

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНСТИТУТ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ СО РАН им. В.Е. ЗУЕВА



# **НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИССЛЕДОВАНИИ СЛОЖНЫХ СТРУКТУР**

**МАТЕРИАЛЫ  
ДВЕНАДЦАТОЙ КОНФЕРЕНЦИИ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ  
4–8 июня 2018 г.**

*Мероприятие проведено при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-07-20033)*

Томск  
Издательский Дом Томского государственного университета  
2018

самотестируемые детекторы кодов. Предполагается, что программируемые логические блоки (ПЛБ) реализованы в рамках look up table (LUT)-технологий. Они могут быть запрограммированы на реализацию любых интересующих нас булевых функций заданного числа переменных. Методы синтеза самотестируемых детекторов равновесных кодов с использованием программируемых логических блоков (ПЛБ) представлены в работах [1, 2].

Для представления всевозможных  $(m, n)$  – кодов в [1] предложена специальная формула  $D_n^m(X) = \sum_{i=0}^m D_g^i(X^1) D_{n-g}^{m-i}(X^2)$ , включающая скобки, символы  $\wedge, \vee$  и ДНФ  $D_p^q(X^r)$  – дизъюнкцию конъюнкций, соответствующих всем  $(q, p)$  – кодовым словам,  $p \leq n, q \leq p, X^r \subset X, X = \{x_1, \dots, x_n\}$ . Здесь символ  $\wedge$  между  $D_g^i(X^1) D_{n-g}^{m-i}(X^2)$  опущен. Структура этой формулы может быть представлена соответствующим деревом. Синтез детектора основан на покрытии этого дерева программируемыми блоками, реализующими функции специального вида. Различия в методах связаны с разбиением подмножества переменных кодовых слов при многократном использовании формулы разложения. В первом способе  $g = k$ , где  $k$  – число входов в ПЛБ. Если  $n - k > k$ , то выполним следующий шаг разложения для каждой  $D_{n-k}^{m-i}(X^2)$ , и так далее. Во втором способе  $g$  – наименьшее целое, большее или равное числу  $n / 2$ . Если  $g > k$  и/или  $n - g > k$ , то формула разложения снова используется для каждой функции разложения  $D_g^i, D_{n-g}^{m-i}, i = \overline{0, m}$  и т.д.

В работе [2] разбиение на подмножества переменных в произведениях ориентировано на сокращение максимальной длины путей в схеме, являющейся реализацией полученной в результате формулы, и минимизацию разброса длин путей.

Проведены оценки детекторов, построенными методами [1, 2], по двум параметрам: количеству ПЛБ и максимальной длине путей. Для удобства детектор, построенный методом [1], будем называть *детектор1*, а детектор, синтезированный методом, предлагаемым в [2] – *детектор2*. Результаты приведены в таблице.

**Сравнение сложности детекторов и максимальных длин их путей**

$m$	$n$	$k$	Максимальная длина пути		Количество ПЛБ	
			Детектор 2	Детектор 1	Детектор 2	Детектор 1
6	12	4	5	5	31	31
8	16	4	5	7	60	55
3	16	4	4	6	32	32
10	20	4	7	9	82	85
3	20	4	6	8	43	43
3	64	4	8	30	164	164
10	64	4	11	31	471	448
20	64	4	12	31	728	703
32	64	4	12	31	840	811

Из таблицы видим, что при  $n > 3k$  максимальная длина пути детекторов, синтезированных методом, предлагаемом в [2], оказывается меньше, чем максимальная длина пути детекторов, синтезированных методом, предлагаемом в [1]. Количество ПЛБ, используемых при синтезе детектора рассматриваемыми методами, существенно не отличаются.

#### Литература

1. Матросова А.Ю., Никитин К.В. Синтез самотестируемого детектора  $(m,n)$ -кодов на программируемых логических блоках // Вестник Томского государственного университета. Приложение. 2003. № 6. С. 124–136.
2. Буторина Н.Б., Цидендоржиева С.Р. Построение самотестируемого детектора равновесных кодовых слов // 7 российская конференция с международным участием «Новые информационные технологии в исследовании сложных структур». Томск : ТГУ, 2008. С. 44–44.

## ОБНАРУЖЕНИЕ РОБАСТНО ТЕСТИРУЕМЫХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЗАДЕРЖЕК ПУТЕЙ\*

А.Ю. Матросова, В.В. Андреева

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия  
mau11@yandex.ru, avv.21@mail.ru

В схемах высокого уровня интеграции недостаточно тестировать одиночные константные неисправности на полюсах логических элементов схем, необходимо также тестировать неисправности задержек их путей (path

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00218).

delay faults (PDF)). Такие неисправности обнаруживаются парами тестовых наборов ( $v_1, v_2$ ). Среди неисправно-неисправностей задержек путей выделяют робастно и не робастно тестируемые неисправности. Неисправность задержки пути (PDF) является робастно тестируемой, если существует пара тестовых наборов, на которой она обнаруживается независимо от наличия или отсутствия задержек других путей схемы. Неисправность задержки пути является не робастно тестируемой, если она может быть обнаружена на подходящей тестовой паре только в отсутствие задержек других путей. Обнаружение робастно тестируемых неисправностей позволяет однозначно определить путь в схеме, на котором эта неисправность проявляется. Выделение неисправных путей может быть использовано для коррекции схемы с целью устранения выявленных задержек. Устранение задержек дает возможность повысить быстродействие схемы. В работе [1] на основе анализа эквивалентной нормальной формы (ЭНФ) сформулированы требования к паре ( $v_1, v_2$ ) тестовых наборов для робастно тестируемых неисправностей задержек путей, позволяющие строить эти наборы. Однако ЭНФ – громоздкая формула даже для простых логических схем. В работе [2] предлагаются методы построения наборов  $v_2$  тестовых пар на основе анализа И, ИЛИ-деревьев, представляющих более компактно ЭНФ, и использования Structural Synthesized Binary Decision Diagrams (SSBDD-графов). Тем не менее, для реальных схем эти деревья и графы по-прежнему остаются громоздкими, а использование композиций этих деревьев и графов существенно усложняет алгоритмы поиска тестовых пар.

В данной работе предлагается новый подход к поиску тестовых пар ( $v_1, v_2$ ) для робастно тестируемых неисправностей задержек путей (в дальнейшем будем называть их робастно тестируемыми PDF). Он основан на использовании операций над ROBDD (Reduced Ordered Binary Decision Diagram) – графами. Операции над такими графами характеризуются полиномиальной сложностью. Они выполняются над ROBDD-графами, построенными для фрагментов комбинационных схем (фрагментов комбинационных составляющих последовательностных схем). Сначала находится функция, задающая булеву разность для рассматриваемого пути, компактно представляемая ROBDD-графом  $R(D_{path})$ .  $R(D_{path})$  получается перемножением ROBDD-графов, задающих наблюдаемости для подсхем, порожденных рассматриваемым путем. В этом графе содержатся тестовые наборы  $v_2$  для обоих (противоположных) перепадов значений сигналов пути. Противоположные перепады в англоязычной литературе называют rising transition и falling transition. Предлагается отделить наборы противоположных перепадов друг от друга и компактно представить их соответствующими ROBDD-графами  $R_{rise}$  и  $R_{fall}$ , соответственно.

Перемножив графы  $R_{rise}, R_{fall}$ , получаем компактное представление всех тестовых пар для робастно тестируемых неисправностей задержек данного пути (двух неисправностей, по одной для каждого из противоположных перепадов значений сигналов) в виде ROBDD  $R_{rob}$ . Путь от корня до его 1-концевой вершины представляет множество тестовых пар. Речь идет о соседних векторах в каждой тестовой паре, причем последовательность векторов  $v_1, v_2, v_1$  дает возможность тестировать оба перепада значений сигналов один за другим. Путь от корня до его 1-концевой вершины представляет множество тестовых пар. Векторы пары являются соседними по переменной, отмечающей начало пути в схеме.

В работе [1] показано, что если путь робастно тестируемый, то для него существует тестовая пара, образованная из соседних наборов.

Не всегда оба из перепадов значений сигналов пути робастно тестируемые. Тестовые наборы для робастно тестируемой неисправности задержки пути, обнаружимой только для rising transition этого пути, представляются графом  $R_{rise\ rob}$ , получаемым перемножением инверсии ROBDD  $R_{rob}$  и ROBDD  $R_{rise}$ . Тестовые наборы для робастно тестируемой неисправности задержки пути, обнаружимой только для falling transition этого пути, представляются графом  $R_{fall\ rob}$ , получаемым перемножением инверсии ROBDD  $R_{rob}$  и ROBDD  $R_{fall}$ .

#### Литература

1. Матросова А.Ю., Липский В.Б. Свойства пар тестовых наборов, обнаруживающих неисправности задержек путей в логических схемах VLSI высокой производительности // Автоматика и телемеханика. 2015. № 4. С. 135–148.
2. Матросова А.Ю., Останин С.А., Сингх В. Обнаружение несущественных путей логических схем на основе совместного анализа и/или деревьев и SSBDD-графов // Автоматика и телемеханика. 2013. № 9. С. 126–142.

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАЗЛИЧНЫХ СТРАТЕГИЙ ЗАМЕЩЕНИЯ СТРАНИЦ В ОПЕРАТИВНОЙ ПАМЯТИ

*В.М. Винарский, О.Д. Костюкова, А.А. Романов*

Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова НИУ ВШЭ, Москва, Россия  
 vmvinarskiy@edu.hse.ru

С каждым годом растёт вычислительная мощность электронных устройств, сложность задач, возлагаемых на них, увеличивается, а их количество уже давно перевалило за десятки миллиардов. В настоящее время почти у каждого в кармане есть устройство способное хранить и обрабатывать информацию, зачастую это смартфоны и различная носимая электроника. В их памяти храниться различная информация, необходимая