УДК 519.613

В.И. ХАХАНОВ, А.С.ШКИЛЬ,
Р.В.БЕДРАТЫЙ, ХАК ДЖАХЕРУЛ

МЕТОД КУБИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЦИФРОВЫХ СХЕМ

Предлагается применение обобщенной формулы формирования списков неисправностей при дедуктивном моделировании для случая представления таблицы переходов последовательностного устройства в виде кубического покрытия в двухтактном алфавите. Предложенный алгоритм проиллюстрирован на примере анализа неисправностей одно- и двухступенчатых триггеров.

1. Введение

Рост сложности и стоимости отдельных компонентов цифровой техники обуславливает повышение требований к их надежности и качеству. Обеспечить решение этих проблем при автоматизированном проектировании устройств невозможно без использования эффективных и быстродействующих систем моделирования на логическом уровне. Одной из самых важных функций моделирования является анализ неисправного поведения схемы в задачах верификации проектов и определения полноты тестов. Основными критериями эффективности алгоритмов моделирования являются адекватность и быстродействие, а последнее в свою очередь зависит от размеров моделируемых объектов. Поэтому разработка более точных и быстродействующих методов логического моделирования неисправностей цифровых устройств – важная и актуальная задача.

Опыт использования промышленных систем моделирования показал, что для схем большой размерности наиболее эффективным является дедуктивный метод моделирования неисправностей [1], так как время моделирования для указанного метода линейно зависит от сложности схемы. Известные реализации метода дедуктивного моделирования неисправностей для последовательностных схем (ПС) [1] были связаны с построением итеративной модели вентильного уровня для схем с локальными обратными связями (ОС), реализующих триггерные, регистровые, счетные схемы. Если же для описания упомянутых последовательностных компонентов использовать таблицы переходов, то такой подход позволяет уйти от явной итеративной модели, что даст возможность значительно сократить количество операций над списками неисправностей и общее время моделирования неисправностей устройства.

В работе рассматривается способ обработки списков неисправностей при дедуктивном моделировании для случая представления таблицы переходов последовательностного примитива в виде кубического покрытия в двухтактном алфавите [2], описывающего автоматную модель устройства в двух временных тактах. В качестве моделей неисправностей традиционно рассматриваются одиночные константные неисправности линий схемы.

2. Получение аналитических формул по кубическому представлению примитива

Рассмотрим комбинационные устройства и табличный способ их описания.Любая комбинационная схема $Y=f(x_1,x_2,\ .....x_n)$, где x_i – входные переменные, а Y – выходная переменная, может быть описана таблицей истинности или кубическим покрытием. Введем некоторые определения.

Булева переменная x_i существенна на двоичном наборе $(x_1,x_2,\ .....x_n)$, если ее изменение на противоположное приведет к изменению значения функции Y.

Группа булевых переменных $x_i...x_j$ существенна на двоичном наборе $(x_1,x_2,\ .....x_n)$, если одновременное изменение всех значений указанных переменных на противоположные приведет к изменению значения функции Y.

С точки зрения обнаружения константных неисправностей элемента, реализующего функцию $Y=f(x_1,x_2,\ .....x_n)$, они будут проявляться на выходе при подаче на схему данного двоичного набора.

Кубическое покрытие элемента есть минимизированная таблица истинности, значения координат которой представлены в алфавите {0,1,X}. Пустое пересечение двоичного набора с кубами покрытия позволяет определить всевозможные варианты существенности входных переменных на этом наборе и осуществить кубическое моделирование неисправностей на элементе [2].

В [3,4] показано, каким образом получаются формулы дедуктивного моделирования из кубического покрытия элемента. Общее уравнение получения выходных списков неисправностей элемента имеет вид:

$$S^{\sigma}_{\text{вых}} = \sum_{i=1}^{n}\prod_{j=1}^{m} S^{\sigma}_{j} \text{ для } C_{ij} \neq X, \quad (1)$$

где m – количество входных координат куба покрытия; n – число кубов в покрытии; σ – тип неисправности на линии схемы, σ = {0,1} для константных неисправностей; S_j – список проверяемых неисправностей на j-м входе элемента; $S_{\text{вых}}$ – список проверяемых неисправностей на выходе элемента; C_{ij} – координата куба покрытия; S – операция сложения, соответствующая теоретико-множественному объединению (∪); Π – операция умножения, соответствующая теоретико-множественному пересечению (З) [4].

Такую запись принято называть каноническим списочным представлением элемента (КСП).

Рассмотрим примеры составления КСП для некоторых элементов.

Для трёхвходового элемента И, покрытие которого имеет вид

$$C=\left[\begin{array}{ccc|c} \underline{1} & \underline{2} & \underline{3} & \underline{4} \\ 0 & X & X & 0 \\ X & 0 & X & 0 \\ X & X & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{array}\right],$$

формулы КСП будут следующими: $\left[\begin{array}{l} S_4^0 = S_1^0 + S_2^0 + S_3^0; \\ S_4^1 = S_1^1 S_2^1 S_3^1; \end{array}\right].$

Для двухвходового коммутатора, покрытие которого имеет вид

$$C=\left[\begin{array}{ccc|c} \underline{D1} & \underline{D2} & \underline{C} & \underline{Y} \\ 0 & X & 0 & 0 \\ X & 0 & 1 & 0 \\ 1 & X & 0 & 1 \\ X & 1 & 1 & 1 \end{array}\right],$$

формулы КСП будут следующими: $\left[\begin{array}{l} S_Y^0 = S_{D1}^0 S_C^0 + S_{D2}^0 S_C^1; \\ S_Y^1 = S_{D1}^1 S_C^0 + S_{D2}^0 S_C^0; \end{array}\right].$

Для перехода к моделированию неисправностей непосредственно на конкретных двоичных наборах берутся только формулы,описывающие неисправные значения по выходу элемента, и из них исключаются списки для переменных, соответствующих исправным значениям, путем их *вычитания* из соответствующих термов формул КСП [4].

Например, если на элемент $\cup$ поданы двоичные наборы , то списки проверяемых неисправностей будут иметь вид:

$$\longrightarrow \qquad \left[\begin{array}{l} S_4^0 = S_1^0 + S_2^0 + S_3^0; \\ S^1{}_4 = S^1{}_1 S^1{}_2 - S^0{}_3; \end{array}\right].$$

Если на двухвходовой коммутатор поданы двоичные наборы , то списки проверяемых неисправностей будут иметь вид:

.

Таким образом,дедуктивные формулы моделирования вентилей И, ИЛИ, И-НЕ, ИЛИ- НЕ, приведенные в [1], являются частным случаем применения выражения (1) к таблицам истинности указанных элементов. В [4] доказано, что моделирование поведения множества неисправных схем на исправном элементе дает одинаковые результаты для формул КСП и таблиц истинности. Можно утверждать, что кубическое покрытие является неявной формой КСП, а разница в технологии неисправного моделирования состоит в способе наложения моделируемого набора на табличную или аналитическую форму представления формул КСП.

При кубическом моделировании неисправностей наложение моделируемого набора на кубическое покрытие выполняется путем пересечения моделируемого набора с кубами покрытия противоположного значения по выходу. Упрощенные правила выполнения пересечения приведены в табл. 1, где символ α обозначает непустое пересечение с существенными координатами данного куба покрытия: $R_{ij} = E_j \cap C_{ij}$, где R_{ij} – результат пересечения; – символ входного набора; – значение координаты куба покрытия.

Таблица 1

$\cap$	0	1	X
0	α	U	X
1	U	α	X
X	X	X	X

Правило заполнения табл.1 назовём правилом преобладания X. В соответствии с ним R_{ij}=X обозначает, что список неисправностей по j-й координате пуст. R_{ij}=X для столбца табл.1 по причине несущественности соответствующей координаты куба покрытия. R_{ij}=X для строки табл.1 исходит из предположения, что список неисправностей для неопределенной (безразличной) координаты входного набора пуст. В общем случае это предположение несколько сужает класс моделируемых неисправностей [4], но для константных неисправностей его можно считать верным.

С учетом (1) и правил вычитания списков для несущественных переменных можно записать общую формулу получения выходных списков неисправностей для комбинационного элемента:

S = для R_{ij} = U)- для R_{ij} = a))+ , (2)

или в сокращенной форме

S = ( ), (3)

или в теоретико-множественном представлении:

$$S = \bigcup_{i}^{n} \left(\bigcap_{j}^{m} S_j \setminus \bigcup_{j}^{m} S_j \right) \cup \overline{E}_{\text{вых}}. \tag{4}$$

Аналогичный результат получен в работе [5] и проиллюстрирован на примере моделирования комбинационной схемы с произвольными комбинационными элементами. Следует отметить, что формула (1) ориентирована на компилятивный способ моделирования схемы, а (2) и (3) – на интерпретативный, каковым и является кубическое моделирование.

3. Кубическое моделирование неисправностей

Закон функционирования последовательностного элемента (ФПЭ) описан таблицей переходов, которая может быть представлена в виде кубического покрытия в двухтактном алфавите [2]:

$$F^2 = <(t\text{-}1,t),(X,Z,Y),\{A^2\}>,$$

где (t-1,t) – два соседних автоматных такта в описании системы функциональных отношений; (X,Z,Y) – вектор упорядоченных подмножеств входных, внутренних, выходных переменных; $\{A^2\}$ – двухтактный алфавит описания состояний автоматных переменных [2]:

A^2={Q=00,E=01,H=10,J=11,O={Q,H},I={E,J},A={Q,E}, B={H,J},S={Q,J},P={E,H},C={E,H,J},F={Q,H,J},L={Q,E,J}, V={Q,E,H},Y={Q,E,H,J}, A^1={0,1,X={0,1}}, Ж(U)}

кубическим покрытием C = (C_1, C_2, ..., C_i, ..., C_n), здесь C_i = (C_{i1}, C_{i2}, ..., C_{ij}, ..., C_{ik}), разбитый на упорядоченные подмножества C_i = (C_i^X, C_i^Z, C_i^Y). Если функциональный элемент – комбинационный автомат, задаваемый в формате F^1 = <(t),(X,Y),{A^1}>, кубическое покрытие определяется отношениями на векторе переменных C_i = (C_i^X, C_i^Y), что задает многовыходовую комбинационную схему в виде примитивного элемента с m входами и k выходами. Если k=1, речь идет о двоичной булевой функции от m переменных $Y=f(X_1,X_2,..., X_m)$.

Такая форма записи таблицы переходов позволяет рассматривать координаты кубов покрытия C_{ij} как независимые друг от друга переменные, а состояние элемента описывается суперпозицией выходных (внутренних) координат кубов покрытия.

Исходя из сказанного выше, существенность переменной на наборе трансформируется в существенность переменной на переходе.

Автоматная переменная x_i существенна во входном слове ФПЭ ($x_1,x_2, ...x_n$), если изменение ее значения на противоположное не позволит реализовать предполагаемый переход из состояния A_m в состояние A_n .

Группа автоматных переменная $x_i...x_j$ будет существенна во входном слове ФПЭ ($x_1,x_2, ...x_n$), если одновременное изменение всех значений указанных переменных на противоположные не позволит реализовать предполагаемый переход из состояния A_m в состояние A_n .

Аналогично можно определить существенность внутренних переменных на переходе.

С точки зрения обнаружения (проявления) константных неисправностей ФПЭ, реализующего функцию Y=f(X,Z), неисправности переменных, существенных на данном переходе, проявляются при реализации любого другого перехода, кроме A_m - A_n, в терминах двухтактного алфавита Z_t (Y_t) для исправной и неисправной схем будут отличаться.

Если для простоты изложения внутренние и выходные переменные объединить в одно подмножество Z, то формат записи списков неисправностей в двух тактах можно представить в следующем виде:

$S^X{}_{t-1}$	$S^Z{}_{t-1}$
$S^X{}_t$	$S^Z{}_t$

.

Исходя из определения существенности и обнаружения неисправности на переходе, представляет интерес правильность конечного состояния перехода Z_t.Формирование списка неисправностей, проверяемых на двухтактном входном слове, можно представить в виде

$$S_t^Z = F(S_{t-1}^X, S_t^X, S_{t-1}^Z, S_t^Z)\,. \qquad (5)$$

С учетом (5) формулу (3) для ПСЭ можно записать в виде

$$S_t = \sum_{i=1}^{n} \Big(\prod_{j-1}^{m}(S_j^x)^U * \prod_{j=1}^{k}(S_{t-1}^z)^U - \sum_{j=1}^{m}(S_j^x)^{\alpha} - \sum_{j=1}^{k}(S_{t-1}^z)^{\alpha}\Big) + \overline{E}_t^Z, \qquad (6)$$

где к – количество выходных и внутренних переменных.

Правила реализации операции пересечения моделируемого набора с двухтактным кубическим покрытием представлены в табл.2.

Таблица 2

∩	0	1	X	Q	E	H	J	O	I	A	B	S	P	C	F	L	V	Y
00	α	U	X	α	U	U	U	α	U	α	U	λ	β	U	α	α	α	X
01	U	α	X	U	α	U	U	U	α	α	U	β	λ	α	U	α	α	X
10	α	U	X	U	U	α	U	α	U	U	α	β	λ	α	α	U	α	X
11	U	α	X	U	U	U	α	U	α	U	α	λ	β	α	α	α	U	X
X0	α	U	X	α	U	α	U	α	U	X	X	X	X	X	α	X	α	X
X1	U	α	X	U	α	U	α	U	α	X	X	X	X	α	X	α	X	X
0X	X	X	X	α	α	U	U	X	X	α	U	X	X	X	X	α	α	X
1X	X	X	X	U	U	α	α	X	X	U	α	X	X	α	α	X	X	X
XX	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Она является упрощенным вариантом двухтактной операции пересечения, введенной в [2] с учетом того, что список неисправностей соответствующего такта будем считать пустым, если двухтактная переменная моделируемого набора E_j или координата куба покрытия C_{ij} равна X в этом такте.

В табл.2 символы l есть непустые пересечения по выходным координатам сохранения (инверсии) состояния, а β – пустые пересечения по указанным координатам.

Таблица 3

∩	0	1	X	Q	E	H	J	O	I	A	B	S	P	C	F	L	V	Y
0 0	x 0	x u	X	0 0	0 u	u 0	u u	x 0	x u	0 x	u x	0u 0u	0u u0	ux xu	ux x0	ux xu	x0 0x	X
0 1	x u	x 1	X	0 u	0 1	u u	u 1	x u	x 1	0 x	u x	u0 1u	0u 1u	xu 1x	ux xu	x0 1x	x0 ux	X
1 0	x 0	x u	X	u 0	u u	1 0	1 u	x 0	x u	u x	1 x	u1 0u	1u 0u	1x xu	1x x0	ux xu	ux x0	X
1 1	x u	x 1	X	u u	u 1	1 u	1 1	x u	x 1	u x	1 x	1u 1u	u1 1u	x1 1x	1x xu	ux x1	ux xu	X
X 0	x 0	x u	X	x 0	x u	x 0	x u	x 0	x u	X	X	X	X	X	x 0	X	x 0	X
X 1	x u	x 1	X	x u	x 1	x u	x 1	x u	x 1	X	X	X	X	x 1	X	x 1	X	X
0 X	X	X	X	1 x	1 x	u x	u x	X	X	1 x	u x	X	X	X	X	0 x	0 x	X
1 X	X	X	X	u x	u x	0 x	0 x	X	X	u x	0 x	X	X	1 x	1 x	X	X	X
X X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

В формуле (6) S_j является суперпозицией списков неисправностей на j-й координате в моменты времени (t-1, t). Чтобы рассмотреть варианты взаимодействия списков в моменты времени (t-1, t) на одной координате, представим табл. 2 в варианте разбивки на моменты времени (такты) t-1 и t (табл.3).

Для дальнейшего упрощения табл.3 и перехода к спискам неисправностей примем некоторые допущения, которые загрубляют математическую модель ПС в двухтактном алфавите, но отражают физические процессы, протекающие в ПС.

1. Одноименные неисправности, возникающие в разных временных тактах, будем считать эквивалентными.

2.В модели ПСЭ символы {C,F,L,V} могут присутствовать только на входных координатах кубов покрытия (множество X), а символы {S,P} - только на выходных и внутренних координатах (множество Z).

3.Неисправности по выходам (внутренним переменным) ПСЭ в момент времени t включаются в результирующий список безусловно как инверсия значения сигнала в исправном состоянии. Существенными по координатам множества Z будут только те результаты пересечений, которые имеют u в момент времени t. Таким образом, Q∃H=U по табл. 2 или {u0} в табл.3 на самом деле существенность выхода в момент времени t не определяет.

4.С учетом правила преобладания X в случае неполностью установившейся схемы $E^Z_{t-1} = X$ списки S_{t-1} считаются пустыми.

5.Если по координатам множества Z для j-й координаты существует хотя бы один вариант пустого пересечения (например, Q∃S=1 или по

табл.3 {00, uu}), то такая координата будет существенной; таким образом, 1=U.

6. Если по координатам множества X для j-й координаты существует хотя бы один вариант непустого пересечения (например, Q∃L=a или по табл.3 {0x, xu}), то такая координата будет несущественной, несмотря на наличие символа u в одном из вариантов пересечения в момент времени t.

7. Если в ячейке табл.3 имеется несколько равнозначных вариантов пересечения, то для формирования выходного списка неисправностей указанные варианты берутся по ИЛИ ("+").

С учетом сделанных допущений и формулы (5) в табл. 4 представлены правила формирования списков неисправностей на отдельных координатах кубов покрытий, исходя из результатов пересечений в табл.3 и правил обработки содержимого ее ячеек.

Таблица 4

	u u	u x	x u	uu 01	01 uu	0011 0101	01 xx	xx 01
$(S_{ij})^U$	$S_{t-1} \cap S_t$	S_{t-1}	S_t	$S_{t-1} - S_t$	$S_t - S_{t-1}$	∅	∅	∅
$(S_{ij})^\alpha$	∅	∅	∅	∅	∅	$S_{t-1} + S_t$	S_{t-1}	S_t
S_t^Z	$\overline{E}_t^Z$	∅	$\overline{E}_t^Z$	∅	$\overline{E}_t^Z$	∅	∅	∅
S_{t-1}^Z	$(S_{t-1})^U$	∅	∅	∅	$(S_{t-1})^\alpha$	∅	∅	∅

Полученные по правилам табл. 4 списки неисправностей на отдельных координатах кубов покрытий используются в формуле (6) для построения выходных списков неисправностей ПСЭ.

Правила дедуктивного моделирования ПСЭ следующие.

1. Моделируется исправный набор E методом кубического моделирования в двухтактном алфавите.

2. Формируются начальные списки неисправностей на элементе путем инверсии координат E_j в моменты времени t и t-1.

3. Выполняется пересечение результата исправного моделирования с очередным i-м кубом покрытия ПСЭ по правилам табл. 3.

4. Определяются координаты множества Z = (Z,Y), на которых имеются символы U в момент времени t. Эти выходы (внутренние переменные) попадают в список существенных.

5. Для куба с существенными выходами по табл. 3 и 4 определяются списки неисправностей на отдельных координатах.

6. Вычисляется список неисправностей на существенных координатах из множества Z для i-го куба по формуле (6).

7. Суммируются списки по всем кубам покрытия и добавляется E_t^Z.

В качестве иллюстрации предложенного метода приведем результаты неисправного моделирования асинхронного DV-триггера и синхронного DC-триггера, для простоты используя только прямой выход триггера. Моделирование будем производить на последовательности из 6 наборов в двухтактном алфавите в соответствии с [2]. В приведенных примерах справа от моделируемого набора показаны результаты его пересечения с соответствующим кубом покрытия по табл. 3. Символ "+" справа от результата пересечения обозначает существенность выхода в данном пересечении, а "–" – несущественность выхода и соответственно $S_i = \varnothing$. Суммарный список неисправностей для выхода S_t вычисляется по выражению

$$S_t = S_1 + S_2 + S_3 + \overline{E_t}^{Z}. \qquad (7)$$

Входные и выходные списки неисправностей приведены в соответствующих таблицах для каждого моделируемого набора.

Пример 1.

Покрытие

D	V	Q
X	0	S
0	1	0
1	1	1

	D	V	Q	D	V	Q
а	0	1	0	O	I	O
б	0	0	0	Q	H	Q
в	1	1	1	E	E	E
г	1	0	1	J	H	J
д	0	1	0	H	E	H
е	1	0	0	E	H	Q

а) Выполняется пересечение результата исправного моделирования T_i в двухтактном алфавите с кубами покрытия DV-триггера.В данном случае выход является существенным при пересечении с третьим кубом из покрытия E. По формуле (6) для каждого куба покрытия вычисляются частичные списки неисправностей S_i:

$$T_1(OIO)\mathrm{I}\ C^1\begin{bmatrix} X & 0 & S\\ 0 & 1 & 0\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X & u & X\\ 0 & 1 & 0\\ u & 1 & u\end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} -\\ -\\ +\end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \varnothing\\ \varnothing\\ S_3 = D^1 - V^0\end{bmatrix}.$$

Суммарный список неисправностей St вычисляем по формуле (7):

$$S_t = D^1 + Q^1.$$

Аналогично в пунктах б), в), г), д), е) вычисляются списки неисправностей для остальных входных воздействий.

б)

$$T_2(QHQ)\mathrm{I}\ C^1\begin{bmatrix} X & 0 & S\\ 0 & 1 & 0\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X & 0 & \substack{u\\u}\\ 0 & u & 0\\ u & u & u\end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} +\\ -\\ +\end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} S_1 = D^1 + Q^1\\ \varnothing\\ S_3 = D^1 * Q^1 = \varnothing\end{bmatrix};$$

$$S_t = D^1 + Q^1;$$

в)

$$T_3(EEE)\mathrm{I}\ C^1\begin{bmatrix} X & 0 & S\\ 0 & 1 & 0\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X & u & \substack{0\\u}\\ u & 1 & u\\ u & u & u\end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} +\\ +\\ -\end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} S_1 = V^0\\ S_2 = D^0\\ \varnothing\end{bmatrix},$$

$$S_t = D^0 + Q^0 + D^0;$$

г)

$$T_4(JHJ)\mathrm{I}\ C^1\begin{bmatrix} X & 0 & S\\ 0 & 1 & 0\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X & 0 & \substack{u\\u}\\ u & u & u\\ 1 & u & 1\end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} +\\ +\\ -\end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} S_1 = V^0 + D^0 + Q^0\\ S_2 = D^0 * V^1 = \varnothing\\ \varnothing\end{bmatrix};$$

$$S_t = D^0 + Q^0 + V^0;$$

д)

$$T_5(HEH)\mathrm{I}\ C^1\begin{bmatrix} X & 0 & S\\ 0 & 1 & 0\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X & u & \substack{1\\u}\\ 0 & 1 & 1\\ u & 1 & u\end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} +\\ -\\ +\end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} S_1 = V^0 - S_{t-1} = \varnothing\\ \varnothing\\ S_3 = D^1 - V^0 = D^1\end{bmatrix};$$

$$S_t = D^1 + Q^1;$$

е)

$$T_6(EHQ)\mathrm{I}\ C^1\begin{bmatrix} X & 0 & S\\ 0 & 1 & 0\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X & 0 & \substack{u\\u}\\ u & u & \substack{u\\0}\\ 1 & u & u\end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} +\\ -\\ +\end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} S_1 = D^1 + Q^1\\ \varnothing\\ S_3 = V^1 - D^0 = V^1\end{bmatrix};$$

$$S_t = D^1 + Q^1 + V^1.$$

Пример 2.
Покрытие

$$\begin{array}{ccc} \underline{D} & \underline{C} & \underline{Q} \\ X & F & S \\ Q & E & O \\ H & E & I \end{array}$$

	D	V	C	D	V	C
а	0	0	X	O	O	X
б	0	1	0	Q	E	O
в	0	0	0	Q	H	Q
г	1	0	0	E	Q	Q
д	1	1	1	J	E	E
е	1	1	1	J	J	J

а) $O \quad O \quad X \qquad S_t = \varnothing$;

б)

$$T_2(QEO)I \ C^2 \begin{bmatrix} X & F & S \\ Q & E & O \\ H & E & I \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X & \begin{matrix} ux \\ xu \end{matrix} & X \\ Q & E & O \\ u & 0 & x \\ u & 1 & u \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} - \\ - \\ + \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \varnothing \\ \varnothing \\ S_3 = D^1 \end{bmatrix},$$

$$S_t = D^1 + Q^1;$$

в)

$$T_3(QHQ)I \ C^2 \begin{bmatrix} X & F & S \\ Q & E & O \\ H & E & I \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X & \begin{matrix} 1x \\ x0 \end{matrix} & \begin{matrix} u \\ u \end{matrix} \\ Q & U & O \\ u & u & x \\ u & u & u \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} + \\ - \\ + \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} S_1 = D^1 + Q^1 \\ \varnothing \\ S_3 = \varnothing \end{bmatrix};$$

$$S_t = D^1 + Q^1 + Q^1 = D^1 + Q^1;$$

г)

$$T_4(EQQ)I \ C^2 \begin{bmatrix} X & F & S \\ Q & E & O \\ H & E & I \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X & \begin{matrix} ux \\ x0 \end{matrix} & \begin{matrix} u \\ u \end{matrix} \\ U & U & Q \\ u & 0 & x \\ 1 & u & u \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} + \\ - \\ + \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} S_1 = D^1 + Q^1 \\ \varnothing \\ S_3 = \varnothing \end{bmatrix};$$

$$S_t = D^1 + Q^1;$$

д)

$$T_5(JEE)I \ C^2 \begin{bmatrix} X & F & S \\ Q & E & O \\ H & E & I \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X & \begin{matrix} ux \\ xu \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ u \end{matrix} \\ \begin{matrix} u \\ u \end{matrix} & E & \begin{matrix} x \\ u \end{matrix} \\ J & E & E \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} + \\ + \\ - \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} S_1 = C^0 + C^1 \\ S_2 = D^0 \\ \varnothing \end{bmatrix};$$

$$S_t = C^0 + C^1 + D^0 + Q^0;$$

е)

$$T_6(JJJ)I \ C^2 \begin{bmatrix} X & F & S \\ Q & E & O \\ H & E & I \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X & \begin{matrix} 1x \\ xu \end{matrix} & \begin{matrix} u \\ u \end{matrix} \\ \begin{matrix} u \\ u \end{matrix} & \begin{matrix} u \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} x \\ u \end{matrix} \\ J & \begin{matrix} u \\ 1 \end{matrix} & I \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} + \\ + \\ - \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} S_1 = C^0 + C^1 + D^0 + D^1 \\ S_2 = \varnothing \\ \varnothing \end{bmatrix};$$

$$S_t = C^0 + C^1 + D^0 + Q^0.$$

Заключение

Метод кубического моделирования представляет собой эффективную технологию обработки цифровых схем табличного уровня представления. Применение данного метода позволяет моделировать все одиночные константные неисправности за одну итерацию.Необходимым и достаточным условием применения является наличие табличной формы описания примитивов цифрового устройства. В случае представления таблицы переходов последовательностного компонента в виде кубического покрытия в двухтактном алфавите предложенный метод также является эффективным. Разработанная технология позволяет: получать дедуктивные формулы для любых типов функциональных элементов; моделировать неисправности путём анализа кубического покрытия, используя единую модель для исправного и неисправного элемента; генерировать тесты для цифровых систем на основе использования КПСН; проектировать аппаратурные быстродействующие симуляторы.

Список литературы: 1. *Автоматизированное* проектирование цифровых устройств/ *С.С. Бадулин, Ю.М. Барнаулов и др.* / Под ред. С.С. Бадулина. М.:Радиосвязь, 1981. 240 с. 2. *Хаханов В.И.* Техническая диагностика элементов и узлов персональных компьютеров. К.: ІЗМН. 1997. 308 с. 3.*Ермилов В.А.* Метод отбора существенных неисправностей для диагностики цифровых схем. Общие выражения для неисправностей, возможных при эксперименте // Автоматика и телемеханика. 1971. №1. С. 159-167. 4.*Биргер А.Г.* Многозначное дедуктивное моделирование цифровых устройств // Автоматика и вычислительная техника. 1982. №4. С. 77-82. 5. *Дедуктивный* метод кубического моделирования неисправностей цифровых устройств// Радиоэлектроника и информатика. 1999. №1. С.77-84. 6.*Armstrong D.B.* A deductive method for simulation fault in logic circuits // IEEE Trans on Computers. 1972. Vol. C-21, №5. P.464 - 471.

Поступила в редколлегию 02.07.2000

Хаханов Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники ХТУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика вычислительных систем. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26.

Шкиль Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники ХТУРЭ. Научные интересы: диагностика компьютеров. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26.

Бедратый Роман Анатольевич, аспирант кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники ХТУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика вычислительных устройств, сетей. Адрес: 61166, Украина, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26.

Хак Х.М. Джахирул, аспирант кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники ХТУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика цифровых устройств. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26.

УДК 621.3.049:681.3

Н.В. АЛИПОВ, Е.И. ЛИТВИНОВА, В.П. КУКСОВ

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ТРАССИРОВКА ДВУСТОРОННИХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Описывается новый алгоритм гибкой трассировки двусторонней печатной платы, который позволяет минимизировать длину соединения, количество переходных отверстий и обеспечивает высокое качество топологического рисунка.

Топологический подход к трассировке печатных соединений на плате позволяет создавать гибкие программы-трассировщики, способные заменить человека-конструктора на наиболее трудоемком и сложном этапе проектирования печатных модулей. Гибкими они называются потому, что могут изменять конфигурацию ранее проложенных трасс в процессе своей работы, что позволяет улучшить качество печатного рисунка и увеличить процент разведенных соединений.

При топологическом подходе к решению задачи трассировки связей используют два основных типа моделей коммутационного поля печатной платы:

– модель с непрерывным топологическим представлением поверхности конструктивного узла – непрерывное топологическое рабочее поле;

– модель с дискретизованным топологическим представлением поверхности конструктивного узла – дискретное топологическое (крупнодискретное) рабочее поле.

Наибольшее распространение получил второй тип модели, так как он позволяет реализовать волновые методы поиска кратчайшего пути между двумя дискретами.

Рассмотрим алгоритм гибкой трассировки печатных соединений, основанный на использовании крупнодискретной топологической модели рабочего поля печатной платы.

Представим коммутационное поле каждого слоя платы в виде совокупности макродискретов так, как это описано в работе*. С этой целью разделим рабочее пространство с размещенными в нем компонентами на макродискреты путем проведения прямых линий по границам установочных мест конструктивных элементов. Полученные совокупности макродискретов назовем соответственно крупнодискретными рабочими полями (КДРП) первого и второго слоев. Эти поля могут быть связаны между собой в процессе трассировки с помощью межслойных переходов и удовлетворяют следующим условиям:

* *Алипов Н.В., Литвинова Е.И.* Трассировка многослойных печатных плат на основе крупнодискретной модели // Труды УНИИРТ. 1995. №3. С.72-76.