

УДК 681.518

Д.Е. ИВАНОВ¹, Р. ЗУАУИ²¹Институт прикладной математики и механики НАН Украины, Украина²Донецкий национальный технический университет, Украина

АЛГОРИТМ СИМУЛЯЦИИ ОТЖИГА ОПТИМИЗАЦИИ РАССЕЙВАНИЯ ТЕПЛА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ТЕСТОВ

В данной статье предлагается новый подход к решению задачи построения тестов цифровых устройств с минимальным рассеиванием тепла, который основан на понятии избыточности тестовых последовательностей. Данный подход состоит из трех последовательных этапов: генерация множества избыточных тестовых последовательностей, оценка их свойств и выбор оптимального подмножества. Особенностью подхода является то, что последний этап основан на алгоритме симуляции отжига. Приводятся результаты машинных экспериментов для схем каталога ISCAS-89, подтверждающие эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: цифровая последовательностная схема, генерация тестов, диагностическая избыточность, симуляция отжига, рассеивание тепловой энергии.

Введение

Требования рынка электроники заставляют производителей выпускать продукцию с минимальным потреблением электрической энергии, что вписывается в современную тенденцию к снижению потребления человечеством любого вида энергии. Для цифровой техники известно [1], что пиковое потребление происходит во время стартового тестирования, поскольку в этот момент задействована максимальная часть логики устройства. Наряду с полнотой теста и его длиной параметр рассеивания тепловой энергии является одной из наиболее часто применяемых метрик при оценке качества входных диагностических последовательностей.

Для решения задачи построения тестов с минимальным рассеиванием тепла было предложено несколько подходов. Один из них – адаптация известных алгоритмов, в которые включены дополнительные ограничения. Например, в [2] предложен такой генератор тестов на основе алгоритма РОДЕМ: при этом присвоение значений на неопределенных линиях происходит таким образом, чтобы минимизировать число событий. В работе [3] те же цели достигаются за счет упорядочивания входных векторов в заранее построенном тесте.

В последнее время для решения многих задач технической диагностики широкое применение нашли недетерминированные методы, в частности, генетические алгоритмы [4-5]. Это связано с недостатками классических методов, основанных на преобразовании булевого представления схемы [6] или построения дерева решения [7], в которых происхо-

дит переполнение памяти, что делает их практически неприменимыми к реальному размеру современных цифровых устройств.

Авторами в последнее время активно изучается новая оптимизационная стратегия «симуляция отжига» (СО). Будучи заимствованной из области металлургии [8], она сохранила первоначальные термины, однако была развита как оптимизационный подход в работе [9]. Сама стратегия является концептуально более прозрачной и более простой в реализации в сравнении с генетическими алгоритмами. Это связано с тем, что в ней эволюция (улучшение свойств по решению целевой задачи) происходит для отдельно взятого потенциального решения. Это избавляет алгоритм от громоздких процедур обработки и построения популяций. В качестве апробации оптимизационных свойств данной стратегии авторы уже построили на ее основе одноуровневый алгоритм для генерации инициализирующих последовательностей [10] и показали его эффективность.

В данной работе будет предложен трехэтапный подход построения тестов с минимальным рассеиванием тепла, который основывается на понятии избыточного тестирования. Его особенностью является то, что в качестве алгоритма выбора оптимального множества подпоследовательностей в фазе 3 используется новая стратегия симуляции отжига.

Статья организована следующим образом. Во введении показана актуальность и связь с другими работами в данном направлении. В первом разделе описывается формальная постановка задачи и этапы ее решения. Во втором разделе описан алго-

ритм симуляції отжига вибору субоптимального підмножества входних послідовностей. В третьому розділі приводяться результати машинних експериментів з програмною реалізацією алгоритма. В заключенні робляться висновки і вказуються напрямки можливих подальших досліджень.

1. Общий подход решения задачи

В качестве модели в данной работе используются синхронные последовательностные схемы с нулевой задержкой распространения неисправностей и физической реализацией по КМОП технологии.

Целью работы является разработка алгоритма, который строит входные тестовые последовательности с минимальным рассеиванием тепла.

Решение указанной задачи осуществляется в три этапа:

1. Генерация избыточных по покрытию неисправностей входных последовательностей.
2. Оценка качества решения задачи для каждой из таких последовательностей.
3. Поиск оптимального подмножества входных последовательностей.

Первые два этапа являются подготовительными, а третий - задачей комбинаторной оптимизации и решается в нашем подходе с помощью алгоритма симуляции отжига.

Для формальной постановки задачи дадим определение избыточности входной тестовой последовательности.

Определение. Неисправность $f \in \tilde{F}_{\text{const}}$ обнаруживается (проверяется) заданной последовательностью $S = \{s_1, s_2, \dots, s_l\}$ с избыточностью r , если существует не менее чем r подпоследовательностей $s_1, s_2, \dots, s_{ll} \in S$, где $ll \geq r$, таких, что каждая из них проверяет неисправность f . При этом r называется фактором избыточности. Здесь \tilde{F}_{const} - сжатое по эквивалентности множество одиночных константных неисправностей.

Определение. Входная тестовая последовательность $s_{\text{вх}}$ обладает полной избыточностью r , если каждая неисправность класса \tilde{F}_{const} проверяется данной последовательностью не менее r раз.

Определение. Избыточная полнота последовательности $s_{\text{вх}}$ при избыточности r равна

$$P_r(s_{\text{вх}}) = \frac{m_r}{|\tilde{F}_{\text{const}}|}, \quad (1)$$

где $m_r = |\tilde{F}_{\text{const}}^r(s_{\text{вх}})|$ - число неисправностей из множества \tilde{F}_{const} , которые проверяются не менее r раз заданной входной последовательностью.

Этап 1 решения задачи заключается в построении входной последовательности (набора подпоследовательностей) $S = \{s_1, s_2, \dots, s_l\}$, которая обладает требуемой избыточной полнотой при фиксированной избыточности r . При этом для каждой фиксированной неисправности из $\tilde{F}_{\text{const}}^r(s_{\text{вх}})$ гарантируется существование не менее r входных подпоследовательностей, принадлежащих S таких, что каждая из них обнаруживает данную неисправность. Гарантирование избыточности для некоторой неисправности позволяет в дальнейшем в зависимости от целей задачи выбирать ту или иную из последовательностей.

Этап 2 заключается в вычислении оценки рассеивания тепла $E(s_i)$ для каждой подпоследовательности $s_i \in S$. Задача фактически заключается в моделировании работы схемы на заданной входной последовательности и получении на его основании необходимых данных.

Показатель рассеиваемой тепловой энергии при моделировании заданной входной последовательности $s_{\text{вх}}$ существенно зависит от технологии физической реализации микросхем. Наиболее распространенной в настоящее время технологией производства микросхем является КМОП. Активность моделируемой схемы, вызванная приложением заданной входной последовательности, влияет только на динамическую составляющую рассеиваемой энергии, тогда как статическая часть никак от нее не зависит. Также известно, что доминирующей является динамическая составляющая рассеивания тепла.

Известно [11], что для КМОП технологии рассеиваемая мощность для заданной входной последовательности $s_{\text{вх}}$ определяется выражением

$$E(s_{\text{вх}}) = 0,5 \cdot V^2 \cdot C \cdot f \cdot A(s_{\text{вх}}), \quad (2)$$

где V - напряжение работы схемы, C - физическая емкость на выходе вентиля, f - частота работы схемы, $A(s_{\text{вх}})$ - число событий при моделировании на заданной входной последовательности.

Таким образом, для оценки рассеиваемой тепловой мощности с точностью до постоянного коэффициента нам необходимо вычислить параметр $A(s_{\text{вх}})$, который в свою очередь имеет следующее представление:

$$A(s_{\text{вх}}) = \sum_{i=1}^L \sum_g A_g^i, \quad (3)$$

где L - длина входной последовательности (число входных наборов), а активность вентиля определяется выражением:

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

Произвести вычисление параметра $A(s_{\text{вх}})$ позволяет сделать любой алгоритм событийного моделирования работы неисправных схем. Авторами для данной задачи описанный ранее алгоритм [12] с нулевыми задержками распространения сигнала.

2. Алгоритм симуляции отжига выбора множества подпоследовательностей

Этап 3 основан на алгоритме СО и заключается в выборе подмножества последовательностей $S' \subset S$ такого, что выполняются два следующих условия:

$$P(S') = P(S), \quad (5)$$

$$E(S') \rightarrow \min. \quad (6)$$

Рассмотрим пример, который раскрывает суть этапа. Пусть для некоторой схемы множество проверяемых неисправностей $\tilde{F}_{\text{const}} = \{f_1, f_2, \dots, f_{10}\}$, тестовая последовательность $S = \{s_1, s_2, \dots, s_6\}$, где подпоследовательности $s_i, i = \overline{1,6}$ имеют следующие характеристики:

$$s_1: E(s_1) = 45, F^1(s_1) = \{1, 3, 5, 7, 9, 10\};$$

$$s_2: E(s_2) = 15, F^1(s_2) = \{1, 3, 5, 10\};$$

$$s_3: E(s_3) = 13, F^1(s_3) = \{2, 4, 6\};$$

$$s_4: E(s_4) = 30, F^1(s_4) = \{1, 2, 5, 7, 8, 10\};$$

$$s_5: E(s_5) = 10, F^1(s_5) = \{6, 7, 8, 10\};$$

$$s_6: E(s_6) = 15, F^1(s_6) = \{1, 2, 8, 9, 10\}.$$

Пусть в качестве возможных решений выступают следующие подмножества S :

$$S_1 = \{s_1, s_3, s_5\} \subset S, \quad S_2 = \{s_1, s_3, s_6\} \subset S,$$

$$S_3 = \{s_2, s_3, s_5\} \subset S \quad \text{и} \quad S_4 = \{s_1, s_3, s_4, s_6\} \subset S.$$

Рассчитаем характеристики данных последовательностей:

$$S_1: E(S_1) = 68, P(S_1) = 100\%;$$

$$S_2: E(S_2) = 73, P(S_2) = 100\%;$$

$$S_3: E(S_3) = 38, P(S_3) = 90\%;$$

$$S_4: E(S_4) = 103, P(S_4) = 100\%.$$

Из расчетов видно, что из множества потенциальных решений сразу необходимо исключить набор S_3 , поскольку он обладает худшими тестовыми свойствами относительно других наборов. Из наборов с наилучшими тестовыми свойствами необходимо выбрать тот, который обладает наименьшим параметром рассеивания, т.е. S_1 . Также из примера видно, что набор S_4 является избыточным, и из него без потери полноты можно исключить либо последовательность s_4 (рассеивание тепла = 73), либо последовательность s_6 (рассеивание тепла = 88). Хотя в этих случаях полнота теста останется равной 100%, параметр рассеивания мощности окажется больше, чем у других наборов и данное множество также не будет выбрано в качестве оптимального.

Введем некоторые базовые понятия, которые необходимы для описания стратегии (алгоритма) симуляции отжига. Данная стратегия представляет собой итеративный алгоритм улучшения свойств некоторого потенциального решения - конфигурации, которое для шага i алгоритма обозначается K_i . С каждой конфигурацией K_i соотносится функция, которая показывает качество данной конфигурации с точки зрения решения задачи, и называется функцией оценки: $C_i = C(K_i)$. Также дополнительно вводятся модифицирующие операции, которые позволяют для точки K_i строить окружение - некоторое множество точек с измененными характеристиками. Вычисление функций оценки для точек из окружения может показать, что их качество ухудшилось по сравнению с исходной точкой. Принимать такие ухудшения или отклонять показывает распределение температур $\{T_i\}$. Смысл построения данного распределения заключается в том, что при больших температурах вероятность принять худшие решения выше, чем при более низких. Выбор распределения температур $\{T_i\}$ задает скорость остывания субстанции и, таким образом, существенно влияет результаты поиска.

На основе этого дадим краткое описание алгоритма симуляции отжига.

1. Алгоритм начинает работу с построения начальной конфигурации $K_1 = K_1$ и ее оценке $C_1 = C(K_1)$. Также для выбранного распределения температур выбирается начальная температура $T_1 = T_1$. Следующие шаги алгоритма повторяются итеративно вплоть до нахождения решения на одном из них, либо до достижения верхней границы числа итераций.

2. Для текущей температуры T_i путем применения модифицирующих операций к текущей конфигурации K_i строится ее окружение, состоящее из N конфигураций:

$$O_i^N = O(K_i) = \{K_i^1, K_i^2, \dots, K_i^N\}$$

3. Для каждой конфигурации K_i^j из окружения O_i^N вычисляется ее оценка $C_i^j = C(K_i^j)$, а также параметр улучшения оценки $\Delta C_i^j = C_i^j - C_i$, на основании которого происходит/не происходит замещение текущей конфигурации K_i :

$$K_{i+1} = \begin{cases} K_i^j, & \text{если } \Delta C_i^j < 0; \\ K_i & \text{с вероятностью} \\ P = \exp(-\Delta C_i^j / kT_i), & \text{если } \Delta C_i^j > 0; \end{cases} \quad (7)$$

где k - константа Больцмана.

4. Изменяется счетчик итераций $i = i + 1$, а также в соответствии с выбранным распределением температур изменяется текущая температура:

$$T_{i+1} = \text{обновить}(T_i)$$

5. Переход к шагу 2.

В качестве конфигурации в предлагаемом алгоритме выступает множество номеров подпоследовательностей из S , которые фактически задают входную последовательность. Номера в разных конфигурациях изменяются в ходе эволюции, также как и их число. Мы не учитываем порядок номеров в конфигурациях.

Используются три «классические» операции возмущения для множеств: обмен элементами, удаление элемента и добавление случайного элемента. При этом выбор между типами операций происходит также случайно.

Алгоритм делится на две фазы, в каждой из которых применяется свой вид функции оценки.

В *первой фазе* из множества S выбираются такие подмножества, для каждого из которых выполнено условие $P(S') = P(S)$, т.е. подпоследовательности, входящие в множество S' обнаруживают все те неисправности, которые обнаруживают последовательности из S . Функция оценки при этом имеет вид:

$$C(K_i) = P(S) - P(S') \quad (8)$$

Как только будет обнаружен набор подпоследовательностей, для которого выполнено условие (5), алгоритм СО сразу переходит к фазе 2 оптимизации данного набора.

Во *второй фазе* развитие конфигурации идет таким образом, чтобы уменьшить рассеивание тепла для

подмножества последовательностей и оценка имеет вид:

$$C(K_i) = E_{\max} - E_i \quad (9)$$

где $E_{\max} = E(S)$. При этом операции возмущения, которые приводят к нарушению условия (5) считаются некорректными.

Эффективность алгоритма СО измеряется уменьшением рассеивания тепла для конфигураций на входе и выходе фазы 2.

Отметим, что поскольку при одном распределении температур будут использоваться две различные функции оценки для различных фаз решения задачи, то экспериментально необходимо подбирать два значения константы Больцмана.

3. Экспериментальные данные

Для алгоритмов трех этапов решения задач авторами была произведена их программная реализация. Для первого этапа построения избыточных тестовых последовательностей был адаптирован описанный ранее авторами генетический алгоритм построения тестов [13]. Изменения касались того фрагмента кода, в котором определяется вносить ли неисправность для моделирования на данном входном наборе. В модифицированной версии алгоритма для внесения неисправности на моделирование в первом из указанных условий мы установили требование, чтобы неисправность была проверена менее γ раз, где γ - параметр избыточности. Также исходный генератор тестов строил одну последовательность, не фиксируя в ней отдельные подпоследовательности. Наш алгоритм использует эту существенную информацию. Поэтому в структуру данных, которая хранит тестовые наборы, было внесено изменение, которое для тестовой последовательности фиксирует такты времени, в которые начинаются подпоследовательности.

Для второго этапа был адаптирован ранее предложенный авторами алгоритм событийного моделирования цифровых схем с неисправностями [12]. В результате работы строился файл, который содержал следующую информацию:

- общее число подпоследовательностей;
- общее число неисправностей в сжатом списке;
- далее для каждой подпоследовательности: длина, число событий моделирования, список, содержащий номера проверяемых неисправностей.

Для третьего этапа был программно реализован описанный выше алгоритм СО. Объем программной реализации на C++ составил около 1100 строк кода. Эксперименты проводились на инструментальной

ЭВМ с процессором Core2Quad 2.4ГГц, оперативная память 2Гбайта.

Для выбора оптимальных значений эвристических констант была проведена серия предварительных экспериментов. Для краткости изложения мы не показываем этапы исследования алгоритма по подбору констант. Отметим, что в результате были выбраны следующие значения:

- параметр избыточности $r = 5$, $T_{нач} = 120$, $T_{кон} = 1$;
- число рассматриваемых конфигураций для одной температуры равно 450;
- константа Больцмана этапа 1 $k_1 = 100$;
- константа Больцмана этапа 2 $k_2 = 4000$;
- число итераций без улучшения = 50.

Далее были проведены машинные эксперименты со схемами каталога ISCAS-89 [14]. Их результаты приведены в табл. 1. Столбец «уменьшение рассеивания тепла» показывает результат относительно набора подпоследовательностей, с которым проис-

ходит переход в фазу 2 алгоритма СО. Анализируя результаты, можно сделать следующие выводы:

- наилучшие результаты около 90% получены для легкотестируемых схем;
- наихудшие результаты получены для труднотестируемых схем, для которых на этапе 1 сгенерировано небольшое число подпоследовательностей.

Заключение

В статье предложен подход построения тестовых последовательностей с минимальным рассеиванием тепловой энергии. Подход состоит из трех последовательных этапов: построение избыточной тестовой последовательности, оценка рассеивания тепла для каждой подпоследовательности, выбор оптимального множества подпоследовательностей. Для решения задачи третьего этапа предложено использовать алгоритм симуляции отжига. Эффективность предложенного подхода демонстрируется на контрольных схемах ISCAS-89, при этом среднее уменьшение рассеивания тепла составило 86.34%, достигая 93.28% в лучших случаях.

В качестве дальнейших исследований можно отметить применение данного подхода к другим задачам оптимизации входных последовательностей, например, уменьшении их длины.

Литература

1. Zorian Y. A Distributed BIST Control Scheme for Complex VLSI Devices / Y. Zorian // Proc. 11th IEEE VLSI Test Symposium – April 1993. – P. 4-9.
2. Wang S. ATPG for Heat Dissipation Minimization During Test Application / S. Wang, S. Gupta // Proc. IEEE International Conference. – October 1994. – P. 250-258.
3. Dabholkar V. Two Techniques to Minimize Power Dissipation During Test Application in Scan Circuits / V. Dabholkar, S. Chakravarty // IEEE Asian Test Conference. – November 1994. – P. 324-329.
4. Goldberg D.E. Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning / D.E. Goldberg // Addison-Wesley, 1989. – 432p.
5. Скобцов Ю.А. Основы эволюционных вычислений / Ю.А. Скобцов – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 326 с.
6. Ghosh A. Sequential Logic Testing and Verification / A. Ghosh, S. Devadas, A.R. Newton // Kluwer Academic Publishers, 1992.
7. Coudert O. A Unified Framework for Formal Verification of sequential Circuits / O. Coudert, J.C. Madre // ICCAD-90: IEEE Intl. Conf. on Computer Aided Design. – November 1990. – P. 134-137.

Таблица 1
Экспериментальные результаты

Схема	Полнота теста, %	Уменьшение рассеивания тепла, %	Время работы, сек
s298	85,71	92,02	1
s344	96,19	92,97	1
s349	95,42	91,73	1
s382	89,47	91,02	1
s386	73,95	90,77	1
s400	88,21	93,08	<1
s444	79,32	88,72	1
s526	8,65	72,53	<1
s635	0,15	54,43	<1
s641	44,75	88,91	3
s713	81,93	91,56	1
s832	48,05	89,74	4
s938	4,40	86,31	<1
s967	7,41	89,56	1
s1196	91,22	84,19	23
s1238	77,86	76,32	6
s1269	17,87	87,77	1
s1423	73,47	81,89	5
s1488	92,19	83,25	20
s1494	95,22	89,55	9
s1512	4,86	84,75	1
s2081	8,29	93,28	<1
s3271	96,57	89,60	64
s3330	66,45	88,28	5
В среднем:		86,34	

8. Metropolis N. Equation of State Calculation by Fast Computing Mashines / N. Metropolis, A.W. Rosenbluth, M.N. Rosenbluth, A.H. Teller, E. Teller // *J. of Chem.Phys.* – 1953. – Vol.21. – No.6. – P. 1087-1092.
9. Kirkpatrick S. Optimization by simulating annealing / S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, M.P. Vecchi // *Science*, 220. – 1983. – P. 671-680.
10. Иванов Д.Е. Алгоритм построения инициализирующих последовательностей цифровых схем, основанный на стратегии симуляции отжига / Д.Е. Иванов, Р. Зуауи // *Искусственный интеллект*, 2009. - №4. – С. 415-424.
11. 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.* – P. 402-407.
12. Иванов Д.Е. Параллельное моделирование неисправностей для последовательностных схем / Д.Е. Иванов, Ю.А. Скобцов // *Искусственный интеллект.* – 1999. – №1. – С. 44-50.
13. Skobtsov Yu.A. Evolutionary approach to the test pattern generation for the sequential circuits / Yu.A. Skobtsov, D.E. Ivanov // *Радиоэлектроника и информатика* – 2003. - №3. – С. 46-51.
14. Brgles F. Combinational profiles of sequential benchmark circuits / F. Brgles, D. Bryan, K. Kozminski // *International symposium of circuits and systems, IS-CAS-89.* – 1989. – P. 1929-1934.

Поступила в редакцию 20.02.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. кафедры автоматизированных систем управления Ю.А. Скобцов, Донецкий национальный технический университет, Украина.

АЛГОРИТМ СИМУЛЯЦИИ ОТЖИГА ОПТИМИЗАЦИИ РАССЕЙВАНИЯ ТЕПЛА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ТЕСТОВ

Д.Е. Иванов, Р. Зуауи

У даній статті пропонується новий підхід до вирішення задачі побудови тестів цифрових пристроїв з мінімальним розсіюванням тепла, який заснований на понятті надлишковості тестових послідовностей. Даний підхід складається з трьох послідовних етапів: генерація множини надлишкових тестових послідовностей, оцінка їх властивостей та вибір оптимальної підмножини. Останній етап є задачею комбінаторної оптимізації та його рішення базується на алгоритмі симуляції віджигу. Наводяться результати машинних експериментів для схем каталога ISCAS-89, що підтверджують ефективність запропонованого підходу.

Ключові слова: цифрова послідовнісна схема, генерація тестів, діагностична надлишковість, симуляція віджигу, розсіювання теплової енергії.

THE SIMULATING ANNEALING ALGORITHM FOR THE OPTIMIZATION OF THE POWER DISSIPATION OF THE INPUT TEST SEQUENCES

D.E. Ivanov, R. Zouaoui

In this paper a new approach for solving the problem of the optimization of the power dissipation under test sequence application is proposed. This approach is based on the redundancy of test sequences and consists of the steps: redundant test generation, evaluating power dissipation for generated test sequences and construction subset of sequences with optimal parameters. The last stage is the task of the combinatorial optimization and its solution is based on the simulating annealing algorithm. Also we give the results of the computer experiments on the ISCAS-89 benchmark circuits that shows the effectiveness of the propose approach.

Keywords: sequential circuit, test generation, diagnostic redundancy, simulating annealing algorithm, power dissipation.

Иванов Дмитрий Евгеньевич – канд. техн. наук, доц., старший научный сотрудник отдела теории управляющих систем Института прикладной математики и механики НАН Украины, Донецк, Украина e-mail: ivanov@iamm.ac.donetsk.ua.

Зуауи Рамзи – аспирант Донецкого национального технического университета, Донецк, Украина e-mail: zouaoui_ram@hotmail.com.