

П. Н. Бибило, д-р техн. наук, проф., зав. лаб., И. П. Логинова, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси

Формирование энергоемких тестов для комбинационных логических схем по результатам оценки их энергопотребления

Предлагается формализация задачи и алгоритмы нахождения тестовых векторов, которые обеспечивают режим максимального энергопотребления комбинационной логической схемы, синтезированной в базе проектирования заказной КМОП СБИС. Эксперименты показали, что выбор одной десятой части "энергоемких" наборов для комбинационных схем позволяет примерно на 50–70 % повысить энергопотребление схем при повторном моделировании на найденных тестах.

Ключевые слова: комбинационные КМОП-схемы, моделирование, псевдослучайные тестовые векторы, оценка энергопотребления

Введение

Сокращение энергопотребления электронных логических схем является комплексной проблемой и требует решения в различных аспектах [1]. Одним из таких аспектов является оценка энергопотребления схемы в режиме повышенного энергопотребления. Получение логических схем выполняется с помощью синтезаторов [2], которые превращают высокоуровневые описания алгоритмов функционирования схем на языке VHDL (либо Verilog) в структурные описания логических схем. Приближенная оценка энергопотребления логических КМОП-схем осуществляется моделированием таких описаний в системах логического моделирования [3, 4]. Более точная оценка энергопотребления проекта логической схемы выполняется в схемотехнических системах аналогового моделирования. И в том и в другом случае для каждой пары (такта) сменяемых значений входных воздействий проектировщики получают значение энергии, потребляемой схемой в данном такте. Таким образом, начальное моделирование позволяет получить для каждой пары тестовых воздействий (тестовых векторов — двоичных входных наборов) некоторое число, определяющее общее (динамическое и статическое) потребление, возникающее в результате переключений транзисторов, входящих в логические КМОП-элементы схемы.

В данной работе описывается формализация задачи нахождения энергоемкого теста для комбинационных логических КМОП-схем, и предлагаются два алгоритма нахождения заданного числа k тестовых векторов, использование которых при повторном моделировании таких схем обеспечивает режим их возможно большего энергопотребления. Выбор тестовых векторов осуществляется по результатам начального моделирования логической схемы. Результаты начального моделирования представляют собой последовательность двоичных на-

боров, причем для каждой пары соседних наборов (такта срабатывания и энергопотребления схемы) указывается число — потребляемая энергия в данном такте.

Первый алгоритм оперирует на множестве всех возможных пар тестовых векторов и предназначен для схем небольшой размерности, второй алгоритм обрабатывает псевдослучайные последовательности тестовых векторов, и его можно применять для схем произвольной размерности. Приводятся результаты экспериментов по нахождению энергоемких тестов для комбинационных логических схем из библиотечных КМОП-элементов [3].

2. Формализация и решение задачи 1 нахождения теста

Пусть задана комбинационная логическая схема R , имеющая n входов x_1, x_2, \dots, x_n . Булево пространство V^X над переменными вектора $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ содержит 2^n двоичных наборов \mathbf{x}_i^* . Каждому двоичному набору $\mathbf{x}_i^* \in V^X$ 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 $S_{i, j}$, 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 [5].

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 $S_{i,j}$ — вес пары $\langle i, j \rangle$. Каждой упорядоченной последовательности

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

элементов (необязательно различных) множества V соответствует множество

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

упорядоченных пар, составленных из соседних элементов последовательности (1). Правильной k -последовательностью назовем такую упорядоченную последовательность (1), что все упорядоченные пары вида (2) являются различными. Заметим, 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

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

Пример 1. Результаты моделирования энергопотребления логической схемы заданы в табл. 1, где в левой части таблицы заданы наборы из множества L , в правой части — веса $S_{i,j}$, соответствующие упорядоченным парам. На практике в качестве весов обычно используют вещественные числа, получаемые программы схемотехнического моделирования. Далее в примерах для удобства будем использовать в качестве весов целые числа. Например, для первой пары $\langle 111, 101 \rangle = \langle 7, 5 \rangle$ вес $S_{7,5} = 44$, для последней пары $\langle 110, 111 \rangle = \langle 6, 7 \rangle$ вес $S_{6,7} = 14$. Среднее потребление (средний вес) на всех возможных парах наборов составляет $S_{\text{ср}} = 53,21$ (см. табл. 1).

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 которого взвешены неотрицательными целыми числами, требуется найти простую цепь M , состоящую из $k - 1$ дуг и имеющую максимальную сумму S весов, входящих в нее (т. е. в цепь) дуг. Данная задача и алгоритмы ее решения хорошо известны в теории графов [6].

Табл. 1 может быть интерпретирована как задание весов дуг полного ориентированного графа G и переписана в виде табл. 2: элемент $\langle i, j \rangle$ (строка i , столбец j) матрицы смежности полного ориентированного графа G задает вес $S_{i,j}$ дуги, исходящей из вершины i и заходящей в вершину j . Заметим, что в данном примере $S_{i,j} = S_{j,i}$, а значения весов получены в результате подсчета числа переключе-

Таблица 1

Входные наборы (тест)	Потребляемая энергия (по тактам) $S_{i,j}$
111	0
101	44
111	44
100	62
111	62
011	72
111	72
010	88
111	88
001	72
111	72
000	82
111	82
110	14
100	52
110	52
011	86
110	86
010	78
110	78
001	82
110	82
000	72
110	72
101	58
011	36
101	36
010	60
101	60

Окончание табл. 1

Входные наборы (тест)	Потребляемая энергия (по тактам) $S_{i,j}$
001	56
101	56
000	70
101	70
100	26
010	34
100	34
001	62
100	62
000	44
100	44
011	62
001	32
011	32
000	46
011	46
010	28
000	18
010	18
001	36
000	18
001	18
010	36
011	28
100	62
101	26
110	58
111	14
$S_{\text{ср}}$	53.21

Таблица 2

i	j							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0		18	18	48	44	70	72	82
1	18		36	32	62	56	82	72
2	18	36		28	34	60	78	88
3	46	32	28		62	36	86	72
4	44	62	34	62		26	52	62
5	70	56	60	36	26		58	44
6	72	82	78	86	52	58		14
7	82	72	88	72	62	44	14	

ний транзисторов в каждом такте моделирования энергопотребления комбинационной логической схемы, имеющей три входа.

Алгоритм 1 решения задачи 1 является "жадным".

Для каждой вершины графа G находится одна ориентированная цепь, состоящая из $k - 1$ дуг и имеющая максимальный суммарный вес. Весом цепи является сумма весов входящих в цепь дуг. Формирование цепи тоже осуществляется "жадным" алгоритмом, каждый раз в цепь добавляется дуга, имеющая максимальный вес.

В рассматриваемом примере полного графа для $k = 7$ найдена цепь из шести дуг (упорядоченных пар)

$$\langle 1,6 \rangle \rightarrow \langle 6,3 \rangle \rightarrow \langle 3,6 \rangle \rightarrow \langle 6,2 \rangle \rightarrow \langle 2,7 \rangle \rightarrow \langle 7,2 \rangle,$$

со следующими весами дуг: $S_{1,6} = 82$, $S_{6,3} = 86$, $S_{3,6} = 86$, $S_{6,2} = 78$, $S_{2,7} = 88$, $S_{7,2} = 88$. Вес найденной цепи равен

$$S_{1,6} + S_{6,3} + S_{3,6} + S_{6,2} + S_{2,7} + S_{7,2} = 82 + 86 + 86 + 78 + 88 + 88 = 508.$$

Таким образом, найденный энергоемкий тест, состоящий из семи наборов, имеет следующий вид:

001
110
011
110
010
111
010.

Среднее потребление энергии на полученном энергоемком тесте составляет: $S_{\text{ср}}^{\text{алг 1}} = 508:6 = 84,6$ (условных единиц потребляемой энергии), что значительно больше, чем среднее энергопотребление $S_{\text{ср}} = 53,21$ при начальном моделировании.

Если начальное моделирование проведено не на всех парах входных наборов, то граф G не является полным. Например, для табл. 3 (пример 2), задающей результаты моделирования на тесте из 32 входных наборов, соответствующий граф представлен на рис. 1. В результате применения алгоритма 1 для $k = 7$ найдена цепь (рис. 2) из шести дуг (упорядоченных пар):

$$\langle 5,0 \rangle \rightarrow \langle 0,7 \rangle \rightarrow \langle 7,2 \rangle \rightarrow \langle 2,6 \rangle \rightarrow \langle 6,3 \rangle \rightarrow \langle 3,4 \rangle,$$

со следующими весами дуг: $S_{5,0} = 70$, $S_{0,7} = 82$, $S_{7,2} = 88$, $S_{2,6} = 78$, $S_{6,3} = 86$, $S_{3,4} = 62$.

Вес найденной цепи равен

$$S_{5,0} + S_{0,7} + S_{7,2} + S_{2,6} + S_{6,3} + S_{3,4} = 70 + 82 + 88 + 78 + 86 + 62 = 466.$$

Таким образом, найденный энергоемкий тест, состоящий из семи наборов, имеет следующий вид:

101
000
111
010
110
011
100.

Среднее потребление энергии на полученном энергоемком тесте составляет: $S_{\text{ср}}^{\text{алг 1}} = 466:6 = 77,6$ (условных единиц потребляемой энергии).

Заметим, что алгоритм 1 для данного примера находит в графе G цепь заданной длины, однако при достаточно больших значениях числа входных переменных логической схемы и последовательности псевдослучайных тестовых наборов такая цепь, как правило, алгоритмом 1 не находится. Заметим, что граф G является цепью, если тестовые наборы не повторяются.

Таблица 3

Окончание табл. 3

Входные наборы (тест)	Потребляемая энергия (по тактам) $S_{i,j}$	Входные наборы (тест)	Потребляемая энергия (по тактам) $S_{i,j}$
101	0	101	36
111	44	101	0
100	62	000	70
111	62	100	44
101	44	000	44
000	70	000	0
001	18	111	82
011	32	110	14
000	46	011	86
001	18	010	28
011	32	000	18
100	62	100	44
110	52	101	26
111	14	010	60
010	88	100	34
110	78		
011	86	$S_{\text{ср}}$	43.56

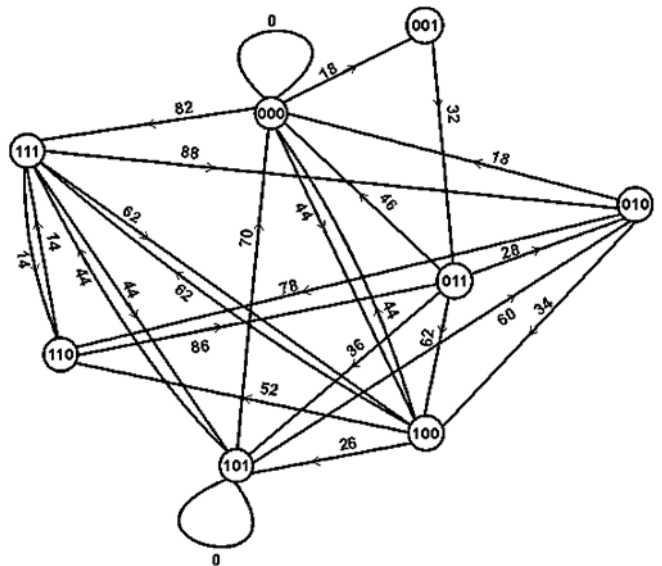


Рис. 1. Ориентированный граф $G(V, L^4)$, соответствующий табл. 3

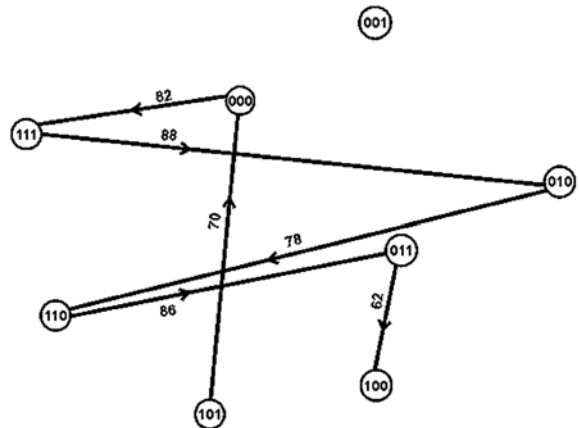


Рис. 2. Ориентированный граф $G(V, L^4)$ с выделенными дугами, соответствующими найденному алгоритмом 2 тесту

3. Формализация и решение задачи 2 нахождения теста

Следующая задача возникает после проведения оценки энергопотребления комбинационной схемы на последовательности псевдослучайных тестовых векторов, в этом случае не для всех упорядоченных пар входных наборов известны их веса, так как некоторые пары входных наборов не были использованы при начальном моделировании.

Задача 2. Задана упорядоченная последовательность из m случайно выбранных наборов из множества V , для каждой пары $\langle i_{q-1}, i_q \rangle$ наборов указан ее вес $S_{q-1, q}$. Требуется найти правильную k -последовательность ($k < m$) P с максимальной суммой весов.

Пусть псевдослучайная последовательность задана в табл. 3, для упорядоченной пары $\langle 010, 111 \rangle$ нет значения веса, поэтому если эта пара войдет в результирующую последовательность (т. е. в решение задачи 2), то только при повторном моделировании будет определен ее вклад в энергопотребление. Так как для некоторых (а на практике очень многих) пар будут отсутствовать веса, то получаемая в результате решения задачи 2 тестовая последовательность обеспечит больший суммарный вес, чем тот, который определяется найденными парами, так как веса некоторых пар будут определены при повторном моделировании. Табл. 3 соответствует табл. 4, задающая веса дуг графа G .

Алгоритм 2 решения задачи 2 тоже является "жадным".

Все дуги графа G упорядочиваются по убыванию веса. Для каждой вершины графа находится ориентированная цепь, которая обязательно содержит первых $k/2$ дуг упорядоченной последовательности и имеющих максимальный вес. Формирование цепи осуществляется "жадным" алгоритмом, каждый раз в цепь добавляется дуга, либо имеющая максимальный вес из $k/2$ упорядоченной последовательности, либо позволяющая увеличить длину цепи, но не включенная в L^q (множество взвешенных дуг). Весом цепи является сумма весов входящих в цепь дуг, за исключением тех дуг, веса которых не были определены при начальном моделировании.

В результате применения алгоритма 2 для $k = 7$ найдена цепь из шести дуг (упорядоченных пар) следующего вида:

$$\langle 4,7 \rangle \rightarrow \langle 7, 2 \rangle \rightarrow \langle 2, 6 \rangle \rightarrow \langle 6,3 \rangle \rightarrow \langle 3, 0 \rangle \rightarrow \langle 0, 7 \rangle,$$

со следующими весами дуг: $S_{4,7} = 62$, $S_{7,2} = 88$, $S_{2,6} = 78$, $S_{6,3} = 86$, $S_{3,0} = 46$, $S_{0,7} = 82$. Вес найденной цепи равен

$$\begin{aligned} S_{4,7} + S_{7,2} + S_{2,6} + S_{6,3} + S_{3,0} + S_{0,7} = \\ = 62 + 88 + 78 + 86 + 46 + 82 = 442. \end{aligned}$$

Таким образом, найденный алгоритмом 2 энергоемкий тест, состоящий из семи наборов, имеет следующий вид:

100
111
010
110
011
000
111.

Среднее потребление энергии на полученном энергоемком тесте составляет: $S_{\text{ср}}^{\text{алг 2}} = 442:6 = 73,6$ (условных единиц потребляемой энергии). Заметим, что среднее потребление на исходном тесте составляет $S_{\text{ср}} = 43,56$ (см. табл. 3). В рассмотренном примере число $n = 3$, и в графе нашлась цепь, состоящая из шести дуг.

Приведем **пример 3** (табл. 5), когда граф G представляет собой цепь, так как все псевдослучайные тестовые наборы являются различными.

Таблица 4

i	j							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0		18	0	0	44	0	0	82
1	0		0	32	0	0	0	0
2	18	0		28	34	0	78	0
3	46	0	28		62	36	0	0
4	44	0	0	0		26	52	62
5	70	0	60	0	0		0	44
6	0	0	0	86	0	0		14
7	0	0	88	0	62	44	14	

Таблица 5

Входные наборы (тест)	Потребляемая энергия (по тактам) $S_{i,j}$
101010101	0
101011011	42
100000010	126
111010100	224
000110110	126
000001010	140
010011100	140
000111101	112
001000110	70
101111101	126
100110010	154
000100011	70
110110000	182
100011111	140
001000111	84
110110010	140
001111111	140
011101101	112
100111001	140
001001110	126
$S_{\text{ср}}$	126

Алгоритм 2 для $k = 7$ нашел следующее решение:

$\langle 101011011, 100000010 \rangle \rightarrow \langle 100000010, 111010100 \rangle \rightarrow$
 $\rightarrow \langle 111010100, 000100011 \rangle \rightarrow \langle 000100011, 110110000 \rangle \rightarrow$
 $\rightarrow \langle 110110000, 101111101 \rangle \rightarrow \langle 101111101, 100110010 \rangle.$

Запишем данное решение в сокращенном виде, используя вместо двоичных наборов их числовые эквиваленты:

$\langle 347, 258 \rangle \rightarrow \langle 258, 468 \rangle \rightarrow \langle 468, 35 \rangle \rightarrow \langle 35, 432 \rangle \rightarrow$
 $\rightarrow \langle 432, 381 \rangle \rightarrow \langle 381, 306 \rangle,$

со следующими весами дуг: $S_{347,258} = 126$, $S_{258,468} = 224$, $S_{468,35} = \text{"-"}$, $S_{35,432} = 182$, $S_{432,381} = \text{"-"}$, $S_{381,306} = 154$. Веса отсутствующих дуг обозначены через "-". Среднее значение потребления до повторного моделирования

$$(S_{347,258} + S_{258,468} + S_{35,432} + S_{381,306}) : 6 = 126 + 224 + 182 + 154 = 686 : 6 = 114,3.$$

В данном примере среднее значение энергопотребления до повторного моделирования меньше, чем 126 — среднее значение на исходном тесте. Однако на практике, как показал эксперимент, часто бывает иначе, а именно: среднее значение энергопотребления до повторного моделирования может быть больше среднего на исходном тесте. При повторном моделировании с найденным энергоемким тестом

101011011
 100000010
 111010100
 000100011
 110110000
 101111101
 100110010

выяснились веса отсутствующих в начальном эксперименте пар наборов: $S_{468,35} = 154$, $S_{432,381} = 154$. Суммарный вес энергоемкого теста равен

$$S_{347,258} + S_{258,468} + S_{468,35} + S_{35,432} + S_{432,381} + S_{381,306} = 126 + 224 + 154 + 182 + 154 + 154 = 994.$$

Среднее значение потребления на энергоемком тесте $S_{\text{ср}}^{\text{алг 2}} = 994 : 6 = 165,7$.

4. Эксперимент

Проведенный эксперимент состоял из выполнения пяти этапов и заключался в схемной реализации систем ДНФ булевых функций F логическими схемами из библиотечных логических элементов, оценке их потактового энергопотребления на исходных и энергоемких тестах. Энергоемкие тесты строили с помощью описанных ранее алгоритмов 1 и 2. Перечислим этапы эксперимента по получению и оценке энергоемких тестов.

Этап 1. Синтез комбинационных схем по VHDL-представлениям систем булевых функций.

Этап 2. Построение начальных тестов длины $K_{\text{исх}}$ (входных наборов) трех типов ($T1$, $T2$, $T3$).

Этап 3. Оценка потактового энергопотребления полученных комбинационных схем с помощью VHDL-моделирования на начальных тестах, получение среднего значения $S_{\text{ср}}$ энергопотребления на начальных тестах.

Этап 4. Выполнение программ, реализующих алгоритмы 1 и 2, и получение энергоемких тестов.

Этап 5. Повторное моделирование схем на энергоемких тестах, получение средних значений $S_{\text{ср}}^{\text{алг 1}}$, $S_{\text{ср}}^{\text{алг 2}}$ энергопотребления на энергоемких тестах.

Исходными данными явились 19 примеров систем ДНФ полностью определенных булевых функций из набора примеров [7]. В качестве промышленной системы синтеза логических схем во всех экспериментах использовали синтезатор Leonardo-Spectrum (версия 2010a.7). В качестве целевой библиотеки синтеза использовали отечественную библиотеку [3] проектирования заказных цифровых КМОП СБИС. В качестве числа k задавалось число, равное примерно одной десятой от общего числа наборов при начальном моделировании. Например, для первой строки табл. 6 (пример b12) $K_{\text{исх}} = 512$, $k = K_1 = K_2 = 54$.

Результаты эксперимента представлены в табл. 6, где S — площадь схемы в условных единицах; n — число входов схемы; T — тип теста:

$T1$ — 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);

$T2$ — тестовые наборы, состоящие из упорядоченной по возрастанию десятичного эквивалента последовательности из 2^n всех наборов булева пространства размерности n (левая часть таблицы истинности системы полностью определенных булевых функций);

$T3$ — специальная последовательность тестовых наборов, генерируемая с помощью алгоритма из работы [8] и задающая все упорядоченные пары входных наборов из булева пространства размерности n ;

$K_{\text{исх}}$ — число наборов исходного теста;

K_1 — число наборов теста, полученного алгоритмом 1;

K_2 — число наборов теста, полученного алгоритмом 2;

$S_{\text{ср}}^{\text{алг 1}}$ — среднее потребление на энергоемком тесте, полученном алгоритмом 1;

$S_{\text{ср}}^{\text{алг 2}}$ — среднее потребление на энергоемком тесте, полученном алгоритмом 2.

Таблица 6

Имя	S	n	T	Исходный тест		Алгоритм 1			Алгоритм 2		
				$K_{исх}$	$S_{ср}$	K_1	$S_{ср}^{алг1}$	%	K_2	$S_{ср}^{алг2}$	%
b12	19826	15	T1	512	9,18e-8	54	9,94e-8	108,30	54	13,0e-8	142,3
C1355	96065	41	T1	4096	2,24e-7				412	2,78e-7	124,11
CHT	47770	47	T1	4096	7,64e-8				412	1,68e-7	219,90
FRG2	299501	143	T1	4096	1,18e-6				412	1,61e-6	136,4
I8	205684	133	T1	4096	4,29e-7				412	5,26e-7	122,61
C1908	92522	33	T1	4096	2,21e-7				412	3,11e-7	140,72
Life	15178	9	T1	256	1,18e-7	28	1,48e-7	125,42	28	1,49e-7	126,27
Life	15178	9	T2	512	4,34e-8	54	4,90e-8	112,90	54	1,29e-7	297,24
C432	43357	36	T1	4096	2,01e-7				412	2,98e-7	148,26
FRG1	40154	28	T1	4096	2,12e-7				412	3,29e-7	155,19
C880	25808	60	T1	4096	8,69e-8				412	1,24e-7	142,69
C499	46917	41	T1	4096	6,19e-11				412	76,3e-011	893,4
I3	30545	132	T1	4096	2,35e-11				412	2,83e-011	120,43
I9	32236	88	T1	512	1,11e-7	54	1,29e-7	116,22	54	2,34e-7	210,81
DALU	124071	75	T1	1024	4,98e-7	104	5,48e-7	110,04	104	7,29e-7	146,39
CM42A	1830	4	T1	64	1,16e-8	8	1,80e-8	155,17	8	1,61e-8	138,79
CM42A	1830	4	T3	241	1,49e-8	26	2,81e-8	188,59	26		
CM82A	3437	5	T1	128	2,22e-8	14	3,99e-8	179,73	14	3,11e-8	140,09
CM82A	3437	5	T3	993	2,18e-8	102	4,21e-8	193,12	102		
CM85A	4994	11	T2	2048	2,09e-8	206	2,88e-8	137,80	206	3,99e-8	190,91
CM138A	1099	6	T1	2048	3,25e-13	206	1,01e-12	310,77	206	5,76e-13	177,23
CM162A	6283	14	T1	2048	3,04e-8	206	3,25e-8	106,91	206	3,74e-8	123,03
INTB	444709	15	T1	1024	1,31e-6	104	1,36e-6	106,82	104	1,59e-6	121,37
Среднее							Алгоритм 1	152,99	Алгоритм 2		191,34
									Алгоритм 2 (без учета C499)		156,24

Обсуждение результатов эксперимента

Анализ представленных в табл. 6 и других полученных экспериментальных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Использование начальных полных тестов типа $T3$ позволяет выбрать более энергоемкие тесты, чем использование начальных тестов типа $T1$ и псевдослучайных тестов типа $T2$.

2. Алгоритм 1 является достаточно трудоемким алгоритмом и пытается найти среди имеющихся пар входных наборов наиболее энергоемкие тесты, однако он неприменим для тестов из псевдослучайных наборов.

3. Алгоритм 2 является быстродействующим, применимым для задач произвольной размерности и достаточно эффективным, однако, выбирая наиболее энергоемкие пары, он не может предсказать потребление на отсутствующих при начальном моделировании парах наборов, хотя достаточно часто обеспечивает увеличение на 20 % среднего энергопотребления даже без повторного моделирования.

4. Выбор одной десятой части (10 %) энергоемких наборов для комбинационных схем позволяет примерно на 50–70 % повысить энергопотребление схем на найденных коротких энергоемких тестах.

Заключение

Разработанные программы формирования энергоемких тестов включены в систему [9] логического синтеза КМОП-схем и используются для оценки вариантов схем в целях получения проектов КМОП СБИС, характеризующихся пониженным энергопотреблением. Уменьшение числа наборов в энергоемком тесте приводит к увеличению среднего значения потребляемого схемой тока, что, в свою очередь, важно для определения минимальной ширины проводников в сетях питания и заземления в СБИС. Правильно выбранная ширина таких проводников важна для предотвращения эффектов электромиграции [1], приводящих к разрыву проводников и сбоям функционирования СБИС.

Список литературы

1. Рабаи Ж. М., Чандракасан А., Николич Б. Цифровые интегральные схемы, 2-е изд.: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2007. 912 с.
2. Библо П. Н. Системы проектирования интегральных схем на основе языка VHDL. StateCAD, ModelSim, LeonardoSpectrum. М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 384 с.
3. Библо П. Н., Кириенко Н. А. Оценка энергопотребления логических КМОП-схем по их переключательной активности // Микроэлектроника. 2012. № 1. С. 65–77.

4. Ghosh A., Devadas S., Keutzer K., White J. Estimation of Average Switching Activity in Combinational and Sequential Circuits // Proc. 29th ACM/IEEE Design Automation Conference, June, Anaheim, CA. 1992. P. 253—259.

5. Бибило П. Н. Нахождение теста для режима максимального энергопотребления комбинационной логической схемы // Управляющие системы и машины. 2010. № 5. С. 39—45.

6. Харари Ф. Теория графов. М.: Мир, 1973. 300 с.

7. <http://www1.cs.columbia.edu/~cs6861/sis/espresso-examples/ex/>

8. 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.

9. Бибило П. Н., Черемисинова Л. Д., Кардаш С. Н., Кирiyенко Н. А., Романов В. И., Черемисин Д. И. Автоматизация логического синтеза КМОП схем с пониженным энергопотреблением // Программная инженерия. 2013. № 8. С. 35—41.

P. N. Bibilo, Professor, Head of Lab., I. P. Loginova, Associate Professor, Senior Researcher
United Institute of Informatics Problem, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

The Creation of Energy-Intensive Tests for Combinational Logic Circuits According to the Results of Evaluation of Their Power Consumption

The decrease of energy consumption of logic circuits is a complex problem and it requires the decision in various aspects. One of these aspects is evaluation of power consumption in the mode of heightened consumption of energy. The design of logic circuits is performed using program-synthesizer that converts high level VHDL descriptions of algorithms for functioning circuits into structural description of logic circuits. The approximate evaluations of power consumption in logic CMOS circuits are implemented through modeling of such descriptions in logical simulation systems, for example in CAD ModelSim (Mentor Graphics). The more exact evaluation of power consumption in logic circuit projects are made by analog simulation systems. In both approaches, for every pair of input variable values, the designer gets the value of energy consumed by the circuit in the current time unit. This paper gives formalization of the problem of finding energy-intensive tests for combinational logic CMOS circuits. Also, it offers two algorithms for searching a given number of test vectors, using of which in logical re-simulation of such circuits provides the mode of their heightened consumption. Selection of test vectors is done by results of primary logic circuit simulation. Results of primary logic circuit simulation (both logical and analog) are represented by sequence of binary sets, each pair of neighboring sets related to the time activation being put in correspondence to power consumption of the circuit (i.e. the number equal power consumption in the time of activation is shown). The first algorithm operates on the set of all possible test vector pairs and intended for small-scale circuits. The second algorithm is fast and efficient, deals with pseudorandom sequences of input vectors and can be applied for arbitrary-dimension circuits. At the same time, when choosing the most energy-intensive pairs it cannot predict energy consumption of unused set pairs (in primary simulation), however it gives often enough up to 20—30 % increase of power average consumption even without re-simulation. The results of experiment on building of energy-intensive tests for combinational logic circuits from library CMOS gates are presented. Experiments shows that selection of average 10 % energy-intensive test sets from the whole sets of test vector pairs allows 50—70 % increasing power consumption of circuits in found energy-intensive tests by remodeling.

Keywords: combinational CMOS circuits, simulation, pseudorandom test vectors, estimating energy consumption

References

1. Raba Zh. M., Chandrakasan A., Nikolic B. *Cifrovye integral'nye shemy* (Digital integrated circuits), 2nd ed.: Moscow, Williams, 2007. 912 p. (in Russian).

2. Bibilo P. N. *Cistemy proektirovaniya integral'nyh shem na osnove yazyka VHDL. StateCAD, ModelSim, LeonardoSpectrum* (Systems of design of integrated schemes on the basis of the VHDL. StateCAD, ModelSim, LeonardoSpectrum). Moscow, SOLON Press, 2005. 384 p. (in Russian).

3. Bibilo P. N., Kiriyenko N. A. *Ocenka jenergotrebleniya logicheskikh KMOP-shem po ih pereklyuchatel'noj aktivnosti* (Estimation of energy consumption of logical CMOS schemes on their switching activity), *Mikroelektronika*, 2012, no. 1, pp. 65—77 (in Russian).

4. Ghosh A., Devadas S., Keutzer K., White J. Estimation of Average Switching Activity in Combinational and Sequential Circuits, *Proc. 29th ACM/IEEE Design Automation Conference*, June, Anaheim, CA. 1992, pp. 253—259.

5. Bibilo P. N. *Nahozhdenie testa dlja rezhima maksimal'nogo jenergotrebleniya kombinacionnoj logicheskoy shemy* (Finding of dough for the mode of the maximum energy consumption of the combinational logical scheme), *Upravljajushhie sistemy i mashiny*, 2010, no. 5, pp. 39—45 (in Russian).

6. Harare F. *Teorija grafov* (Theory of graphs). Moscow, Mir, 1973. 300 p. (in Russian).

7. <http://www1.cs.columbia.edu/~cs6861/sis/espresso-examples/ex/>

8. Zakrevsky A. D. Minimizacija perebora orientirovannyh par (Minimization of search of the focused couples), *Tanaevskie chtenija. Doklady Chetvertoj Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii*, Minsk. March 29, 2010, Minsk, OIPI NAN of Belarus, 2010. pp. 58—62 (in Russian).

9. Bibilo P. N., Cheremisinova L. D., Kardash S. N., Kiriyenko N. A., Romanov V. I., Cheremisinov D. I. Avtomatizacija logicheskogosmeza KMOP shem s ponizhennym jenergotrebleni (Automation of logical synthesis of CMOS of schemes with the lowered energy consumption), *Programmnyaya Ingeneriya*. 2013, no. 8, pp. 35—41 (in Russian).