

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
СИНТЕЗА ТЕСТОВ**

П. П. ГРИГОРЬЕВ, Н. П. БАЙДА

(Представлена научным семинаром кафедры вычислительной техники)

Наибольшая эффективность проверок при программном контроле цифровых устройств достигается решением следующих основных задач [1]:

1. Построением математической модели контролируемого устройства, позволяющего находить минимальное множество входных воздействий, с помощью которых можно гарантировать заданную полноту проверки или локализацию неисправностей.

2. Разработкой методов нахождения указанного множества входных воздействий, использующих математическую модель и не требующих перебора всех возможных вариантов неисправностей, так как такой перебор для сложных устройств затруднителен даже при использовании быстродействующих ЭЦВМ.

3. Упорядочением найденной для данного устройства последовательности входных воздействий для оптимизации процедуры контроля.

4. Разработкой технических средств для реализации найденных проверок и анализа их результатов (разработкой устройств, генерирующих тестовые последовательности входных сигналов, и индикаторных устройств).

Если решение третьей и четвертой задач не имеет особых трудностей, то решение второй и связанной с ней первой задач наталкивается на значительные трудности.

Основной причиной трудности решения первой и второй задач синтеза тестов цифровых устройств является высокая размерность этих задач. Источников высокой размерности два — большое количество всех возможных входных воздействий (входных наборов или входных последовательностей) и большое число всех возможных, особенно кратных, неисправностей. Причем объем трудностей существенно зависит от вида схем, составляющих цифровое устройство (комбинационные они или последовательностные). В большей степени решены задачи синтеза тестов для комбинационных схем.

**Комбинационные схемы**

Существует три подхода к решению задач синтеза тестов для комбинационных схем: структурный, функциональный и аналитический [2]. При использовании функционального подхода предполагается, что задан список устойчивых логических неисправностей и строится таблица функций неисправностей (ТФН). В этой таблице для всех возможных наборов указывается значение выходных сигналов исправной

схемы и схем, соответствующих каждой неисправности из заданного списка. ТФН являются исходным материалом для получения тестовых входных наборов.

Метод обладает рядом преимуществ. Универсальность его позволяет решать разнообразные задачи: получать строго минимальные множества диагностирующих и проверяющих тестов, обнаруживать и локализовать неисправности в цифровых блочных объектах, получать минимальное количество контрольных точек и т. д. Метод полностью формализован и может быть легко реализован на ЭЦВМ.

Однако чрезмерная громоздкость алгоритмов не позволяет использовать этот метод для схем, имеющих более 8—10 входов и 100 элементов даже при машинной реализации.

Тем не менее этот метод имеет широкое применение для автоматизированного синтеза тестов при несложных схемах и в сочетании с другими методами синтеза тестов. Все существующие простые алгоритмы синтеза тестов этого метода могут быть сведены к четырем [3], из которых большими преимуществами обладает алгоритм, предложенный С. В. Яблонским [4], который позволяет получать тесты с очень небольшим разбросом длины теста. Сущность алгоритма заключается в следующем:

1. По ТФН строится выражение, названное С. В. Яблонским «выражение вида ПΣ».

2. В ПΣ выбирается набор, который встречается в наибольшем числе сомножителей (если таких сомножителей несколько, то выбирается один из них).

3. Из выражения ПΣ вычеркиваются сомножители, которые входят в этот набор.

Для остальной части ПΣ процедура повторяется до тех пор, пока все сомножители не будут вычеркнуты.

Этот алгоритм в сочетании с алгоритмом Сешу и Фримена [5] был использован В. А. Данильченко для автоматизированного синтеза тестов для СЦВМ, сложность описания которых составляет  $4 \cdot 10^3$  букв.

При структурном подходе [2] основой для построения тестов служит логическая схема устройства. Основным понятием, поясняющим суть этого подхода, является понятие чувствительности. Причем необходимо различать локальную и глобальную чувствительность. Понятие локальной чувствительности применимо к отдельной логической компоненте схемы. Предположим, что логическая компонента реализует некоторую булеву функцию  $f(x_1, \dots, x_n)$  от  $n$  аргументов. Вход  $x_i$  является чувствительным (или функция  $f(x_1, \dots, x_n)$  чувствительна к входной переменной  $x_i$ ) при наборе  $\delta_i = x_1^{\alpha_1} x_2^{\alpha_2} \dots x_n^{\alpha_n}$ , где  $\alpha = 0$  или  $\alpha = 1$ , если

$$f(x_1^{\alpha_1}, \dots, x_i^{\alpha_i}, \dots, x_n^{\alpha_n}) \neq f(x_1^{\alpha_1}, \dots, \bar{x}_i^{\alpha_i}, \dots, x_n^{\alpha_n}),$$

т. е. изменение значения переменной  $x_i$  приводит к изменению значения выхода логической компоненты. Понятие глобальной чувствительности применено к схеме в целом. Схема чувствительна к входной переменной  $x_i$  при наборе  $\delta_i = x_1^{\alpha_1}, \dots, x_i^{\alpha_i}, \dots, x_n^{\alpha_n}$ , если изменение значения переменной  $x_i$  приводит к изменению сигнала на одном из выходов схемы. Понятие чувствительности для некоторой внутренней линии схемы сводится к понятию чувствительности входной переменной. Предположим, что на месте линии  $\alpha_i$  сделан разрез и часть схемы, для которой  $\alpha_i$  является выходом, отброшена. Теперь  $\alpha_i$  является входной переменной, и к ней может быть применено данное выше определение чувствительности. Обеспечив чувствительность схемы к выходу данного элемента, можно проверить его с помощью набора элементарных тестов элементов.

В литературе известно большое количество алгоритмов структурного подхода синтеза тестов. Причем следует отметить, что если при функциональном подходе имеется некоторая стабилизация в определениях используемых при синтезе, оценках преимуществ и недостатков подхода, то при структурном подходе наблюдается обратное: нет идентичных определений (в работах Элдрида и Рота [6] — метод активизации пути, у ряда советских авторов — метод существенных путей [7], метод подъема и спуска к выходам и входам схемы [8] и т. д.). Аналогично обстоит дело с оценками преимуществ и недостатков метода.

Большинство предложенных в литературе алгоритмов автоматизированного синтеза тестов или недостаточно формализованы для реализации на ЭЦВМ, или применены к схемам со значительными ограничениями (схемы без избыточности, неповторные схемы и другие), или слишком сложны и не могут быть применены к схемам большого порядка (несколько десятков входов и несколько сотен элементов). Из алгоритмов, в значительной степени преодолевающих эти недостатки, может быть назван алгоритм, описанный в [2]. Алгоритм применим для синтеза локально-оптимального множества проверяющих тестов для комбинационных схем без разветвлений. Алгоритм легко реализуется на ЭЦВМ и применим к схемам большого порядка.

Другим алгоритмом для автоматизированного синтеза тестов является алгоритм, предложенный в [9]. При разработке алгоритма использованы основные результаты работ Амара и Армстронга [10, 11].

Сущность метода заключается в активизации пути от входа схемы к выходу. Схема алгоритма нахождения тестовых наборов для данного пути заключается в следующем:

1. Считается, что данный путь активизирован и установлены компоненты пути по значениям П0 или П1. Для неустановленных входов устанавливаются такие значения, при которых путь становится активным.

2. Если имеются активно установленные компоненты с неустановленными входами, то их входы устанавливаются. Если установленные входные значения для неустановленного компонента определяют его значения, то компонент устанавливается соответственно этим значениям. Неустановленными остаются только входные компоненты неактивно установленных компонентов.

3. Если на шаге 2 получены противоречия, то путь нельзя активизировать по данному значению и следует перейти к другому его значению, или же, если все значения исчерпаны, к другому пути.

4.  $j := 1$ .

5. Если в уровне  $k - j$  нет неактивно установленных компонентов, то переход к шагу 9.

6. Образуется двоичная матрица  $A_{k-j}$ , столбцам которой соответствуют неактивно установленные компоненты уровня  $k - j$ , а строкам — входные компоненты для компонентов столбцов. Элемент матрицы  $a_{pq} = 1$ , если компонент  $q$  столбца, в противном случае  $a_{pq} = 0$ .

7. Вычисляется оператор  $\Sigma(A_{k-j})$  для получения очередного решения. Если нет решения, то переход к шагу 10.

8. Компонентам, соответствующим строкам решения по оператору  $\Sigma(A_{k-j})$ , присваиваются значения соответствующих компонентов столбцов матрицы  $A_{k-j}$ . Выполняется шаг 2. Если получается противоречие, то установленные в данном шаге компоненты превращаются в неустановленные и переход к шагу 7.

9.  $j := j + 1$ . Если  $j \neq k$ , то переход к шагу 6, если  $j = k$ , то тестовый набор получен, т. е. все входы схемы определяют тестовый набор, при этом неустановленные входы можно установить на любое значение. Выход из алгоритма.

10. Если  $j=1$ , то путь нельзя активизировать по данному его значению или другому пути.

11. Снимаются установки компонентов, установленные по оператору  $\Sigma(A_{k-j})$ ,  $j := j - 1$  и переход к шагу 7. С помощью данного алгоритма были синтезированы [9] тесты для реальной схемы, имеющей 34 входа, 57 компонентов и 88 путей. Программа занимает 500 ячеек оперативной памяти ЭВМ «Раздан-3», и время решения составляет 70 сек. Но этот алгоритм эффективен для схем, число путей которых намного меньше числа всевозможных входных комбинаций.

Третий подход к автоматизированному синтезу тестов — аналитический. Начало этому направлению было дано работами Армстронга [11], который предложил структурно-аналитическое описание схемы в виде эквивалентной нормальной формы (ЭНФ) функции выхода схемы. Сущность метода состоит в следующем:

1. Строится ЭНФ схемы.

2. На основании теоремы Армстронга находится тест для схемы.

Теорема Армстронга гласит следующее: «Некоторый тест для буквы, появляющийся в ЭНФ, активизирует соответствующий путь в схеме. Таким образом, если можно выбрать некоторый набор букв, соответствующий путям, которые в совокупности содержат все вершины схемы, и если может быть найден некоторый набор тестов, который проверяет по крайней мере одно появление каждой буквы на неисправности ( $\equiv 1$ ) и ( $\equiv 0$ ), то этот набор тестов обнаруживает любую неисправность схемы.

В своей работе Армстронг предположил, что метод ЭНФ является алгоритмом и может быть запрограммирован и использован при автоматизированном синтезе тестов. Но у этого метода есть существенный недостаток: он применим к схемам с ограниченным числом разветвлений и для больших схем, встречающихся на практике, число появлений букв становится настолько большим, что с трудом поддается обработке на ЭЦВМ. Достоинством этого метода является возможность анализа поведения схемы одновременно для нескольких множеств неисправностей, что снижает громоздкость вычислений, проводимых при построении тестов.

В последующих работах [6, 7] метод ЭНФ претерпел ряд изменений. Было показано, что он в формулировке Армстронга не всегда позволяет строить тесты для схем, и, соответственно, после устранения этого недостатка метод стал более универсальным и применимым для нахождения тестов на ЭВМ.

Эквивалентная нормальная форма представляет собой дизъюнкцию букв ЭНФ. Каждая буква ЭНФ состоит из входной переменной с индексом, являющимся последовательностью номеров элементов, по которым проходит сигнал с входа, обозначенного этой переменной, до выхода схемы. Разработанная методика автоматизированного синтеза тестов [14] предполагает сначала построение на основе анализа ЭНФ тестов для одновыходных комбинационных подсхем (фрагментов), на которые предварительно разбивается проверяемая многовыходная схема, а затем получение объединенных тестов для всей схемы.

Исходными данными для построения ЭНФ служит информация о том, какие логические функции реализуются элементами фрагмента, как эти элементы связаны между собой, с входом и выходом фрагмента. При подготовке исходных данных схема разбивается на фрагменты, а элементы фрагментов нумеруются последовательно восьмеричными номерами, причем первый номер присваивается выходному элементу фрагмента, входы фрагмента обозначаются латинскими буквами без индексов.

В основу алгоритма построения ЭНФ функции выхода фрагмента положен принцип подстановки, заключающийся в том, что в выражение функции выхода выходного элемента фрагмента, записанного относительно входов, последовательно подставляются выражения, представляющие собой функции выходов соответствующих элементов фрагмента, также записанные относительно входов этих элементов. Процесс подстановки заканчивается, когда будет получено выражение функции выхода выходного элемента фрагмента, зависящее только от входных переменных фрагмента, т. е. не содержащие цифр.

Недостатком этого алгоритма является большой расход памяти, даже при синтезе тестов для схем средней сложности.

В последнее время большое распространение получили графоаналитические методы синтеза тестов. Сущность этих методов заключается в следующем: комбинационная схема представляется в виде булева графа. И исходной информацией для синтеза тестов служит или матрица инцидентий [1], или матрица путей. Одним из алгоритмов, использующих графоаналитический метод, является алгоритм, предложенный Микони [15].

В основу предложенного метода синтеза проверяющих тестов ТП положен следующий принцип:

Тест ТП схемы должен обнаруживать неисправности всех логических элементов, входящих в данную схему.

Все неисправности логического элемента обнаруживаются его минимальным тестом. Следовательно, проверяющий тест комбинационной схемы может быть построен на основе композиции минимальных тестов логических элементов. При этом необходимо соблюдать следующие условия. Для проверяемого элемента нужно не только построить все тестовые наборы из его минимального теста, но и следить за тем, чтобы неисправность, обнаруживаемая каждым набором, влияла на контролируемый вход схемы. Таким образом, для получения контролируемого теста схемы нужно знать минимальные тесты (ТМ) логических элементов схемы и пути, по которым неисправности элементов распространяются к выходам схемы. ТМ элемента определяются его логической функцией, а пути распространения неисправностей — структурой соединений логических элементов в схеме.

Комбинационная схема представляется в виде булева графа. А граф задается в виде матрицы путей. На основе матрицы путей строятся две матрицы контролирующих цепочек  $C$  и  $C_d$ , прямая и дополнительная. В прямой и дополнительной матрицах контролирующих цепочек содержится необходимая и дополнительная информация для построения всех вариантов проверяющих и диагностирующих тестов. Метод специально ориентирован на применение ЭЦВМ, так как в основе вычисления тестов лежит матричный способ вычислений.

Метод применим только для комбинационных схем, состоящих из элементов, реализующих монотонные и обратные функции.

### Последовательностные схемы

Как уже упоминалось выше, задача синтеза тестов для последовательностных схем является более трудной, чем синтез тестов для комбинационных схем. Формальный подход к этой проблеме — попытаться разработать алгоритм точно так же, как это было сделано для комбинационных схем.

Такой подход не имел особого успеха (за исключением случая очень малых последовательностных схем) из-за следующих трудностей. Во-первых, каждый возможный проверочный вход, как правило, нужно вычислять для каждого возможного состояния схемы. Следовательно,

каждый элемент памяти, содержащийся в схеме, удваивает объем вычислений, необходимых для отыскания теста.

Во-вторых, существует проблема начальной установки. Прежде чем применить некоторый тест к последовательностной схеме, необходимо установить ее в известное фиксированное состояние, или, в крайнем случае, мы должны знать, в каком состоянии она находится. Альтернативный подход состоит в том, чтобы для выполнения такой операции иметь специальные цепи. По всем этим причинам алгоритмические методы не имеют особого успеха для больших последовательностных схем.

Второй подход состоит в физическом размыкании цепей обратной связи объекта при его проверке [6], т. е. превращении схемы в комбинационную.

Этот подход подавал надежду для синхронных схем, однако имеются трудности в его применении к асинхронным схемам.

Наконец, для последовательных схем были разработаны эвристические методы. Эти методы могут быть использованы для довольно больших схем. Они применимы как к синхронным, так и к асинхронным схемам. Однако они ни в коем случае не гарантируют получение оптимальных проверочных последовательностей. На самом деле они могут даже не дать полной проверочной последовательности. В качестве типичного примера алгоритмического подхода можно назвать работы Поджа и Маккласки [6]. Начало эвристического подхода было положено работами Сешу [16]. Из последних работ, посвященных автоматизированному синтезу тестов, может быть названа работа [17]. Метод синтеза тестов, реализованный в [17], основан на принципе формирования тестовой последовательности с помощью логического моделирования и локальной оптимизации, впервые описанной Сешу и Фрименом [5]. Метод [17] рассчитан для реализации на ЭЦВМ-М-220 с объемом оперативной памяти 16К слов. Метод обеспечивает синтез и анализ тестов для схем, содержащих до 1000 логических элементов типа И, ИЛИ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ с общим числом задаваемых неисправностей до 1500.

### Выводы

1. Несмотря на сравнительно большое количество алгоритмов автоматизированного синтеза тестов, задача автоматизированного синтеза тестов требует дальнейшей разработки.
2. Из всех подходов автоматизированного синтеза тестов следует отметить структурный подход к синтезу.
3. Авторы считают перспективным использование теории графов к автоматизированному синтезу тестов.
4. При синтезе тестов для последовательностных схем наибольшие результаты достигнуты с помощью эвристических методов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Обнаружение и исправление ошибок в дискретных устройствах. Под ред. В. С. Толстякова. М., «Советское радио», 1972.
2. С. Е. Енин. Метод построения локально-оптимального множества проверяющих тестов комбинационных схем. Сб. «Вычислительная техника и машиностроение». Минск, ИТК АН БССР, 1971.
3. В. А. Данильченко. Минимизация проверяющих тестов. Сравнение эффективности алгоритмов. Сб.: «Вычислительная техника в машиностроении». Свердловск, Изд. УПИ, 1971.
4. И. А. Чегис, С. В. Яблонский. Логические способы контроля электрических схем. Труды математического института им. В. А. Свеклова, т. 51. Изд. АН СССР, 1958.
5. S. Seshu, D. Freeman. The diagnosis of a synchronous Sequential Switching Systems, TRE Trans on El Computers, EC-11 (4), 1962.

6. Г. Чжен, Е. Мэннинг, Г. Метц. Диагностика отказов цифровых вычислительных систем. М., «Мир», 1972.

7. П. П. Пархоменко. Основные задачи технической диагностики. Сб.: «Техническая диагностика». М., «Наука», 1972.

8. Г. А. Миронов, Д. Е. Федотова. Составление тестов для логических цепей. Сб.: «Цифровая вычислительная техника и программирование». Вып. 3. М., «Сов. радио», 1967.

9. Э. А. Лазарен. Алгоритм нахождения тестов для контроля и диагностики больших комбинационных схем. Вопросы радиоэлектроники, серия ЭВТ, 1970, № 10.

10. V. Aman, N. Candulmanu. Diagnosis of Large Combinations Networks IEEE Trans on El. Comp., EC-16, 1967.

11. D. Armstrong. On Finding a nearly minimal Set of Fault Detection Tests on El. Comp., EC-15, 1966.

12. В. П. Чипулис. О построении тестов для контроля комбинационных схем. «Автоматика и телемеханика», 1970, № 10.

13. Р. С. Гольдман, В. П. Чипулис. О диагностике неисправностей комбинационных схем. «Автоматика и телемеханика», 1971, № 3.

14. В. С. Кретов. Оценка сложности структурно-аналитического описания схем в эквивалентной нормальной форме. «Вопросы радиоэлектроники». Серия ЭВТ, 1972, № 10.

15. С. В. Микони. Метод построения тестов комбинационных схем. «Автоматика и вычислительная техника», 1969, № 9.

16. S. Seshu. On an Improved diagnosis Program, IEEE Trans on Electronic Computers, EC-14 (1), 1965.

17. В. М. Карасик, П. П. Алексахина, М. П. Агурева, Н. Д. Романчикова. Система автоматического синтеза и анализа тестов для асинхронных последовательностных схем. «Вопросы радиоэлектроники», Серия ЭВТ, 1972, № 3.