

**АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ КУБИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ  
СХЕМ С ТРИГГЕРНЫМИ СТРУКТУРАМИ  
(МОДИФИЦИРОВАННЫЙ П-АЛГОРИТМ)**

---

Предлагаются методы построения кубических покрытий для структурно-функциональных моделей цифровых устройств. Методы позволяют строить КП и проектировать проверяющие тесты для всех константных неисправностей существенных линий схемы, полученные из системы булевых уравнений. Объект диагностирования – триггерные структуры, представленные в виде схемного и функционального (булевые уравнения в формате BNF, являющегося подмножеством языков VHDL, Verilog) описания. Математический аппарат для представления поведения объекта диагностирования – кубическое исчисление.

### **1. Введение**

Уровень развития микроэлектроники является определяющим для построения причинно-следственной иерархии создания новых систем: микроэлектронные субмикронные технологии – схемотехнические стандарты – схемотехнические решения. На среднем уровне цифровой техники имеются три базовых компонента: микропроцессорные БИС (CPU); заказные БИС (ASIC); программируемые логические интегральные схемы – ПЛИС (CPLD, FPGA). Возникает проблема тестирования этого нового объекта диагностирования. Большим успехом пользуется применение П-алгоритма при построении кубических покрытий (КП) для комбинационных схем [1]. Поэтому разработка модифицированного П-алгоритма для последовательностных схем дала бы возможность параллельного построения КП для подсхем, что позволило бы повысить быстродействие процедуры генерации тестов. В связи с этим в статье предпринята попытка разработки модифицированного П-алгоритма для последовательностных и триггерных структур.

### **2. Алгоритм построения покрытия триггерной схемы**

1. Производится анализ схемной структуры в целях ее дальнейшей декомпозиции на комбинационные и последовательностные подсхемы. Данный анализ проводится либо по вентильной схеме, либо по булевым уравнениям.

2. Схема проверяется на предмет наличия глобальных обратных связей (ГОС). Данная проверка также осуществляется либо по вентильной структуре, либо по булевым уравнениям.

3. При наличии ГОС в схеме производится их псевдоразрыв, в результате ГОС будет представлена одним псевдовходом и одним псевдовыходом.

4. Для выявленных комбинационных и последовательностных подсхем строятся собственные КП с учетом псевдовходов и псевдовыходов при наличии ГОС. Методы построения КП: по системе булевых уравнений, по таблице состояний, по вентильной схеме. Выбор метода зависит от структуры рассматриваемой схемы (количества и типов подсхем). Так, при наличии в схеме одной триггерной структуры наиболее подходящим является метод построения КП по системе булевых уравнений. При наличии двух и более триггерных структур (ступеней) в схеме данный метод используется для построения КП ступеней, необходимых для получения общего КП схемы по П-алгоритму. Имеется возможность получить общее КП для многоступенчатых триггеров по системе булевых уравнений при условии, что КП ступеней триггера отличаются только по входу синхронизации. В таком случае нет надобности применять П-алгоритм. Данный метод также подходит для построения КП комбинационных подсхем.

5. После получения КП для всех подсхем схемы выполняется суперпозиция КП ступеней для получения общего КП по П-алгоритму. В целях обеспечения временной функции автомата для входа синхронизации используется двухтактный алфавит, либо данный вход представляется двумя переменными в соседних временных фреймах.

6. Полученное покрытие минимизируется до получения тупикового КП.

7. Для верификации полученных КП используется среда моделирования Active-HDL, где схема представляется в виде системы логических уравнений либо на уровне потока данных.

Подробное описание, а также преимущества и недостатки каждого метода будут рассмотрены далее.

### 3. Построение КП для одноступенчатых триггерных структур

Алгоритм построения КП для ПА (ступеней триггерной структуры) следующий:

1. Булевы уравнения в формате BNF привести к формату аппарата описания булевых уравнений, принятому в дискретной математике (ДМ). Символы формата (\*, +, !, =) переводятся в ( $\wedge$ ,  $\vee$ ,  $\bar{\phantom{x}}$ , =) соответственно.

2. По булевым уравнениям ступеней триггерной структуры, описанных в формате BNF записать общую функцию структуры в виде булевого уравнения.

3. Минимизировать полученное уравнение по правилам

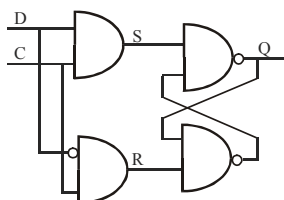


Рис. 1. Схема Latch (C\_high, D)

ДМ. 4. По полученному уравнению построить общее КП структуры.

5. Минимизировать КП и проверить его полноту с помощью карт Карно.

Работу алгоритма построения КП для ПА проиллюстрируем на примере триггера-защелки **Latch (C\_high, D)**, с синхронизацией по переднему фронту, схема которого представлена на рис. 1.

Формат BNF:  $S=D * C$ ;  $R=C * !D$ ;  $Q(t)=S + (!R * Q(t-1))$ .

Выполняем первый пункт алгоритма, проводя замену соответствующих символов.  $S=D \wedge C$ ;  $R=C \wedge \bar{D}$ ;  $Q=S \vee (\bar{R} \wedge Q(t-1))$ .

По булевым уравнениям ступеней, описанных в формате BNF записываем общую функцию структуры в виде булевого уравнения путем подстановки промежуточных значений в функцию выхода. Заметим, что при подстановке, запись символа конъюнкции можно опустить.

$$Q = DC \vee \bar{C}\bar{D}Q(t-1).$$

Произведем минимизацию полученного уравнения по правилам ДМ.

$$\begin{aligned} Q &= DC \vee (\bar{C} \vee D)Q(t-1) = DC \vee \bar{C}Q(t-1) \vee DQ(t-1) = \\ &= DC \vee \bar{C}Q(t-1) \vee DQ(t-1)\bar{C} \vee DQ(t-1)C = \\ &= DC(1 \vee Q(t-1)) \vee \bar{C}Q(t-1)(1 \vee D) = DC \vee \bar{C}Q(t-1). \end{aligned}$$

По полученному уравнению строим КП триггера (1).

C	D	Q(t-1)	Q
1	1	X	1
0	X	1	1
X	0	0	0
1	0	X	0
0	X	0	0

(1)

Минимизируем полученное КП и проверяем его полноту с помощью карт Карно. Из (2) видно, что 3-й куб поглощается 4-м и 5-м кубами.

Q(t-1)	00	01
CD		
00	0	1
01	0	1
11	1	1
10	0	0

(2)

C	D	Q(t-1)	Q
1	1	X	1
0	X	1	1
1	0	X	0
0	X	0	0

(3)

В результате получаем полное и избыточное КП триггера на рис. 1 (3).

Преимущества данного метода заключаются в относительной простоте его использования, возможности одновременного выполнения процедур получения КП и его минимизации, возможности проверки адекватности модели по карте Карно [2].

Также можно сделать вывод о том, что данная методика идеально подходит для одноступенчатых ПА со сравнительно небольшим количеством входных переменных, т.к. при большом количестве входных переменных становится затруднительным процесс проверки полноты КП по карте Карно.

#### 4. Построение КП для двухступенчатых триггерных триггеров

Проиллюстрируем работу алгоритма, приведенного в подразделе 3, для двухступенчатых триггеров на примере D-триггера **Flip-flop (C high, D)**, с синхронизацией по переднему фронту, структурная схема которого изображена на рис. 2.

Формат BNF:

$$S = C * Q1(t-1); R = C * !Q1(t-1); Q(t) = S + (!R * Q(t-1));$$

$$S1 = D * !C; R1 = !C * !D; Q1(t) = S1 + (!R1 * Q1(t-1));$$

Аналогичным образом производятся преобразования к аппарату ДМ:

$$S = C \wedge Q1(t-1);$$

$$R = C \wedge \overline{Q1(t-1)};$$

$$Q(t) = S \vee (\overline{R} \wedge Q(t-1));$$

$$S1 = D \wedge \overline{C};$$

$$R1 = \overline{C} \wedge \overline{D};$$

$$Q1 = S1 \vee (\overline{R1} \wedge Q1(t-1)).$$

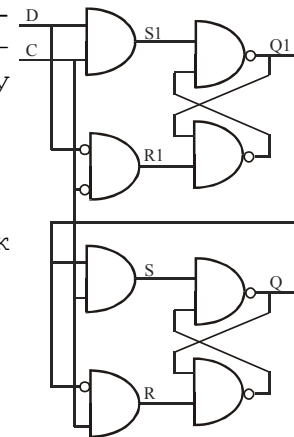


Рис. 2. Схема **Flip-flop (C\_high, D)**

Для каждой функции, присутствующей в системе булевых уравнений (ступени триггера), выполняется подстановка промежуточных значений и ее минимизация:

$$Q1 = (D \wedge \overline{C}) \vee (\overline{C} \wedge \overline{D} \wedge Q1(t-1)) = D\overline{C} \vee (C \vee D)Q1(t-1) =$$

$$D\overline{C} \vee CQ1(t-1) \vee DQ1(t-1) = D\overline{C} \vee CQ1(t-1) \vee DQ1(t-1)\overline{C} \vee$$

$$DQ1(t-1)C = D\overline{C}(1 \vee Q1(t-1)) \vee CQ1(t-1)(1 \vee D) =$$

$$D\overline{C} \vee CQ1(t-1).$$

$$Q = C \vee Q1 \vee (\overline{C} \wedge \overline{Q1} \wedge Q(t-1)) = CQ1 \vee \overline{C}Q(t-1) \vee Q1Q(t-1) =$$

$$CQ1 \vee \overline{C}Q(t-1) \vee Q1Q(t-1)C \vee Q1Q(t-1)\overline{C} = CQ1 \vee \overline{C}Q(t-1).$$

Исходя из полученных результатов для ступеней, получим общее КП триггера:

$$Q_{\text{общ}} = C(D\overline{C} \vee CQ1(t-1)) \vee \overline{C}Q(t-1) =$$

$$CDC\overline{C} \vee CCQ1(t-1) \vee \overline{C}Q(t-1) =$$

$$CQ1(t-1) \vee \overline{C}Q(t-1).$$

По последнему уравнению строится КП:

C	Ql(t-1)	Q(t-1)	Q(t)
0	X	0	0
1	0	X	0
1	1	X	1
0	X	1	1

(4)

По полученному КП триггера (4) можно определить его принцип функционирования (по переднему фронту синхронизации), однако в процессе получения и минимизации общего булевого уравнения ( $Q_{общ}$ ) была утеряна входная переменная.

Можно сделать вывод, что при выполнении п. 2, 3 алгоритма невозможно получить общее КП путем подстановки всех значений в общее уравнение, т.к. при замене  $Q(t-1)$  на  $Q(t)$  и в процессе минимизации уравнения теряются входные переменные, без которых в дальнейшем невозможно построения теста. Утеря входной переменной в приведенном примере объясняется неявной зависимостью состояния 2-й (выходной) ступени от входа синхронизации и состояния 1-й (внутренней) ступени, что в процессе минимизации булевого уравнения позволяет элиминировать входную переменную, от которой зависит состояние первой ступени.

Отсюда видно, что булевы уравнения не привязаны к структурно-временной модели триггера, поэтому при их минимизации с применением правил ДМ могут быть утеряны входные переменные, что приведет к бесполезности полученного КП для последующего тестирования. Следовательно, необходим анализ структурно-временной модели.

Рассмотрим следующий **алгоритм построения общего КП**:

1. Построение КП для всех ступеней триггерной структуры по булевым уравнениям каждой ступени.

2. Построение общего КП путем объединения КП ступеней в одном такте.

Работу алгоритма продемонстрируем на примере триггера на рис.2.

Выполним п.1 алгоритма. Получим два КП для каждой ступени (5, 6) соответственно.

C	D	Ql(t-1)	Ql
0	1	X	1
1	X	1	1
1	X	0	0
0	0	X	0
X	0	0	0

(5)

C	Ql	Q(t-1)	Q(t)
1	1	X	1
0	X	1	1
0	X	0	0
1	0	X	0
X	0	0	0

(6)

Анализируя полученные КП ступеней, можно заметить, что они отличаются только по входу синхронизации. Следовательно можно построить общее КП объединив эти два КП в одно, и представив триггерную структуру в одном автоматном такте. При этом происходит исключение несущественных внутренних переменных, что соответствует работе алгоритма построения КП для триггерных структур [1].

**Аксиома.** Объединение КП ступеней производится только в том случае, когда приведенные КП отличаются только по входу синхронизации.

В результате получаем общее КП (7).

C(t-1)	C(t)	D	Q(t-1)	Q(t)
0	1	1	X	1
0	1	0	X	0
X	0	X	0	0
X	0	X	1	1
1	1	X	0	0
1	1	X	1	1

(7)

Можно сделать вывод, что предложенная методика применима для частного случая – многоступенчатых триггерных структур, в которых все ступени имеют одинаковую структуру ПА. Заметим, что большинство триггерных структур именно такого типа, поэтому данный алгоритм может быть применим для множества последовательностных схем. Предложенный алгоритм эффективно обрабатывает двухступенчатые триггерные структуры, имеющие одинаковые типы ПА.

### 5. Построение КП для многоступенчатых триггеров (модифицированный р-алгоритм)

Проблема возникает при наличии трех и более ступеней и различных типов ПА. Для обработки таких структур необходимо произвести их разбиение на подсхемы, состоящие из последовательностных и комбинационных элементов, независимых друг от друга, при этом может наблюдаться сокращение входов для комбинационных подсхем за счет разрыва связей между триггерами. В результате некоторые вентили могут быть удалены из схемы. Для такой декомпозиции необходимо выделить функциональные элементы структуры, являющиеся примитивными автоматами на два состояния – синхронными и асинхронными триггерами (ступени триггерной структуры), и примитивные элементы, являющиеся фрагментами вентильной логики. Построение общего КП произведем с помощью р-алгоритма, относящегося к прямым методам анализа комбинационных схем [3]. Однако данный метод необходимо модифицировать в целях его адаптации к последовательностным схемам с точки зрения их временной зависимости. В качестве примитивных элементов (ПЭ) будут выступать ПА (ступени триггерной структуры) и элементы вентильной логики. На первом этапе необходимо построить КП для всех ступеней триггерной структуры. Второй этап – суперпозиция – получение общего КП по известным КП ступеней с применением р-алгоритма.

Проиллюстрируем основные пункты р-алгоритма для последовательностных схем на примере трехступенчатого триггера **Flip-Flop(C\_high,D)**, схема которого представлена на рис. 3. В качестве ПЭ будем рассматривать ПА, являющиеся ступенями триггерной структуры. Формат BNF:

$$\begin{aligned}
 S2\_tmp0 &= C\_tmp0 * Q3\_tmp0(t-1); \\
 Q2\_tmp0(t) &= !S2\_tmp0 + (D\_tmp0 * Q2\_tmp0(t-1)); \\
 R3\_tmp0 &= !(D\_tmp0 * Q2\_tmp0(t-1)); \\
 Q3\_tmp0(t) &= !C\_tmp0 + (R3\_tmp0 * Q3\_tmp0(t-1)); \\
 Q(t,0) &= !Q3\_tmp0(t) + (Q2\_tmp0(t) * Q(t-1));
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

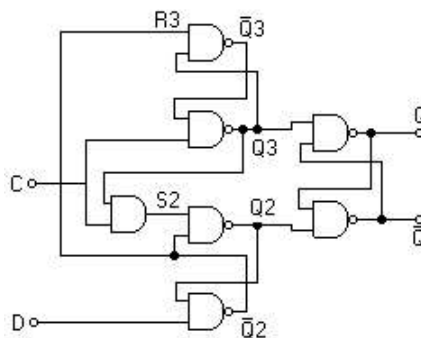


Рис. 3... Схема описание **Flip-Flop(C\_high,D)**

1. Производим разбиение триггерной структуры на независимые подсхемы (декомпозиция схемы), для этого выделяем части подсхемы с обратными связями и заменяем их на функциональные элементы (ПА) с покрытиями  $S$ , являющиеся ступенями этой структуры (рис. 4).

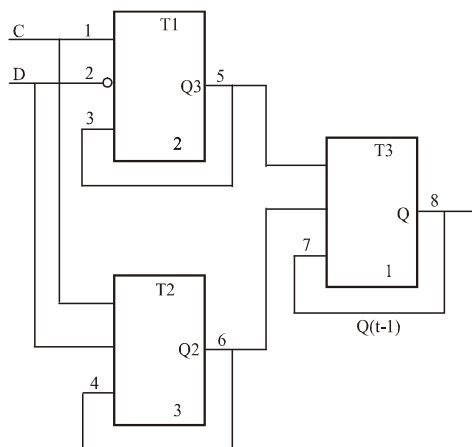


Рис. 4. Модель трехступенчатой триггерной структуры

Символами T1, T2, T3 обозначаются ступени триггерной структуры (ПА).

2. Производим ранжирование и нумерацию ПА и линий. Сначала отмечаются внешние входы, затем выходы тех ПА, входы которых занумерованы. Процедура заканчивается полной нумерацией ПА и линий схемы, как показано на рис. 4, где все линии и ПА соответственно пронумерованы.

3. Следующим шагом является построение КП для каждой ступени триггерной структуры на рис. 4, которые представлены в (9)–(11) для первой, второй и третьей ступеней соответственно:

C(t-1)	C(t)	D	Q3(t-1)	Q3
X	0	X	X	1
0	1	0	1	1
0	1	1	X	0
1	1	X	0	0
1	1	X	1	1

(9)

C(t-1)	C(t)	D	Q2(t-1)	Q2
X	0	X	X	1
0	1	1	X	1
0	1	0	X	0
1	1	X	0	0
1	1	X	1	1

(10)

Q2	Q3	Q(t-1)	Q
1	1	1	1
1	1	0	0
1	0	X	1
0	1	X	0

(11)

Таблица 1

$C_i$	1	2	3	4	5	6	7	8
C1	.	.	.	.	1	1	1	1
	.	.	.	.	1	1	0	0
	.	.	.	.	1	0	X	1
	.	.	.	.	0	1	X	0
C2	0	X	X	.	1	.	.	.
E	0	.	1	.	1	.	.	.
E	1	.	X	.	0	.	.	.
J	X	.	0	.	0	.	.	.
J	X	.	1	.	1	.	.	.
C3	0	X	X	.	1	.	.	.
E	1	X	.	.	1	.	.	.
E	0	X	.	.	0	.	.	.
J	X	0	.	.	0	.	.	.
J	X	1	.	.	1	.	.	.

4. Произведем заполнение исходной таблицы покрытиями ПА, в которых точки имеют значение символа X, как показано в табл.1.

5. Затем строим вторую таблицу (2), в которой исходный вектор решений  $E_0$ , равный X на всех координатах, пересекается с каждым кубом  $t$  покрытия ПА  $E_0 \cap C_t^i$ , который имеет только внешние выходы. В данном примере таким является примитив C1 из табл.1. Пересечение множества векторов  $E^i$ , полученного после обработки покрытия  $C^i$ , с кубами ПА  $E^i \cap C_t^i$ , связанного с уже обработанными ПА. Пересечение строки решения с кубом покрытия равно пусто, если есть пустое пересечение хотя бы по одной координате. Если вектор решения имеет символы X по выходным координатам анализируемого КП  $C^{i+1}$ , то он освобождается от пересечения и переносится в таблицу формируемых кубов  $E^{i+1}$ .

6. Выполнение операторов минимизации и поглощения на множестве полученных векторов после обработки очередного примитива дает существенное уменьшение числа промежуточных решений.

7. После обработки примитивов из векторов решения убираются столбцы, соответствующие внутренним переменным, после чего к строкам покрытия E на оставшемся множестве переменных применяется оператор минимизации и поглощения. Входные переменные, определенные на всех кубах символами X также исключаются из результирующего покрытия как несущественные. Полученная совокупность векторов на множестве входных и выходных существенных переменных есть искомое кубическое покрытие триггерной структуры, которое в общем случае является не минимальным, но тупиковым решением, представленным в КП (12).

C(t-1)	C(t)	D	Q(t-1)	Q(t)
0	X	1	X	1
X	1	1	X	1
0	X	0	X	0
X	1	0	X	0
X	0	X	0	0
X	0	X	1	1
0	X	X	0	0
0	1	X	1	1

Таблица 2

E <sup>i</sup>	1	2	3	4	5	6	7	8
E0	X	X	X	X	X	X	X	X
E1	.	.	.	.	0	1	X	1
	.	.	.	.	1	0	X	0
	.	.	.	.	1	1	0	0
	.	.	.	.	1	1	1	1
E2	E	1	X	.	0	1	X	1
	J	X	0	.	0	1	X	1
	O	X	X	.	1	0	X	0
	E	0	1	.	1	0	X	0
	J	X	1	.	1	0	X	0
	O	X	X	.	1	1	0	0
	E	0	1	.	1	1	0	0
	J	X	1	.	1	1	0	0
	O	X	X	.	1	1	1	1
	E	0	1	.	1	1	1	1
	J	X	1	.	1	1	1	1

Полученное КП (12) должно быть отверифицировано, для чего в САПР Active-HDL вводится модель триггера и моделирующие воздействия и результаты моделирования (временная диаграмма) сравниваются с упомянутым КП. Результаты верификации показали несоответствие КП, полученного по П-алгоритму, модели триггера (12 и рис. 5). Таким образом, П-алгоритм нуждается в дополнительной модификации в целях его корректного применения к последовательностным схемам, имеющим как установочные, так и внутренние состояния, наличие которых, скорее всего, и является источником проблемы. Так как последовательностные схемы имеют временную зависимость, то есть, в отличие от комбинационных схем, для состояния схемы безразлично, в каком временном фрейме она находится, то продвижение назад, выполняемое П-алгоритмом для комбинационных структур, заменяется на продвижение вперед для триггерных структур. В остальном работа П-алгоритма аналогична описанной ранее.

При продвижении вперед (от кубических покрытий Q2 и Q3 к КП выходной ступени Q) будем пересекать только непротиворечивые кубы, то есть кубы, имеющие одинаковые значения по входным координатам ступеней первого ранга, а для получения выходного значения Q входными координатами будем считать значения функций Q2 и Q3, представленные в (13) как внутренние состояния.

C <sub>t-1</sub>	C <sub>t</sub>	D	Q2 <sub>t-1</sub>	Q2 <sub>t</sub>	Q3 <sub>t-1</sub>	Q3 <sub>t</sub>	Q <sub>t</sub>	Q <sub>t-1</sub>
X	0	X	X	1	X	1	0	0
X	0	X	X	1	X	1	1	1
0	1	0	X	0	1	1	X	0
0	1	1	1	1	X	0	X	1
1	1	X	0	0	0	0	unreached state	.
1	1	X	1	1	1	1	0	0
1	1	X	1	1	1	1	1	1

Путем исключения несущественных внутренних переменных получим окончательное КП триггерной структуры (14). Данное КП совпадает с результатами моделирования схемы в САПР Active HDL.

E <sup>i</sup>	1	2	3	4	5	6	7	8
E3	A	1	X	X	0	1	X	1
	E	1	X	1	0	1	X	1
	I	1	X	1	0	1	X	1
	B	X	0	X	0	1	X	1
	I	1	X	1	0	1	X	1
	J	X	0	1	0	1	X	1
	A	0	X	X	1	0	X	0
	B	X	X	0	1	0	X	0
	E	0	1	X	1	0	X	0
	I	0	1	0	1	0	X	0
	I	0	1	X	1	0	X	0
	J	X	1	0	1	0	X	0
	O	X	X	X	1	1	0	0
	A	1	X	1	1	1	0	0
	B	X	X	1	1	1	0	0
	A	0	1	X	1	1	0	0
	E	X	1	1	1	1	0	0
	I	0	1	1	1	1	0	0
	B	X	1	X	1	1	0	0
	I	1	1	1	1	1	0	0
	J	X	1	1	1	1	0	0
	O	X	X	X	1	1	1	1
	A	1	X	1	1	1	1	1
	B	X	X	1	1	1	1	1
	A	0	1	X	1	1	1	1
	E	X	1	1	1	1	1	1
	I	0	1	1	1	1	1	1
	J	X	1	X	1	1	1	1

$C_{t-1}$	$C_t$	D	$Q_{t-1}$	$Q_t$
X	0	X	0	0
X	0	X	1	1
0	1	0	X	0
0	1	1	X	1
1	1	X	0	0
1	1	X	1	1

(14)

Предложенный модифицированный р-алгоритм имеет преимущество перед классическим, заключающееся в возможности обработки сильнопоследовательных схем.

## 6. Верификация полученных результатов

Построение таблицы состояний по системам булевых уравнений вручную – трудоемкий и длительный процесс: количество строк в таблице состояний вычисляется по формуле  $N = 2 \cdot 2^n$ , где  $n$  – количество входных линий. При таком подходе для получения достоверной модели необходимо вычислять значения внутренних линий. При построении таблицы состояний по структурной (схемной) модели триггера отпадает необходимость рассмотрения внутренних линий, что приводит к некоторой оптимизации процедуры получения КП.

Однако эту процедуру можно автоматизировать путем построения модели триггера в среде Active-HDL, подачи на полученную модель верифицирующей последовательности, являющейся множеством входных наборов для таблицы состояний и последующего анализа выходных значений триггера по волновой диаграмме либо по текстовому файлу с результатами моделирования (создание такого файла возможно при подключении библиотеки TEXTIO).

Немаловажным преимуществом использования среды моделирования является возможность визуального выявления синхронной/асинхронной природы входов триггера, что при построении таблицы состояний вручную оказывается затруднительным.

Процедуру моделирования в VHDL продемонстрируем на примере трехступенчатой триггерной структуры **Flip-Flop(C\_high, D)**.

В первую очередь описывается архитектура триггера в формат .vhdl [4] по имеющимся булевым уравнениям, представленных ранее в (8):

```

library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;
entity C_highD is
    port (
        C: in  STD_LOGIC;
        D: in  STD_LOGIC;
        Q: out STD_LOGIC
    );
end C_highD;

architecture C_highD of C_highD is
    signal S2: std_logic;
    signal Q3: std_logic;
    signal Q2: std_logic;
    signal R3: std_logic;
    signal Q1: std_logic;
begin
    S2<=C and Q3;
    Q2<=not(S2) or (D and Q2);
    R3<=not(D and Q2);
    Q3<=not(C) or (R3 and Q3);
    Q1<=not(Q3) or (Q2 and Q1);
    Q<=Q1;
end C_highD;

```

```

end C_highD;
Строим тесты для моделирования всех состояний триггера:
process
  begin
    C<= '0','1' after 10 ns;
    wait for 20 ns;
  end process;

process
  begin
    D<='0','1' after 17 ns;
    wait for 34 ns;
  end process.

```

По результатам моделирования в виде wave-форм получаем общее КП (рис. 6) и КП ступеней триггерной структуры.

Анализируя полученную временную диаграмму, можно записать все состояния установки и сохранения триггера и, в конечном счете, записать общее КП для триггера, исходя из анализа его поведения, а также меняя список наблюдаемых сигналов во временной диаграмме, КП для всех ступеней триггера.

Полученные покрытия совпадают с покрытиями, полученными ранее для этой триггерной структуры. Таким образом, мы произвели верификацию полученных ранее КП. Исходя из анализа результатов тестирования можно сделать вывод о том, что наиболее полный тест для триггерных структур строится детерминированным методом.

## 8. Выводы

Были предложены методы построения кубических покрытий для структурно-функциональных моделей цифровых устройств, позволяющие строить КП и проектировать проверяющие тесты для всех константных неисправностей существенных линий схемы, полученные из системы булевых уравнений. Для применения той или иной методики построения КП необходимо учитывать количество подсхем в схеме, а также их тип (комбинационный или последовательностный). Так, метод построения КП по системе булевых уравнений с применением дискретного матаппарата является наиболее подходящим для комбинационных схем, а также для последовательностных схем, имеющих одну обратную связь. Данный метод также применим для построения КП ступеней в многоступенчатых последовательностных схемах, и для построения общего КП, при условии, что КП ступеней отличаются только по фронту входа синхронизации. Полученные результаты были проверены с помощью моделирования в среде Active HDL.

**Список литературы:** 1. Хаханов В.И. Техническая диагностика элементов и узлов персональных компьютеров. К.: ИЗМН, 1997. 308 с. 2. Баранов С.И., Майоров С.А., Сахаров Ю.П., Селютин В.А. Автоматизация проектирования цифровых устройств. -Л. Судостроение, 1979. 264 с. 3. Майоров С.А. Проектирование цифровых вычислительных машин. М.: Высш. шк., 1972. 344 с. 4. Active-VHDL Series. Book 1. Reference Guide. ALDEC Inc. 1998. 205 p.

**Хаханов Владимир Иванович**, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники ХТУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика вычислительных устройств, систем, сетей. Увлечения: баскетбол, горные лыжи. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26. E-mail: Hahanov@kture.kharkov.ua.

**Скворцова Ольга Борисовна**, аспирантка кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники ХТУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика вычислительных устройств, систем, сетей. Увлечения: аэробика, иностранные языки, музыка. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26. E-mail: <o\_skv2000@mail.ru>.

**Бабич Анна Витальевна**, аспирантка кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники ХТУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика вычислительных устройств, систем. Увлечения: иностранные языки. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26. E-mail: <anna\_babich@mail.ru>.