

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ****DESIGNING AND DIAGNOSTICS OF COMPUTER SYSTEMS**

Научная статья

УДК 519.7

doi: 10.17223/19988605/69/14

**Тестирование многовыходных комбинационных схем  
в условиях известных реакций на тестовые наборы****Анжела Юрьевна Матросова<sup>1</sup>, Марина Максимовна Савенкова<sup>2</sup>,  
Виктор Алексеевич Провкин<sup>3</sup>, Ксения Алексеевна Сухорученко<sup>4</sup>***<sup>1, 2, 3, 4</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия**<sup>1</sup> mau11@yandex.ru**<sup>2</sup> marina1412\_11@mail.ru**<sup>3</sup> prowkan@mail.ru**<sup>4</sup> ksenia\_s.a@bk.ru*

**Аннотация.** При построении тестовых последовательностей для многовыходных логических схем обычно используются тестовые наборы на множестве входных переменных схемы, такие что реакции на каждый из наборов отличаются в исправном и неисправном состоянии схемы хотя бы на одном из ее выходов. Знание реакций на каждый из наборов может оказаться полезным при построении тестовых последовательностей с целью включения подходящих наборов, ориентированных как на снижение потребляемой при тестировании мощности, так и на обнаружение неисправностей. Предлагается точный алгоритм поиска всех тестовых наборов с соответствующими им реакциями исправной и неисправной схем. Алгоритм основан на выполнении операций над ROBDD-графами, зависящими только от входных переменных, только от выходных переменных и от тех и других переменных вместе. Обсуждаются возможности применения тестовых наборов совместно с их реакциями с целью дебаггинга.

**Ключевые слова:** комбинационные схемы; тестовые наборы; ROBDD-графы.

**Для цитирования:** Матросова А.Ю., Савенкова М.М., Провкин В.А., Сухорученко К.А. Тестирование многовыходных комбинационных схем в условиях известных реакций на тестовые наборы // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 69. С. 134–143. doi: 10.17223/19988605/69/14

Original article

doi: 10.17223/19988605/69/14

**Testing of multi-output combinational circuits when reactions  
on test patterns are known****Anzhela Yu. Matrosova<sup>1</sup>, Marina M. Savenkova<sup>2</sup>, Viktor A. Provkina<sup>3</sup>, Ksenia A. Sukhoruchenko<sup>4</sup>***<sup>1, 2, 3, 4</sup> National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation**<sup>1</sup> mau11@yandex.ru**<sup>2</sup> marina1412\_11@mail.ru*

<sup>3</sup> *prowkan@mail.ru*

<sup>4</sup> *ksenia\_s.a@bk.ru*

**Abstract.** Deriving test sequences for multi-output combinational circuits is usually connected with applying test patterns on input circuit variables, so that the reaction on each test pattern differs at least by one output from correct one. Finding the suitable reactions on test input patterns may be used when deriving test sequences is oriented to cut power dissipation or to facilitate finding the circuit faults. The precise algorithm of deriving all input test patterns together with their reactions that differs fault and fault free circuits is suggested. It is based on applying operations on ROBDDs depending on only input circuit variables, only output circuit variables and both input and output circuit variables. Some possibilities of using input test patterns together with their reactions for debugging are discussed.

**Keywords:** combinational circuits; test sequences; ROBDDs.

**For citation:** Matrosova, A.Yu., Savenkova, M.M., Provkina, V.A., Sukhoruchenko, K.A. (2024) Testing of multi-output combinational circuits when reactions on test patterns are known. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 69. pp. 134–143. doi: 10.17223/19988605/69/14

## Введение

Традиционные подходы к тестированию неисправностей многовыходных комбинационных схем связаны с нахождением тестовых наборов для заданной неисправности в виде подходящего множества ее входных наборов. Различия реакций исправной и неисправной схем на каждом из наборов могут быть установлены двоичным моделированием. В случае, когда находятся все тестовые наборы и число их велико, выполнить двоичное моделирование для каждого из наборов практически невозможно. В этой ситуации предлагается воспользоваться операциями над ROBDD-графами, зависящими от различных подмножеств переменных схемы, с тем чтобы получить компактное представление тестовых наборов в виде совокупности ROBDD-графов от входных переменных. Каждому графу сопоставляется пара реакций исправной и неисправной схем (пара наборов значений выходных переменных этих схем). Из полученных наборов и их реакций далее можно выбирать наборы с полезными для нас свойствами, например с целью построения тестовых последовательностей, ориентированных на снижение потребляемой при тестировании мощности или для ускорения процесса поиска неисправности в предъявленной неисправной схеме. Предполагается, что возможны неисправности элементов схемы при условии, что связи между элементами сохраняются.

В данной работе предлагается точный алгоритм поиска тестовых наборов с соответствующими им реакциями на основе представления исправной и неисправной схем однокоренными ROBDD-графами, построенными на множестве входных и выходных переменных [1], ROBDD-графами, построенными на множестве выходных переменных схемы [2], и традиционными ROBDD-графами [3] на множестве входных переменных схемы. Обсуждаются возможности применения тестовых наборов совместно с их реакциями с целью обнаружения неисправностей в предъявленной схеме.

### 1. Представление многовыходной схемы однокоренным ROBDD-графом

Логическая функция многовыходной схемы может быть представлена в виде однокорневого, направленного, ациклического графа [2], который состоит из внутренних вершин и концевых вершин, называемых 0-терминальными и 1-терминальными вершинами. Каждая внутренняя вершина помечена логической переменной, входной или выходной, и имеет две дочерние вершины. Ребро от внутренней вершины до дочерней вершины задает присвоение переменной, которой помечена рассматриваемая внутренняя вершина, значения 0 или 1 для функции, сопоставляемой дочерней вершине.

Пусть задана многовыходная комбинационная схема  $C$ , реализующая систему булевых функций  $y_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $y_2 = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , ...,  $y_m = f_m(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . На ее основе строится функция  $f$ , которая зависит от входных и выходных переменных этой схемы:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_m) = \bigwedge_{i=1}^m [y_i \sim f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)], \quad (1)$$

где  $\sim$  – логическая операция «эквивалентность».

В дальнейшем будем называть эту функцию входо-выходной функцией схемы. Данная функция обладает следующими свойствами:

1. Если вместо входных переменных схемы  $C$  подставить в (1) константы из  $\{0, 1\}$ , то получим функцию, которая принимает единичное значение на единственном выходном наборе схемы. Этот набор является реакцией схемы  $C$  на данный входной набор.

2. Если вместо выходных переменных схемы  $C$  подставить в (1) константы из  $\{0, 1\}$ , то получим функцию, которая принимает единичное значение на всех входных наборах схемы  $C$ , обеспечивающих проявление заданной реакции на ее выходах. В частном случае, если заданная реакция недостижима, то полученная функция тождественно равна 0.

Для получения всех достижимых реакций схемы можно построить ROBDD-граф входо-выходной функции схемы  $C$ . Если известна структура схемы  $C$ , то ROBDD-граф для входо-выходной функции может быть получен непосредственно по ее структуре.

Рассмотрим множество  $B_N$  булевых векторов длины  $N = n + m$ . Каждая из первых  $n$  компонент соответствует значениям входных переменных схемы  $C$ ,  $m$  последних компонент вектора соответствуют значениям выходных переменных этой схемы.

Если построить ROBDD-граф для входо-выходной функции схемы  $C$ , выбрав порядок разложения от выходных переменных к входным [1], то каждая простая цепь, начинающаяся в корне этого графа и заканчивающаяся в 1-терминальной вершине, соответствует достижимому выходному набору схемы и входному набору либо множеству входных наборов, обеспечивающих его достижение.

Набор значений выходных переменных схемы называется недостижимым, если его невозможно получить на выходах схемы никакой комбинацией значений входных переменных. Недостижимому набору или множеству недостижимых наборов соответствует простая цепь ROBDD-графа для входо-выходной функции схемы  $C$ , заканчивающаяся в 0-терминальной вершине и не содержащая внутренних вершин, помеченных входными переменными схемы.

Пусть реакция  $\beta = \beta^1 \beta^2 \dots \beta^m$  схемы  $C$  является достижимой. Тогда она обеспечивается некоторым множеством  $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k\}$  входных наборов длины  $n$ , то есть входо-выходная функция схемы  $C$  принимает единичные значения на множестве булевых векторов длины  $N$  вида

$$\begin{aligned} & \alpha_1^1 \alpha_1^2 \dots \alpha_1^n \beta^1 \beta^2 \dots \beta^m \\ & \alpha_2^1 \alpha_2^2 \dots \alpha_2^n \beta^1 \beta^2 \dots \beta^m \\ & \dots \\ & \alpha_k^1 \alpha_k^2 \dots \alpha_k^n \beta^1 \beta^2 \dots \beta^m \end{aligned}$$

Последние  $m$  компонент каждого набора не меняют свои значения, поскольку они соответствуют реакции  $\beta = \beta^1 \beta^2 \dots \beta^m$  (выходному набору) схемы  $C$  на соответствующие входные наборы.

Пусть  $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_l\}$  – множество входных наборов схемы  $C$ , которые не обеспечивают реакцию  $\beta$ . Пространство  $B_n$  размерности  $n$  разбивается на два подмножества  $A$  и  $\Gamma$ , причем на наборах множества  $\Gamma$

$$\begin{aligned} & \gamma_1^1 \gamma_1^2 \dots \gamma_1^n \beta^1 \beta^2 \dots \beta^m \\ & \gamma_2^1 \gamma_2^2 \dots \gamma_2^n \beta^1 \beta^2 \dots \beta^m \\ & \dots \\ & \gamma_l^1 \gamma_l^2 \dots \gamma_l^n \beta^1 \beta^2 \dots \beta^m \end{aligned}$$

входо-выходная функция схемы  $C$  принимает нулевое значение, поскольку реакция  $\beta$  не может быть обеспечена ни одним набором этого множества. Следовательно, пути, соответствующие векторам из множества  $\Gamma$ , ведут в 0-терминальную вершину ROBDD-графа схемы  $C$ .

Итак, входо-выходная функция схемы  $C$  принимает значение 0 на недостижимых выходных наборах схемы. В этом случае входные переменные  $N$ -мерного вектора на соответствующих троичных векторах имеют неопределенные значения.

Кроме того, входо-выходная функция принимает значение 0 на  $N$ -мерных векторах, представляющих входные наборы, которые не обеспечивают приписанные им выходные наборы схемы  $C$ . Следовательно, входо-выходная функция схемы  $C$  принимает нулевые значения на недостижимых входо-выходных состояниях схемы  $C$ . Обозначим это множество состояний как  $I$  (impossible). Функция схемы  $C$  принимает единичные значения на достижимых входо-выходных состояниях схемы. Назовем это множество  $E$  (exprected). Объединение множеств  $E, I$  образует булево пространство размерности  $2^N$ .

Проиллюстрируем сказанное примером. Пусть поведение схемы  $C$  описывается системой из трех булевых функций. Достижимые выходные наборы вместе с условиями их достижимости представлены таблицей истинности (табл. 1) входо-выходной функции  $f(x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3)$ .

Таблица 1

Таблица достижимых состояний схемы  $C$

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$y_1$	$y_2$	$y_3$
0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	1	1	1	0
0	0	1	0	1	0	1
0	0	1	1	0	1	1
0	1	0	0	1	1	0
0	1	0	1	1	0	1
0	1	1	0	0	1	1
0	1	1	1	1	1	0
1	0	0	0	1	0	1
1	0	0	1	0	1	1
1	0	1	0	1	1	0
1	0	1	1	1	0	1
1	1	0	0	0	1	1
1	1	0	1	1	1	0
1	1	1	0	1	0	1
1	1	1	1	0	1	1

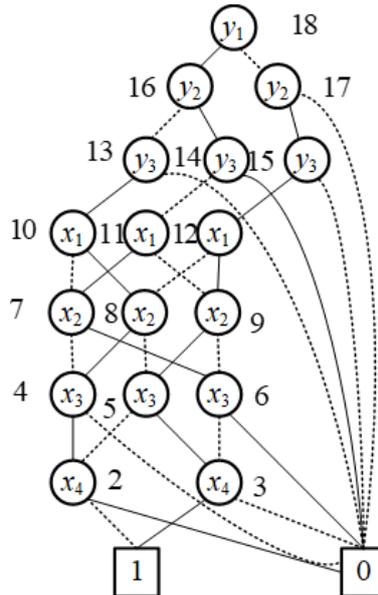


Рис. 1. ROBDD-граф функции  $f(x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3)$

Fig. 1. ROBDD of function  $f(x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3)$

Достижимым состояниям соответствуют единичные значения входо-выходной функции схемы  $C$ . Нулевые значения этой функции в таблице не представлены. На рис. 1 задан ROBDD-граф входо-выходной функции схемы  $C$ , зависящий от входных и выходных переменных системы булевых функций, описывающий поведение схемы  $C$ .

Простая цепь  $\overline{y_1} \overline{y_2} \overline{y_3} \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} \overline{x_4}$  в ROBDD-графе, ведущая в 1-концевую вершину, представляет входной набор 0101, обеспечивающий реакцию 101 выходных переменных схемы.

Простая цепь  $\overline{y_1} \overline{y_2} \overline{y_3} \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3}$ , ведущая в 0-концевую вершину, представляет входные наборы 0111, 0110, не обеспечивающие реакцию 101 выходных переменных схемы  $C$ .

Простая цепь  $\overline{y_1} \overline{y_2} \overline{y_3}$ , ведущая в 0-концевую вершину, представляет недостижимую реакцию выходных переменных схемы  $C$  на выходном наборе, обращающем порождаемую цепью конъюнкцию в единицу.

Итак, простые цепи однокоренного ROBDD-графа схемы  $C$ , ведущие из корня в 1-концевую вершину, задают достижимые входо-выходные состояния этой схемы, а простые цепи, ведущие в 0-концевую вершину, задают ее недостижимые входо-выходные состояния.

## 2. Получение множеств всех тестовых наборов совместно с реакциями исправной и неисправной схем

Рассмотрим схему  $C$  в исправном и неисправном состояниях. Речь идет о существенных неисправностях, порождающих другую систему булевых функций и, следовательно, другую входо-выходную функцию схемы.

Исправной схеме соответствуют множества  $E, I$ , а неисправной сопоставляются множества  $E', I'$ .

Множества  $E, E' (I, I')$  обязательно различаются, поскольку в исправной и неисправной схемах реализуются различные системы булевых функций.

Если в  $E'$  присутствует входо-выходное состояние, которое не содержится в  $E$ , то оно принадлежит множеству  $I$ .

Если в  $E$  присутствует входо-выходное состояние, которое не содержится в  $E'$ , то оно принадлежит множеству  $I'$ .

Из вышесказанного следует, что в присутствии неисправности в схеме  $C$  могут появиться дополнительные достижимые входо-выходные состояния из  $I$ , принадлежащие множеству  $E'$ . В то же время из множества  $E$  могут исчезнуть некоторые входо-выходные состояния, принадлежащие множеству  $I'$ .

Чтобы найти добавленные входо-выходные состояния схемы  $C$  в присутствии неисправности, надо выполнить пересечение множества  $E'$  с  $I$ .

Чтобы найти исчезнувшие из схемы  $C$  входо-выходные состояния в присутствии неисправности, надо выполнить пересечение множества  $E$  с  $I'$ .

Алгоритм получения тестовых наборов с одной из реакций исправной и неисправной схем:

1. Представим входо-выходные функции для исправной и неисправной схем в виде соответствующих однокоренных ROBDD-графов.

2. Для получения тестовых наборов и реакций схемы в исправном состоянии на этих наборах необходимо инвертировать однокоренный граф для неисправной схемы и выполнить его конъюнкцию с однокоренным графом для исправной схемы.

3. Для получения тестовых наборов и реакций схемы в неисправном состоянии на этих наборах необходимо инвертировать однокоренный граф для исправной схемы и выполнить его конъюнкцию с однокоренным графом для неисправной схемы.

Будем иметь в виду, что инвертирование однокоренного графа заключается в переименовании его концевых вершин.

Для каждого элемента множества  $E \cap I' (E' \cap I)$  известна только реакция исправной (неисправной) схемы, но не известна реакция неисправной (исправной) схемы.

Алгоритм получения тестовых наборов со второй реакцией:

1. Соответствующие пары реакций можно найти, выделив сначала для каждой реакции из тестовых наборов исправной и неисправной схем обычные ROBDD-графы, представляющие условия обеспечения соответствующих реакций

2. Затем необходимо выполнить пересечения каждого обычного ROBDD-графа исправной (неисправной) схемы с каждым обычным ROBDD-графом для неисправной (исправной) схемы.

Полученные непустые пересечения представляют в виде обычных ROBDD-графов подмножества входных тестовых наборов, каждому из которых сопоставляется одна и та же пара реакций исправной и неисправной схем  $S$ .

Проиллюстрируем сказанное примером.

Пусть дана логическая схема, представленная на рис. 2.

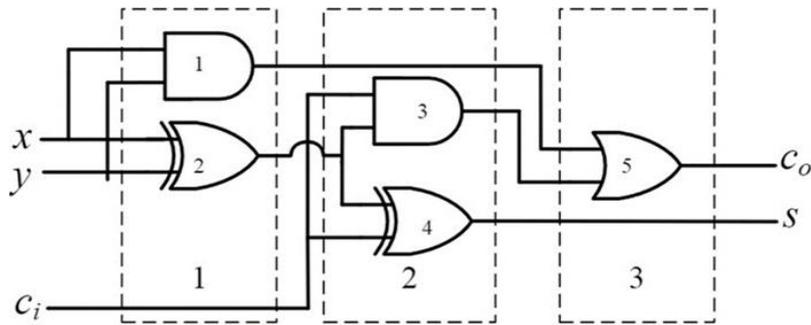


Рис. 2. Логическая схема с двумя выходами и тремя входами  
Fig. 2. Logic circuit with two outputs and three inputs

Внесем константную неисправность «1» на выходе второго элемента схемы, при отсутствии неисправности реализующего сумму по модулю два для входных переменных  $x$  и  $y$ . Построим ROBDD-графы для входо-выходных функций исправной и неисправной схем (рис. 3).

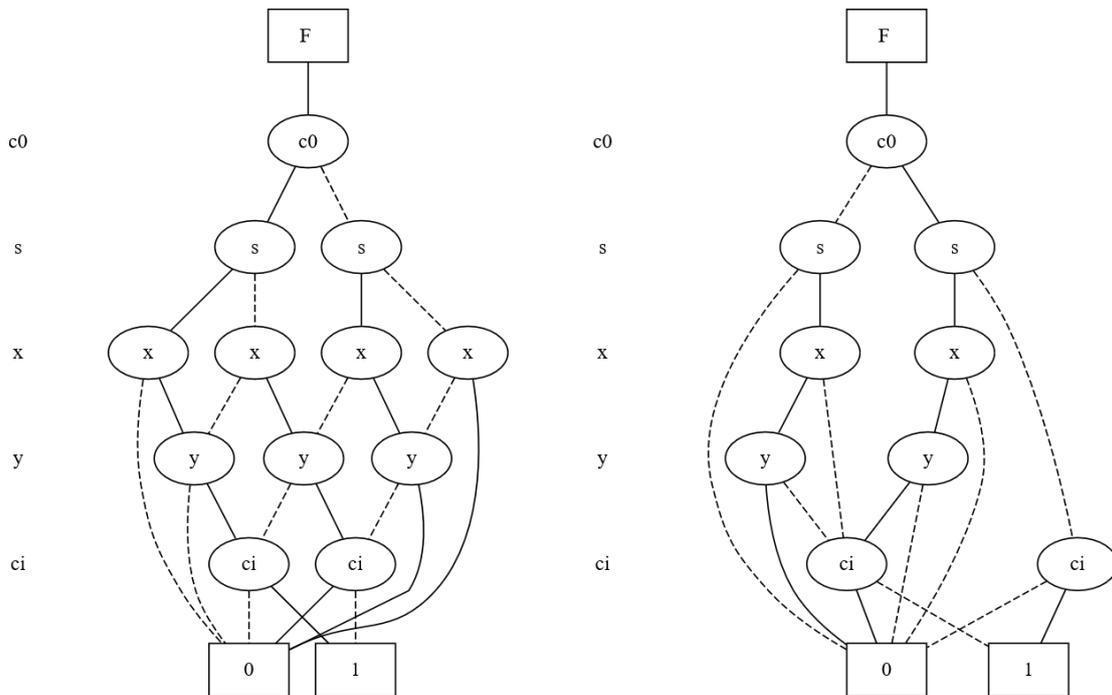


Рис. 3. ROBDD-графы входо-выходной функции исправной и неисправной схем соответственно  
Fig. 3. ROBDDs of the input-output functions of fault free and fault circuits, respectively

Обозначим выходные переменные в неисправной схеме как  $c'_0$  и  $s'$ . Тогда достижимые состояния исправной и неисправной схем можно привести в таблице истинности (табл. 2).

Таблица 2

Таблица достижимых состояний исправной и неисправной схем

$x$	$y$	$c_i$	$c_0$	$s$	$c'_0$	$s'$
0	0	0	0	0	0	1
0	0	1	0	1	1	0
0	1	0	0	1	0	1
0	1	1	1	0	1	0
1	0	0	0	1	0	1
1	0	1	1	0	1	0
1	1	0	1	0	1	1
1	1	1	1	1	1	0

Инвертируем ROBDD-граф входо-выходной функции неисправной схемы и выполним его конъюнкцию с ROBDD-графом входо-выходной функции для исправной схемы. В результате получаем граф, содержащий тестовые наборы вместе с реакциями исправной схемы (рис. 4). Инвертируем ROBDD-граф входо-выходной функции исправной схемы и выполним его конъюнкцию с ROBDD-графом входо-выходной функции для неисправной схемы. В результате получаем ROBDD-граф, содержащий тестовые наборы и реакции схемы в неисправном состоянии на этих наборах (см. рис. 4).

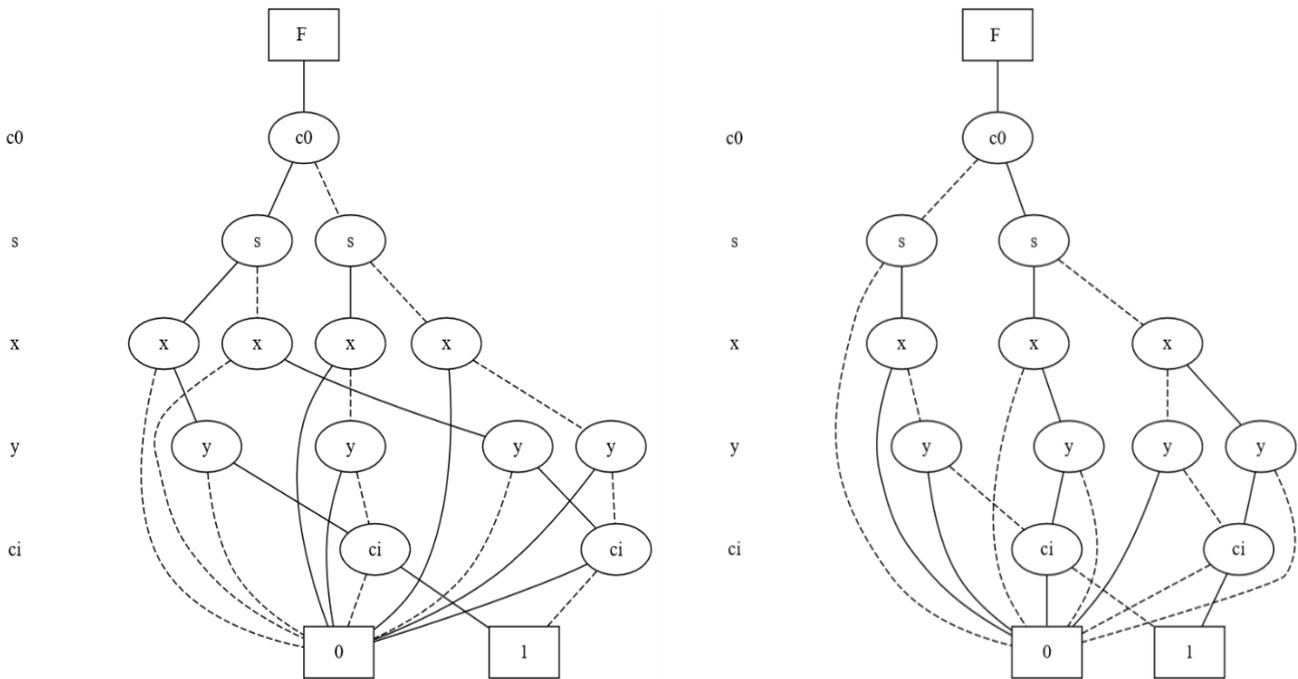


Рис. 4. ROBDD-графы, содержащие тестовые наборы совместно с реакциями исправной и неисправной схем соответственно  
 Fig. 4. ROBDDs, representing test patterns with the corresponding reactions of fault free and fault circuits, respectively

Выпишем значения переменных в графах различий для исправной и неисправной схем, которые соответствуют путям, ведущим в 1-терминальную вершину, причем обеспечивают различные реакции этих схем на одном и том же входном наборе. Полученные входные тестовые наборы и их реакции представлены в табл. 3.

Следует иметь в виду, что сложность однокоренных графов многовыходных схем, в частности число их внутренних вершин, помеченных символами выходных переменных, экспоненциально растет с ростом числа выходов схемы. Предложенный подход позволяет получить все тестовые наборы входных переменных с соответствующими реакциями исправной и неисправной схем и может быть применен для схем с числом выходов порядка 10 и менее.

Таблица тестовых наборов

$x$	$y$	$c_i$	$c_0$	$s$	$c'_0$	$s'$
0	0	0	0	0	0	1
0	0	1	0	1	1	0
1	1	0	1	0	1	1
1	1	1	1	1	1	0

Часто в реальных схемах присутствие неисправности искажает значения на некотором подмножестве выходов, связанных между собой подмножеством входных переменных исправной и неисправной схем. В этих ситуациях рассматриваемый подход также может быть применен при наличии подходящих вычислительных ресурсов.

Будем иметь в виду, что обычно нет необходимости в получении всех тестовых наборов и их реакций. В то же время знание возможных реакций схемы позволяет выбирать входные тестовые наборы с полезными для нас реакциями. Учитывая это обстоятельство, можно поступить следующим образом.

Воспользуемся алгоритмом поиска достижимых реакций схемы без получения условий их обеспечения [2]. Представим реакции графом от выходных переменных схемы  $S$ . Эти графы существенно проще однокоренных графов многовыходных схем, рассматриваемых нами ранее. Так, для однокоренного графа граф, представляющий только достижимые реакции схемы, показан на рис. 5.

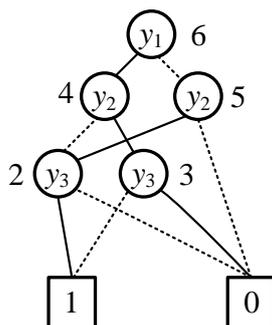


Рис. 5. ROBDD-граф достижимых реакций схемы  
Fig. 5. ROBDD of achievable reactions of the scheme

В условиях использования графов реакций предлагается выполнить следующие шаги:

1. Выбираем из графов достижимых реакций подмножество пар реакций исправной и неисправной схем, так чтобы эти реакции по возможности характеризовались большим расстоянием по Хеммингу.
2. Для каждой пары выбранных реакций строим соответствующие пары обычных ROBDD-графов от входных переменных, обеспечивающих эти реакции.
3. Выполняем пересечение этих графов. Непустые ROBDD-графы, представляющие результаты пересечений, задают множество тестовых наборов с одной и той же парой реакций на них.
4. Из подмножества графов, полученных в п. 3 выбираем, например, по одному тестовому набору и путем двоичного моделирования на наборах этого множества находим подмножества элементов, изменивших свои значения в исправной схеме, пытаюсь определить элементы, на которых последствия неисправностей впервые проявились при движении от входов к выходам исправной схемы, т.е. для дебаггинга.

Проведенные нами предварительные эксперименты [4–8] над моделями реальных исправных и неисправных схем показали:

- 1) различные тестовые наборы для одной и той же пары реакций могут порождать различные множества элементов, изменяющих значения своих выходов в присутствии неисправности;

2) чем больше расстояние по Хеммингу между реакциями этих схем для одного и того же тестового набора, тем больше элементов исправной схемы изменяет свои значения на соответствующем тестовом наборе.

### Заключение

Предложен точный алгоритм поиска всех тестовых наборов с соответствующими им реакциями исправной и неисправной схем, основанный на выполнении операций над ROBDD-графами, зависящими только от входных переменных, только от выходных переменных и от графов, зависящих от обоих множеств переменных. Для каждой пары реакций исправной и неисправной схем строится ROBDD-граф от входных переменных, компактно представляющий соответствующее множество тестовых наборов. Обсуждаются некоторые возможности применения тестовых наборов совместно с их реакциями с целью дебаггинга.

### Список источников

1. Провкин В.А., Матросова А.Ю. Графовые представления множеств всех достижимых реакций комбинационной схемы // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 61. С. 128–138. doi: 10.17223/19988605/61/13
2. Провкин В.А. Построение множества всех достижимых реакций комбинационных схем // Математическое и программное обеспечение информационных, технических и экономических систем : материалы IX Междунар. науч. конф., Томск, 26–28 мая 2022 г. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2022. С. 99–108.
3. Bryant R.E. Graph-Based Algorithms for Boolean Function Manipulation // IEEE Transactions on Computers. 1986. V. C-35, is. 8. P. 677–691.
4. ISCAS'89 Benchmarks // Digital Design & Dependability Research Group. URL: <https://ddd.fit.cvut.cz/www/prj/Benchmarks> (accessed: 25.05.2024).
5. Simple Blifparser. URL: <https://github.com/mario33881/blifparser> (Дата обращения 25.05.2024).
6. dd package // Github.com. URL: <https://github.com/tulip-control/dd> (accessed: 25.05.2024).
7. The CUDD package, BDD, ADD Tutorial and examples // David Kebo Houngninou. URL: <https://www.davidkebo.com/cudd#cudd1> (accessed: 25.05.2024)
8. SIS // Matteo Iervasi : embedded systems engineer. URL: <https://jackhack96.github.io/logic-synthesis/sis.html#overview> (accessed: 25.05.2024).

### References

1. Provkina, V.A. & Matrosova, A.Yu. (2022) Graph representations of the sets of all reachable reactions of the combinational circuit. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 61. pp. 128–138. DOI: 10.17223/19988605/61/13
2. Provkina, V.A. (2022) Postroenie mnozhestva vsekh dostizhimykh reaktsiy kombinatsionnykh skhem [Construction of the set of all achievable reactions of combinational circuits]. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie informatsionnykh, tekhnicheskikh i ekonomicheskikh sistem* [Mathematical and software support for information, technical and economic systems]. Proc. of the 9th International Conference. May 26–28, 2022. Tomsk. pp. 99–108.
3. Bryant, R.E. (1986) Graph-Based Algorithms for Boolean Function Manipulation. *IEEE Transactions on Computers*. C-35(8). pp. 677–691.
4. Czechia. (1989) *ISCAS'89 Benchmarks*. [Online] Available from: <https://ddd.fit.cvut.cz/www/prj/Benchmarks>. (Accessed: 25th May 2024).
5. *Simple Blifparser*. [Online] Available from: <https://github.com/mario33881/blifparser>. (Accessed: 25th May 2024).
6. *dd package*. [Online] Available from: <https://github.com/tulip-control/dd>. (Accessed: 25th May 2024).
7. *The CUDD package, BDD, ADD Tutorial and examples*. [Online] Available from: <https://www.davidkebo.com/cudd#cudd1>. (Accessed: 25th May 2024).
8. SIS. [Online] Available from: <https://jackhack96.github.io/logic-synthesis/sis.html#overview>. (Accessed: 25th May 2024).

### Информация об авторах:

**Матросова Анжела Юрьевна** – профессор, доктор технических наук, профессор кафедры компьютерной безопасности Института прикладной математики и компьютерных наук Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: mau11@yandex.ru

**Савенкова Марина Максимовна** – магистрант кафедры компьютерной безопасности Института прикладной математики и компьютерных наук Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: marina1412\_11@mail.ru

**Провкин Виктор Алексеевич** – старший преподаватель кафедры компьютерной безопасности Института прикладной математики и компьютерных наук Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: prowkan@mail.ru

**Сухорученко Ксения Алексеевна** – магистрант кафедры компьютерной безопасности Института прикладной математики и компьютерных наук Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: ksenia\_s.a@bk.ru

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

***Information about the authors:***

**Matrosova Anzhela Y.** (Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Applied Mathematics and Computer Science, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: mau11@yandex.ru

**Savenkova Marina M.** (Master's Student, Institute of Applied Mathematics and Computer Science, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: marina1412\_11@mail.ru

**Provkin Viktor A.** (Institute of Applied Mathematics and Computer Science, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: prowkan@mail.ru

**Sukhoruchenko Ksenia A.** (Master's Student, Institute of Applied Mathematics and Computer Science, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ksenia\_s.a@bk.ru

***Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.***

*Received 16.08.2024; accepted for publication 02.12.2024*

*Поступила в редакцию 16.08.2024; принята к публикации 02.12.2024*