

УДК 621.382

П.Н. Бибило, И.П. Логинова

Выбор энергоемких тестовых наборов для обеспечения режима повышенного энергопотребления комбинационных КМОП-схем

Рассмотрена задача формирования энергоемких тестов для комбинационных КМОП-схем по результатам моделирования их энергопотребления на различных видах тестовых последовательностей. Описаны соответствующие эксперименты. Для схем со многими входами целесообразно формировать тестовые пары псевдослучайных векторов с возможно большим расстоянием по Хэммингу.

Розглянуто задачу формування енергомістких тестів для комбінаційних КМОП-схем за результатами моделювання їх енергоспоживання на різних видах тестових послідовностей. Описано відповідні експерименти. Для схем з багатьма входами доцільно формувати тестові пари псевдовипадкових векторів з можливо великою відстанню за Хеммінгом.

Введение. Один из аспектов в проблеме сокращения энергопотребления логических КМОП-схем – получение оценок для режима повышенного энергопотребления схемы [1]. Приближенные оценки энергопотребления можно получить путем моделирования структурных описаний на языке *VHDL* в системах логического моделирования [2]. Более точные оценки энергопотребления получают, используя системы аналогового моделирования [1]. В обоих видах моделирования для каждой пары тестовых наборов, подаваемых на вход схемы, в результате получают некоторое значение энергопотребления, представляющее общее (динамическое и статическое) потребление, возникающее переключением транзисторов в логических КМОП-элементах схемы. Нахождение ограниченной последовательности тестовых векторов, обеспечивающей режим повышенного энергопотребления комбинационной логической схемы, можно реализовать тремя способами.

Первый способ – провести логическое моделирование схемы на достаточно большом наборе тестовых векторов, генерируемых случайным образом. Затем провести выбор из исходной *большой* тестовой последовательности некоторых наборов, на которых потребление схемы будет повышенным. Как показали вы-

числительные эксперименты, в результате выбора 10 процентов наиболее энергоемких тестовых векторов, режим энергопотребления увеличивается примерно на 50–70 процентов. Такой путь дает достаточно эффективные результаты в контексте формирования энергоемких тестов, но требует:

- проведения начального моделирования на достаточно длинных последовательностях наборов тестовых векторов;
- нахождения энергоемких пар тестовых векторов;
- повторного моделирования.

Второй способ заключается в формировании требуемой *энергоемкой* тестовой последовательности путем учета определенных свойств тестовых векторов безотносительно схемы и без выполнения начального моделирования.

Третий способ основан на формировании тестовой последовательности с учетом структуры логической схемы, требует индивидуального подхода к каждой схеме и может применяться только в очень ответственных случаях.

В данной статье рассматриваются результаты экспериментов по реализации первого способа на трех видах исходных тестовых векторов: случайных тестах; наборах из таблиц истинности; на множестве всех различных упорядоченных пар тестовых векторов. В рамках

второго способа генерировались пары взаимно инверсных случайных векторов.

Результаты экспериментов показывают, что для рассматриваемых комбинационных КМОП-схем вид исходных тестов влияет на результирующие (обеспечивающие повышенное энергопотребление) тесты. Кроме того, установлено, что использование исходных пар тестовых векторов, характеризующихся большим расстоянием по Хэммингу, позволяет получать повышенное энергопотребление без проведения начального моделирования и отбора лучших входных тестовых пар, как это делается в первом способе.

Задача выбора энергоемких пар тестовых наборов

Пусть задана комбинационная логическая схема R , имеющая n входов x_1, x_2, \dots, x_n . Булево пространство V^x над переменными вектора $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ содержит 2^n двоичных наборов x_i^* . Каждому двоичному набору $x_i^* \in V^x$ поставим в соответствие число i , равное десятичному эквиваленту этого набора. Если при моделировании схемы R входной набор i сменяется входным набором j , то упорядоченной паре $\langle i, j \rangle$ соответствует некоторое число $E_{i,j}$, выражающее энергопотребление, например, значение потребляемого схемой тока. Будем считать, что значения всех переменных входного набора подаются одновременно в очередном такте работы схемы. Сформулируем формальную постановку задачи нахождения теста T заданной длины, обеспечивающего максимальное суммарное энергопотребление, при условии, что при моделировании оценены все возможные упорядоченные пары входных тестовых наборов [3].

Пусть задано множество V чисел: $V = \{0, 1, 2, \dots, 2^n - 1\}$. Рассмотрим множество L всех $2^n(2^n - 1)$ упорядоченных пар $\langle i, j \rangle$, составленных из элементов множества V . Каждой паре $\langle i, j \rangle$ соответствует неотрицательное целое число $E_{i,j}$ – вес пары $\langle i, j \rangle$. Каждой упорядоченной последовательности P

$$P = \langle i_1, i_2, i_3, i_4, \dots, i_{k-2}, i_{k-1}, i_k \rangle \quad (1)$$

элементов (не обязательно различных) множества V соответствует множество

$$\langle i_1, i_2 \rangle, \langle i_2, i_3 \rangle, \langle i_3, i_4 \rangle, \dots, \dots, \langle i_{k-2}, i_{k-1} \rangle, \langle i_{k-1}, i_k \rangle \quad (2)$$

упорядоченных пар, составленных из соседних элементов последовательности (1). Правильной k -последовательностью назовем такую упорядоченную последовательность (1), что все упорядоченные пары вида (2) – различные. Отметим, что для $P = \langle i_q, i_{q+1}, i_q \rangle$ получаем две различные упорядоченные пары $\langle i_q, i_{q+1} \rangle, \langle i_{q+1}, i_q \rangle$. Такие последовательности определяют пиковое энергопотребление для двух тактов.

Задача нахождения теста T имеет следующую формальную постановку.

Задача 1. Для заданного числа k требуется составить из элементов множества L правильную k -последовательность P с максимальной суммой весов

$$E = \sum_{q=2}^{k-1} (E_{i_{q-1}, i_q} + E_{i_q, i_{q+1}}). \quad (3)$$

Для точного решения задачи требуется провести моделирование для каждой пары тестовых векторов из множества L и получить все значения $E_{i,j}$, после чего можно приступить к решению задачи 1 выбора энергоемких пар наборов. Однако все значения $E_{i,j}$ могут быть получены лишь для схем с небольшим числом n входов, так как число всех пар тестовых векторов составляет $2^n(2^n - 1)$ и с ростом числа n экспоненциально возрастает. Поэтому чаще всего исходное моделирование выполняется на 2^n тестовых наборах из таблицы истинности либо применяется генерация ограниченного числа псевдослучайных наборов для начального теста.

Если каждому элементу множества V поставить в соответствие вершину полного ориентированного графа G , то задача может быть переформулирована в графовой постановке: в полном ориентированном графе G , дуги кото-

рого взвешены неотрицательными целыми числами $E_{i,j}$, требуется найти простую цепь M , состоящую из $k - 1$ дуг и имеющую максимальную сумму E весов $E_{i,j}$ входящих в нее (т.е. в цепь) дуг. Данная задача и алгоритмы ее решения хорошо известны в теории графов [4].

Для решения задачи 1 предложен жадный алгоритм, который программно реализован: для каждой вершины графа G находится одна ориентированная цепь, состоящая из $k - 1$ дуг и имеющая максимальный суммарный вес. Весом цепи есть сумма весов входящих в цепь дуг. Формирование цепи тоже осуществляется жадным алгоритмом, каждый раз в цепь добавляется дуга, имеющая максимальный вес. Если граф неполный, то алгоритм позволяет получить пары вершин (векторов) с максимальными значениями $E_{i,j}$.

Начальные тестовые последовательности

В качестве начальных использованы четыре вида (Т1, Т2, Т3, Т4) тестов:

Т1 – тестовые наборы с равновероятными значениями нулей и единиц, т.е. на любом входе логической схемы для любого входного набора вероятность появления единицы (нуля) равна 0,5 (псевдослучайные наборы);

Т2 – тестовые наборы, состоящие из упорядоченной по возрастанию десятичного эквивалента последовательности из 2^n всех наборов булева пространства размерности n (левая часть табл. 2 истинности системы полностью определенных булевых функций);

Т3 – специальная последовательность тестовых наборов [5], задающая (без повторений) все упорядоченные пары входных наборов из булева пространства размерности n ;

Т4 – псевдослучайные пары взаимно инверсных наборов. Пусть первый элемент пары $\langle i_q, i_{q+1} \rangle$ определяет псевдослучайный входной набор i_q с равновероятными значениями нулей и единиц. Тогда второй элемент пары $\langle i_{q+1} \rangle$ определяется инверсией вектора i_q , при этом расстояние по Хэммингу между векторами пары будет максимальным и равным

числу n . Все последующие пары тестовых векторов формируется аналогичным образом.

Эксперимент

Проведенный эксперимент состоял из выполнения *пяти этапов* и заключался в схемной реализации систем F дизъюнктивных нормальных форм (ДНФ) булевых функций логическими схемами из библиотечных логических элементов, оценке потактового энергопотребления схем на исходных и сформированных энергоемких тестах и подсчете характеристик среднего энергопотребления.

Перечислим этапы эксперимента по получению и оценке энергоемких тестов.

Этап 1. Синтез комбинационных схем по VHDL-представлениям систем булевых функций и получение структурных VHDL-описаний схем.

Этап 2. Построение начальных тестов (входных наборов) длины $K_{вх}$ четырех (Т1, Т2, Т3, ЭТ4) видов тестов.

Этап 3. Оценка потактового энергопотребления посредством начального моделирования полученных структурных VHDL-описаний комбинационных схем с помощью подхода [2]. В качестве системы моделирования использовалась система *ModelSim* [6], в качестве тестов при начальном моделировании использовались тесты Т1, Т2, Т3. Подсчитывалось среднее значение S_{cp}^{Ti} энергопотребления каждой схемы на выполняемом тесте Ti ($i = 1, 2, 3$).

Этап 4. Выполнение программы выбора энергоемких тестовых наборов для каждого из начальных тестов и получение энергоемких тестов ЭТ1, ЭТ2, ЭТ3 длины K_{res} .

Этап 5. Повторное моделирование схем на энергоемких тестах ЭТ1, ЭТ2, ЭТ3 (и на начальном тесте ЭТ4), получение средних значений энергопотребления.

Этапы 3, 4, 5 эксперимента показаны на рис. 1, при этом предполагается, что по начальному тесту Ti путем отбора наборов строится энергоемкий тест ЭТ i . Для тестов вида ЭТ4 начальное моделирование не проводилось, т.е. для теста ЭТ4 выполнялось сразу повторное моделирование.

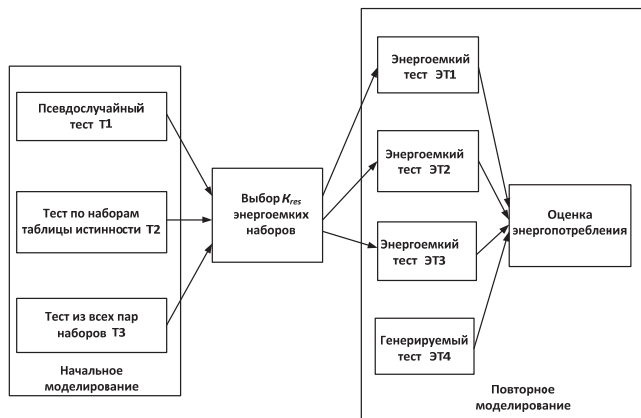


Рис. 1. Организация моделирования схем для оценки энергопотребления

Исходные данные в эксперименте – 17 примеров систем ДНФ полностью определенных булевых функций из набора примеров [7]. Пример *mult* – это четырехразрядный умножитель, синтез схемы которого осуществлялся по его функциональному VHDL-описанию. В качестве промышленной системы синтеза логических схем во всех экспериментах использовался синтезатор *LeonardoSpectrum* (версия 2010a.7). В качестве целевой библиотеки синтеза использовалась отечественная библиотека [8] проектирования заказных цифровых КМОП сверхбольших интегральных схем (СБИС). В качестве числа k задавалось число K_{res} , равное примерно одной десятой от общего числа наборов

Таблица 1

Имя схемы	Z	n	Псевдослучайные наборы				Псевдослучайные пары взаимноинверсных наборов, тест ЭТ4		
			Моделирование начальное, тест Т1		Моделирование повторное, тест ЭТ1 (100%)		K_{res}	$S_{cp}^{ЭТ4}$	α_4 %
			$K_{исх}$	$S_{cp}^{Т1}$	K_{res}	$S_{cp}^{ЭТ1}$			
<i>b12</i>	19826	15	512	9,18e-8	54	1,33e-7	54	1,30e-7	97,7
<i>C1355</i>	96065	41	4096	2,24e-7	412	2,24e-7	412	1,52e-7	67,9
<i>СНТ</i>	47770	47	4096	7,64e-8	412	1,39E-7	412	1,03e-7	74,1
<i>FRG2</i>	299501	143	4096	1,18e-6	412	1,60e-6	412	1,62e-6	101,3
<i>I8</i>	205684	133	4096	4,29e-7	412	9,26e-7	412	6,01e-7	64,9
<i>C1908</i>	92522	33	4096	2,21e-7	412	3,13e-7	412	2,69e-7	85,9
<i>C432</i>	43357	36	4096	2,01e-7	412	3,02e-7	412	2,55e-7	84,4
<i>FRG1</i>	40154	28	4096	2,12e-7	412	3,25e-7	412	2,88e-7	88,6
<i>C880</i>	25808	60	4096	8,69e-8	412	1,26e-7	412	1,20e-7	95,2
<i>I3</i>	30545	132	4096	2,35e-11	412	2,82e-11	412	2,72e-11	96,4
<i>I9</i>	32236	88	512	1,11e-7	54	1,95e-7	54	1,66e-7	85,1
<i>DALU</i>	124071	75	1024	4,98e-7	104	7,22e-7	104	7,52e-7	104,2
<i>CM42A</i>	1830	4	64	1,16e-8	8	2,01e-8	8	2,01e-8	100,0
<i>CM82A</i>	3437	5	128	2,22e-8	14	3,67e-8	14	2,92e-8	79,6
<i>CM138A</i>	1099	6	2048	3,25e-13	206	5,76E-13	206	3,32e-13	57,6
<i>CM162A</i>	6283	14	2048	3,04e-8	206	4,83e-8	206	3,95e-8	81,8
<i>INTB</i>	444709	15	1024	1,31e-6	104	1,61e-6	104	1,67e-6	105,0

при начальном моделировании. Например, для первой строки табл. 1 (пример *b12*) $K_{исх} = 512$, $K_{res} = 54$.

Результаты эксперимента представлены в табл. 1 – 3, где

Z – площадь кристалла, требующаяся для размещения элементов схемы;

n – число входов схемы;

Ti – тип теста при начальном моделировании, $ЭTi$ – соответствующий энергоемкий тест для повторного моделирования, $i = 1, 2, 3, 4$;

$K_{исх}$ – число наборов начального теста;

K_{res} – число наборов результирующего (энергоемкого) теста.

S_{cp}^{T1} – среднее потребление на начальном тесте Т1. Аналогичный смысл имеют обозначения S_{cp}^{T2} , S_{cp}^{T3} , S_{cp}^{T4} ;

$S_{cp}^{ЭT1}$ – среднее потребление на энергоемком тесте ЭТ1, полученном из начального теста Т1 отбором энергоемких пар. Аналогичный смысл имеют обозначения $S_{cp}^{ЭT2}$, $S_{cp}^{ЭT3}$, $S_{cp}^{ЭT4}$;

Коэффициенты $\alpha_2 = (S_{cp}^{ЭT2} / S_{cp}^{ЭT1}) 100\%$; $\alpha_3 = (S_{cp}^{ЭT3} / S_{cp}^{ЭT1}) 100\%$; $\alpha_4 = (S_{cp}^{ЭT4} / S_{cp}^{ЭT1}) 100\%$ в каждой из таблиц 1 - 3 задают отношение (в процентах) среднего энергопотребления, полу-

ченного по тестам ЭТ2, ЭТ3, ЭТ4, к среднему значению $S_{\text{cp}}^{\text{ЭТ1}}$ энергопотребления, полученного базовым подходом. *Базовым подходом* назовем выбор энергоемких тестов из псевдослучайной последовательности тестовых векторов.

В табл. 1 приведены результаты сравнения базового подхода с подходом генерации теста ЭТ4 без начального моделирования. Результаты сравнения показывают, что выбор пар взаимно инверсных тестовых векторов (использование теста ЭТ4) позволяет получить близкие результаты к базовому подходу, но в целом проигрывает в большинстве случаев. Тесты типа ЭТ4 только в четырех случаях (*FRG2*, *DALU*, *CM42A*, *INTB*) из 17 позволяют получить лучший (не худший) результат в сравнении с энергоемкими тестами, полученными из теста Т1. На рис. 2 показана зависимость энергопотребления $S_{\text{cp}}^{\text{Т1}}$ от суммарной площади Z всех элементов схемы, по сути, от суммарного числа транзисторов, из которых состоят элементы схемы. Данная зависимость может быть полезной для быстрой (и весьма грубой) оценки энергопотребления синтезируемых комбинационных логических схем по параметру площади без выполнения моделирования их энергопотребления. Схема *I3* на графике (рис. 2) не представлена, так как имеет большое число ($n = 132$) входов, но малое энергопотребление из-за вырожденности функционального описания.

В табл. 2 приведены результаты выбора энергоемкого теста из наборов таблицы истинности. Для задач небольшой размерности ($n \leq 11$) преимущество имеет выбор из псевдослучайной последовательности. Однако, если длина начальной псевдослучайной последовательности намного меньше числа 2^n , то выбор из *большого* множества пар таблицы истинности дает лучшие результаты – в табл. 2 для схем *CM162A* *INTB*, *b12* лучший энергоемкий тест получен по таблице истинности. Например, для схемы *b12*, выбор 54 энергоемких наборов осуществлялся из псевдослучайных наборов (исходный тест состоял из 512 наборов), а чис-

ло всех наборов по таблице истинности равно $2^n = 32768$, поэтому выбор энергоемких пар из таблицы истинности позволил для схемы *b12* получить лучший результат.

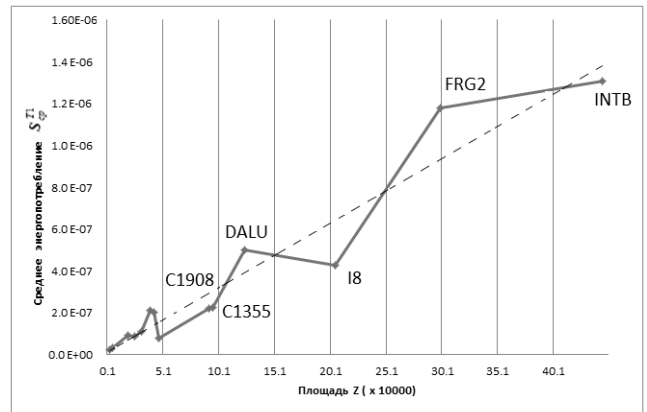


Рис. 2. Зависимость энергопотребления от площади схемы

Выбор энергоемкого теста из множества всех пар дает наилучшие результаты, однако, как уже говорилось, это возможно для схем с небольшим числом входных переменных (табл. 3).

Заключение Число входных переменных комбинационной схемы – решающий фактор при выборе теста для оценки ее энергопотребления. При небольшом числе входов ($n \leq 10$) схемы могут быть рассмотрены все пары тестовых наборов и определено пиковое и среднее энергопотребление. Для комбинационных схем с числом входов $n > 10$ целесообразно генерировать псевдослучайные взаимно инверсные пары, отбирать энергоемкие пары и отсортировать их, стремясь увеличить расстояние по Хэммингу между соседними элементами найденных энергоемких пар теста.

Принятая в инженерной практике методика моделирования комбинационных схем по таблицам истинности позволяет проверить правильность функционирования схем, однако получаемые оценки энергопотребления – неточны, так как при таком моделировании выпадают из рассмотрения многие пары тестовых наборов. Полученные в данной статье экспериментальные результаты по выбору тестов для оценки энергопотребления используются в системе проектирования [9].

Таблица 2

Имя схемы	n	Таблицы истинности					Псевдослучайные наборы				
		Моделирование начальное, тест T2		Моделирование повторное, тест ЭТ2			Моделирование Начальное, тест T1		Моделирование повторное, тест ЭТ1 (100%)		
		$K_{исх}$	S_{cp}^{T2}	K_{res}	$S_{cp}^{ЭТ2}$	α_2 %	$K_{исх}$	S_{cp}^{T1}	K_{res}	$S_{cp}^{ЭТ1}$	
CM42A	4	16	3,75e-9	8	4,01e-9	19,9	64	1,16e-8	8	2,01e-8	
CM82A	5	32	1,04e-8	14	3,24e-8	88,2	128	2,22e-8	14	3,67e-8	
CM138A	6	64	1,94e-13	32	1,65e-13	28,6	2048	3,25e-13	32	5,76e-13	
mult	8	256	3,48e-8	104	1,03e-7	82,4	1024	7,63e-8	104	1,25e-7	
Life	9	512	4,34e-8	54	1,36e-7	86,6	512	7,36e-8	54	1,57e-7	
CM85A	11	2048	3,55e-9	206	3,16e-8	77,6	2048	1,15e-7	206	4,07e-8	
CM162A	14	16384	9,94e-9	206	4,83e-8	129,1	2048	2,09e-8	206	3,74e-8	
INTB	15	32768	1,37e-7	104	1,84e-6	115,7	1024	1,31e-6	104	1,59e-6	
b12	15	32768	7,47e-9	54	1,40e-7	105,2	512	1,31e-6	54	1,33e-7	

Таблица 3

Имя схемы	n	Таблицы истинности					Все пары наборов					Псевдослучайные наборы			
		Моделирование начальное, тест T2		Моделирование повторное, тест ЭТ2			Моделирование начальное, тест T3		Моделирование повторное, тест ЭТ3			Моделирование начальное, тест T1		Моделирование повторное, тест ЭТ1 (100%)	
		$K_{исх}$	S_{cp}^{T2}	K_{res}	$S_{cp}^{ЭТ2}$	α_2 %	$K_{исх}$	S_{cp}^{T3}	K_{res}	$S_{cp}^{ЭТ3}$	α_3 %	$K_{исх}$	S_{cp}^{T1}	K_{res}	$S_{cp}^{ЭТ1}$
CM42A	4	16	3,75e-9	8	4,01e-9	19,9	241	1,50e-8	8	2,41e-8	119,9	64	1,16e-8	8	2,01e-8
CM82A	5	32	1,04e-8	14	3,24e-8	88,3	993	2,18e-8	14	3,89e-8	105,9	128	2,22e-8	14	3,67e-8
CM138A	6	64	1,94e-13	32	1,65e-13	28,6	4033	3,40e-13	32	1,26e-12	218,7	2048	3,25e-13	32	5,76e-13
mult	8	256	3,48e-8	104	1,03e-7	82,4	65281	7,44e-8	104	1,76e-7	140,8	1024	7,63e-8	104	1,25e-7
Life	9	512	4,34e-8	54	1,36e-7	86,6	261633	1,16e-7	54	1,91e-7	121,6	256	1,18e-7	54	1,57e-7

1. Рабаи Ж.М., Чандракасан А., Николитч Б. Цифровые интегральные схемы, 2-е издание. – М.: Вильямс, 2007. – 912 с.
2. Бибило П.Н., Соловьев А.Л. Оценка энергопотребления комбинационных КМОП-схем на основе логического моделирования с учетом временных задержек элементов // УСиМ. - 2014. - № 6. – С. 34–41.
3. Бибило П.Н. Нахождение теста для режима максимального энергопотребления комбинационной логической схемы. // Там же. – 2010. – № 5. – С. 39–45.
4. Харари Ф. Теория графов. – М.: Мир, 1973. – 300 с.
5. Закревский А.Д. Минимизация перебора ориентированных пар. Танаевские чтения // Доклады Четвертой международной научной конференции (29 марта 2010 г., Минск). – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2010. – С. 58–62.
6. Лохов А. Функциональная верификация СБИС в свете решений Mentor Graphics // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2004. - № 1. - С. 58–62.
7. <http://www1.cs.columbia.edu/~cs6861/sis/espresso-examples/ex/>
8. Бибило П.Н., Кириенко Н.А. Оценка энергопотребления логических КМОП-схем по их переключательной активности // Микроэлектроника. – 2012. – № 1 – С. 65–77.
9. Автоматизация логического синтеза КМОП схем с пониженным энергопотреблением / П.Н. Бибило, Л.Д. Черемисинова, С.Н. Кардаш и др. // Программная инженерия. – 2013. – № 8. – С. 35–41.

Поступила 09.04.2015
Тел. для справок: +375 17 284-2084, 284-2076 (Минск)
E-mail: bibilo@newman.bas-net.by
© П.Н. Бибило, И.П. Логинова, 2016

UDC 621.382

P.N. Bibilo, I.P. Loginova

The Energy-Intensive Testing Sets Selection for Realization of the Increased Power Consumption Mode of the Combinational CMOS Circuits

One of the problem of decreasing the energy consumption of the logic CMOS circuits is the obtaining estimates for the energy-intensive mode of a circuit. The approximate evaluations of the power consumption can be obtained by simulation of the structural descriptions in VHDL language in logical simulation systems. More accurate estimates for energy consumption can be received by using analog simulation systems. In both kinds of modeling for each pair testing sets applied to the input of the circuit, the result of modeling is the same value of power consumption presenting both the dynamic and static consumption, which occurs when transis-

tor of logic CMOS elements of circuit are switched. The determination of the finite sequence of testing vectors, which provides the mode of the increased power consumption of the combinational CMOS circuit, can be implemented in three ways. The first method is to carry out logical simulation on a sufficiently large set of randomly generated testing vectors and then to select the some sets, on which the power consumption of circuit will be increased, from the original “big” test sequence. The second method is to form the required “energy-intensive” test sequence by taking into account the certain properties of test vectors without performing the initial modeling and irrespective of the circuit. The third method is based on the formation of a test sequence, which takes into account the structure of the logic circuit, requires an individual approach to each scheme and can only be used in very demanding applications.

The problem of the energy-intensive tests formation for combinational CMOS circuits according to the results of their power consumption modeling on various types of test sequences in the first method is considered: on the randomly generated sets of the testing vectors; on the sets of truth tables; on the set of the ordered pairs of different testing vectors. The experiments shows that the the complete set of ordered test vectors pairs allows to get the most energy-intensive tests, but this approach is applicable to the combinational circuits of small (no more than ten) number of input variables. The selection of energy-intensive test vectors was carried out by a program implementing a “greedy” algorithm.

In the second method, the tests which consist of mutually inverse pseudorandom vectors pairs, are generated. The experimental results show that for the considered combinational CMOS circuits, the form of the initial tests influences the received energy-intensive tests. In addition, it is proved that the use of the original pairs of the test vectors, characterized by a large Hamming distance, allows the obtaining high power consumption without an initial modeling and selection of the best test input pairs, as is done in first method.



Вниманию читателей

На сайте usim.irtc.org.ua выставлен архив журнала с 2009 года.

Авторы могут приобрести любой из имеющихся в редакции журналов, оплатив через счет Международного Центра текущую стоимость журнала.

Можно также оформить ретро-подписку через агентство «Укринформнаука»:
(тел. (044) 239-64-57, (044) 239-65-89, e-mail: innovation@nas.gov.ua).

Для продвижения журнала в международный научно-метрических базах, редакция в обязательном порядке должна иметь информацию об авторах статей на англ. языке: ФИО, должность, место работы, степень, звание, контактную информацию.