

ЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 681.325

Н.А. Авдеев, П.Н. Бибило

ПРИМЕНЕНИЕ ОЦЕНОК СЛОЖНОСТИ ДИАГРАММ ДВОИЧНОГО ВЫБОРА ПРИ СИНТЕЗЕ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ

Предлагается формула для оценки площади логической схемы, построенной в заданной библиотеке логических элементов по BDD-представлению (диаграмме двоичного выбора) системы булевых функций. Описываются результаты синтеза комбинационных логических схем по минимизированным BDD-представлениям в библиотеке проектирования заказных КМОП СБИС.

Введение

Синтез логических схем в заданном базисе (библиотеке) элементов традиционно разбивается на два больших этапа: технологически независимую оптимизацию реализуемых систем булевых функций и технологическое отображение – покрытие оптимизированных представлений описаниями библиотечных логических элементов. Решающее влияние на основные параметры (сложность, быстродействие, энергопотребление) логических схем оказывает первый этап. На данном этапе в качестве главных методов оптимизации до недавнего времени использовались методы раздельной и совместной минимизации систем булевых функций в классе дизъюнктивных нормальных форм (ДНФ). В последнее время к ним добавились методы оптимизации многоуровневых представлений на основе разложения Шеннона – диаграмм двоичного выбора (англ. Binary Decision Diagram, BDD) [1, 2].

В настоящей работе предлагается формула для оценки площади логической схемы, построенной по BDD-представлению системы булевых функций. Данная оценка выведена согласно непосредственной реализации формул многоуровневого представления системы булевых функций логическими элементами. Она может применяться для определения максимальной площади проектируемой комбинационной логической схемы в заданной библиотеке КМОП-элементов. Формула проверена экспериментально на потоке практических примеров минимизированных BDD-представлений, позволяет быстро оценивать схемные решения, получаемые синтезаторами логических схем, и различные варианты при выборе лучшей схемы в экспертных системах логического проектирования [3].

1. Диаграмма двоичного выбора для системы булевых функций и оценки ее сложности

Разложением Шеннона полностью определенной булевой функции $f = f(x_1, \dots, x_n)$ по переменной x_i называется представление ее в виде

$$f = \bar{x}_i f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n) \vee x_i f(x_1, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n). \quad (1)$$

Функции в правой части (1) называются коэффициентами разложения. Они получаются из функции $f(x_1, \dots, x_n)$ подстановкой вместо переменной x_i констант 0 и 1 соответственно. Каждый из коэффициентов $f_0 = f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)$ и $f_1 = f(x_1, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n)$ может быть разложен по одной из переменных множества $\{x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n\}$. Процесс разложения коэффициентов f_0, f_1 заканчивается, когда все n переменных будут использованы для раз-

ложения. В процессе разложения на каждом шаге некоторые из коэффициентов могут вырождаться до констант, на последнем шаге разложения все полученные коэффициенты являются константами 0, 1. На каждом шаге разложения выполняется сравнение на равенство полученных коэффициентов и оставляется один из нескольких попарно равных коэффициентов. Если же коэффициенты разложения по переменной x_i равны, то переменная x_i называется несущественной переменной и $f = f(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)$.

Под *диаграммой двоичного выбора*, т. е. под BDD, понимается ориентированный ациклический граф, задающий последовательные разложения Шеннона булевой функции $f(x_1, \dots, x_n)$ по всем ее переменным x_1, \dots, x_n при заданном порядке (перестановке) переменных, по которым проводятся разложения. BDD одной полностью определенной булевой функции содержит три вида вершин: функциональные вершины, соответствующие разлагаемым функциям либо коэффициентам; вершины-переменные и листовые вершины, соответствующие константам 0, 1. Функциональная вершина, соответствующая функции f , называется корнем. Если коэффициенты разложения (1) равны, то граф BDD упрощается, так как вершина x_i , из которой исходит одна дуга, удаляется из графа. BDD, представляющая систему m полностью определенных булевых функций, имеет m корневых и две листовые вершины 0, 1, которые обычно дублируются для упрощения изображения графа. Ориентация дуг не показывается, так как при изображении графа BDD все дуги ориентируются сверху вниз.

Совместными BDD (далее BDD), представляющими систему функций F , будем называть такие BDD, которые построены по общей (для всех функций системы) перестановке переменных. В литературе [4] эти BDD называют сокращенными упорядоченными BDD (англ. Reduced Ordered BDD, ROBDD). Методы построения BDD для систем булевых функций хорошо известны [1, 2].

Проиллюстрируем построение BDD на примере системы функций (табл. 1) схемы сумматора, предназначенного для сложения чисел, заданных двоичными кодами: $(a_1, b_1) + (a_2, b_2) = (c^2, s^2, s^1)$, где a_1, a_2 – старшие разряды складываемых чисел; b_1, b_2 – младшие разряды складываемых чисел. Функциями системы F являются: c^2 – перенос в третий разряд; s^2 – старший разряд суммы; s^1 – младший разряд суммы.

Таблица 1
Таблица истинности функций двухразрядного сумматора

a_1	b_1	a_2	b_2	c^2	s^2	s^1
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	1
0	0	1	0	0	1	0
0	0	1	1	0	1	1
0	1	0	0	0	0	1
0	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	0	1	1
0	1	1	1	1	0	0
1	0	0	0	0	1	0
1	0	0	1	0	1	1
1	0	1	0	1	0	0
1	0	1	1	1	0	1
1	1	0	0	0	1	1
1	1	0	1	1	0	0
1	1	1	0	1	0	1
1	1	1	1	1	1	0

На рис. 1 показана BDD, построенная по общей для всех функций перестановке $\langle b_2, b_1, a_1, a_2 \rangle$. Многоуровневое представление F_{BDD} , соответствующее BDD, имеет вид

$$c^2 = \bar{b}_2 r^5 \vee b_2 r^1; \quad s^2 = \bar{b}_2 r^7 \vee b_2 r^2; \quad s^1 = \bar{b}_2 r^3 \vee b_2 r^4;$$

$$r^1 = \bar{b}_1 r^5 \vee b_1 r^6; \quad r^2 = \bar{b}_1 r^7 \vee b_1 r^8; \quad r^3 = b_1; \quad r^4 = \bar{b}_1;$$

$$r^5 = a_1 r^9; \quad r^6 = \bar{a}_1 r^9 \vee a_1; \quad r^7 = \bar{a}_1 r^9 \vee a_1 r^{10}; \quad r^8 = \bar{a}_1 r^{10} \vee a_1 r^9;$$

$$r^9 = a_2; \quad r^{10} = \bar{a}_2.$$

Под сложностью E^{node} BDD будем понимать число функциональных вершин BDD без учета функциональных вершин, реализующих переменные либо инверсии переменных. На рис. 1 BDD имеет 13 вершин, из них четыре вершины $r^3 = b_1, r^4 = \bar{b}_1, r^9 = a_2, r^{10} = \bar{a}_2$ реализуют переменные (либо инверсии переменных); следовательно, $E^{node} = 9$ (функциональных вершин). В литературе [4, 5] обычно используется оценка сложности BDD по числу всех функциональных вершин. В работе [6] предлагались эмпирические формулы для оценки числа вершин BDD, реализующей одну булеву функцию, по числу аргументов функции и числу конъюнкций в совершенной ДНФ, представляющей функцию.

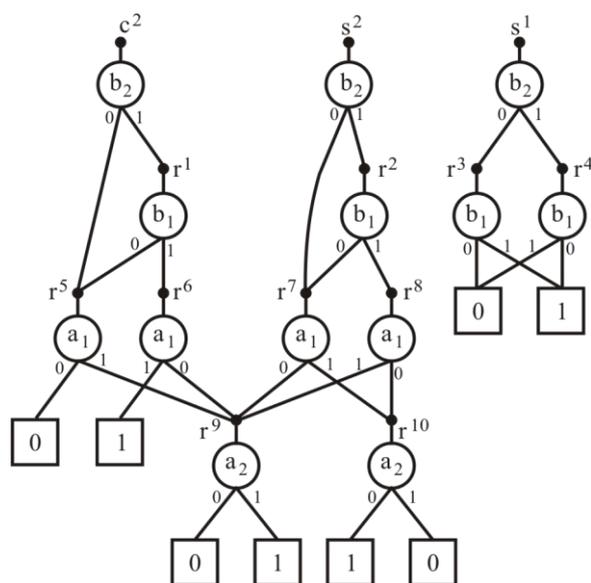


Рис. 1. Диаграмма двоичного выбора

Число операций дизъюнкции \vee в многоуровневом представлении F_{BDD} системы функций F будем обозначать через E^\vee . Аналогично число операций конъюнкции $\&$ в многоуровневом представлении F_{BDD} системы функций F будем обозначать через $E^\&$. В примере $E^\vee = 8, E^\& = 15$.

Чтобы подсчитать суммарную площадь $S_{np}(F_{BDD})$ всех элементов схемы, реализующей уравнения многоуровневого представления F_{BDD} , воспользуемся простым способом технологического отображения – будем реализовывать каждое полное уравнение вида (1) многоуровневого представления единообразно в виде подсхемы из двух последовательно соединенных логических элементов. Рассмотрим выражение

$$f = AB \vee CD. \quad (2)$$

Схема, реализующая формулу (2) в рассматриваемом библиотечном базисе КМОП-элементов [7], будет состоять из двух последовательно соединенных элементов: элемента NOAA и инвертора N. Функция элемента NOAA выражается формулой $f_{NOAA} = \overline{AB \vee CD}$, а инвертор реализует функцию отрицания. В схеме выход элемента NOAA подается на вход инвертора N. Площадь S_{NOAA} элемента NOAA равна 485,46, площадь S_N инвертора N равна 223,2 (условных единиц площади).

Чтобы реализовать BDD-представление системы функций в виде схемы из КМОП-элементов, каждую из входных переменных схемы будем инвертировать только один раз и считать, что инверсия каждой из входных переменных в схеме является доступной, тогда каждое выражение (1) можно заменить при синтезе парой элементов NOAA, N: на вход A элемента NOAA подается инверсия \bar{x}_i переменной x_i , на вход B – коэффициент f_0 , на вход C – переменная x_i , на вход D – коэффициент f_1 . Каждая вершина BDD, описываемая логическим выражением, имеющим в своем составе операцию дизъюнкции, будет при таком подходе реализована элементом NOAA, выход которого соединен с входом инвертора N.

Легко подсчитать в многоуровневом представлении системы функций число выражений вида

$$\varphi = x^\alpha \& f_\beta = x^\alpha f_\beta, \quad (3)$$

где x^α – переменная x_i ($\alpha = 0$) либо инверсия \bar{x}_i ($\alpha = 1$); f_β – коэффициент f_0 ($\beta = 0$) либо f_1 ($\beta = 1$). Число выражений вида (3) равно $E^{node} - E^\vee$. Выражения вида (3) будем реализовывать элементом A2 (двухвходовым конъюнктом), площадь которого $S_{A2} = 435,24$.

Для построения схемы по формулам многоуровневого BDD-представления исключим (подставим в другие выражения) переменные, являющиеся переименованием переменных либо их инверсий. В рассматриваемом примере $E^{node} = 9$ и получаются девять формул:

$$\begin{aligned} c^2 &= \bar{b}_2 r^5 \vee b_2 r^1; & s^2 &= \bar{b}_2 r^7 \vee b_2 r^2; & s^1 &= \bar{b}_2 b_1 \vee b_2 \bar{b}_1; \\ r^1 &= \bar{b}_1 r^5 \vee b_1 r^6; & r^2 &= \bar{b}_1 r^7 \vee b_1 r^8; \\ r^5 &= a_1 a_2; & r^6 &= \bar{a}_1 a_2; & r^7 &= \bar{a}_1 a_2 \vee a_1 \bar{a}_2; & r^8 &= \bar{a}_1 \bar{a}_2 \vee a_1 a_2. \end{aligned}$$

Для нахождения оценки $S_{np}(F_{BDD})$ площади схемы будем реализовывать выражения вида (3) элементами A2, а выражения вида (2) – элементами NOAA. Таким образом, значение $S_{np}(F_{BDD})$ площади каскадной схемы будем вычислять по формуле

$$\begin{aligned} S_{np}(F_{BDD}) &= [E^\vee \times (S_{NOAA} + S_N)] + (S_N \times n) + [S_{A2} \times (E^{node} - E^\vee)] = \\ &= 485,46 E^\vee + 223,2 n + 435,24 (E^{node} - E^\vee). \end{aligned} \quad (4)$$

Логическая схема, построенная по полученным формулам, иллюстрирует предлагаемый способ нахождения оценки сложности схемы, а не ориентирована на минимизацию сложности сумматора (рис. 2). Применяемая в литературе оценка сложности логической схемы по числу E^{node} вершин BDD (уравнений) не учитывает разницу в аппаратной сложности уравнений вида (2) и (3) и не исключает аппаратную сложность функциональных вершин BDD, помеченных входными переменными.

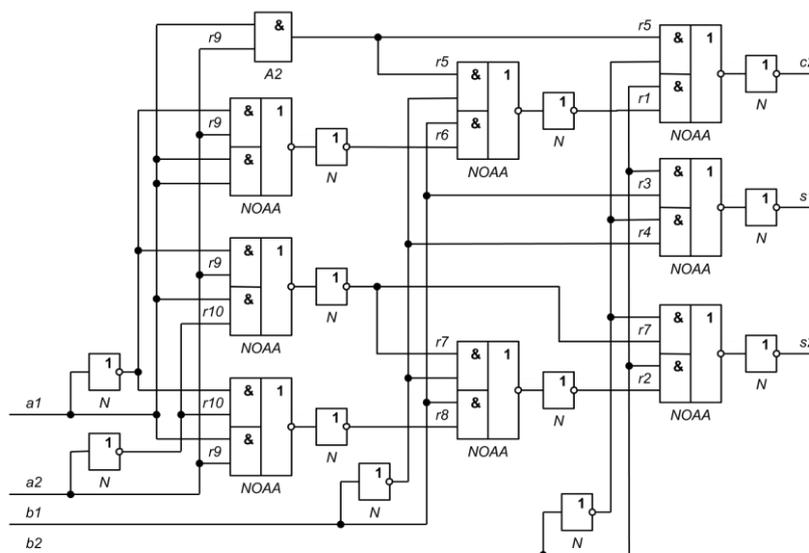


Рис. 2. Логическая схема

2. Эксперимент по схемной реализации BDD-представлений систем булевых функций

Проведенный эксперимент заключался в схемной реализации систем ДНФ булевых функций F логическими схемами из библиотечных логических элементов и состоял из двух этапов:

1. По исходной системе ДНФ строилось оптимизированное BDD-представление функций. Для совместной BDD-минимизации систем булевых функций использовалась программа TIE_BDD [2], реализующая алгоритм минимизации многоуровневых представлений системы булевых функций на основе разложения Шеннона. При проведении экспериментов данная программа строила BDD не более чем по 5000 случайно выбираемым перестановкам переменных и выбирала из рассмотренных вариантов BDD наименьшей сложности.

2. Синтезировались схемы по минимизированным BDD-представлениям систем функций.

Исходными данными явились 60 примеров систем ДНФ полностью определенных булевых функций из набора примеров [8]. В качестве промышленной системы синтеза логических схем во всех экспериментах использовался синтезатор LeonardoSpectrum (версия 2011a.4), при этом BDD-представления конвертировались в соответствующие VHDL-описания многоуровневого представления системы функций. В качестве целевой библиотеки синтеза выступала отечественная библиотека [7] проектирования заказных цифровых КМОП СБИС.

Результирующими данными для каждой из схем явилась площадь $S(F_{BDD})$ логической схемы, реализующей BDD-представление системы F . Площадь схемы, полученной синтезатором LeonardoSpectrum, сравнивалась с площадью $S_{np}(F_{BDD})$ схемы, полученной непосредственной реализацией формул многоуровневого представления.

3. Результаты эксперимента

Результаты эксперимента приведены в табл. 2, где приняты следующие обозначения:

n – число аргументов (число входных полюсов схемы);

m – число функций (число выходных полюсов схемы);

k – число общих элементарных конъюнкций, входящих в систему ДНФ булевых функций;

E^{node} – оценка сложности BDD;

$S(F_{BDD})$ – суммарная площадь всех элементов схемы, построенной синтезатором LeonardoSpectrum по многоуровневому BDD-представлению F_{BDD} системы функций F ;

$S_{np}(F_{BDD})$ – оценка суммарной площади всех элементов схемы по формуле (4);

$\rho_1 = S(F_{BDD}) / S_{np}(F_{BDD})$ – отношение площади схемы, полученной синтезатором LeonardoSpectrum, к оценке площади схемы по формуле (4).

Проведенный эксперимент, как и другие подобные эксперименты [3], показал, что схемные реализации различных представлений одной и той же системы булевых функций при синтезе в промышленном синтезаторе LeonardoSpectrum могут иметь различную площадь, так как данный синтезатор чувствителен к форме задания исходных данных. В синтезатор LeonardoSpectrum включены собственные модули оптимизации, поэтому для небольших размерностей задач результаты синтеза обычно не зависят от формы задания функций. Для примеров схем небольших размерностей синтезатор не принимал во внимание результаты предварительной оптимизации в классе BDD-представлений, а осуществлял собственную оптимизацию функций.

По результатам эксперимента можно также сделать вывод о том, что в среднем реальная суммарная площадь элементов схемы на четверть больше, чем площадь, вычисляемая по формуле (4). Однако имеется ряд примеров (LIFE, MLP4 и др.), для которых площадь, вычисленная по формуле (4), оказывается меньше, чем площадь схемы, построенной синтезатором LeonardoSpectrum. В этом случае целесообразно использование компилятивного метода синтеза (см. схему на рис. 2), заключающегося в покрытии уравнений логическими элементами и дополненного процедурой введения повторителей сигналов для удовлетворения нагрузочных способностей логических элементов.

Приведем пример использования оценки (4). Пусть требуется реализовать систему булевых функций для приближения тригонометрической функции синуса $y = \sin(x)$ на интервале $[0, \pi/2]$ значений аргумента x . Исходное задание на синтез представляет собой таблица истинности системы функций $F = \{f^1(x_1, x_2, \dots, x_{14}), \dots, f^{14}(x_1, x_2, \dots, x_{14})\}$, содержащая 2^{14} строки. Оптимизация заключается в выборе лучшего BDD-представления путем перебора 500 случайно выбранных перестановок переменных.

Таблица 2

Имя схемы	n	m	k	$S(F_{BDD})$	E^{node}	E^v	$S_{np}(F_{BDD})$	ρ_1
ADD6	12	7	1092	20 222	58	52	30 533,76	0,66
ADDM4	9	8	512	91 372	187	153	91 082,34	1,00
ADR4	8	5	256	7661	27	21	14 591,7	0,53
ALU1	12	8	19	7109	16	11	10 194,66	0,70
B12	15	9	431	17 002	54	39	28 809,54	0,59
B2	16	17	110	217 464	558	410	267 025,3	0,81
B9	16	5	123	25 104	69	61	36 666,18	0,68
BR1	12	8	34	30 562	76	32	37 363,68	0,82
BR2	12	8	35	22 973	70	33	34 802,46	0,66
CLPL	11	5	20	2929	14	9	9000,54	0,33
CO14	14	1	47	12 996	25	13	14 658,66	0,89
DC2	8	7	58	22 956	60	35	29 657,7	0,77
DIST	8	5	256	69 884	144	123	70 637,22	0,99
EX7	16	5	123	25 104	69	61	36 666,18	0,68
F51M	8	8	256	26 717	62	52	31 381,92	0,85
gary	15	11	442	102 192	301	186	143 696,2	0,71
IN1	16	17	110	217 464	558	410	267 025,3	0,81
IN2	19	10	137	95 669	255	173	123 915,1	0,77
INTB	15	7	664	239 527	615	507	296 482,1	0,81
LIFE	9	1	512	14 977	24	18	13 358,52	1,12
LOG8MOD	8	5	47	26 778	60	49	30 360,78	0,88
M1	6	12	32	18 899	55	40	27 286,2	0,69
M181	15	9	430	18 124	45	30	24 440,4	0,74
M2	8	16	96	63 679	127	104	62 283,96	1,02

Окончание табл. 2

Имя схемы	n	m	k	$S(F_{BDD})$	E^{node}	E^\vee	$S_{np}(F_{BDD})$	ρ_1
M3	8	16	128	62 859	139	101	67 356,18	0,93
M4	8	16	256	84 637	204	161	98 659,98	0,86
MAX1024	10	6	1024	146 430	295	257	143 534,3	1,02
MAX46	9	1	46	39 802	72	51	35 907,3	1,11
MAX512	9	6	512	73 221	173	138	84 235,68	0,87
MLP4	8	8	256	73 143	134	115	65 883,06	1,11
MP2D	14	14	123	18 827	69	45	35 416,26	0,53
NEWAPLA	12	10	17	10 189	21	4	12 019,32	0,85
NEWAPLA1	12	7	10	7650	18	0	10 512,72	0,73
NEWBYTE	5	8	8	5692	19	0	9385,56	0,61
NEWCOND	11	2	31	13 961	27	18	15 110,64	0,92
NEWCPA1	9	16	38	28 006	80	41	38 887,02	0,72
NEWCPA2	7	10	19	17 806	58	37	28 664,46	0,62
NEWILL	8	1	8	5312	14	8	8280,72	0,64
NEWTAG	8	1	8	2126	8	6	5568,84	0,38
NEWTPLA	15	5	23	14 419	11	2	8236,08	1,75
NEWTPLA1	10	2	4	3800	28	14	15 121,8	0,25
NEWTPLA2	10	4	9	7354	50	18	24 897,96	0,30
P82	5	14	24	19 971	57	30	27 431,28	0,73
RADD	8	5	120	8465	27	21	14 591,7	0,58
RD53	5	3	32	10 055	21	17	11 109,78	0,91
RD73	7	3	147	15 925	41	37	21 265,38	0,75
ROOT	8	5	256	27 381	73	49	36 018,9	0,76
RYY6	16	1	112	4224	15	11	10 652,22	0,40
SEX	9	14	23	13 928	45	24	22 799,88	0,61
soar	83	94	529	172 913	646	402	319 879,1	0,54
SQN	7	3	96	24 329	48	39	24 412,5	0,996
SQR6	6	12	64	27 158	68	50	33 446,52	0,81
SYM10	10	1	837	21 143	36	32	19 507,68	1,08
T3	12	8	152	20 116	54	19	27 135,54	0,74
TIAL	14	8	640	313 339	706	613	341 189,1	0,92
vtx1	27	6	110	21 952	85	52	45 633,24	0,48
x9dn	27	7	120	22 342	89	57	47 625,3	0,47
Z4	7	4	128	6992	24	19	12 962,34	0,54
Z5XP1	7	10	128	28 374	65	49	32 313,78	0,88
Z9SYM	9	1	420	18 191	31	27	16 857,18	1,08
Среднее								0,77

Полученная BDD содержит $E^{node} = 6017$ вершин, а соответствующее многоуровневое представление состоит из 6017 логических выражений, в которых насчитывается $E^\vee = 5839$ операторов дизъюнкции.

Синтез схемы из библиотечных элементов в синтезаторе LeonardoSpectrum занял 6 мин, полученная схема имела площадь 3 535 817 условных единиц. Оценка площади схемы по формуле (4) при значениях $E^{node} = 6017$, $E^\vee = 5839$, $n = 14$ проводится следующим образом:

$$S_{np}(F_{BDD}) = 485,46 \times 5839 + 223,2 \times 14 + 435,24 \times (6017 - 5839) = \\ = 2\,834\,600,94 + 3124,8 + 77\,472,72 = 2\,837\,725,74.$$

Площадь согласно оценке оказалась значительно меньше площади схемы, полученной промышленным синтезатором. Однако следует учесть тот факт, что удовлетворение электрических характеристик сигналов (учет нагрузочных способностей элементов) немного снижает этот выигрыш, так как требуется ввести в схему дополнительные элементы – повторители сигналов.

Использование формулы (4) позволяет оценить качество схем, получаемых промышленными синтезаторами и имеющими собственные программно реализованные алгоритмы оптимизации. Проведенные эксперименты показывают, что при реализации функциональных блоков большой размерности целесообразно осуществить предварительную глобальную BDD-оптимизацию и оценить площадь схемы по формуле (4). Не исключены варианты, что в процессе процедуры синтеза, использующей мощную глобальную минимизацию BDD-представлений и простую процедуру технологического отображения, могут быть получены логические схемы меньшей площади, чем схемы, получаемые промышленными синтезаторами. Промышленные синтезаторы ориентируются на схемную реализацию высокоуровневых описаний, представленных на языках VHDL, Verilog [9], и имеют в своем составе собственные алгоритмы локальной минимизации функциональных описаний логических схем.

Заключение

В литературе сложность BDD оценивается по числу вершин BDD, однако предложенная оценка сложности BDD является более практичной и может быть использована для оценки площади логических схем, получаемых промышленными синтезаторами. Как показали эксперименты, при больших размерностях задачи синтеза комбинационной логики не исключены случаи, когда целесообразно реализовать логическую схему непосредственно по минимизированному BDD-представлению.

Список литературы

1. Meinel, C. Algorithms and Data Structures in VLSI Design: OBDD – Foundations and Applications / C. Meinel, T. Theobald. – Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1998. – 267 p.
2. Бибило, П.Н. Алгоритм построения диаграммы двоичного выбора для системы полностью определенных булевых функций / П.Н. Бибило, П.В. Леончик // Управляющие системы и машины. – 2009. – № 6. – С. 42–49.
3. Бибило, П.Н. Логическое проектирование дискретных устройств с использованием продукционно-фреймовой модели представления знаний / П.Н. Бибило, В.И. Романов. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 279 с.
4. Кнут, Д.Э. Искусство программирования / Д.Э. Кнут. – М. : Вильямс, 2013. – Т. 4, А : Комбинаторные алгоритмы, ч. 1. – 960 с.
5. Ishiura, N. Minimization of Binary Decision Diagrams Based on Exchanges of Variables / N. Ishiura, H. Sawada, S. Yajima // IEEE Intern. Conf. Computer-Aided Design (ICCAD–1991). – USA, 1991. – P. 472–475.
6. Raseen, M. An efficient estimation of the ROBDDs complexity / M. Raseen, P.W. Chandana Prasad, A. Assi // Integration, the VLSI Journal. – 2006. – Vol. 39, № 3. – P. 211–228.
7. Бибило, П.Н. Оценка энергопотребления логических КМОП-схем по их переключательной активности / П.Н. Бибило, Н.А. Кириенко // Микроэлектроника. – 2012. – № 1. – С. 65 – 77.
8. Espresso examples [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www1.cs.columbia.edu/~cs6861/sis/espresso-examples/ex>. – Date of access : 25.03.2015.
9. Поляков, А.К. Языки VHDL и VERILOG в проектировании цифровой аппаратуры / А.К. Поляков. – М. : СОЛОН-Пресс, 2003. – 320 с.

Поступила 24.04.2015

*Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси,
Минск, Сурганова, 6
e-mail: bibilo@newman.bas-net.by*

N.A. Avdeev, P.N. Bibilo

**EMPLOYING COMPLEXITY ESTIMATES OF BINARY DECISION
DIAGRAMS IN THE SYNTHESIS OF LOGICAL CIRCUITS**

A formula is suggested to evaluate the area of a logical circuit that is built in a given library of logical elements according to the BDD (Binary Decision Diagram) representation of a system of Boolean functions. The experimental results of synthesis of combinational logical circuits from the minimized BDD representations in the design library of custom CMOS VLSI circuits are described.