

УДК 681.325

Н.А. Кириенко, Л.Д. Черемисинова

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ НЕЗАВИСИМОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОПИСАНИЙ КМОП-СХЕМ

Исследуется влияние процедур технологически независимой оптимизации функциональных описаний, которые представлены системами булевых функций, на сложность и задержку схем, синтезированных из библиотечных элементов КМОП СБИС. Сравняется эффективность предварительной минимизации и алгебраической декомпозиции систем булевых функций в классе ДНФ при оптимизации функциональных описаний средствами синтезатора LeonardoSpectrum. Экспериментальное исследование показало, что к наиболее существенному уменьшению сложности и задержки схем приводит последовательное выполнение на этапе технологически независимой оптимизации процедур минимизации систем булевых функций и алгебраической декомпозиции.

Введение

Задача синтеза состоит в представлении исходного функционального описания логической схемой из элементов технологической библиотеки изготовителя СБИС, каждый из которых характеризуется своей функцией и физическими характеристиками. Широко используемыми критериями оптимальности при синтезе являются площадь результирующего кристалла СБИС (функция от числа вентилях, транзисторов), быстродействие и (в последние годы) энергопотребление. В такой постановке задача синтеза выступает комбинаторно сложной. Процесс синтеза существенно упрощается за счет разбиения его на две стадии (как это делается практически во всех системах логического проектирования): технологически независимую оптимизацию и технологическое отображение.

На первом этапе исходное функциональное описание проектируемой схемы представляется в виде многоуровневой схемы из простых элементов (типа И, ИЛИ, НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ). На втором этапе эта схема преобразуется в функционально эквивалентную схему из элементов целевой технологической библиотеки.

В настоящей работе исследуется степень влияния разных подходов к технологически независимой оптимизации функциональных описаний, представленных системами булевых функций, на площадь и задержку схем, синтезированных из библиотечных элементов КМОП СБИС с помощью средств синтезатора LeonardoSpectrum.

1. Технологически независимая оптимизация функциональных описаний

Результатом выполнения данного этапа является схема из вентилях (типа И, ИЛИ, НЕ). Цель этапа состоит в том, чтобы построить такой вариант представления схемы, который послужил бы хорошей отправной точкой для этапа технологического отображения в базис библиотечных элементов. В качестве количественных оценок эффективности проектирования на этом этапе используется суммарное число входных полюсов вентилях и задержка схемы.

Минимизация систем булевых функций в классе дизъюнктивных нормальных форм (ДНФ). Технологически независимая оптимизация, используемая в системах логического проектирования микросистемных устройств, включает в себя в качестве первого этапа, как правило, этап минимизации булевых функций. Выполнение этого этапа обусловлено тем, что минимизация позволяет сократить сложность исходного задания (иногда довольно существенно). Минимизация функционального описания ведется с учетом фактора сложности (оцениваемой по Квайну числом всех литералов полученной системы ДНФ). В результате выполнения этапа минимизации систем функций получается двухуровневая И-ИЛИ-схема (с использованием инверторов), в которой элементы имеют число входных полюсов, не привязанное к целевому технологическому базису.

Алгебраическая декомпозиция систем ДНФ булевых функций. Основным методом (используемым в большинстве САПР) построения многоуровневой схемы из вентилях, подлежащей переводу в технологический базис, является алгебраическая декомпозиция системы ДНФ [1], в основе которой лежит построение факторизованных форм (или факторизованных ДНФ) путем поиска факторов – общих частей конъюнкций или дизъюнкций системы ДНФ. Факторизованная форма, по сути, является скобочной формой задания многоуровневого представления ДНФ. Специальный термин вводится для обозначения того факта, что заданная система логических уравнений подготовлена для многоуровневой реализации, т. е. удовлетворяет требованиям, накладываемым технологическим базисом, в котором предполагается реализовать описываемую ею комбинационную схему. Преобразование системы ДНФ в факторизованную форму, которой соответствует многоуровневая реализация из вентилях с ограниченным числом входов, разбивается в программном комплексе проектирования КМОП-схем [2] на два этапа [1, 3]:

– совместную нетривиальную факторизацию системы ДНФ. На этом этапе выделяются факторы (в виде конъюнкций или ДНФ), которые имеют ограниченную длину (число литералов), диктуемую целевым технологическим КМОП-базисом, и входят в несколько конъюнкций или ДНФ;

– построение скобочных выражений ДНФ независимо для каждой из функций системы. Оно основано на итеративном вынесении общих литералов конъюнкций заданной ДНФ D за скобки путем декомпозиции вида $D = k(A) + B$, где D , A и B – ДНФ (дизъюнкции некоторого множества конъюнкций), а k – конъюнкция, состоящая из некоторого множества литералов, общих для всех конъюнкций из A .

В результате выполнения первого этапа получается многоуровневая И-ИЛИ-схема (с использованием инверторов), в которой могут быть элементы с числом входных полюсов, не привязанным к целевому технологическому базису. В многоуровневой схеме, являющейся результатом выполнения второго этапа, число входных полюсов всех элементов не превосходит максимума числа входов вентилях, диктуемого технологическим базисом.

2. Организация эксперимента по исследованию подходов к технологически независимой оптимизации

Синтез схем производился в базисе отечественной библиотеки заказных КМОП СБИС. В качестве средства проектирования схем использовался промышленный синтезатор LeonardoSpectrum (версия 2011a.4) [4], настроенный на целевую отечественную библиотеку КМОП СБИС. На вход синтезатора подавались VHDL-описания представлений двух- и многоуровневых И-ИЛИ-схем.

Проводилось сравнение результатов синтеза схем из библиотечных элементов, полученных с помощью синтезатора LeonardoSpectrum, исходя из четырех представлений одних и тех же тестовых систем булевых функций из набора Berkeley PLA test set [5]:

1) двухуровневые И-ИЛИ-схемы, соответствующие исходным описаниям систем булевых функций; в этом случае оптимизация проектируемой схемы производилась только средствами синтезатора LeonardoSpectrum (исследуемый вариант 1);

2) двухуровневые И-ИЛИ-схемы, полученные после совместной минимизации систем булевых функций с помощью программы [6], реализующей модифицированный метод ESPRESSO (вариант 2);

3) многоуровневые И-ИЛИ-схемы, полученные после совместной минимизации систем булевых функций и последующей совместной нетривиальной факторизации полученной системы ДНФ (вариант 3);

4) многоуровневые И-ИЛИ-схемы из элементов с ограниченным числом входных полюсов, полученные после совместной минимизации систем булевых функций и последующей алгебраической декомпозиции (вариант 4).

Представления схем по вариантам 2–4 были получены с помощью программного комплекса проектирования цифровых интегральных КМОП-микросхем с пониженным энергопотреблением ELS [2]. На рис. 1 и 2 показаны окна, демонстрирующие функциональные возможности комплекса в части технологически независимой оптимизации логических схем. Исследуемые ва-

рианты 2–4 технологически независимой оптимизации функциональных описаний реализованы в комплексе соответственно проектными операциями «Двухуровневая оптимизация», «Многоуровневая оптимизация» и «Синтез схем из вентиляей».

Из трех возможных проектных операций двухуровневой оптимизации выбрана «Минимизация Espresso» (рис. 1), реализующая модифицированный метод Espresso совместной минимизации системы булевых функций. В результате выполнения этой операции получается оптимизированное двухуровневое И-ИЛИ-представление схемы.

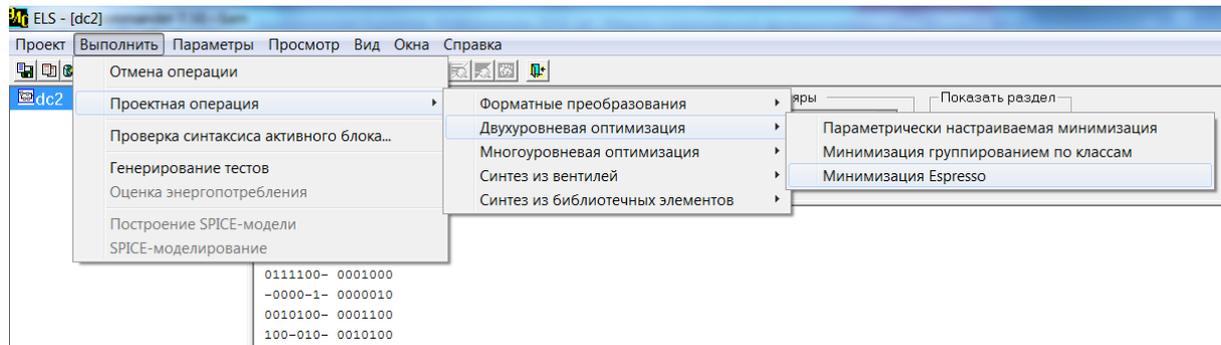


Рис. 1. Вызов процедуры совместной минимизации систем булевых функций

На рис. 2 представлено окно выбора одной из процедур выполнения «Многоуровневая оптимизация», а именно процедуры «Совместная факторизация» системы булевых функций. Данная процедура выделяет факторы (в виде конъюнкций или ДНФ), которые имеют ограниченную длину (число литералов), диктуемую целевым технологическим КМОП-базисом, и входят в несколько конъюнкций или ДНФ. В результате выполнения этой операции получается оптимизированное многоуровневое И-ИЛИ-представление схемы.

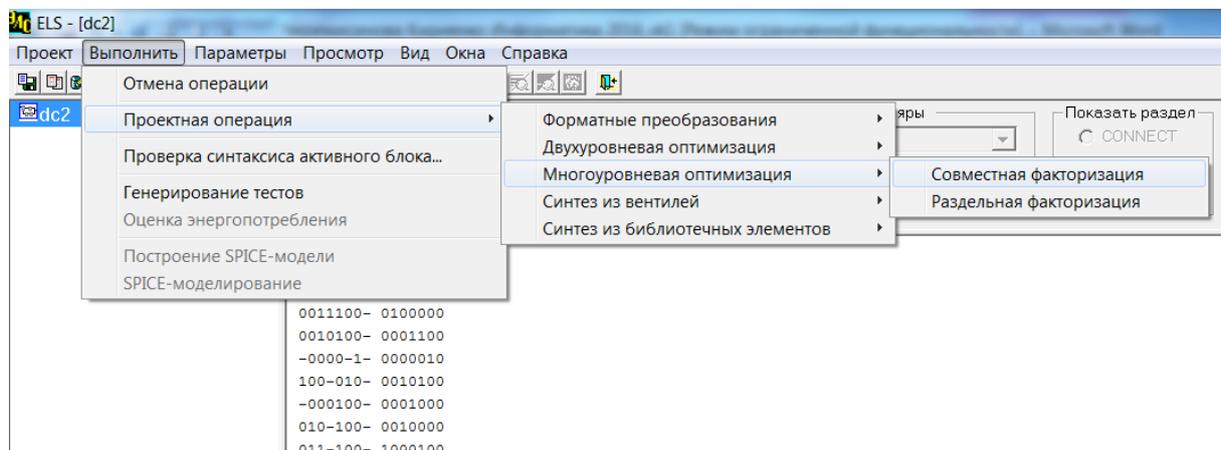


Рис. 2. Вызов процедуры совместной факторизации систем булевых функций

На рис. 3 показано окно вызова одной из процедур выполнения «Синтез из вентиляей», а именно процедуры синтеза схем из многоходовых вентиляей. В ходе выполнения этой процедуры осуществляется алгебраическая декомпозиция систем ДНФ булевых функций, состоящая из этапов совместной нетривиальной факторизации системы ДНФ и построения скобочных выражений ДНФ независимо для каждой из функций системы. В результате получается оптимизированное многоуровневое представление схемы, ориентированное на заданный отечественный технологический КМОП-базис, на который настроен программный комплекс ELS [2].

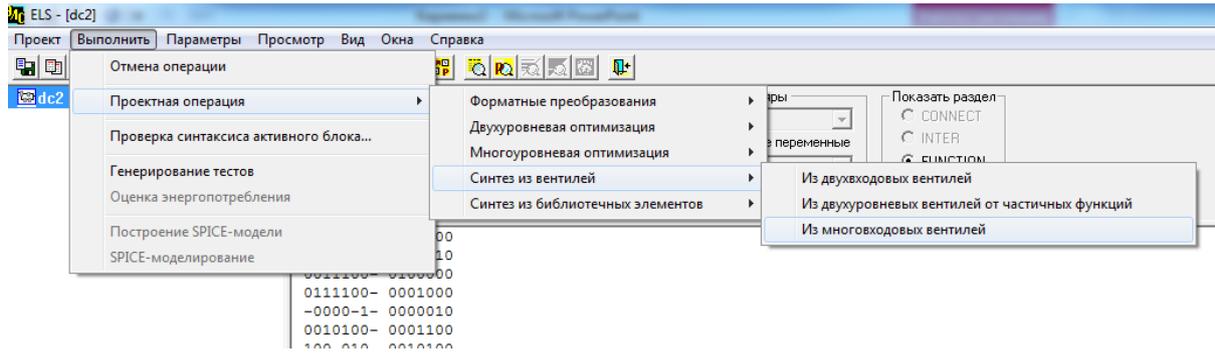


Рис. 3. Вызов процедуры синтеза схем из многоходовых вентилях

Полученные данные исследования различных вариантов технологически независимой оптимизации для каждой из тестовых схем приведены в таблице. В ходе исследования для каждого из тестовых примеров было получено четыре варианта схемных решений. Состав и последовательность вызова оптимизационных процедур для каждого исследуемого варианта оптимизации представлены на рис. 4.

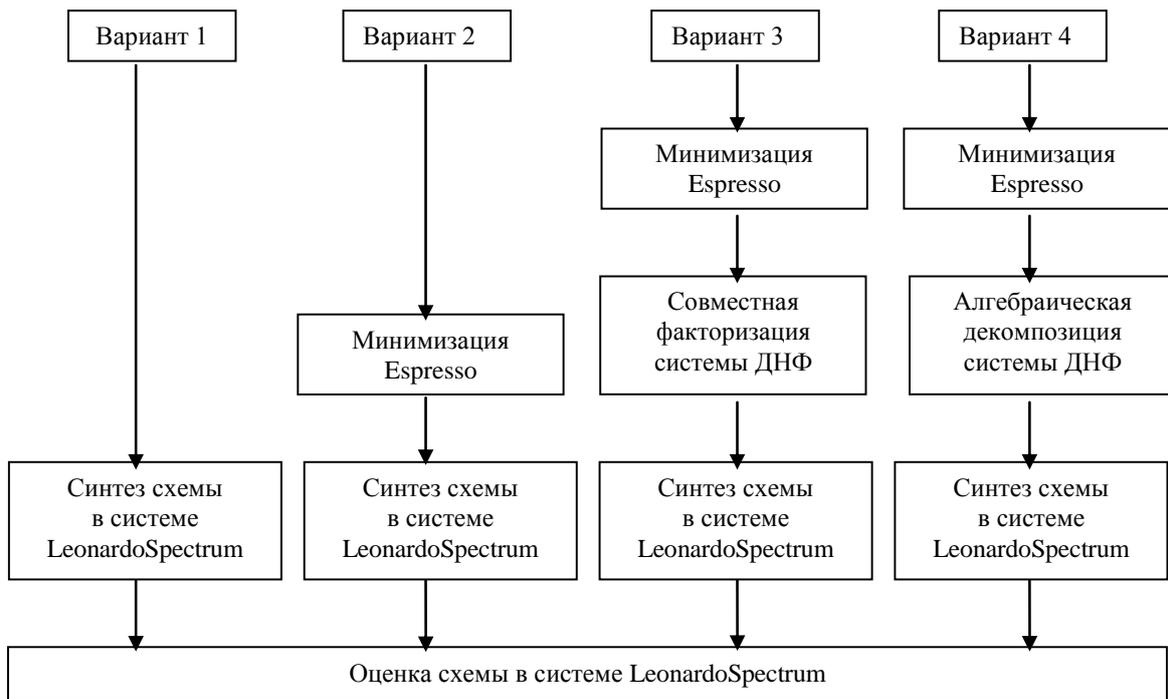


Рис. 4. Исследуемые варианты оптимизационных преобразований функциональных описаний схем

Как видно из рис. 4, для каждого из полученных четырех вариантов описаний, реализующих одну и ту же систему булевых функций, синтезируется схема в заданном библиотечном КМОП-базисе с помощью синтезатора. Оценка сложности синтезированных схем производится средствами LeonardoSpectrum: подсчитывается площадь схемы (рис. 5) и задержка критического пути (рис. 6). Площадь схемы подсчитывается (в условных единицах) как сумма площадей входящих в нее библиотечных элементов при размещении их на кристалле СБИС. Задержка критического (наиболее «длинного») пути измеряется в наносекундах.

Information - Read Only				
NOA	power	6 x	363	2176 um_2
NOA3	power	2 x	530	1060 um_2
NOAA	power	3 x	485	1456 um_2
O2	power	1 x	407	407 um_2
Number of ports :				15
Number of nets :				83
Number of instances :				75
Number of references to this view :				0
Total accumulated area :				
Number of um_2 :				27509
Number of accumulated instances :				75
Info. Command 'report_area' finished successfully				

Рис. 5. Оценка площади синтезированной схемы

Critical Path Report				
Critical path #1. (unconstrained path)				
NAME	GATE	ARRIVAL		LOAD
x4/		0.00	0.00 up	0.13
ix23/Y	NO	0.29	0.29 dn	0.02
ix494/Y	IX1	1.11	1.39 dn	0.11
ix429/Y	NA	0.25	1.65 up	0.02
ix25/Y	N	0.22	1.87 dn	0.04
ix502/Y	N	0.47	2.35 up	0.13
ix239/Y	NO3A	0.55	2.90 dn	0.02
ix476/Y	NOA	0.33	3.22 up	0.02
ix245/Y	NAO3	0.56	3.78 dn	0.02
ix469/Y	NO3AA	0.81	4.59 up	0.02
ix269/Y	NA3O	0.39	4.98 dn	0.00
y2/		0.00	4.98 dn	0.00
data arrival time			4.98	
data required time		not specified		
data required time		not specified		
data arrival time			4.98	
		unconstrained path		

Рис. 6. Оценка задержки синтезированной схемы

3. Результаты исследования подходов к технологически независимой оптимизации

Для каждого тестового примера в таблице приведены следующие параметры:

- числа n , m и k аргументов, функций и конъюнкций тестовой системы ДНФ;
- величины s_1 и τ_1 площади и задержки схем, полученных средствами синтезатора LeonardoSpectrum по варианту 1;
- для вариантов 2–4 процент относительного выигрыша/проигрыша i -го варианта оптимизации по площади схемы относительно варианта 1: $\%s_i = ((s_1 - s_i)/s_1) \cdot 100 \%$;
- для вариантов 2–4 процент относительного выигрыша/проигрыша i -го варианта оптимизации по задержке схемы относительно варианта 1: $\%\tau_i = ((\tau_1 - \tau_i)/\tau_1) \cdot 100 \%$.

Если i -й вариант оптимизации по площади или задержке схемы выигрывает у варианта по площади или задержке схемы, соответствующий параметр ($\%s_i$ или $\%\tau_i$) будет иметь положительное значение, в противном случае (в случае проигрыша) он будет отрицательным.

В таблице жирным курсивом отмечены выигрышные варианты оптимизации (по площади и задержке схемы) для каждого тестового примера, а в последней строке для каждого варианта оптимизации приведено число тестовых примеров, для которых использование соответствующего варианта позволило получить лучшую схему по каждому из оцениваемых критериев (площадь и задержка).

Результаты экспериментального исследования влияния
логической оптимизации на площадь и задержку синтезированных схем

Имя схемы	Параметры схемы (n, m, k)	Оптимизация сред- ствами Leonardo Spectrum (вариант 1)		Минимизация Espresso (вариант 2)		Совместная факторизация (вариант 3)		Алгебраическая декомпозиция (вариант 4)	
		s_1	τ_1	% s_2	% τ_2	% s_3	% τ_3	% s_4	% τ_4
b9	16, 5, 123	26148	3,92	-15,6	-17,1	-8,6	-14,5	-6,7	-21,2
br1	12, 8, 34	32615	6,54	19,5	16,4	29,2	22,2	38,5	13,6
br2	12, 8, 35	22632	6,44	5,1	5,1	20,3	-1,6	22,3	-15,7
dc2	8, 7, 58	32375	4,73	7,5	12,3	16,1	-1,5	15,0	-5,3
dist	8, 5, 256	110060	7,97	20,0	18,3	26,4	10,3	30,2	25,1
dk48	15, 17, 148	30082	7,44	41,3	41,0	48,7	39,4	49,5	39,2
f51m	8, 8, 256	276350	11,17	91,0	56,2	89,1	67,0	90,0	65,1
gary	15, 11, 446	107627	6,66	5,2	-22,4	8,8	-41,4	11,8	-31,8
in0	15, 11, 138	133786	9,39	19,4	30,5	33,5	15,0	36,1	24,8
in2	19, 10, 137	141336	7,77	1,8	11,5	22,2	4,1	33,2	3,6
life	9, 1, 512	24641	5,54	2,7	11,6	-26,2	9,7	-12,0	-11,7
max1024	10, 6, 1024	423288	10,77	54,1	16,8	53,0	4,5	55,2	11,9
m1	6, 12, 32	21773	5,34	-2,9	14,0	-1,8	3,9	8,5	16,3
m2	8, 16, 96	85960	7,51	28,9	3,5	27,9	-7,9	30,0	-3,3
m3	8, 16, 128	97120	7,86	15,9	10,7	18,6	-0,6	14,3	0,8
m4	8, 16, 256	222447	11,01	34,9	25,5	43,6	17,2	45,9	15,8
mlp4	8, 8, 256	164967	8,06	36,9	23,3	40,7	6,3	43,8	21,8
root	8, 5, 256	55750	6,47	25,8	23,8	22,0	24,3	23,3	30,9
tms	8, 16, 30	46465	7,36	-10,5	2,7	3,6	14,7	-3,9	9,8
z9sym	9, 1, 420	59896	9,9	28,2	38,7	19,7	35,2	23,8	44,9
Выигрыш:		1	2	4	11	3	3	12	4

По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Использование при синтезе схем из элементов КМОП-библиотеки предварительного этапа технологически независимой оптимизации по варианту 4 позволило получить наибольший выигрыш по площади синтезируемых схем (в 12 случаях из 20). Значения относительных выигрышей по площади находятся в пределах от 8,5 до 55,2 %. При этом полученные схемы проигрывают по быстродействию схемам, полученным по варианту 2 (4 выигрыша против 11). Значения относительных выигрышей по быстродействию находятся в пределах от 16,3 до 44,9 %.

2. Использование при синтезе схем из элементов КМОП-библиотеки предварительного этапа оптимизации по варианту 3 также позволяет в некоторых случаях (в 3 из 20) уменьшить

площадь схем и повысить их быстродействие (в 3 случаях из 20). Значения относительных выигрышей по площади находятся в пределах от 3,6 до 18,6 %. Значения относительных выигрышей по быстродействию находятся в пределах от 14,7 до 67,0 %.

3. Использование при синтезе схем из элементов КМОП-библиотеки предварительного этапа оптимизации по варианту 2 (минимизация Espresso) продемонстрировало эффективность этого метода для повышения быстродействия схемы. Получен выигрыш в 11 случаях из 20. Метод также позволяет в некоторых случаях (в 4 из 20) уменьшить площадь схем. Значения относительных выигрышей по площади находятся в пределах от 2,7 до 91,0 %. Значения относительных выигрышей по быстродействию находятся в пределах от 3,5 до 41,0 %.

4. Только в одном случае из 20 не получено уменьшение площади КМОП-схемы при выполнении предварительной технологически независимой оптимизации (с помощью вариантов 2–4). Здесь реализованные в LeonardoSpectrum процедуры оптимизации позволили получить для примера b9 лучший результат.

В целом выполнение процедур совместной минимизации систем булевых функций, совместной нетривиальной факторизации системы ДНФ, а также алгебраической декомпозиции системы ДНФ позволяет в большинстве случаев улучшить качество проектируемых схем с помощью промышленного синтезатора LeonardoSpectrum. Проигрыш вариантов 3 и 4 варианту 2 по быстродействию получаемых схем объясняется тем, что при оптимизации схем по вариантам 3 и 4 критерий быстродействия принимается во внимание в последнюю очередь, а в первую очередь рассматриваются критерии сокращения площади и энергопотребления. При синтезе схем по варианту 2 критерий быстродействия, наоборот, является более приоритетным.

Заключение

Проведены сравнительные исследования влияния процедур технологически независимой оптимизации функциональных описаний на сложность и задержку схем, синтезированных из библиотечных элементов с помощью промышленного синтезатора LeonardoSpectrum. Показано, что использование процедур минимизации булевых функций и алгебраической декомпозиции систем булевых функций приводит к существенному выигрышу в сложности и задержке результирующих схем.

Список литературы

1. Черемисинова, Л.Д. Синтез и оптимизация комбинационных структур СБИС / Л.Д. Черемисинова. – Минск, 2007.
2. Автоматизация логического синтеза КМОП-схем с пониженным энергопотреблением / П.Н. Бибило [и др.] // Программная инженерия. – 2013. – № 8. – С. 35–41.
3. Черемисинова, Л.Д. Синтез многоуровневых логических схем с учетом энергопотребления / Л.Д. Черемисинова, Н.А. Кириенко // Информационные технологии. – 2013. – № 3. – С. 8–14.
4. Бибило, П.Н. Системы проектирования интегральных схем на основе языка VHDL / StateCAD, ModelSim, LeonardoSpectrum / П.Н. Бибило. – М. : Солон-Пресс, 2005. – 384 с.
4. Berkeley PLA test set [Electronic resource]. – 2015. – Mode of access : <http://www1.cs.columbia.edu/~cs6861/sis/espresso-examples>. – Date of access : 25.02.2015.
6. Черемисинов, Д.И. Минимизация двухуровневых КМОП-схем с учетом энергопотребления / Д.И. Черемисинов, Л.Д. Черемисинова // Информационные технологии. – 2011. – № 5. – С. 17–23.

Поступила 31.05.2016

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

N.A. Kirienko, L.D. Cheremisinova

**ANALYSIS OF EFFECTIVENESS OF TECHNOLOGY INDEPENDENT
OPTIMIZATION OF CMOS CIRCUIT FUNCTIONAL DESCRIPTIONS**

The influence of procedures of technology independent optimization of functional descriptions on complexity and delay of circuits made of CMOS VLSI library elements is investigated. The effectiveness of the optimization methods implemented in the synthesizer LeonardoSpectrum, the methods of minimization of Boolean functions systems in DNF and algebraic decomposition was compared. Experimental analysis was shown that sequential fulfilment of procedures of minimization of Boolean functions systems and algebraic decomposition during the technology independent optimization stage results in the great reduction of the circuit complexity and delay.