

ПОДХОДЫ К ТЕСТИРОВАНИЮ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Деменковец Д.В., Петровская В.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Ярмолик В.Н. – доктор технических наук, профессор

Тезис посвящен подходам к тестированию запоминающих устройств. В тексте рассмотрены основные модели неисправностей, примеры традиционных методов тестирования и маршевые тесты. Особое внимание уделено теме многократного неразрушающего тестирования. В работе приведены достоинства и недостатки исчерпывающего тестирования.

В современных вычислительных системах выделяют три основных составляющих: программную (software), аппаратную (hardware) и запоминающую (memory) части системы [1]. Причиной неисправного состояния запоминающих устройств (ЗУ) является наличие физического или механического дефекта либо множества подобных дефектов, количество и многообразие которых практически неограниченно [1,2]. К основным типам неисправностей запоминающих устройств относят: константные неисправности (stuck-at faults – SAF); переходные неисправности (transition faults – TF); неисправности взаимного влияния (coupling fault – CF); инверсные неисправности взаимного влияния (inverse coupling faults – CFin), неисправности взаимного влияния прямого действия (idempotent coupling faults – CFid), статические неисправности взаимного влияния (state coupling faults – CFst); граничные кодочувствительные неисправности (neighborhood pattern sensitive faults – NPSF); пассивные кодочувствительные неисправности (passive NPSF – PNPSF), активные кодочувствительные неисправности (active NPSF - ANPSF), статические кодочувствительные неисправности (static NPSF – SNPSF) [2].

Для диагностирования неисправностей запоминающих устройств выделяют так называемые традиционные тесты и маршевые тесты. К первым относят тесты типа шахматная доска (checkerboard), тест бегущая 1/0 (walking 1/0), тест бегущая диагональ (sliding diagonal), тест пинг-понг (ping-pong), тест галопирующая 1/0 (galloping) и другие [1]. Маршевые тесты (march tests) обладают достоинствами: приемлемая покрывающая способность неисправностей ЗУ, простота реализации тестовой процедуры (временная и аппаратная). Это очень важно при проектировании средств самотестирования.

К классическим маршевым тестам относят следующие тесты: MATS (modified algorithmic test sequence, сложность 4N), MATS++ (сложность 6N), March X (сложность 6N), March Y (сложность 8N), March C- (сложность 10N), March PS (сложность 23N). Данные тесты имеют различные обнаруживающие способности, напрямую зависящие от их сложности. Их относят к разрушающим маршевым тестам, т.е. без сохранения исходных данных (например, памяти ОЗУ).

Снижение аппаратной сложности систем тестирования достигается в классе замкнутых схем компактного тестирования. Данные схемы позволяют реализовать сохранение исходных данных системы и соответствуют неразрушающему принципу тестирования, которое связано со схемой кольцевого тестирования. При этом возникающая аппаратная избыточность, за счет совмещения функций генератора и анализатора, незначительная. Неразрушающие методы тестирования заключаются в сохранении и восстановлении данных ЗУ после проведения процедуры тестирования. Это обусловлено критическим применением многих приложений. К примеру, использование в системах автопилотирования, автоматизированных системах контроля и управления, в системах реального времени, лабораторных системах анализа и т.п., для которых необходимо выполнять периодическое тестирование.

Для периодического тестирования основным является способность восстанавливать оперативные данные после каждого тестового сеанса. Первые данные системы использовали резервные копии модулей ЗУ с применением классических разрушающих традиционных и маршевых тестов, по завершении которых информация переписывалась обратно из резервных копий.

Подход, предложенный Б. Конеманом, основанный на линейности сигнатурного анализатора, нашел применение в различных системах тестирования. Но из-за ряда существенных недостатков не получил широкого распространения на практике. Вместо него используются методы, основанные на преобразовании классических маршевых тестов к неразрушающему виду.

Впервые метод преобразования был предложен М. Николаидисом в его работе [3]. Общая сложность неразрушающего теста, преобразованного из разрушающего маршевого теста, складывается из двух слагаемых: сложности начального теста и сложности базового теста. Преобразованные тесты по данной методике: TMATS (сложность 5N), TMATS++ (сложность 8N),

TMarch X (сложность 8N), TMarch Y (сложность 12N), TMarch C- (сложность 14N). Можно сделать вывод о том, что алгоритмическая сложность неразрушающих тестов, построенных по методу Николаидиса, значительно возрастает в сравнении с разрушающей версией.

В дальнейшем был предложен минимальный неразрушающий тест минимальной сложности. При условии не ограниченного числа выполнения теста для изменяемого содержимого ЗУ тест обладает максимальной покрывающей способностью для класса основных неисправностей. С целью уменьшения временной сложности неразрушающего теста были использованы алгоритмы аддитивного сжатия выходных данных. Данный подход позволяет избежать временных задержек для вычисления эталонной сигнатуры. При этом аппаратные затраты на реализацию встроенных средств самотестирования, основанных на этих алгоритмах, сопоставимы с аппаратными затратами обычных неразрушающих тестов и имеют низкую временную сложность. Недостатком методов неразрушающего тестирования является вычисление эталонной сигнатуры. При этом увеличивается сложность процедуры тестирования в сравнении с классическими тестами. Данный недостаток может быть решен использованием симметричных тестов ЗУ. Для синтеза данных тестов выполняется преобразование исходного маршевого теста в симметричный неразрушающий тест по определенным правилам и последовательности действий.

Достаточно часто в качестве анализируемого ЗУ рассматривается запоминающее устройство, состоящее из множества однобитных запоминающих ячеек, для тестирования которых используются только маршевые тесты. Наиболее актуальной моделью является кодочувствительная неисправность (PSFk), в частности PNPSFk, результаты которой обобщаются для всех других неисправностей.

Из-за последовательной процедурой доступа к ячейкам памяти маршевые тесты обладают невысокой покрывающей способностью кодочувствительных неисправностей. Для увеличения полноты покрытия применяется многократное тестирование ЗУ, которое формулируется в границах исчерпывающего и псевдо-исчерпывающего тестирования, основанного на использовании повторяющейся тестовой процедуры для различных начальных состояний. Неразрушающее тестирование ЗУ также считается разновидностью многократного тестирования с произвольными состояниями. Неразрушающее тестирование позволяет обнаружить любые неисправности ЗУ при многократном повторении теста. Максимальная полнота покрытия в 100% достигается при повторении теста $n \rightarrow \infty$.

Наиболее распространённая технология тестирования вычислительных систем является технология черного ящика, которая определяет применение тестовых последовательностей большой длины, таких как вероятностные тестовые последовательности и их модификации, в пределе которые повторяют, так называемые исчерпывающие тесты. Достоинством исчерпывающего тестирования является его максимальная эффективность, которую невозможно превзойти в рамках любых других известных подходов и методов тестирования вычислительных систем. К недостаткам данного тестирования следует отнести нереально высокую временную сложность, определяемую как большим числом состояний систем, так и множеством возможных входных данных. Поэтому в настоящее время используются различные аппроксимации, среди которых выделяют псевдо-исчерпывающие тесты. Данные тесты характеризуются свойством использования не менее одного раза [1]. Важное отличие псевдо-исчерпывающих тестов по сравнению с исчерпывающими тестами является их существенно меньшая сложность при такой же эффективности.

В качестве подходов для формирования псевдо-исчерпывающих тестовых наборов применяют циклические коды, коды Рида-Соломона, тесты на основе векторов заданного веса, псевдо-исчерпывающие циклические последовательности (сдвиговая последовательность, последовательность Джонсона, псевдослучайная последовательность).

Как аппроксимация исчерпывающего тестирования широко используется вероятностное тестирование. В этом случае каждый тестовый вектор выбирается случайным образом, независимо от ранее сгенерированных тестовых наборов. В качестве тестового вектора может выступать содержимое памяти и адресная последовательность, используемая маршевым тестом. Достоинством вероятностного тестирования является низкая стоимость внедрения и возможность автоматической генерации множества тестовых данных. Кроме того, при вероятностном тестировании обычно используются тестовые наборы, которые формируются генератором псевдослучайных или квазислучайных чисел с определенным начальным состоянием, чтобы можно было воспроизвести любое поведение ЗУ при его неисправном состоянии. Вероятностное тестирование и его вариации широко используются как для аппаратной части вычислительных систем, так и для программного обеспечения [1]. Время, необходимое для реализации вероятностного теста, не превышает допустимого и может считаться незначительным по сравнению со временем подготовительной процедуры. Исследования вероятностного тестирования памяти основаны на применении модели цепей Маркова. Было доказано теоретически и экспериментально, что вероятностное тестирование памяти имеет линейную

сложность и поэтому более эффективно, чем детерминированные тесты. Дальнейшим развитием данного подхода является многократное псевдо-исчерпывающее тестирование.

Список использованных источников:

1. Ярмолик, В.Н. Контроль и диагностика вычислительных систем / В.Н. Ярмолик. – Минск: Бестпринт, 2019. – 387 с.
2. Goor, A.J. *Testing Semiconductor Memories: Theory and Practice* / A.J. Goor. – Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1991. – 536 p.
3. Nicolaidis, M. *Transparent BIST for RAMs* / M. Nicolaidis // *Proc. IEEE Int. Test Conf.* – Washington DC, USA, 1992. – P. 598–607.