях), большая «гибкость» при проектировании системы, независимость от фирм изготовителей микросхем и др [1].

Тяжелые условия применения ЦС на ПЛИС обуславливают интенсивные потоки отказов и сбоев элементной базы [2]. Это обстоятельство требует обеспечения активной отказоустойчивости ПЛИС и систем на их основе [3]. Требуемый уровень отказоустойчивости ЦС достигается на этапе проектирования путем размещения на кристалле ПЛИС средств контроля, диагностики и реконфигурации [4, 5] и их оперативного использования при маскировании отказов и сбоев на этапе применения. Одним из наиболее актуальных вопросов обеспечения высокого уровня отказоустойчивости ЦС критического применения на ПЛИС архитектуре является организация самодиагностирования в реальном масштабе времени [6].

## Постановка задачи

Структура ПЛИС, представленная на рис. 1 включает в себя: КЛБ – конфигурируемые логические блоки; БВВ – блоки ввода/вывода; DLL – моду-

ли автоподстройки задержек; VersaRing – интерфейс ввода-вывода.

Основой схемы является матрица конфигурируемых логических блоков (рис. 2), состоящая из макроячеек [1, 2, 8, 9], в которой конфигурируется проектируемая схема цифровой системы (ЦС).



Рис. 1. Структура ПЛИС (черные квадраты – DLL)

Матрица КЛБ (рис. 2) предназначена для реализации необходимой схемы цифровой системы (ЦС) посредством конфигурирования вычислительных модулей (ВМ)  $V_r = \{C_{ij}(i, j)\}$ ,  $r = \overline{1, m}$ , из множества используемых ячеек  $\{C_{ij}(i, j)\}$ ,  $i = \overline{1, a}$ ,  $j = \overline{1, b}$ .

Стандартные размеры ПЛИС и уникальные требования к цифровым системам обуславливают структурную избыточность ПЛИС – наличие мно-

жества  $\{C_n(k, l)\}$ ,  $k = \overline{a+1, g}$ ,  $l = \overline{b+1, h}$  - неиспользуемых ячеек, где  $g$  и  $h$  общее количество ячеек, организующих матрицу КЛБ.

Тогда модель конфигурируемой матрицы ПЛИС можно представить в следующем виде:

$$M = C_n \cup C_n = \{C_n(i, j) \cup C_n(k, l)\}. \quad (1)$$

При условии, что  $C_n > C_n$ ,  $C_n \neq 0$ .

Неиспользуемые ячейки являются резервными для возможности осуществления реконфигурации в случае отказа.

Целесообразно использовать некоторую часть этих средств для организации самодиагностирования ЦС на ПЛИС в реальном масштабе времени. Необходимо определить число, размещение и характеристики средств самодиагностирования ПЛИС. Эффективность решения этой задачи можно определить выражением:

$$P(\tau_d \leq \tau) \geq P_{зад}, \quad (2)$$

$\tau_d$  - время самодиагностирования цифровой системы на ПЛИС;

$\tau$  - допустимое время, на самодиагностирование;

$P_{зад}$  - заданная вероятность правильной оценки технического состояния ЦС.

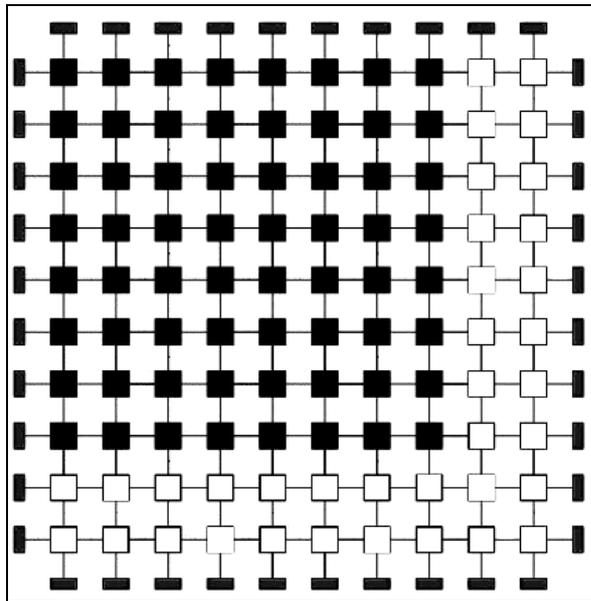


Рис. 2. Структура матрицы КЛБ

Известные методы самодиагностирования [2-6] позволяют:

1) Выполнять диагностирование цифровой системы за счет выделения собственных вычислительных средств (на основе блуждающего диагностического ядра), что приводит к снижению производительности системы, элементарные проверки проводятся случайным образом в свободное от работы время;

2) Производить проверки случайным образом;

3) Определять техническое состояние ЦС при ограниченном количестве отказов, не превышающих определенный параметр;

4) Хранить диагностическую информацию о системе с возможностью передачи ее внешнему ресурсу и др.

### Решение задачи

Необходимо осуществлять самодиагностирование ЦС за счет выделения неиспользуемых аппаратных средств. Из множества неиспользуемых ячеек  $\{C_n(k, l)\}$  на этапе проектирования необходимо создавать и включать в алгоритм работы цифровой системы диагностические модули (ДМ)  $V_{дг} = \{C_n(k, l)\}$ ,  $k = \overline{a+1, g}$ ,  $l = \overline{b+1, h}$ .

С учетом выражений (2) и (3) время, необходимое для последовательного самодиагностирования ЦС, можно представить в виде:

$$\tau_d = \sum_{r=1}^m \tau_{дг}, \quad (3)$$

где  $\tau_{дг}$  - время диагностирования  $r$ -го вычислительного модуля.

С целью сократить время самодиагностирования ЦС, данный процесс необходимо распараллелить, введя дополнительные диагностические вычислительные модули (ДМ)  $V_d$ . Тогда время диагностики определится выражением:

$$\tau_d = \frac{\sum_{i=1}^m \tau_{дг}}{V_d}, \quad (4)$$

где  $V_d$  - количество диагностических модулей в цифровой системе.

Самодиагностирование может проводиться непрерывно (функциональное) или периодически (тестовое). Периодичность диагностирования устанавливается с учетом требований к достоверности работы конкретной ЦС. Рассмотрим пример организации самодиагностирования ЦС на ПЛИС (рис. 3). Показан фрагмент некоторой произвольной ЦС, имеющий пять рабочих модулей и один диагностический.

В течение промежутка времени  $\tau_{дг}$  ДМ формирует и подает на рабочий ВМ  $V_i$  тестовое воздействие  $r_i$ , получает отклик (реакцию)  $a_i$  и проводит сравнение отклика с эталонным значением. Далее делается вывод о работоспособности  $i$ -го модуля: ( $i = \overline{1, m}$ ):

$$a_i = \begin{cases} 0 - \text{àñèè } V_i & \text{í àèñ ðàáááí,} \\ 1 - \text{àñèè } V_i & \text{èñ ðàáááí.} \end{cases} \quad (5)$$

После анализа исправности  $V_i$ , ДМ приступает к диагностированию следующего вычислительно модуля  $V_{i+1}$ . До тех пор пока,  $i \leq m$ , после чего алгоритм повторяется сначала.

Диагностическая информация о системе хранится в выделенной для этой цели области памяти ПЛИС с возможностью передачи ее внешним ресурсам. Информация должна поступать от всех ДМ и обновляться после каждого цикла самодиагностирования ЦС.

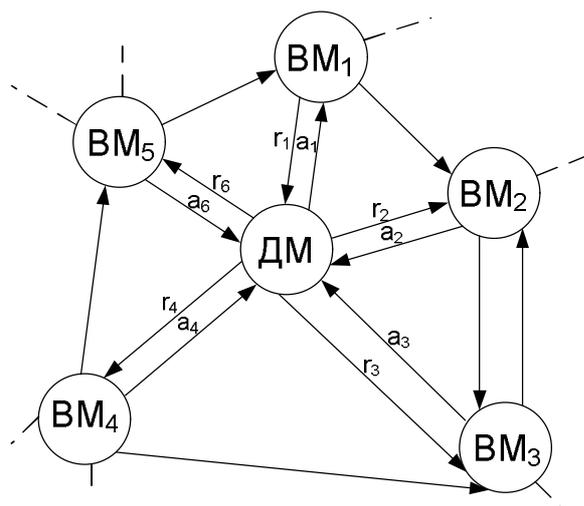


Рис. 3. Граф взаимосвязей ВМ фрагмента произвольной ЦС

После выполнения алгоритма самодиагностирования возможны два исхода:

- 1) Диагностические модули выдают положительный результат технического состояния системы.
- 2) Диагностические модули выдают отрицательный результат технического состояния системы.

При выдаче отрицательного результата самодиагностирования осуществляется восстановление работоспособности системы путем реконфигурации отказавшего ВМ или системы в целом, либо же отключения из системы неисправного вычислительного модуля и возложения решаемых им задач на оставшиеся исправные модули. Цифровая система продолжает функционировать.

### Заключение

1. При использовании самодиагностирования в ЦС критических приложений повышается уровень

отказоустойчивости ( $R_{зд} \rightarrow \max$ ), за счет наличия информации об отказавших вычислительных модулях.

2. Повышается эффективность использования ресурсов ПЛИС. Часть незадействованных изначально ячеек используются при конфигурировании ДМ, а часть остается в горячем резерве.

3. В дальнейшем необходимо выполнить согласование алгоритмов контроля, самодиагностики и реконфигурации для работы цифровых систем реального времени критической области применения на базе ПЛИС.

### Литература

1. Грушвицкий Р.И. Проектирование систем на микросхемах программируемой логики / Р.И. Грушвицкий, А.Х. Мурсаев, Е.П. Угрюмов. – СПб.: БХВ, 2002. – 606 с.
2. Altera.ru [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.altera.ru>.
3. Аксенова Г.П. Метод параллельно-последовательного самотестирования в интегральных схемах типа FPGA / Г.П. Аксенова, В.Ф. Халчев // Автоматика и телемеханика № 1. – 2007. – С. 163-174.
4. Барабаш О.В. Методика обнаружения отказов в вычислительных системах на основе блуждающего диагностического ядра / О.В. Барабаш, М.В. Куклинский // Збірник наукових праць «Проблеми інформатизації та управління». – № 12. – Х.: ХАІ, 2004. – С. 22-27.
5. Благодарный Н.П. Методика самодиагностирования VLSI – архитектур с циклическим режимом функционирования / Н.П. Благодарный, Б.В. Остроумов, Н.Ф. Сидоренко, С.Я. Яценко // Радиоэлектронные и компьютерные системы № 6. – Х.: ХАІ, 2008. – С. 171-176.
6. Дмитриев Ю.К. Самодиагностирование модульных вычислительных систем / Ю.К. Дмитриев. – Новосибирск: ВО Наука, 1993. – 293 с.
7. Аксенова Г.П. Обеспечение контролепригодности в матрице типа FPGA / Г.П. Аксенова // Радиоэлектронные и компьютерные системы № 6. – Х.: ХАІ. – 2007. – С. 116-119.
8. Ведешников В.А. Путевой метод самодиагностирования цифровых систем / В.А. Ведешников // Автоматика и телемеханика №3. – 2005. – С. 154-168.
9. PLIS.ru [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.plis.ru>.

Поступила в редакцию 09.03.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, професор, зав. кафедрой авиационных приборов и измерений Н.Д. Кошевой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е Жуковского "ХАИ", г. Харьков

### САМОДІАГНОСТУВАННЯ ВИСОКОІНТЕГРОВАНІХ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

*М.П. Благодарний, Д.С. Троненко*

Розглядається структура програмованих логічних інтегральних мікросхем (ПЛІС), а також математичні моделі конфігурованих матричних логічних блоків ПЛІС, пропонується удосконалений метод самодіагностування цифрових систем реального часу, побудованих на базі програмованих мікросхем з більш ефективним використанням апаратної надмірності. Підвищується ефективність використання ресурсів ПЛІС за рахунок того, що частина незадіяних осередків використовуються при конфігуруванні ДМ, а частина залишається в резерві.

**Ключові слова:** відмовостійкість, самодіагностування, обчислювальний модуль, діагностичний модуль ПЛІС.

### SELF-DIAGNOSTIC HIGH-INTEGRATED DIGITAL SYSTEMS OF REAL TIME

*M.P. Blagodarniy, D.S. Tronenko*

The structure of programmable logic integrated circuits (FPGAs), as well as mathematical models of configurable logic blocks of the FPGA matrix, is presented. The method of self-diagnosing digital real-time systems, based on the basis of programmable chips with more efficient use of hardware redundancy is proposed and improved. The efficiency of the use of FPGA resources is increased due to the fact that the part of unused cells are used for configuring DM, and the other one remains hot standby.

**Keywords:** fault tolerance, self-diagnosing, computing module, diagnostic module, FPGA.

**Благодарный Николай Петрович** – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры электротехники и мехатроники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: blag\_1956@mail.ru

**Троненко Денис Сергеевич** – аспирант кафедры электротехники и мехатроники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: driverden@mail.ru.