

ПРИМЕНЕНИЕ СИМВОЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

ВВЕДЕНИЕ

Существующие подходы к тестированию устройств с памятью можно классифицировать по двум категориям: методы, основанные на теории экспериментов с конечными автоматами, и структурные методы построения тестов. Методы из первой группы в качестве модели цифрового устройства (ЦУ) используют конечный автомат. В основе построения проверяющего эксперимента или теста лежит построение различающей последовательности (РП) [1], определяемой как входная последовательность (ВП), которая вырабатывает различные выходные реакции для каждого начального состояния конечного автомата. В случае, когда РП не может быть построена, применяются улучшенные проверяющие эксперименты [2], основанные на уникальной последовательности (УП), которые способны существенно сократить длину теста. УП - это входная последовательность, отличающая одно заданное начальное состояние ЦУ от всех остальных начальных состояний. К преимуществам алгоритмов, основанных на теории экспериментов с автоматами, можно отнести высокую полноту проверки неисправностей полученными тестами и гарантию нахождения решения (если таковое существует). Однако данные методы не пользуются популярностью при решении практических задач в силу их высокой степени сложности и необходимости построения автоматной модели исходного устройства.

Структурные методы генерации проверяющих тестов в качестве модели ЦУ используют логическую схему или укрупненное структурное описание ЦУ. Устройства с памятью (как и любые другие ЦУ), чаще всего, описываются разработчиками именно на структурном уровне, поэтому необходимость в каких-либо дополнительных построениях отсутствует. В большинстве методов процесс построения проверяющего теста заключается в получении ВП, различающих исправное и неисправное ЦУ, с помощью применения разнообразных многозначных моделей и алгоритмов активизации критических путей и некоторых других подходов [3,4]. Использование структурной модели последовательностного устройства и многозначных моделей обеспечивает невысокую сложность данных алгоритмов, однако в силу некоторых особенностей структурных методов получаемые тесты обладают недостаточно высокой полнотой по сравнению с автоматными методами.

Нами предлагается метод, который объединяет преимущества обоих подходов. Этот метод основан на символьном моделировании последовательных схем [5]. Использование символьного моделирования позволило нам создать алгоритмы построения РП и УП для ЦУ с памятью на структурном уровне представления. Применение данных характеристических последовательностей позволяет генерировать проверяющие тесты высокой полноты.

МНОГОЗНАЧНЫЕ АЛФАВИТЫ И ФУНКЦИИ

Для описания значений сигналов на линиях схемы используется универсальный 16-значный алфавит $B_{16} = \{\emptyset, I, D, GI, D', FI, D^*, DI, 0, C, F0, H, G0, E, D0, U\}$, который является множеством всех подмножеств базового алфавита $B_4 = \{0, D', D, I\}$ [3, 6]. Элементы B_{16} кодируются при помощи упорядоченной совокупности четырех двоичных характеристических переменных $(x^0, x^{D'}, x^D, x^I)$, а именно: $\emptyset = \{\emptyset\}$ (код $x^0 = 0, x^{D'} = 0, x^D = 0, x^I = 0$), $I = \{I\}(0001)$, $D = \{D\}(0010)$, $GI = \{D \cup I\}(0011)$, $D' = \{D'\}(0100)$, $FI = \{D' \cup I\}(0101)$, $D^* = \{D' \cup D\}(0110)$, $DI = \{D' \cup D \cup I\}(0111)$, $0 = \{0\}(1000)$, $C = \{0 \cup I\}(1001)$, $F0 = \{0 \cup D\}(1010)$, $H = \{0 \cup D \cup I\}(1011)$, $G0 = \{0 \cup D'\}(1100)$, $E = \{0 \cup D' \cup I\}(1101)$, $D0 = \{0 \cup D' \cup D\}(1110)$, $U = \{0 \cup D' \cup D \cup I\}(1111)$. Каждая из переменных является признаком присутствия на линии соответствующего ей значения.

Показано, что поведение логической многозначной функции $f(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ описывается четырьмя булевыми характеристическими функциями $f^0(X^0, X^{D'}, X^D, X^I)$, $f^{D'}(X^0, X^{D'}, X^D, X^I)$, $f^D(X^0, X^{D'}, X^D, X^I)$, $f^I(X^0, X^{D'}, X^D, X^I)$. Данные функции являются компонентами характеристического вектора $f(f^0, f^{D'}, f^D, f^I)$, представляющего значение функции $f(X)$ [3, 6]. В табл. 1 представлены характеристические функции для базисных вентилей И, ИЛИ, НЕ.

Табл. 1.
Характеристические функции для базисных вентилей И, ИЛИ, НЕ

f	f^0	$f^{D'}$	f^D	f^I
ab	$a^0 \vee b^0 \vee a^{D'}b^D$ $\vee a^D b^{D'}$	$a^{D'}b^1 \vee a^1b^{D'} \vee a^{D'}b^{D'}$	$a^D b^1 \vee a^1b^D \vee a^D b^D$	$a^1 b^1$
$a \vee b$	$a^0 b^0$	$a^{D'}b^0 \vee a^0b^{D'} \vee a^{D'}b^{D'}$	$a^D b^0 \vee a^0b^D \vee a^D b^D$	$a^1 \vee b^1 \vee a^{D'}b^D$ $\vee a^D b^{D'}$
\bar{a}	a^1	a^D	$a^{D'}$	a^0

СИМВОЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Рассмотрим основные положения используемого метода моделирования неисправностей, представленные в [5]. В начале процесса моделирования мы полагаем переменные начального состояния Y_j равными символьным значениям Y вместо неопределенных значений $U(Y_j, \tilde{Y}_j$ - переменные состояния ЦУ в начале и в конце j -й итерации соответственно). На каждой итерации j переменным, соответствующим внешним входам, X_j присваиваются соответствующие двоичные значения j -го набора из входной последовательности. На каждом входном наборе для всех внешних выходов Z и переменных состояния \tilde{Y} выводятся серии символьных выражений $Z(Y), \tilde{Y}(Y)$, зависящие от символьных значений переменных начального состояния Y .

Процесс вывода символьных выражений выполняется поventильно, в направлении от входов к выходам, используя логику и структуру схемы. Вывод выражений основан на применении свойств булевой алгебры.

В [5] было показано, что пары начальных состояний ЦУ, различаемые ВП из k наборов, определяются из характеристического символьного выражения:

$$dZ_k = \bigvee_{j=1}^k \bigvee_{i=1}^m (z_{ij}^{D'} \vee z_{ij}^D) \quad (1)$$

где: m - число внешних выходов.

Характеристические символьные выражения $Z^{D'}$ и Z^D для всех внешних выходов Z на каждой итерации выводятся из символьных выражений $Z(Y)$ путем применения характеристических функций (табл. 1) [3, 6] и с учетом свойств характеристических переменных [5, 7]. Пример вычисления характеристического выражения z^D для выражения $z = y_1 y_2$ приводится ниже:

$$z^D = (y_1 \vee y_2)^D = y_1^D \cdot y_2^0 \vee y_1^0 \cdot y_2^D \vee y_1^D \cdot y_2^D$$

Из этого примера видно, что символьные характеристические выражения зависят от характеристических переменных, определяющих символьные значения Y начального состояния. Так, полученное выражение зависит от характеристических переменных y_2^0, y_2^D , определяющих символьное значение $y_2 = (y_2^0, y_2^{D'}, y_2^D, y_2^1)$, и характеристических переменных y_1^0, y_1^D , определяющих символьное значение $y_1 = (y_1^0, y_1^{D'}, y_1^D, y_1^1)$. Пары начальных состояний, различаемые ВП, определяются из выражения (1) следующим образом. Некоторая характеристическая переменная y^v в характеристическом выражении (1) является признаком установления значения сигнала равным v на линии начального состояния $y_l : y_l = v$. Вектор значений сигналов на линиях, соответствующих переменным начального состояния $Y_l = (y_{l1}, y_{l2}, \dots, y_{ln}) = (v_1, v_2, \dots, v_n) = V$, определяет различающиеся пары начальных состояний. Таким образом, из вида присутствующих в выражении (1) характеристических переменных мы можем определить, какие пары начальных состояний различаются. Например, из характеристического выражения z^D мы можем сказать, что различаются пары состояний, определяемые значениями переменных начального состояния $(y_1 = D, y_2 = 0), (y_1 = 0, y_2 = D)$ и $(y_1 = D, y_2 = D)$. Значит, различаются пары начальных состояний исправного и неисправного ЦУ соответственно $((y_{1f} = 1, y_{2f} = 0), (y_{1f} = 0, y_{2f} = 0)), ((y_{1f} = 0, y_{2f} = 1), (y_{1f} = 0, y_{2f} = 0)), ((y_{1f} = 1, y_{2f} = 1), (y_{1f} = 0, y_{2f} = 0))$.

Таким образом, в результате символьного моделирования мы получаем множество пар начальных состояний, различаемых моделируемой входной последовательностью, путем вычисления характеристического символьного выражения (1). Применяя к данному выражению (1) соответствующий критерий, мы могли бы определить, какую последовательность мы имеем: проверяющий тест, РП или УП.

Как показано выше, символьное моделирование определяет множество пар начальных состояний, различаемых заданной ВП. Построение пути дерева приемников

состояний (1), соответствующего данной последовательности, для конечного автомата, описывающего заданную схему, позволяет получить такой же результат. Поэтому между символьным моделированием и построением дерева преemников состояний существует соответствие.

ПОСТРОЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Исходя из вышесказанного, можно искать характеристические последовательности путем полной адаптации автоматного метода [1] для структурного уровня описания последовательностного ЦУ. Это можно сделать при помощи символьного моделирования на всех возможных входных последовательностях длины один, два и т.д. (под длиной подразумевается число наборов в последовательности). Поиск останавливается, когда будет найдена последовательность, для которой выполняется определяющий ее тип критерий. Однако такая стратегия построения характеристической последовательности ведет к перебору входных последовательностей. Нами предлагается иной подход.

Построение различающих последовательностей.

Изначально имеется множество пар начальных состояний SI , состоящее из всех возможных пар начальных состояний данного последовательностного ЦУ за исключением пар, образуемых эквивалентными состояниями $((A, A), (B, B))$ и т.п.). Данные пары не рассматриваются, так как очевидно, что эквивалентные состояния вызывают одинаковые реакции устройства и поэтому не различаются. Конечной целью является построение ВП, различающей все пары состояний из начального множества SI . По определению, такая последовательность является РП для данного ЦУ.

Из множества SI берется некоторая пара начальных состояний S_1^1 и $S_2^1 : (S_1^1, S_2^1)$, где верхний индекс - номер итерации. Для выбранной пары состояний генерируется входная последовательность T_1 , вырабатывающая различные выходные реакции для состояний S_1^1 и S_2^1 , то есть различающая их. Последовательность, различающая заданную пару состояний, строится при помощи структурного метода, использующего универсальный 16-значный алфавит и многозначные функции, которые представлены в разделе 2. На этой итерации мы полагаем искомую входную последовательность равной $T = T_1$. Далее для последовательности T выполняется символьное моделирование данной цифровой схемы. Можно показать, что моделируемая последовательность T является различающей последовательностью тогда и только тогда, когда на некоторой итерации k моделирования выполняется следующее равенство:

$$dZ_k = \bigvee_{j=1}^k \bigvee_{i=1}^m (z_{ij}^{D'} \vee z_{ij}^D) = \bigvee_{l=1}^n (y_l^{D'} \vee y_l^D), \quad (2)$$

где: n - число переменных, соответствующих линиям начального состояния.

Таким образом, равенство (2) является критерием различимости состояний для РП. Если последовательность T является РП, то процесс построения завершается, так как искомое решение найдено. Иначе - процесс построения продолжается.

Как говорилось в предыдущем разделе, символьное моделирование определяет множество пар начальных состояний, различаемых подаваемой ВП. Назовем это множество SD . Далее определяется новое множество пар начальных состояний: $SI = SI \setminus SD$. Из полученного множества SI выбирается некоторая пара начальных состояний (S_1^2, S_2^2) , для которой строится РП T_2 . На текущей (второй) итерации полагаем искомую последовательность T равной конкатенации $T = T \cdot T_2$. Далее для полученной последовательности T выполняется процедура символьного моделирования. Если в процессе моделирования для ВП T выполняется критерий (2), T - является искомой РП и процесс генерации завершается. Иначе - построение РП продолжается. Процесс генерации РП останавливается, когда РП построена или число итераций превысило некоторую границу.

Построение уникальных последовательностей.

Алгоритм построения УП полностью совпадает с алгоритмом генерации РП. Однако в случае УП конечной целью является построение ВП, которая отличает данное начальное состояние $S_p = (y_{1p}, y_{2p}, \dots, y_{np})$ от всех остальных начальных состояний $S_1, S_2, \dots, S_{p-1}, S_{p+1}, \dots, S_r$ ($r = 2^n$). Поэтому множество SI пар начальных состояний, которые должны различаться результирующей ВП, равно:

$$SI = \{(S_p, S_1), \dots, (S_p, S_{p-1}), (S_p, S_{p+1}), \dots, (S_p, S_r), (S_1, S_p), \dots, (S_r, S_p)\}.$$

Можно также показать, что критерием различимости состояний для УП является следующее равенство:

$$dZ_k = \bigvee_{j=1}^k \bigvee_{i=1}^m (z_{ij}^{D'} \vee z_{ij}^D) = (y_{1p}^{y_{1p}} \cdot y_{2p}^{y_{2p}} \cdot \dots \cdot y_{np}^{y_{np}})^{D'} \vee (y_{1p}^{y_{1p}} \cdot y_{2p}^{y_{2p}} \cdot \dots \cdot y_{np}^{y_{np}})^D, \quad (3)$$

где: $y_p = \begin{cases} \bar{y}, & \text{если } y_p = 0, \\ y, & \text{если } y_p = 1. \end{cases}$

Примеры построения характеристических последовательностей.

Рассмотрим процесс построения РП для последовательностной схемы, представленной на рис. 1. Соответствующий ей конечный автомат задан таблицей переходов и выходов (табл. 2).

Изначально имеем следующее множество пар начальных состояний:

$$SI = \{(A, B), (A, C), (A, D), (B, A), (B, C), (B, D), (C, A), (C, B), (C, D), (D, A), (D, B), (D, C)\}.$$

Из множества SI выбирается пара начальных состояний (A, B) . Можно показать, что данная пара начальных состояний различается входной последовательностью $T_1 = (1)$. Это также видно из (табл. 2). Полагаем искомую ВП равной $T = T_1 = (1)$. В результате символьного моделирования для последовательности $T = (1)$ имеем:

$$z_1 = y_2 \Rightarrow dZ_1 = z_1^{D'} \vee z_1^D = y_2^{D'} \vee y_2^D \neq \bigvee_{l=1}^2 (y_l^{D'} \vee y_l^D).$$

Очевидно, что критерий (2) не выполняется для символьного характеристического выражения dZ_1 . Поэтому T не является РП и процесс построения продолжается. Из выражения dZ_1 определяются следующие наборы значений переменных начального

состояния $(y_1 = U, y_2 = D')$ и $(y_1 = U, y_2 = D)$ Из них определяется множество SD пар начальных состояний, различаемых входной последовательностью $T = (1)$:

$$SD = \{(A, B), (A, D), (B, A), (B, C), (C, B), (C, D), (D, A), (D, C)\}.$$

Отсюда получаем: $SI = SI \setminus SD = \{(A, C), (B, D), (C, A), (D, B)\}$.

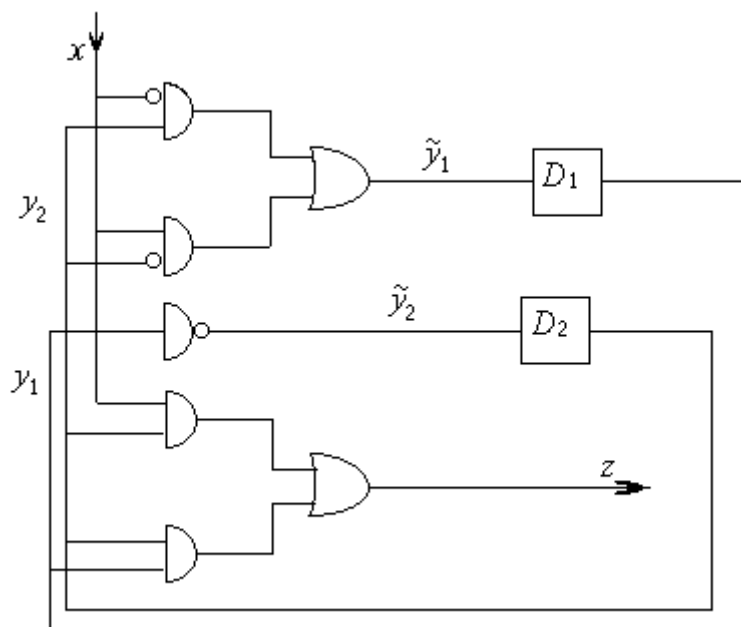


Рис. 1. Схема реализации автомата табл. 2.

Табл. 2.
Конечный автомат.

$S(y_1y_2)$	$S_n, z, x=0$	$S_n, z, x=1$
A(00)	B,0	D,0
B(01)	D,0	B,1
C(10)	A,0	C,0
D(11)	C,1	A,1

Из полученного множества SI выбирается пара начальных состояний (A, C) . Существует две РП для выбранной пары состояний $T_{21} = (1)$ и $T_{22} = (0)$. Сначала полагаем искомую ВП равной $T = T \cdot T_{21} = (1,1)$. В результате символьного моделирования для последовательности T получаем:

$$z_1 = y_2 \Rightarrow dZ_1 = z_1^{D'} \vee z_1^D = y_2^{D'} \vee y_2^D \neq \bigvee_{l=1}^2 (y_l^{D'} \vee y_l^D),$$

$$z_2 = \bar{y}_1 \Rightarrow dZ_2 = \bigvee_{j=1}^2 (z_j^{D'} \vee z_j^D) = y_2^{D'} \vee y_2^D \vee y_1^D \vee y_1^{D'} = \bigvee_{l=1}^2 (y_l^{D'} \vee y_l^D).$$

Из характеристического выражения dZ_2 видно, что для входной последовательности $T = (1,1)$ критерий (2) выполняется. Значит, входная последовательность $T=(1,1)$

является РП для данной последовательностной схемы (рис.1.) Следовательно, нет необходимости рассматривать ВП $T = T \cdot T_{22} = (1, 0)$.

Из рассмотренного примера видно, что процесс построения РП для данной последовательностной цифровой схемы (рис. 1) соответствует процессу построения одного пути дерева преемников состояний (рис. 2) для соответствующего конечного автомата (табл. 2). На рис. 2 этот путь выделен жирной линией и соответствует входной последовательности $T = (1, 1)$. Таким образом, генерация РП для логической схемы с помощью предложенного метода соответствует процессу построения одного или нескольких путей дерева преемников состояний для соответствующего конечного автомата.

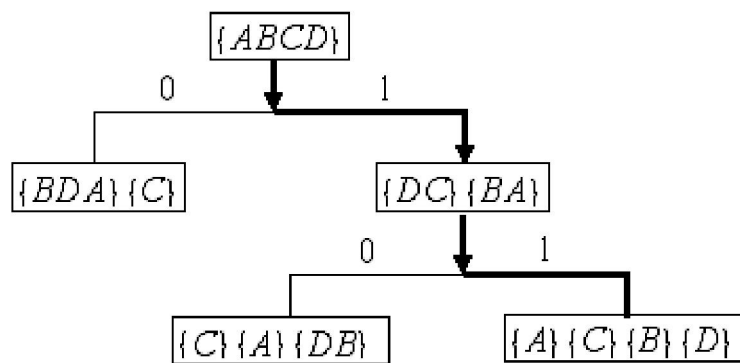


Рис. 2. Дерево преемников.

Заметим, что ВП $T = (1, 0)$ является уникальной последовательностью для начальных состояний $A(y_1 = 0, y_2 = 0)$ и $C(y_1 = 1, y_2 = 0)$ (табл. 2), так как в результате символического моделирования для этой последовательности получаем:

$$\begin{aligned}
 z_2 = \bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2 &\Rightarrow dZ_2 = \bigvee_{j=1}^2 (z_j^{D'} \vee z_j^D) = y_2^{D'} \vee y_2^D \vee (\bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2)^{D'} \vee (\bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2)^D = \\
 &= (\bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2)^{D'} \vee (\bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2)^D \vee (y_1 \cdot \bar{y}_2)^{D'} \vee (y_1 \cdot \bar{y}_2)^D.
 \end{aligned}$$

Это означает, что для начальных состояний A, C и входной последовательности $T = (1, 0)$ выполняется критерий (3), а также следует из A -группы $\{C\}\{A\}\{DB\}$ дерева преемников состояний (рис.2), которая соответствует входной последовательности $T = (1, 0)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены новые методы построения характеристических последовательностей для последовательностных ЦУ на структурном уровне. Применение в предложенных методах разработанного нами алгоритма символического моделирования позволило объединить в них преимущества автоматного и структурного подходов построения характеристических последовательностей. В силу этого, разработанный подход может быть

эффективно применен для тестирования функциональных неисправностей перехода в последовательностных устройствах на структурном уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гилл А. Введение в теорию конечных автоматов. - М.: Наука, 1966.
2. Hsieh E.P. Checking experiments for sequential machines // IEEE Transactions on Computers. 1971. C-20. pp. 1152-1166.
3. Барашко А.С., Скобцов Ю.А., Сперанский Д.В. Моделирование и тестирование дискретных устройств. – К.: Наукова думка. 1992.
4. Андрюхин А.И. Применение метода GPS при построении тестов для дискретных устройств // Искусственный интеллект. - 1997. - № 1-2. - С. 76-85.
5. Скобцов В.Ю. Символьное моделирование неисправностей последовательностных цифровых устройств // Автоматика и вычислительная техника. - 1997. - № 5. - С. 40-50.
6. Скобцов Ю.А. Многозначные модели цифровых устройств логического и функционального уровня // Автоматика и вычислительная техника. - 1995. - № 4. - С. 42-52.
7. Скобцов В.Ю. Символьно-аналитический метод генерации проверяющих тестов для последовательностных цифровых устройств // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 1997. - № 3. - С. 22-29.