

# Оптимизация двухуровневых логических схем с учетом энергопотребления

Л.Д. Черемисинова, Д.И. Черемисинов

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск,

cld@newman.bas-net.by

**Аннотация** — Рассматривается задача энергосберегающего синтеза двухуровневых логических И–ИЛИ схем, реализуемых на основе КМОП-технологии. Предлагается комплекс методов и программ минимизации булевых функций в классе дизъюнктивных нормальных форм (ДНФ) по критерию сложности и энергопотребления соответствующих двухуровневых схем. Программно реализованные методы представляют собой модификации известных методов минимизации булевых функций в классе ДНФ путем добавления в них эвристик, направляющих процесс минимизации к получению систем ДНФ, реализуемых схемами с меньшим энергопотреблением. Приводятся оценки энергопотребления на этапе оптимизации двухуровневых схем, на базе которых можно уменьшить энергопотребление при реализации на кристалле СБИС, и результаты вычислительных экспериментов.

**Ключевые слова** — логический синтез, минимизация булевых функций, энергопотребление.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Быстрый рост плотности размещения элементов на кристалле больших интегральных схем (БИС) приводит к чрезмерному рассеиванию тепла и, соответственно, росту затрат на охлаждение. Это обстоятельство является существенным препятствием на пути повышения плотности монтажа БИС, приводя к перегреву, нарушению функциональности и сокращению времени безотказной работы [1]–[2].

От величины потребляемой микросхемой мощности зависят такие важные ее параметры, как мощность источника питания, размер шин питания, требования к системе охлаждения, время разрядки аккумуляторной батареи, и, в конечном счете, стоимость и надежность вычислительных систем. В последние годы фактор энергопотребления при проектировании интегральных схем стал играть такую же важную роль, как площадь и быстродействие. В большинстве случаев, при проектировании электронных устройств приходится добиваться высокой эффективности при ограниченном потреблении электроэнергии.

Снижение энергопотребления проектируемой схемы может обеспечиваться на разных уровнях проектиро-

вания. Характеристики (сложность, энергопотребление) спроектированной схемы существенно зависят от характеристик проектных решений на каждом из уровней проектирования, так как на каждом этапе преобразования подвергается схема, полученная на предыдущих этапах, и просчеты в качестве схемы, допущенные на ранних уровнях, не могут быть, в общем случае, далее компенсированы в полной мере. Причем, чем более ранним является этап, тем более важно получить на нем более качественное решение. В частности, синтез логической схемы традиционно начинается с оптимизации двухуровневых И–ИЛИ схем, обеспечиваемой путем минимизации систем булевых функций в классе ДНФ [3]. Оптимизация сложности и энергопотребления схемных решений на последующих за минимизацией этапах ограничена тем, чего можно достичь, исходя из полученного варианта двухуровневой И–ИЛИ схемы, а существенное их улучшение требует иногда и получения другого варианта этой схемы.

В настоящей работе рассматривается задача энергосберегающего синтеза двухуровневых логических схем, проектируемых на основе КМОП-технологии, рассматриваются оценки энергопотребления на этапе оптимизации двухуровневых схем, позволяющие обеспечить минимум энергопотребления реализованной на кристалле СБИС схемы. Под оценкой энергопотребления далее понимается оценка средней мощности, рассеиваемой микросхемой. Рассматривается случай схем, выполняемых по КМОП-технологии, когда:

- 1) используется синхронная реализация схем;
- 2) предполагается, что основные схемотехнические решения проектируемой схемы, такие как частота синхронизации и напряжение питания, фиксированы;
- 3) для оценки энергопотребления, в процессе оптимизации двухуровневых схем, используется статический метод (в противовес динамическому методу, в основе которого лежит моделирование), основанный на вероятностных характеристиках входных сигналов исследуемой схемы и ее функционально-структурных свойствах.

Известно, что компоненты КМОП-схем потребляют основную часть энергии при переключении. Отсюда более активные, в переключательном плане, КМОП-схемы потребляют больший объем энергии. Таким образом, энергопотребление существенно зависит от последовательности входных воздействий схемы. САПР должны иметь средства, позволяющие оценивать энергопотребление схемы в процессе ее проектирования и выбирать наименее энергоемкий вариант схемы.

Энергопотребление схем на уровне логики, в общем случае, прямо пропорционально площади, занимаемой схемой на кристалле СБИС. Это означает, что основной путь энергосбережения при проектировании логических схем, прежде всего, подразумевает сокращение площади, занимаемой схемой на кристалле СБИС. Однако, применение этих методов в качестве канвы для методов минимизации энергопотребления требует рассмотрения также новых критериев, используемых наряду с критериями минимизации площади схем.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В КМОП-технологии около 80% всей рассеиваемой микросхемой энергии приходится на динамическую составляющую [1], [2], порождаемую нестационарным поведением узлов микросхемы. Эта энергия рассеивается только во время переходных процессов, когда сигналы на выходах узлов микросхемы переключаются. Согласно упрощенной модели КМОП-микросхемой рассеивается энергия всякий раз, когда изменяется сигнал на ее выходе. Средняя величина мощности, рассеиваемой на выходе синхронной микросхемы, выражается известным соотношением ([1]–[2], [4]):

$$P_{dyn} = \frac{1}{2} V_{dd}^2 f_{clk} E_s C_L,$$

где  $V_{dd}$  – напряжение питания;  $f_{clk}$  – частота синхронизации;  $C_L$  – емкостная нагрузка схемы;  $E_s$  – переключательная активность выхода схемы, определяемая как математическое ожидание числа логических переходов сигнала (из 1 в 0 или из 0 в 1) за один период синхронизации.

Значения параметров  $V_{dd}$  и  $f_{clk}$  определяются при архитектурном проектировании, на логическом уровне минимизация динамической мощности сводится к минимизации переключаемой емкости  $E_i C_i$ . Рассеивание энергии микросхемой в целом можно оценить суммой мощностей, потребляемых всеми ее узлами:

$$P_s = \sum_{i=1}^n E_i C_i, \quad (1)$$

где  $n$  – число узлов в схеме;  $C_i$  – емкостная нагрузка и  $E_i$  – переключательная активность  $i$ -го узла схемы.

Для того, чтобы получить схему с минимумом энергопотребления необходимо оптимизировать зна-

чение этого параметра на всех стадиях логического синтеза. Важнейшим из этих этапов является начальный этап – оптимизация двухуровневого представления или минимизация реализуемой системы булевых функций. Известно множество алгоритмов минимизации двухуровневых представлений по критерию площади, выражаемой в этом случае числом простых импликант или литералов кратчайшей системы дизъюнктивных нормальных форм (ДНФ).

Для случая учета энергопотребления было введено расширение понятия простой импликанты [4] – энергосберегающей импликанты (в общем случае не простой), которая может содержать избыточные литералы, приводящие к уменьшению величины ее переключательной активности. Однако, может оказаться, что избыточные литералы, внося вклад в потребляемую схемой мощность, могут привести в итоге не к уменьшению, а к увеличению энергопотребления схемы, так как с учетом (1) энергопотребление под-схемы, реализующей импликанту  $k_r$ , оценивается как

$$P_{rs} = C_{\wedge} E(k_r) + \sum_{i=1}^{n(k_r)} C_{ax} E(z_i), \quad (2)$$

где  $C_{\wedge}$  и  $C_{ax}$  – емкостные нагрузки элемента И и входного полюса;  $E(k_r)$  и  $E(z_i)$  – переключательные активности выхода элемента И и  $i$ -го входного полюса;  $n(k_r)$  – число литералов импликанты  $k_r$ .

Кроме того, построение и учет энергосберегающих импликант приводит к полному пересмотру и усложнению процедур минимизации булевых функций, а их вхождение в решение затрудняет тестирование спроектированного устройства.

Основная проблема оптимизации технологически независимой схемы заключается в том, что на этапе логического синтеза, еще не привязанного к конкретному технологическому базису, трудно оценить энергопотребление реальной схемы на достаточно достоверном уровне. В связи с этим отступать от оптимизации сложности схемы в угоду оптимизации по вводимым оценкам энергопотребления нецелесообразно.

Реализованные в описываемом программном комплексе методы представляют собой модификации известных методов минимизации булевых функций в классе ДНФ путем добавления в них эвристик, направляющих процесс минимизации к получению систем ДНФ, реализуемых схемами с наименьшим энергопотреблением. За основной критерий минимизации принимается число литералов результирующей системы ДНФ, за второй – энергопотребление, оцениваемое суммарной переключательной активностью первого уровня двухуровневой схемы:

$$P_{rs} = \sum_{r=1}^m (E(k_r) + \sum_{i=1}^{n(k_r)} E(z_i)), \quad (3)$$

где  $m$  – число импликант минимизированной формы системы булевых функций. Эта оценка отличается от

(2) тем, что не учитывается влияние емкостных нагрузок  $C_{\wedge}$  и  $C_{\vee}$ , существенно зависящих от технологического базиса проектирования и неизвестных на стадии оптимизации функциональных описаний (их величины полагаются константами).

### III. ОЦЕНКИ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ СИГНАЛОВ

Моделирование, широко используемое в практике проектирования для установления разных параметров (в том числе и энергопотребления) схем, к сожалению, не годится для использования в процессе проектирования схемы для оценки вариантов синтеза. Более подходящими являются статические методы оценки энергопотребления схем, в основе которых лежит вероятностный подход к определению переключающей активности сигналов. Этот метод основан на: 1) задании вероятностных характеристик входных сигналов, отражающих частоту смены значений сигналов на входе; 2) распространении вероятностной информации о смене значений сигналов через всю схему, от входов к выходам.

Используемые на практике оценки переключающей активности узлов схемы выведены в предположении их пространственной (отсутствует корреляция сигналов на разных полюсах) и временной независимости (отсутствует корреляция значений одного и того же сигнала в разных тактах). Реально используемые оценки переключающей активности схемы выведены в предположениях нулевой и ненулевой задержки сигнала узлами схемы. Первые модели оценки предполагают, что все изменения на входах схемы распространяются через все ее элементы мгновенно и значит одновременно. Вторые модели оценок предполагают, что элементы схемы имеют конечные (но не нулевые) задержки, и принимают во внимание паразитные переключения, не предусмотренные функцией, реализуемой узлом.

#### A. Нулевая задержка сигналов

Различают ([1]–[2], [4]) вероятность  $p_i^1$  ( $p_i^0$ ) появления сигнала 1 (0) на некотором  $i$ -м полюсе и вероятность  $E_i$  смены сигнала на полюсе. Первая вероятность называется сигнальной (и обозначается далее через  $p_i$ ) и определяется средней долей тактов, на которых сигнал на  $i$ -м полюсе имеет значение 1. Вторая вероятность называется переключающей активностью и определяется средней долей тактов, на которых сигнал на  $i$ -м полюсе меняет свое значение по сравнению со значением в предшествующем такте. В соответствии с определением переключающей активности  $i$ -го полюса схемы в предположении, что  $p_i^1, p_i^0 < 1$  равна

$$E_i = 2p_i^1 p_i^0 = 2p_i(1 - p_i). \quad (4)$$

Вероятность  $p_e$  появления сигнала 1 на выходе элемента  $y$  зависит от функции, реализуемой этим элементом. В частности для элемента  $e$ , реализующего функцию И, имеет место:

$$p_y^{\wedge} = \prod_{i=1}^{n(e)} p_i. \quad (5)$$

#### B. Ненулевая задержка сигналов

Понятия равновесной вероятности и плотности переключений [5] определяют поведение сигнала во времени, а не только в устойчивом состоянии в течение такта. Равновесная вероятность  $P_x$  логического сигнала  $x(t)$  определяется как средняя доля времени, в течение которого сигнал имеет значение 1. Плотность переключений  $A_x$  определяется как среднее число переключений сигнала  $x(t)$  в единицу времени. В отличие от сигнальной вероятности и переключающей активности равновесная вероятность и плотность переключений позволяют учесть внутренние задержки схемы.

Показано [5], что если входы  $x_i$  элемента пространственно независимы, то плотность переключений сигнала на его выходе  $y$  вычисляется как

$$A_y = \sum_{i=1}^n P\left(\frac{dy}{dx_i}\right) A_{x_i} \quad (6)$$

Здесь булева разность функции  $y$  относительно переменной  $x$  определяется как

$$\frac{dy}{dx} = y(x=1) \oplus y(x=0) \quad (7)$$

Например, для элемента, реализующего функцию И  $y = x_1 x_2 \dots x_n$ , в соответствии с (5) – (7) имеет место:

$$\frac{dy}{dx_i} = x_1 \dots x_{i-1} x_{i+1} \dots x_n, \quad (8)$$

$$A_y = \sum_{i=1}^n (P(x_1) \dots P(x_{i-1}) P(x_{i+1}) \dots P(x_n)) A_{x_i}$$

### IV. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ МИНИМИЗАЦИИ

Практически все методы минимизации двухуровневых представлений булевых функций делят множество искомым импликант на три подмножества: существенных, несущественных и условно существенных. Первые должны быть включены в любое безызбыточное решение, вторые не должны включаться ни в одно решение, а из третьих выбирается некоторое безызбыточное подмножество, покрывающее все интервалы единичных областей задания минимизируемых функций, не покрытые существенными простыми импликантами. Методы минимизации различаются способами построения простых импликант из числа условно существенных и критериями, которым они должны удовлетворять для включения их в решение.

Различают методы: 1) последовательного построения простых импликант, включаемых в решение (например, метод конкурирующих интервалов [6]), путем укрупнения интервала булева пространства аргументов, представляющего импликанту, за счет включения в него непокрытых элементарных конъюнкций; 2) последовательного расширения интервала булева пространства аргументов, представляющего сначала конъюнкцию исходной ДНФ, а в перспективе простую импликанту, покрывающую эту конъюнкцию, за счет исключения некоторых литералов, входящих в нее (например, методы реализуемые ESPRESSO [3]). Простейший метод минимизации может использовать лишь одну операцию расширения условно существенных импликант.

Наиболее просто, с целью учета энергосбережения, модифицируются методы минимизации, в которых в качестве кандидатов в искомое решение строится сразу несколько простых импликант, или методы, в которых найденное решение модифицируется методом последовательных улучшений.

Разработанный программный комплекс включает в себя программы, реализующие приближенные методы минимизации и реализованные на языке программирования C++ для Windows SP. Результатом их работы является, в общем случае, безыбыточная ДНФ или их система. Точные методы в комплекс не были включены в силу того, что для булевых функций практической размерности получение минимальных ДНФ в практически приемлемое время проблематично. Комплекс включает в себя программы, позволяющие варьировать:

1) объект оптимизации: минимизация одной полностью или частично определенной булевой функции; минимизация системы полностью или частично определенных булевых функций;

2) метод решения: метод конкурирующих интервалов [6]; модифицированный метод ESPRESSO [3]; итеративный метод минимизации; быстродействующий однопроходный метод минимизации;

3) способ учета совместности минимизации системы ДНФ: раздельная минимизация функций системы, совместная минимизация функций системы;

4) критерий оптимизации: сложность получаемых ДНФ с учетом и без учета энергопотребления;

5) учет дополнительных настроек: получение парафазных реализаций ДНФ [7]; заданный лимит времени минимизации; число циклов оптимизации.

Исходными данными для алгоритмов оптимизации являются: 1) функциональное описание одной булевой функции или системы; 2) сигнальные вероятности входных сигналов; 3) метод решения; 4) точность решения; 5) дополнительные настройки. Все из упоминаемых выше методов настраиваются на минимизацию

как полностью, так и частично определенных булевых функций.

Для того чтобы направить минимизацию к получению энергосберегающего решения, необходимо априори вычислить переключательные активности для всех входных сигналов, а в процессе получения простых импликант и безыбыточных покрытий вычислять и учитывать переключательные активности всех простых импликант, используя формулы (4), (5) или (5), (6) (в зависимости от принятой модели задержек элементов). Для пояснения процедур, направляющих минимизацию на получение нужного результата, рассмотрим операции, входящие практически во все методы минимизации.

*Операция расширения интервала* выполняется путем исключения литералов. При расширении интервала принимаются во внимание две цели: уменьшить сложность этого интервала, т.е. максимально расширить его (путем исключения литералов), и покрыть с его помощью (полностью или частично) как можно больше других интервалов. При минимизации энергопотребления желательно 1) исключать не любые, а наиболее переключаемые литералы и 2) покрывать не любые, а наиболее энергоемкие интервалы.

В силу этого, важен *порядок расширения* интервалов: слишком раннее расширение интервала может препятствовать ситуации, когда некий другой интервал покрывает этот рассматриваемый. Чтобы снизить энергопотребление, оценивается энергетический вклад каждого выбрасываемого интервала, и выбрасываются в первую очередь энергоемкие интервалы. Для этого, энергоемкие интервалы берутся для расширения последними, в надежде, что некоторые другие интервалы расширятся и покроют их. При этом, перед выполнением этапа расширения интервалы упорядочиваются в порядке возрастания энергопотребления. А на *предмет исключения* проверяются сначала литералы с наибольшей переключательной активностью.

*Операция нахождения безыбыточного покрытия* заключается в приведении текущего покрытия ДНФ к безыбыточному виду. При поиске безыбыточного множества простых импликант выбирается минимальное число наименее активных (наименее энергоемких) импликант. При этом, из безыбыточных множеств простых импликант, представляющих собой покрытие исходного множества интервалов единичных областей минимизируемых булевых функций, отбираются минимальные по мощности или по суммарному числу литералов всех импликант. Каждое из отобранных множеств оценивается суммой переключательных активностей (или плотностей переключений) входящих в него импликант. В качестве решения выбирается безыбыточное множество с минимальной оценкой переключения.

## V. НЕКОТОРЫЕ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Для выявления эффекта, получаемого от применения методов энергосберегающей минимизации, были проведены экспериментальные исследования программных реализаций методов минимизации без учета и с учетом энергопотребления. Исследования проводились на одних и тех же тестовых примерах из набора [8]. Ниже приведены результаты исследования итеративного метода минимизации систем булевых функций без учета (параметры минимизации с индексом 1) и с учетом (параметры минимизации с индексом 2) энергопотребления (таблицы 1 и 2).

Следует заметить, что приведенные в таблице оценки энергопотребления имеют логический характер и основаны на использовании вероятностных методов вычисления переключаемых активностей сигналов. В данном случае эти методы основаны на вычислении плотностей переключений сигналов (6) на входных полюсах схемы и выходных полюсах элементов И, реализующих конъюнкции.

Из таблицы 1 видно, что для таких сравнительно несложных минимизируемых систем булевых функций вычислительные затраты на минимизацию с учетом и без учета энергопотребления практически не

Таблица 1

Результаты минимизации

Пример	Исходная система ДНФ			Минимизированная без учета энергопотребления				Минимизированная с учетом энергопотребления			
	$n$	$m$	$k$	$k_{min}^1$	$l^1$	$P_s^1$	$t^1$	$k_{min}^2$	$l^2$	$P_s^2$	$t^2$
b12	15	9	431	45	286	61.8653	0.06	44	267	<b>61.8647</b>	0.06
in0	15	11	138	111	1348	<b>385.478</b>	0.01	111	1351	385.894	0.01
life	9	1	512	84	756	233.603	0.01	84	756	<b>230.48</b>	0.01
mlp4	8	8	256	160	1574	355.837	0.03	160	1577	<b>355.488</b>	0.03
root	8	5	256	57	430	<b>93.8343</b>	0.01	58	393	95.2714	0.01
tms	8	16	30	30	484	69.3707	0.00	30	484	<b>69.3705</b>	0.00
z9sym	9	1	420	90	630	<b>178.538</b>	0.01	101	707	197.323	0.04
ADDM4	9	8	512	249	2477	613.69	0.09	249	2485	<b>612.889</b>	0.09

В таблице 1 приведены оценки энергопотребления первого уровня двухуровневой И-ИЛИ схемы, на котором реализуются конъюнкции минимизированных систем ДНФ. Жирным шрифтом выделены варианты минимизации, выигравшие по энергопотреблению.

Здесь приняты следующие обозначения:

$n$  – число переменных исходной системы ДНФ;

$m$  – число функций исходной системы ДНФ;

$k$  – число конъюнкций исходной системы ДНФ;

$k_{min}^1, k_{min}^2$  – число конъюнкций минимизированных систем ДНФ;

$l^1, l^2$  – число литералов в системе уравнений, описывающих минимизированные системы ДНФ;

$P_s^1, P_s^2$  – оценки энергопотребления подсхем, реализующих конъюнкции минимизированных систем ДНФ, подсчитанные по формуле (1);

$t^1, t^2$  – время вычислений в секундах на персональном компьютере с процессором Pentium 4 (3 ГГц).

Минимизация систем булевых функций с учетом энергопотребления проводилась при следующих значениях сигнальных вероятностей на входах схемы:

$$\begin{aligned}
 p_1 &= 0.10; & p_2 &= 0.13; & p_3 &= 0.16; & p_4 &= 0.19; \\
 p_5 &= 0.22; & p_6 &= 0.25; & p_7 &= 0.28; & p_8 &= 0.31; \\
 p_9 &= 0.34; & p_{10} &= 0.37; & p_{11} &= 0.40; & p_{12} &= 0.43; \\
 p_{13} &= 0.46; & p_{14} &= 0.49; & p_{15} &= 0.52.
 \end{aligned}
 \quad (9)$$

различаются. Не сильно различаются и оценки энергопотребления в силу того, что в обоих случаях используются приближенные методы минимизации.

Для того чтобы оценить реальное энергопотребление схем, построенных по минимизированным системам ДНФ, были проведены эксперименты по аналоговому моделированию схематехнических описаний этих схем. Использовался маршрут аналогового моделирования BoardStation Flow в САПР Mentor Graphics [9]. Оценка энергопотребления проводилась по методике, предложенной в [10]. Описание систем автоматически [11] переводилось на язык VHDL. Затем средствами синтезатора LeonardoSpectrum [9] синтезировалась логическая схема в библиотечном базисе КМОП-схем, по составу аналогичном базису, описанному в [12].

Полученное текстовое описание схемы (netlist) сохранялось в формате Edif, а затем с помощью средств [10] переводилось в SPICE-описание схемы. Схематехническое моделирование проводилось с помощью программы AccuSim II. Использовались следующие значения основных параметров моделирования [10]: длительность передних и задних фронтов входных сигналов 1 нс, период подачи сигналов 40 нс, температура +27, напряжение питания 3.3 В.

Моделирование проводилось на тестовой последовательности входных воздействий, наборы которой генерировались таким образом, что вероятности по-

явления в них значений 1 и 0 для каждого входного сигнала были равны значениям, принятым при минимизации систем ДНФ (в данном случае они совпадали с (9)). Моделирование проводилось на 512 тестовых наборах для схем b12, life, root, tms, z9sym, и на 128 тестовых наборах для более сложных схем in0, mlp4.

При моделировании оценивалось среднее значение потребляемого схемами тока, так как при постоянном напряжении питания потребляемая мощность легко подсчитывается умножением на константу.

В таблице 2 приведены значения тока, потребляемого схемами, реализованными в КМОП базисе. Жирным шрифтом выделены варианты, выигравшие по энерго-

их сложности. При этом вычислительные затраты на минимизацию увеличиваются незначительно.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Roy K., Prasad S.C. Low Power CMOS VLSI Circuit Design - New York: John Wiley and Sons Inc., 2000. – 376 p.
- [2] Рабаи Ж.М. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования. - М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. – 912 с.
- [3] Brayton R.K., Hachtel G. D., McMullen C., Sangiovanni-Vincentelli A.L. Logic minimization algorithms for VLSI synthesis. – Kluwer Academic Publishers, Boston, Massachusetts, 1984. – 193 p.

Таблица 2

#### Результаты моделирования

Пример	Первой схемы			Второй схемы		
	$p^1$	$s^1$	$I^1$	$p^2$	$s^2$	$I^2$
b12	91	33575	0,47293	97	35176	<b>0,47201</b>
in0	377	141141	<b>1,09385</b>	433	157802	1,28238
life	50	18341	0,30817	52	18922	<b>0,26176</b>
mlp4	422	155425	0,59325	428	158020	<b>0,58931</b>
root	118	41789	0,38138	115	41158	<b>0,38136</b>
tms	166	56838	<b>0,62831</b>	175	60297	0,67691
z9sym	103	38396	0,51769	116	43616	<b>0,49248</b>

потреблению. Приняты следующие обозначения:

$p^1, p^2$  – число элементов используемой КМОП библиотеки в схемах, построенных по минимизированным системам ДНФ;

$s^1, s^2$  – площади КМОП-схем, построенных по минимизированным системам ДНФ;

$I^1, I^2$  – средние значения тока, потребляемого схемами в миллиамперах (мА).

Следует заметить, что результаты вычисления энергопотребления на логическом и схемотехническом уровнях (таблицы 1 и 2) несколько разнятся. Причина заключается в том, что проводилось опосредованное сравнение результатов минимизации систем булевых функций на схемотехническом уровне: моделировались схемы в библиотечном базисе КМОП, построенные по минимизированным системам ДНФ, а для их построения использовались в свою очередь приближенные методы.

#### VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Схемотехническое моделирование двухуровневых И–ИЛИ схем, соответствующих одним и тем же системам ДНФ, полученным в результате минимизации с учетом и без учета энергопотребления, показало, что минимизация булевых функций с учетом переключательной активности сигналов позволяет получить уменьшение энергопотребления схем без увеличения

- [4] Benini L., Micheli G. De. Logic Synthesis for Low Power / Logic Synthesis and Verification / Eds. S. Hassoun, T. Sasao, R.K. Brayton. – Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 2002. – P. 197 – 223.
- [5] Najm F.N. A survey of Power Estimation Techniques in VLSI Circuits // IEEE Transactions on VLSI. – 1994. – № 12. – P. 446 – 455.
- [6] Торопов Н.Р. Минимизация систем булевых функций в классе ДНФ // Логическое проектирование / Под ред. А.А. Закревского. – Минск: Институт технической кибернетики НАН Беларуси. – 1999. – Вып. 4. – С. 4 – 19.
- [7] Торопов Н.Р. Минимизация системы булевых функций с поляризацией их значений // Сборник материалов IV Междунар. конф. Автоматизация проектирования дискретных систем. (CAD DD'2001) (14–16 ноября 2001, Минск). – Ч. 2. – Минск: Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 2001. – С. 92 – 105.
- [8] <http://www1.cs.columbia.edu/~cs4861/sis/espresso-examples/ex/>.
- [9] Бибило П.Н. Системы проектирования интегральных схем на основе языка VHDL. StateCAD, ModelSim, LeonardoSpectrum. - М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 384 с.
- [10] Авдеев Н., Бибило П. Оценка энергопотребления цифрового блока СБИС // Современная электроника. – 2009. – № 9. – С. 46 – 49.
- [11] Черемиснинов, Д.И. Анализ и преобразование структурных описаний СБИС. - Минск: Белорусская наука, 2006. – 275 с.
- [12] Лукошко Г., Коннов Е. КМОП базовые матричные кристаллы серии К1574 // Радиолюбитель. – 1997. – № 9. – С. 39–40.