

## АВТОМАТНЫЕ МОДЕЛИ ИСПРАВНОГО ПОВЕДЕНИЯ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ

Предлагаются модель и алгоритм моделирования исправного поведения цифровых устройств, ориентированный на реализацию троичного синхронного событийного итеративного анализа проектируемых дискретных объектов. Модель может быть также использована для анализа неисправностей.

### 1. Введение

Модель представляет собой структуру взаимосвязанных функциональных элементов, описанных кубическими покрытиями в многозначном алфавите [1, 2]:  
 $A^2 = \{ Q = 00, E = 01, H = 10, J = 11, O = \{ Q, H \}, I = \{ E, J \}, A = \{ Q, E \}, B = \{ H, J \}, S = \{ Q, J \}, P = \{ E, H \}, C = \{ E, H, J \}, F = \{ Q, H, J \}, L = \{ Q, E, J \}, V = \{ Q, E, H \}, Y = \{ Q, E, H, J \}, A^1 = \{ 0, 1, X = \{ 0, 1 \} \}, \emptyset(U) \}$ .

Она предназначена для решения следующих задач:

- 1) реализация процедуры прямой импликации – исправного моделирования невыходных линий при заданных условиях в троичном алфавите на входах цифрового объекта;
- 2) выполнение процедуры обратной импликации на основе применения П-алгоритма в целях определения входных условий, удовлетворяющих заданному состоянию выходных (невыходных) переменных;
- 3) моделирование одиночных константных неисправностей, задаваемых координатами кубических покрытий примитивных элементов (ПЭ) цифровой структуры.

### 2. Прямой анализ кубического покрытия

Процедура выполнения прямой импликации на автоматной модели переменных

$$Y^t = f[X^{(t-1,t)}, Y^{(t-1)}],$$

где  $X$ ,  $Y$  – векторы входных и невыходных автоматных переменных, определяется выражением  $[X^{(t-1,t)}, Y^{(t-1)}] \rightarrow Y^t$  и зависит от способа описания поведения ПЭ.

Если это аналитическая запись, в том числе и на алгоритмических языках, то для определения выходной реакции примитива на входное слово необходимо иметь универсальные или специальные решатели – трансляторы или компиляторы, дорогостоящие, но имеющие высокое быстродействие. Недостаток аналитических моделей – их высокая стоимость, определяемая сложностью написания и отладки фактических программ моделирования примитивов. Кроме того, такие модели не подлежат автоматическому анализу или синтезу в целях проектирования общих структур данных устройства или декомпозиции последнего на составные части, а также их нельзя использовать для решения других задач технической диагностики. Графовое представление поведения примитива может быть оформлено в аналитическую запись, и тогда для нее будут характерны все те преимущества и недостатки, которые названы выше.

Табличная форма описания модели есть явная запись системы отношений на множестве входных (внутренних) и выходных переменных, благодаря чему имеет при одном недостатке (большой объем данных в сравнении с аналитическим, что требует значительных временных затрат) такие преимущества:

- 1) Универсальность и простота алгоритмов анализа и синтеза табличных моделей.

2) Возможность декомпозиции таблицы на элементы с генерацией для последних собственных таблиц меньшей размерности.

3) Композиция таблиц отдельных примитивов для создания единой таблицы истинности цифрового устройства (ЦУ).

4) Универсализм табличных моделей для решения задач прямой и обратной импликации, моделирования неисправностей и исправного поведения, генерации тестов, контроля и поиска дефектов заданного класса.

Учитывая высокую производительность современных компьютеров и практическую безграничность информационных емкостей памяти ЭВМ, недостаток табличных форм не является существенным.

Процедура анализа таблицы [1] заключалась в сравнении входного (выходного) слова со строками, и если такое имело место, то состояние выходов (входов) элемента определялось подстановкой значений соответствующих координат из рассматриваемой строки таблицы. D-исчисление Рота [3] также ничего не добавило к упомянутой процедуре анализа, хотя уже появилась логическая избыточность алфавита в виде символов  $\{0, 1, X\}$ . Методы генерации тестов на основе использования кубических (вырожденных) покрытий (КП) [4-6] ориентированы на решение имплицативных задач без рассмотрения алгоритмов моделирования исправного поведения и неисправностей.

Введение избыточности, предложенной Ротом, в алфавит послужило развитием более сложных процедур анализа, поскольку метод подстановки в чистом виде уже не обеспечивал правильного решения из-за наличия символа X. Следующие доказательства показывают возможность построения процедур для адекватного моделирования цифровых объектов.

**Определение 1.** Пересечение векторов в замкнутом теоретико-множественном алфавите является непустым (непротиворечивым), если результирующий вектор не содержит символов пустого множества

$$M \cap C = \begin{cases} \emptyset \leftarrow \exists M_j, C_j (M_j \cap C_j) = \emptyset; \\ R = M_j \cap C_j \leftarrow \forall M_j, C_j (M_j \cap C_j) \neq \emptyset. \end{cases}$$

**Определение 2.** Объединение векторов в замкнутом теоретико-множественном алфавите будет непустым (пустым), если каждый из них не содержит символов (содержит символы) пустого множества

$$M \cup C = \begin{cases} \emptyset \leftarrow \forall M_j, C_j (M_j \cup C_j) = \emptyset; \\ R = M_j \cup C_j \leftarrow \exists M_j, C_j (M_j \cup C_j) \neq \emptyset. \end{cases}$$

**Определение 3.** Пересечение векторов, один из которых имеет символ пустого множества  $\emptyset$  (U), равно пустому множеству.

Это следует из определения 1.

**Теорема.** Непустое объединение непротиворечивых результатов пересечения входного вектора с кубами покрытия определяет состояния всех переменных цифрового автомата в замкнутом теоретико-множественном алфавите

$$R = \bigcap_{i=1}^n E \cap C_i \neq \emptyset \leftarrow [\forall E_j, C_{ij} (E_j \cap C_{ij}) \neq \emptyset].$$

Если все результаты пересечения вектора E с каждым кубом покрытия  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n\}$  равны пустому множеству, то их объединение равно U. Будем считать, что исходные векторы E и  $C_i$  свободны от символов U. Отсюда следует отсутствие в n-мерном векторном пространстве общей области у покрытия C и вектора E. Это может быть лишь в случае задания неполного кубического покрытия для описания логических функций объекта, или противоречивости определения системы отношений между входными и выходными переменными вектора E. Например, для КП ПЭ 2И-НЕ, имеющего три куба:  $\{0X1, X01, 110\}$ , выполнение пересечения вектора  $E = (000)$  с каждым кубом покрытия определяет результат, равный U. Если же предположить отсутствие в упомянутом КП

последнего куба, то пересечение вектора  $E=110$  с каждым кубом неполного покрытия будет пустым. Это значит, что пустым будет и объединение – свидетельство некорректности задания входного вектора  $E$  или неполноты КП.

Если же существует хотя бы одно непустое пересечение между  $E$  и  $C_i$ , то согласно определениям 1 и 2 их объединение будет непустым. Оно идентифицирует логические состояния всех линий объекта как общую область  $n$ -мерного пространства для  $E$  и  $C$ , которая есть максимально возможный общий результат реакции объекта на входное слово  $E$ .

*Следствие 1.* Для выполнения прямой импликации по КП примитивного элемента необходимо априорное доопределение невходных координат вектора  $E$ :  $X \in E \leftarrow \forall E_j \bar{X}_j = X$ .

Максимальная неопределенность невходных координат позволяет получить максимально возможное множество непротиворечивых результатов пересечения между  $C$  и  $E$ , формирующих самое общее состояние переменных. Любой другой вариант предварительного задания невходных линий лишь подтвердит существование частного решения или опровергнет его в случае получения пустого объединения результатов пересечений.

*Следствие 2.* Реакция комбинационного объекта на двоичный вектор не может быть троичной

$$R_j \bar{X}_j \in R = \{0,1\} \leftarrow \left[ \bigcap_{i=1}^n E_i \cap C_i \neq \emptyset \leftarrow \forall E_j, C_{ij} (E_j \bigcap_{j=1}^m C_{ij}) \neq \emptyset \ \& \ \forall E_j X_j = \{0,1\} \right].$$

Это следует из функционирования конечного автомата, когда двоичному входному слову не могут быть поставлены в соответствие две различные реакции, в противном случае он переходит в класс недетерминированных автоматов, которые здесь не рассматриваются. Следовательно, даже при наличии нескольких непустых пересечений между  $E$  и  $C$  результат должен быть только двоичным по всем линиям ПЭ, в противном случае покрытие не принадлежит к КП комбинационного цифрового автомата.

*Следствие 3.* Реакция комбинационной схемы на троичный входной вектор может быть троичной:

$$R_j \bar{X}_j \in R = \{0,1,X\} \leftarrow \left[ \bigcap_{i=1}^n E_i \cap C_i \neq \emptyset \leftarrow \forall E_j, C_{ij} (E_j \bigcap_{j=1}^m C_{ij}) \neq \emptyset \ \& \ \forall E_j X_j = \{0,1,X\} \right].$$

При существовании хотя бы одного символа  $X$  в векторе  $E$  фактически можно говорить о компактной записи двух двоичных векторов. Каждый из них может иметь собственную реакцию выходов, которые не всегда совпадают, что и формирует при их объединении троичную реакцию на невходных линиях. Если вектор  $E$  с одним символом  $X$  определяет на выходе значение неопределенности, то данная входная переменная существенна или активна на данном векторе  $E$ .

Избыточность однократного алфавита кубического исчисления, определяемая двумя символами  $\{0,U\}$ , один из которых не значащий, привела к усложнению процедуры анализа КП посредством введения двух векторных операций пересечения и объединения. Компактность получаемых моделей функционально сложных устройств можно считать результатом, превосходящим понесенные издержки [7,8].

Избыточность двухтактного алфавита кубического исчисления не изменяет сущности теоретико-множественного анализа КП, но позволяет оформить модели сложных последовательностных, а также комбинационных схем в КП приемлемых размеров. Далее предлагаются способы анализа ЦУ и их примитивов, основанные на использовании двухтактных покрытий в общем случае, где КП комбинационных схем есть частный случай описания цифрового автомата [7,8].

### 3. Автомат описания функций примитивов

Проектирование процедур и алгоритмов анализа исправного поведения ЦУ на основе использования двухтактного кубического исчисления предполагает исследование функциональных особенностей составляющих компонентов. Классификация разнообразия примитивов и их структур определяется следующей совокупностью качественных характеристик, которые следует учитывать при создании системы моделирования.

1) Многовыходовой комбинационный или последовательностный элемент, в котором каждый выход функционально зависим от всех входов. Для такого примитива определяется полное КП, задающее все возможные переходы на пространстве входных состояний. Примерами таких ПЭ могут служить логические элементы, сумматоры, коммутаторы, дешифраторы, преобразователи кодов, триггеры, счетчики, управляющие конечные автоматы.

2) Многовыходовой элемент, представленный КП, в котором состояние выходной переменной определяется подмножеством кубов на ограниченном множестве существенных для данного выхода линий. Значения других выходов на упомянутых кубах покрытия могут не определяться благодаря наличию на них символов Z. Примеры таких примитивов – микросхемы, составленные из нескольких, несвязанных между собой логических, комбинационных или последовательностных элементов; многофункциональные регистры, где отдельные операции не требуют участия всех переменных при их описании.

3) Многовыходовой ПЭ, имеющий двунаправленные линии, которые должны быть как входами, так и выходами при описании КП примитива. При проектировании структур данных ЦУ такие переменные должны быть отнесены ко входам.

4) Многовыходовой примитив, имеющий неполное покрытие, которое формирует отдельные функции ПЭ на векторе существенных переменных.

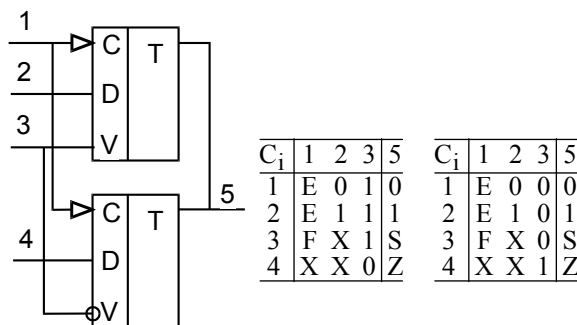
5) Структура элементов, имеющих полные КП, нагруженные на выходы одного потенциала – монтажная логика И (ИЛИ).

6) Совокупность элементов с неполными КП (которые формируют отдельные операции функционального элемента), имеющих выходы одного потенциала – объединение выходов для определения их значений посредством анализа всех нагруженных на них примитивов.

7) Функционалы, реализующие арифметические операции при использовании в качестве входов и выходов одних и тех же линий.

8) ПЭ, имеющие на входах и выходах многоадресные шины и управляющие передачей информации от А к В, и наоборот.

Триггеры и КП представлены на рисунке.



Функциональная модель триггерной структуры

Упомянутое многообразие примитивов и схемных соединений предполагает модификацию автомата первого рода к U-автомату:  $U = \langle X, Y, f \rangle$ , ориентированному на анализ цифрового объекта и определяемому функцией выходов

$$Y(t+1) = f[X(t-1), X(t), Y(t)]$$

на множестве входных и выходных (невходных) состояний. Задание автомата в трех соседних автоматных тактах дает возможность реализовать процедуру его анализа на множестве физических переменных при условии, что синхровход является линией глобальной обратной связи. Автомат может не иметь иницирующего начального состояния, но решение задачи установки схемы по всем линиям в наперед заданное достижимое двоичное состояние за конечное число входных наборов должно иметь положительный результат. Отсутствие классификации линий на внутренние и выходные связано с необходимостью отображения логического состояния объекта (включающего понятие состояние автомата), которое является условием для моделирования очередного перехода объекта при подаче входного набора. Однако существует необходимость выделения на множестве невходных переменных ЦУ наблюдаемых линий, которые имеют гальванические связи с контактами внешнего разъема, что нужно для реализации алгоритмов генерации тестов, моделирования неисправностей, контроля и поиска дефектов. В соответствии с предложенным автоматом можно определить структуру куба покрытия примитива:

t-1	M0	$X_i = \{0,1,X\}$	$Y_i = \emptyset$
t	M1	$X_i = \{0,1,X\}$	$Y_i = \{0,1,X\}$
t+1	M2	$X_i = \emptyset$	$Y_i = \{0,1,X,Z,\emptyset\}$

(1)

Система отношений между входными и выходными переменными конечного автомата определена на трех тактах. Это позволяет создавать модели примитивов, которые смогут модифицировать не только линии  $Y$ , но, что самое важное, и значения переменных  $X$  без использования дополнительных псевдопеременных. Отсюда следуют возможности:

1) Описание входных условий в двух автоматных тактах с целью повысить адекватность и компактность моделей примитивов, что на практике эквивалентно: исключению необходимости введения дополнительных переменных, которым нельзя поставить в соответствие физическую линию; записи наличия или отсутствия переднего или заднего фронтов на синхровходах, задаваемых символами  $\{E, F, H, L\}$  [1]; формированию минимальных условий по отдельным входным линиям в такте  $t-1$  или  $t$  с помощью  $\{0, 1, X, G, T, K\}$ ; заданию таких переходов на входных координатах, которые не вызывают установку автомата в непредсказуемое состояние; определению изменений входных сигналов, иницирующих опасные состязания в ПЭ.

2) Задание условий и направления устойчивого перехода автомата на физически существующих выходных (невходных) переменных в тактах  $t$  и  $t+1$  или его установки в неопределенность.

3) Формирование отношений для функций, которые используют физические линии в качестве входных и выходных  $\{A=A+1, A=A-1\}$ ;  $\{A=B, B=A\}$ .

#### 4. Модель анализа цифрового устройства

ЦУ в виде конечного автомата, использующего структуру примитива (1), адекватно моделируется в трех автоматных тактах  $\langle t-1, t, t+1 \rangle$ , которым соответствуют поля  $M0, M1, M2$ :

t-1	M0	$X_i = \{0,1,X\}$	$Y_i = \{0,1,X\}$
t	M1	$X_i = \{0,1,X\}$	$Y_i = \{0,1,X\}$
t+1	M2	$X_i = \emptyset$	$Y_i = \emptyset$

(2)

Векторы  $M0X, M1X$  – координаты иницирующих сигналов на входах объекта;  $M2$  – поле задания координат, состояния которых должны быть определены в процессе анализа кубических покрытий;  $M1Y$  – поле-идентификатор состояния объекта в момент  $t$ ;  $M0Y$  – определяет значения невходных линий в момент  $t-1$ , которые в совокупности с полем  $M1Y$  формируют входные сигналы для моделирования внутренних примитивов схемы. Поскольку для схемы, как и для примитива, нет смысла делить невходные переменные на внутренние и выходные, определение конечного S-автомата (Simulation) имеет вид

$$Y(t+1)=f[X(t-1),X(t),Y(t-1),Y(t)],$$

где  $Y(t+1)$  – поле модификации входных или выходных координат. Его основное назначение состоит в определении поведения ЦУ на множестве реальных эквипотенциальных линий схемы, которая имеет глобальные обратные связи, фронтальную синхронизацию, двунаправленные линии, элементы памяти. Для таких устройств важно знать только входные линии и то лишь в целях выставления на них инициирующих воздействий, а разделение невходных переменных на внутренние и выходные нужно, как и в случае с примитивом, лишь для идентификации последних в качестве наблюдаемых линий при работе алгоритмов проектирования диагностической информации. Отсюда следует, что U-автомату примитива в формате (2) будет соответствовать следующий фрагмент:

t-1	M0	$X_i = \{0,1,X\}$	$Y_i = \emptyset$
t	M1	$X_i = \{0,1,X\}$	$Y_i = \{0,1,X\}$
t+1	M2	$X_i = \emptyset$	$Y_i = \emptyset$

Здесь состояние  $Y(t+1)$  может определяться любой координатой из M2.

Такая структура объясняет поведение функций, где переменные аргументов и результата представлены одними и теми же эквипотенциальными линиями. Например, КП функций  $\{A=A+1, A=A-1\}$ ;  $\{A=B, B=A\}$  невозможно реализовать на основе концепции классического автомата без использования дополнительных переменных или элементов памяти.

### 5. Процедуры моделирования цифровых устройств

Отход от классического задания конечного автомата в двух временных фреймах и введение трехтактного автомата есть результат принятия структурно-функциональной модели устройства без псевдоразрыва глобальных обратных связей и введения дополнительных псевдопеременных с целью повысить адекватность моделирования исправного поведения цифрового объекта. Для эффективной обработки такой модели следует учитывать концепции введенных U-, S-автоматов, разнообразие используемых структур ПЭ и схемных соединений, значность алфавитов моделирования и описания переходов в целях задания оптимальных и технологичных операций и массивов, чтобы реализовать программные средства моделирования исправного поведения.

1. Векторы моделирования (2) предназначены для формирования входного слова в троичном алфавите и хранения состояний всех линий как результатов анализа КП элементов схемы. Текущее значение входов, для которых необходимо найти реакцию невходных линий, заносится в поле M1X, при этом поле M0 по всем координатам определяет состояния всех переменных автомата в момент t-1; M1Y – уже определенные значения линий устройства в момент t. Поле M2 есть вычисляемые состояния всех переменных автомата в момент t+1 в результате анализа кубических покрытий на заданных значениях M0, M1 по входам и M1 – по выходам. Поле M2X может быть модифицировано относительно M1X только в случае наличия в схеме функциональных элементов, имеющих входные и выходные переменные, отмеченные одинаковыми номерами линий, которые при построении структур данных относятся к входным переменным модели ЦУ.

Идентичность полей M1, M2 по невходным координатам является признаком окончания итеративного процесса при моделировании очередного входного набора. Если такого не происходит, то при достижении максимального, наперед заданного числа итераций всем изменяющимся на невходных полях M1, M2 координатам присваивается символ X, после чего цикл вычислений повторяется. Такая процедура управления простыми итерациями гарантирует сходимость алгоритма моделирования при наличии в схеме опасных состязаний или генераторных режимов. Исходное состояние трех векторов до начала моделирования должно быть равно символу U (здесь он эквивалентен значению X) по всем координатам. Далее, перед обработкой очередного активного примитива или группы ПЭ, нагруженных на одни и те же выходы, последним должны быть

присвоены символы U в поле M2. Такая избирательность обусловлена событийным характером алгоритма анализа схемы, когда ПЭ будет моделироваться в случае его активности – наличия изменений на входных линиях примитива в полях M0, M1, что является условием для формирования в позиции вектора активности VA, соответствующей текущему элементу, признака 1.

2. Вектор объединенных выходов VF определяется числом линий схемы, где содержимое позиции задает количество выходов ПЭ, нагруженных на линию с данным номером:

X	Y	Z
001	112	131
123	456	789

Символ 1 в позиции 3 свидетельствует о двунаправленности линии 3, на которую нагружен один выход ПЭ; линии 6 и 8 объединяют 2 и 3 примитива соответственно. Очевидно, переменные 1 и 2 являются только входами; 4, 5, 7, 9 – выходами, соединенными со входами предшествующих элементов. Наличие символа >0 на входной координате или >1 – на внутренней или выходной служит условием для обработки по сквозному (безусловному) алгоритму всех элементов, связанных с отмеченными линиями, чтобы получить на них адекватное реальному поведению решение, поскольку только все примитивы, нагруженные на объединенные выходы, создают полную картину их состояний.

3. Координатные операции конкатенации, пересечения, объединения [1] определяют технологию анализа КП примитивов, сочетающую свойства простоты метода и максимальных функциональных возможностей, которые можно выжать из синхронного метода моделирования в пятизначном алфавите {0, 1, X, Z, U}. Операция конкатенации предназначена для получения двухтактного символа кодирования состояния линии в фреймах (t-1, t) или на полях (M0, M1) с целью выполнить последующее пересечение двухтактных кубов покрытий с аналогичными состояниями координат упомянутых полей векторов моделирования. Операция пересечения формирует результат пересечения куба КП с исходными для рассматриваемого ПЭ значениями соответствующих входных, выходных линий, полученных конкатенацией состояний упомянутых переменных, заданных полями M0, M1. Для повышения быстродействия анализа КП операция пересечения формирует результат в виде состояния линии в момент t+1.

Модель процесса формирования состояний выходов определяется импликацией следующих процедур:

$$M0 * M1 \rightarrow E \cap C \rightarrow E \rightarrow \#(E0, E1) \rightarrow \Delta(E1) \rightarrow M2,$$

которая может быть представлена в форме последовательного применения четырех функционалов:

$$M2 = \Delta(\#(C \bigcap_{i=1}^n (M0 * M1))).$$

Выполнение \*-операции формирует символ двухтактного алфавита, в данном случае E, который может быть разложен к виду двух однотоктных, а далее #-операция вычисляет однотоктную составляющую в момент t, которая переносится Δ-операцией во фрейм t+1. Бинарная операция пересечения заменяет собой последовательность действий, связанную с объединением непустых результатов пересечений

$$C \bigcup_{i=1}^n (E \cap C_i) \leftarrow \forall E_j, C_{ij} (E_j \bigcap_{j=1}^m C_{ij} \neq \emptyset).$$

Естественно, Y-операция, предназначенная для объединения непротиворечивых результатов пересечений векторов моделирования и кубов покрытия, определена на символах однотоктного алфавита, что делает ее компактной. Результирующие значения в ней представлены пятью символами, которые идентифици-

руют:  $\{0,1\}$  – устойчивое двоичное состояние;  $X$  – переход линии в неопределенное значение;  $Z$  – обозначение высокого импеданса для линий, которые могут иметь три устойчивых состояния;  $U$  – неопределяемое значение переменной, связанное с отсутствием для моделируемого входного набора системы отношений, формирующих состояние линии. Появление символа  $U$  есть следствие неполного КП или наличия в схеме номера линии, которым не отмечена ни одна переменная в множестве примитивов объекта. Чтобы повысить быстродействие выполнения упомянутых операций, символы двухтактного алфавита кодируются однобайтными десятичными числами (0–22).

Отличие таблично-кодовой организации вычисления операций от варианта последовательности условных операторов заключается в реализации за один программный такт любого пересечения, объединения, конкатенации путем нахождения содержимого ячейки  $n$ -мерного массива по его индексам. Таким образом, программные средства оперируют кодами символов, но при вводе и выводе необходимо иметь преобразователи "символ-код" и "код-символ" для удобства восприятия информации пользователем.

4. Буферный вектор моделирования предназначен для формирования по выходам объединения непустых результатов пересечений конкатенации значений векторов моделирования  $M_0, M_1$  с каждым кубом покрытия по линиям, соответствующим обрабатываемому ПЭ.

Рассмотрим схему анализа куба примитива и формирования выходных значений элемента в буферном векторе моделирования  $VB$ .

Каждая строка КП имеет множество входных и невходных (внутренних и выходных) координат. Чтобы она участвовала в формировании состояния выходов, необходима ее непротиворечивость по входным, а также по невходным координатам в момент  $t$  (вектор  $M_1$ ), которые определяют предыдущее состояние автомата. Процедура анализа куба по всем координатам:

1) Конкатенация состояний очередной входной координаты ПЭ, выбранных из векторов моделирования.

2) Выполнение операции пересечения между результатом конкатенации и входной координатой рассматриваемого куба.

3) Если пересечение пусто, выполняется переход к анализу следующего куба ( $i=i+1$ ). В противном случае рассматривается очередная входная координата ( $j=j+1$ ) анализируемой строки.

4) Если по всем входным координатам куба зафиксировано непустое пересечение, выполняется переход к анализу невходных координат, для чего реализуется конкатенация состояния очередной невходной линии  $M_{1j}$  с символом пустого множества, который здесь равен  $X$ .

5) Пересечение конкатенации с очередной невходной координатой анализируемого куба покрытия. Результат непустого пересечения заносится в соответствующую позицию буфера  $VB_j$ .

6) Если результат предыдущей операции пуст, осуществляется переход к анализу очередного куба по входным линиям ( $i=i+1$ ). Иначе – анализ невходной координаты ( $j=j+1$ ).

7) Если по всем состояниям невходных линий зафиксировано непустое пересечение, выполняется покоординатное объединение полученных в буфере значений внутренних и выходных переменных ПЭ с состояниями соответствующих линий вектора моделирования  $M_2$  с записью полученного результата в упомянутый вектор.

Иллюстрацией выполнения процедуры анализа кубов покрытия примитивов (см. рисунок) может служить результат моделирования отдельных входных наборов, представленных в таблице.

В примере моделирования вектор  $M_{01}$  есть конкатенация двух предыдущих по всем координатам; буферные векторы  $V_i$  ( $VB_i$ ) получаются в результате пересечения куба  $C_i$  с вектором  $M_{01}$  по правилам операции пересечения;  $M_{12}$

Результат моделирования  
входного вектора

Ci	1	2	3	5
1	E	0	1	0
2	E	1	1	1
3	F	X	1	S
4	X	X	0	Z
M0	0	0	0	1
M1	1	0	0	∅
M01	E	Q	Q	B
B1	.	.	∅	.
B2	.	∅	.	.
B3	.	.	∅	.
B4	1	0	0	Z
M12	1	0	0	Z

равен вектору M1 по входам и множеству M2  
вычисленных истинных значений – по выходам.

Если на линию нагружено несколько выходов ПЭ,  
результат определяется объединением состояний  
выходной переменной в векторе M2, полученных  
при анализе соответствующих покрытий. Объеди-  
нение результатов моделирования дает:

$$M12 = M1 \cup M2 = (100Z) \cup (1000) = (1000).$$

Описанные процедуры анализа примитивов и  
схем ориентированы на максимальное приближе-  
ние проектируемых моделей к схемотехническим  
особенностям микросхем и цифровых объектов в  
целях нахождения рынка пользователей программ-  
ными средствами моделирования в среде разработчиков радиоэлектронной аппа-  
ратуры.

При моделировании неисправностей алгоритм ориентируется на наблюдаемые  
линии, которые могут быть как входными, так и внутренними или выходными.  
Идентификация наблюдаемых переменных необходима также для выполнения  
процедур генерации тестов, организации и проведения диагностического экспе-  
римента. Естественно, чем больше таких линий, тем проще процедуры анализа  
ЦУ, но дороже устройство из-за увеличения числа выводов на внешнем разъеме.

## 6. Выводы

Предложены концептуальные и формальные модели примитивных элементов  
в виде U-автомата представления комбинационных и последовательностных  
схем, задаваемых кубическими покрытиями в одно- и двухтактном теоретико-  
множественных алфавитах, позволяющие адекватно решать задачи прямой и  
обратной импликаций в троичном алфавите моделирования состояний линий.

Определен трехтактный S-автомат логического синхронного моделирования  
цифровых устройств, имеющих как глобальные обратные связи, так и синхров-  
ходы для последовательностных примитивов. Он позволяет исключить в модели  
псевдовходные переменные, связанные с разрывом обратных связей в целях  
приближения модели к реальной структуре функционального блока.

Предложены формальные процедуры обработки ПЭ и синхронный событий-  
ный, итеративный алгоритм моделирования исправного поведения ЦУ на основе  
анализа кубических покрытий, позволяющий обрабатывать троичные входные  
тест-векторы.

Описаны особенности теоретико-множественного анализа типичных функцио-  
нальных примитивов в целях определения состояний выходов на основе исполь-  
зования кубических покрытий и условий на входных координатах.

**Список литературы:** 1. Хаханов В.И. Техническая диагностика элементов и узлов персо-  
нальных компьютеров. К.: ГЗМН. 1997. 308 с. 2. Бондаренко М.Ф., Кривуля Г.Ф., Рябцев  
В.Г., Фрадков С.А., Хаханов В.И. Проектирование и диагностика компьютерных систем и  
сетей. К.: НМЦВО. 2000. 306 с. 3. Breuer M.A., Friedman A.D. Diagnosis and reliable design of  
digital system. Woodlound wills, Computerscience press inc., 1976. 308p. 4. Автоматизиро-  
ванное проектирование цифровых устройств / С.С.Бадулин, Ю.М.Барнаулов и др. / Под  
ред. С.С. Бадулина. М.: Радио и связь, 1981. 240с. 5. Баранов С.И., Майоров С.А., Сахаров  
Ю.П., Селютин В.А. Автоматизация проектирования цифровых устройств. Л.: Судостро-  
ение, 1979. 264с. 6. Автоматизация диагностирования электронных устройств / Ю.В.Ма-  
лышенко и др. / Под ред. В.П. Чипулиса. М.: Энергоатомиздат, 1986. 216с. 7. Беннеттс Р.Д.  
Проектирование тестопригодных логических схем: Пер. с англ. Дербуновича Л.В. М.: Радио  
и связь, 1990. 176с. 8. Богомоллов А.М., Сперанский Д.В. Аналитические методы в задачах  
контроля и анализа дискретных устройств. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1986. 240с.

Поступила в редколлегию 23.12.2000

**Хак Х.М. Джахирул**, аспирант кафедры автоматизации проектирования вы-  
числительной техники ХТУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика и  
моделирование цифровых систем. Увлечения: иностранные языки. Адрес: Ук-  
раина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26.