

Иванов Д.Е., Васяева Т.А.

## ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПИКОВОГО РАССЕЙВАНИЯ ТЕПЛА ДЛЯ БОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Рассматривается задача оценки пикового рассеивания тепловой энергии для больших и сверхбольших интегральных схем, построенных по КМОП технологии. Задача сводится к построению двухтактной входной последовательности. Предложен генетический алгоритм решения задачи. Приводятся результаты машинных экспериментов на схемах международного каталога ISCAS-89.

Ключевые слова: цифровая схема, рассеивание тепла, генетический алгоритм.

### Введение.

Стремительное развитие КМОП-технологии существенно уменьшает нормы технологического процесса производства больших интегральных схем. При этом размеры транзисторов становятся всё меньше, позволяя размещать на одном кристалле сверхбольших интегральных схем (СБИС) всё большее их число. Современные СБИС часто используются в портативных устройствах: карманные калькуляторы, электронные часы, mp3-плееры и т.п. При разработке таких устройств большое значение имеет параметр потребляемой энергии, что заставляет разрабатывать новые подходы в их проектировании [1].

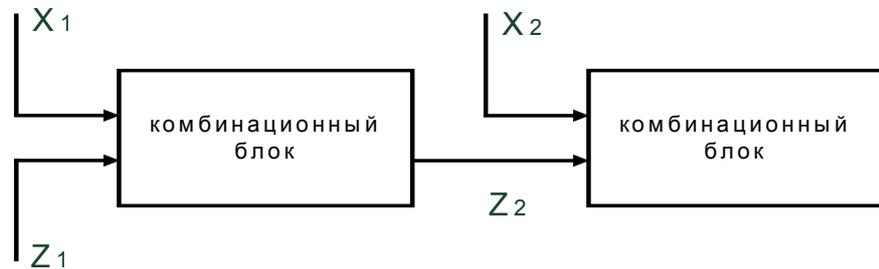
При возникновении задачи уменьшения потребления энергии цифровыми схемами вначале были разработаны методы оценки рассеиваемой тепловой энергии для ЦУ при работе на заданной входной последовательности [Najm-Goel, Tsui-Monterio]. В основном эти методы для оценки данного параметра используют показатель активности вентилях при моделировании. Далее были разработаны методы, которые оценивают пиковое возможное потребление заданного устройства [Devadas-Keutzer]. В работе проблема определения пикового рассеивания тепла в схеме сведена к задаче максимального покрытия для многовыходной булевой функции, которая строится из логического описания схемы. Показано, что задача относится к NP-полным, для её решения предложен метод ветвей и границ. Метод работает для небольших схем: наибольшая представленная схема имела 733 логических элемента, а для решения задачи потребовалось несколько часов машинного времени. Также данную задачу для комбинационных схем рассматривали в [Kriplani-Najm]. В работе [Mappe-Prado] авторы исследовали данную задачу для последовательностных схем. Для устройства восстанавливался граф переходов и для каждого из них оценивался параметр рассеивания тепла. Задача в такой постановке оказалась чрезвычайно ресурсоёмкой. Например, для небольшой схемы s208 в графе было около 71 миллиона переходов. Поэтому метод оказался неприемлемым для обработки схем с большим числом элементов состояний. Наконец, метод, основанный на генерации тестов, предложен в [Wang-Roy]. Идея работы заключалась в попытке активировать те элементы схемы, которые имеют наибольшее количество последователей.

### Постановка задачи.

В качестве модели будем использовать синхронные последовательностные схемы с выделенной комбинационной частью и элементами состояний,

при этом в схемах не предусмотрены цепи начального сброса состояний. Под пиковым рассеиванием (потреблением) тепла понимается максимальное значение за один такт модельного времени.

Показатель рассеиваемой тепловой энергии при моделировании заданной входной последовательности  $s_{ex}$  существенно зависит от технологии фи-



зической реализации микросхем. Наиболее распространённой в настоящее время технологией производства микросхем является КМОП и её современные модификации. Поэтому мы также будем ориентироваться на данную технологию.

Известно [Shen-Ghosh-92], что при реализации ЦУ по технологии КМОП рассеивание тепловой энергии делится на статическое и динамическое.

Статическое рассеивание энергии возникает вследствие токов утечки либо других паразитных токов и происходит постоянно во время работы устройства. Уменьшение потери энергии вследствие статического рассеивания достигается усовершенствованием технологического процесса производства чипов. Однако непосредственно переключательная активность на статическое рассеивание не влияет.

Динамическое рассеивание тепла является следствием утечки токов при зарядке и разрядке конденсаторов во время переключения состояний логических вентилей.

Переключательная активность моделируемой схемы, вызванная приложением заданной входной последовательности, влияет только на динамическую составляющую рассеиваемой энергии, тогда как статическая часть никак от неё не зависит. Также известно, что доминирующей является динамическая составляющая рассеивания тепла. Таким образом, мы будем ориентироваться на оценку пикового динамического рассеивания тепла.

В последовательностной схеме переключательная активность зависит как от начального её состояния, так и от прилагаемого в текущий момент времени входного набора [Hsiao99]. При этом такая активность зависит от состояния схемы в большей степени, поскольку число триггеров в схеме обычно существенно больше, чем число внешних входов. Математически такая зависимость выглядит как  $P(Z, X)$ , где  $Z$  - начальное состояние схемы,  $X$  - текущий входной набор.

Однако такая оценка не является сколь-нибудь приемлемой, поскольку в ней совсем не учитываются значения сигналов (состояния) на внутренних линиях в комбинационном блоке. Для того чтобы учесть данный фактор необходимо сначала произвести инициализацию схемы. Таким образом, мы приходим

к необходимости при оценке рассеивания тепла за один такт учитывать два последовательных входных набора. При этом первый входной набор  $X_1$  необходим для инициализации схемы, а второй набор  $X_2$  для получения переключательной активности схемы. Учитывая, что применяется модель синхронных последовательностных схем, это приведёт к использованию двух копий комбинационного эквивалента схемы, как это показано на рис 1. При этом выходные реакции схемы нас, вообще говоря, не интересуют. Поясним работу схемы, изображённую на данном рисунке. Первоначально схема находится в полностью неопределённом состоянии, что при моделировании в трёхзначном алфавите соответствует наличию на всех линиях схемы значения  $u$  из алфавита  $E_3$ . После записи начального состояния  $Z_1$  и подачи первого входного набора  $X_1$  выполняется моделирование комбинационной части. При этом в соответствии с логикой схемы будут получены выходной набор  $Y_1$  (для оценки рассеивания тепла не учитывается и не приведён на рисунке) и новое состояние схемы  $Z_2$ . Комбинационная часть при этом перейдёт в полностью определённое состояние, т.е. на её линиях будут присутствовать значения 0 и 1 из алфавита моделирования  $E_3$ . Данное утверждение будет верно только для «правильно» спроектированных схем, в которых отсутствует избыточная логика. Мы будем рассматривать только такой случай. Далее на следующем такте времени схема начинает работу из некоторого состояния  $Z_2$ , получает на вход набор  $X_2$ , выполняется моделирование комбинационной части и потребляемой энергии. Заметим, что выход  $Y_2$ , генерируемый схемой на данном такте, также не учитывается. В предлагаемой модели видно, что оценка потребления энергии происходит только для второго такта модельного времени. Это связано с тем, что первый такт необходим только для инициализации всех внутренних линий схемы. Также нет необходимости в параметры работы данной модели включать состояние  $Z_2$ , которое сформируется на триггерах после первого такта времени.

Таким образом, мы приходим к тому, что для оценки рассеивания тепла за один такт времени, необходимо учитывать тройку параметров  $P(Z_1, X_1, X_2)$ . Такая модель служит для оценки рассеивания тепла на одном такте времени.

Для оценки пикового потребления за один такт времени необходимо максимизировать данный функционал:

$$P(Z_1, X_1, X_2) \rightarrow \max . \quad (1)$$

Рассеивание тепла за один такт модельного времени при заданных параметрах схемы [Shen-Ghosh-92] и приложении входной последовательности  $\bar{X}$  определяется выражением:

$$P(\bar{X}) = 0,5 \cdot V^2 \cdot C \cdot f \cdot A(\bar{X}) , \quad (2)$$

где:

- $V$  - напряжение работы схемы;
- $C$  - физическая ёмкость выхода вентиля;
- $f$  - частота работы схемы;

$A(\bar{X})$  - переключательная активность схемы, т.е. число событий при моделировании на заданном входном наборе или последовательности.

Анализируя данное выражение видно, что первые три параметра зависят от технологических характеристик ЦУ. Более того, для реализованного по определенной технологии ЦУ вклад данных параметров в динамическое рассеивание тепла будет определяться некоторой константой. Только параметр  $A(\bar{X})$  определяется входной последовательностью, на которой работает ЦУ.

Таким образом, для оценки рассеиваемой тепловой мощности  $P(\bar{X})$  с точностью до постоянного коэффициента нам необходимо вычислить параметра переключательной активности схемы  $A(\bar{X})$ . Математически он задаётся следующим выражением:

$$A(\bar{X}) = \sum_{i=1}^l \sum_g A_g^i, \quad (3)$$

где:

$l$  - длина входной последовательности  $\bar{X}$  (число входных наборов);

$A_g^i$  - активность вентиля  $g$  при работе на входном наборе с номером  $i$ .

Активность вентиля определяется следующим образом:

$$A_g^i = \begin{cases} 1, & \text{если выход вентиля } g \text{ изменился;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (4)$$

Видно, что для вычисления параметра переключательной активности схемы  $A(\bar{X})$ , необходимо выполнить моделирование работы ЦУ на заданной входной последовательности. В нашем случае для вычисления  $P(Z_1, X_1, X_2)$  необходимо записать начальное состояние схемы  $Z_1$ , выполнить моделирование на наборе  $X_1$  без подсчёта переключательной активности, после чего подать набор  $X_2$  и выполнить моделирование с оценкой параметра  $A(X_2)$ . Полученное значение с точностью до константы будет оценивать  $P(Z_1, X_1, X_2)$ .

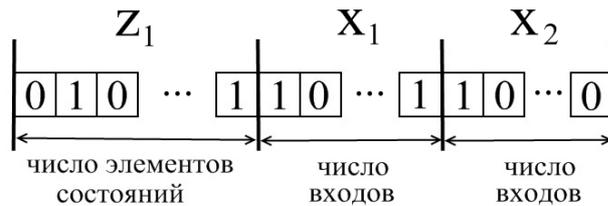
#### **Генетический алгоритм.**

Для оценки пикового потребления энергии в схеме необходимо найти такую тройку объектов  $(Z_1, X_1, X_2)$ , которая максимизирует функционал (1). В общем случае данная задача носит переборный характер и является NP-полной. В последнее время широкое распространение для решения задач подобного рода получили генетические алгоритмы [Скобцов, Ивнов2008]. Мы также предлагаем для решения рассматриваемой задачи использовать ГА.

Будем строить ГА конструктивно, задавая его компоненты.

В качестве особи будем использовать двоичную последовательность. Одна такая последовательность кодирует сразу тройку объектов  $(Z_1, X_1, X_2)$  (рис.2).

С каждой особью ассоциируется численное значение, называемое оценочной функцией, которое показывает: насколько хорошо данная особь решат поставленную задачу. В качестве оценочной функции используется выражение



(3). Произвести вычисление параметра  $A(\bar{X})$  позволяет любой алгоритм событийного моделирования работы цифровых схем. Для решения данной задачи использовался описанный ранее алгоритм [Иванов-Скобцов-Параллельное моделирование] с нулевыми задержками распространения сигнала.

С описанными выше компонентами генетический алгоритм оценки пикового потребления мощности цифровой схемой может быть представлен в виде следующего псевдокода.

```

ГА_оценка_пикового_потребления(схема, параметры)
{
  ВводОписанияСхемы();
  Популяция=ПостроениеНачальнойПопуляции();
  ОценитьПопуляцию(Популяция);
  пока ( НедостигнутКритерийОстановки() )
  {
    Позиция=0;
    для ( i=0 ; i<ЧислоОсобей ; i++ )
    {
      Родитель1=ВыбратьОсобь(Популяция);
      Родитель2=ВыбратьОсобь(Популяция);
      Потомок=Скрещивание(Родитель1, Родитель2);
      Потомок=Мутация(Потомок);
      ДобавитьВПромежуточнуюПопуляцию(Потомок, Позиция);
      Позиция++;
    }
    Популяция=ПостроитьНовуюПопуляцию(Популяция,
      ПромежуточнаяПопуляция);
  }
  Решение=ВыборЛучшейОсобь(Популяция);
}
  
```

### Экспериментальные данные.

При разработке генетических алгоритмов решения конкретной задачи важным является этап подбора эвристических констант. Это осуществляется на основании предварительных экспериментов. Мы не будем полностью описывать данную фазу исследования, поскольку она является достаточно «традиционной». Для примера покажем выбор вероятности операции мутации. На рис.2 приведён график зависимости достигнутой оценки наилучшей особи от значения параметра вероятности мутации. Эксперименты проводились со схемой s1269, усреднение проводилось по 100 экспериментам. Видно, что в каче-



стве параметра следует выбрать  $P_{мут} = 0,05$ , поскольку экстремум функции соответствует данному значению. Другие значения эвристических констант составили:  $P_{скр} = 0,99$ , число особей в популяции = 100, максимальное число поколений = 100, число поколений без улучшения оценки = 20, замене новыми особями на одной итерации подвергается 80% популяции.

В качестве апробации эффективности предложенного алгоритма использовались схемы из международного каталога ISCAS-89 [ISCAS]. Численные результаты экспериментов приведены в табл.1. В колонке «генетический алгоритм» приведены результаты работы предложенного алгоритма. Для сравнения его эффективности в колонке «случайный метод» даны результаты оценки при случайной генерации тройки 500 000 объектов  $(Z_1, X_1, X_2)$ . Результаты обеих серий экспериментов содержат три колонки: «число событий» - параметр рассеивания тепла, который соответствует формуле (3); «вентильная активность» - показывает среднее число переключений вентиля при приложении входного набора  $X_2$ , численно равен отношению параметра «число событий» к числу элементов в схеме; «время работы» - показывает время выполнения соответствующего алгоритма.

### Выводы

В статье рассматривается задача оценки пикового рассеивания тепла для больших интегральных схем, построенных по КМОП-технологии. Задача сводится к построению входной последовательности длины два. Для её решения предложен генетический алгоритм. По результатам проведённых машинных экспериментов видно, что генетический алгоритм позволяет найти более высокую оценку пикового значения рассеивания тепла в заданной схеме в сравнении со случайным методом генерации решений. При этом время работы генетического алгоритма существенно меньше.

### Литература

Табл.1. Численные результаты экспериментов.

схема	число элементов в схеме	случайный метод			генетический алгоритм		
		число событий	вентиляная активность	время, мин:сек	число событий	вентиляная активность	время, мин:сек
s1196	578	902	1,56	3:18	990	1,73	0:06
s1238	557	880	1,58	3:41	979	1,76	0:05
s1269	637	1831	2,87	2:58	1887	2,96	0:28
s1423	756	1217	1,61	3:07	1233	1,63	0:46
s1488	689	1322	1,92	3:14	1322	1,92	0:03
s1494	683	1322	1,94	3:16	1322	1,94	0:03
s3271	1731	1054	0,61	3:49	1208	0,70	0:25
s3330	2037	2348	1,15	5:18	2476	1,22	0:48
s3384	1940	581	0,30	3:48	615	0,32	0:21
s4863	2514	7918	3,15	6:35	8875	3,53	1:05
s5378	3045	2091	0,69	4:30	2177	0,71	0:35
s6669	3460	1523	0,44	5:25	1643	0,47	0:52
s9234	5869	2534	0,43	6:13	2538	0,43	0:19
s13207	8775	665	0,08	8:58	684	0,08	0:28
s15850	10473	5752	0,55	13:14	5752	0,55	0:27
s35932	18151	44463	2,45	35:22	44486	2,45	4:32
s38417	23952	2794	0,12	20:40	2821	0,12	1:25
s38584	20998	9231	0,44	27:47	9231	0,44	1:16

1. Piguet C. Low-power CMOS circuits: technology, logic design and CAD tools / C. Piguet.- CRC/Taylor & Francis, 2005.- 440p.
2. Najm F.N. Power estimation in sequential circuits / F.N. Najm, S. Goel, I.N.Hajj // Proc Design Automation.- 1995.- P.635-640.
3. Tsui C. Power estimation methods for sequential logic circuits / C. Tsui, J. Monterio, M. Pedram, A. Despain and B. Lin // IEEE Trans. on VLSI Systems.- 1995.- V.3, №3.- P.406-416.
4. Devadas S. Estimation of power dissipation in CMOS combinational circuits using Boolean function manipulation / S. Devadas, K. Keutzer, J. White // IEEE Trans. CAD.- 1995.- P.373-383.
5. Kriplani H. Resolving signal correlations for estimating maximum currents in CMOS combinational circuits / H. Kriplani, F. Najm, P. Yang, I. Hajj // Proc. Design Automation Conf.- 1993.- P.384-388.
6. Manne S. Computing the maximum power cycles of a sequential circuit / S. Manne, A. Prado, R.I. Bahar etc. // Proc. Design Automation Conf.- 1995.- P.23-28.
7. Wang C.-Y. Maximum power estimation for sequential circuits using a test generation based technique / C.-Y. Wang, K. Roy, T.-L. Chou // Proc. of IEEE Custom Integrated Circuits Conf.- 1996.- P.229-232.
8. Shen A. An Average Power Dissipation and Random Pattern Testability of CMOS Combinational Logic Networks / A. Shen, A. Ghosh, S. Devadas, K. Keutzer // Proc. IEEE International Conference on Computer-Aided Design.- 1992.- P.402-407.
9. Hsiao M.S. Peak power estimation using genetic spot optimization for large VLSI Circuits / M.S. Hsiao // Proc. of Design, automation and test in Europe conference.- 1999.- P.175-179.
10. Скобцов Ю.А. Основы эволюционных вычислений / Ю.А. Скобцов.- Донецк:ДонНТУ, 2008.- 326с.
11. Иванов Д.Е. Генетические алгоритмы построения идентифицирующих последовательностей для цифровых схем с памятью / Д.Е. Иванов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія:

“Обчислювальна техніка та автоматизація”. Випуск 14(129).-Донецьк: Дон-НТУ. – 2008.- С.97-106.

12. Brgles F. Combinational profiles of sequential benchmark circuits / F. Brgles, D. Bryan, K. Kozminski // International symposium of circuits and systems, ISCAS-89. – 1989. – P.1929-1934.

**Іванов Д.Є., Васяєва Т.О. Генетичний алгоритм оцінки пікового розсіювання тепла для великих інтегральних схем.**

Розглядається задача оцінювання пікового розсіювання теплової енергії для великих і надвеликих інтегральних схем, побудованих за КМОП технологією. Завдання зводиться до побудови двотактної вхідної послідовності. Запропоновано генетичний алгоритм вирішення задачі. Наводяться результати машинних експериментів на схемах міжнародного каталогу ISCAS-89.

Ключові слова: цифрова схема, розсіювання тепла, генетичний алгоритм.

**Ivanov D.E., Vasyaeva T.A. Genetic algorithm for evaluating of peak heat dissipation for large integrated circuits.**

The problem of the peak power estimation for VLSI circuits built in CMOS technology is considered. The problem is reduced to the constructing of the two-pattern input sequence. A genetic algorithm for solving this problem is proposed. The results of computer experiments on ISCAS-89 benchmarks are presented.

Keywords: digital circuit, heat dissipation, the genetic algorithm.

Рецензент Скобцов Юрий Александрович, д.т.н., проф., зав. каф., Дон-НТУ.

*Статья подана  
22.03.2011.*