**УДК: 519.718**

**Голубева О. И.**
к.т.н., доцент
Томский государственный университет

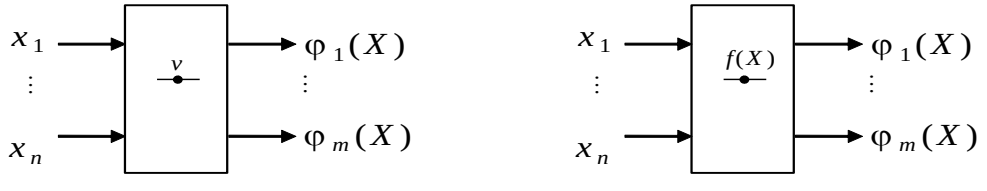
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРУДНООБНАРУЖИМЫХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ КОМБИНАЦИОННЫХ СХЕМ

*Рассматривается метод определения труднообнаружимых константных неисправностей комбинационных схем. Неисправность является труднообнаружимой, если вероятность ее обнаружения меньше заданного порогового значения $P_{th}$. Вычисление вероятности обнаружения неисправности выполняется ранее предложенным методом, основанным на применении функции обнаружения неисправности, представленной в виде ОДНФ или ROBDD. Для сокращения вычислений при определении труднообнаружимых неисправностей используется следующее свойство: объединение множеств тестов для неисправности константа 1 и неисправности константа 0 на некотором полюсе схемы образует множество входных наборов схемы, на которых наблюдается значение на рассматриваемом полюсе.*

***Ключевые слова:*** *труднообнаружимые неисправности, вероятность обнаружения неисправности, функция обнаружения неисправности, управляемость, наблюдаемость, константная неисправность, комбинационная схема, булева производная.*

В данной работе рассматривается метод определения труднообнаружимых константных неисправностей комбинационных схем. Неисправность называется *труднообнаружимой*, если вероятность ее обнаружения меньше заданного порогового значения $P_{th}$. *Вероятность обнаружения неисправности* схемы есть вероятность того, что эта неисправность обнаруживается случайным входным набором. В работах [1, 2] рассматриваются методы вычисления точной вероятности обнаружения неисправности, основанные на рассмотрении схемы, включающей исправную и неисправную схемы. Такое вычисление является достаточно трудоемким ввиду большого размера рассматриваемой схемы. В работах [3, 4] вероятность обнаружения неисправности вычисляется как вероятность единичного значения булевой функции обнаружения неисправности. Известно, что вероятность единичного значения булевой функции легко вычислить, если получить функцию в виде ОДНФ или ROBDD. В работах [3, 4] нами предложены эффективные методы получения функции обнаружения неисправности в виде ОДНФ и ROBDD представлений, в которых достаточно рассмотреть подсхемы исходной схемы. В данной работе выполняется дальнейшее исследование одного из методов определения труднообнаружимых неисправностей, кратко представленного в работе [6] и основанного на методах, предложенных в работах [3, 4].

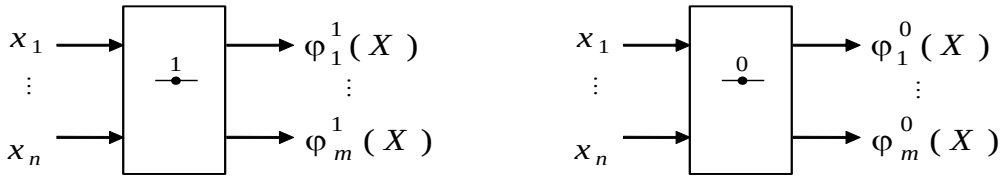
Далее, сначала рассмотрим один из предложенных в работах [3, 4] и в дальнейшем исследованных в работах [5, 7], методов построения ОДНФ и ROBDD представлений функций обнаружения неисправностей константа 1 и константа 0, а затем их применение для определения труднообнаружимых неисправностей.




а) б)

Рисунок 1. – а) Комбинационная схема *C* и полюс *v*; б) схема *C* и функция *f*(*X*)

Рассмотрим комбинационную схему $C$ с $n$ входами и $m$ выходами (рис. 1а)). Пусть $X = \{x_1, ..., x_n\}$ – множество её входных переменных. Обозначим через $\varphi_i(X)$ – функцию, реализуемую $i$-ым, $i \in \{1, ..., m\}$, выходом исправной схемы, $\varphi_i^1(X)$ – функцию, реализуемую $i$-ым выходом схемы с неисправностью константа 1 на полюсе $v$ (рис. 2 а)), $\varphi_i^0(X)$ – функцию, реализуемую $i$-ым выходом схемы с неисправностью константа 0 на полюсе $v$ (рис. 2 б)).




а) б)

Рисунок 2. – а) Схема $C$ с неисправностью константа 1 на полюсе $v$; б) схема $C$ с неисправностью константа 0 на полюсе $v$

В работах [3-5, 7] рассматриваются функции обнаружения константной неисправности, управляемости и наблюдаемости. Будем эти функции называть *функциями тестопригодности*. *Функция обнаружения константной неисправности* $D^1(X)$ ($D^0(X)$) представляет все тестовые наборы для обнаружения одиночной неисправности константа 1 (константа 0) на полюсе элемента схемы; *функция наблюдаемости* $B(X)$ полюса элемента схемы представляет множество наборов входных переменных, обеспечивающих смену значения хотя бы на одном из выходов схемы при смене значения на рассматриваемом полюсе $v$; *функция* 1(0)-*управляемости* $C^1(X)$ ($C^0(X)$) представляет наборы входных переменных, устанавливающие на полюсе значение 1(0).

Для получения ОДНФ и ROBDD представлений функций обнаружения неисправности константа 1 – $D^1(X)$, и константа 0 – $D^0(X)$, в [3–5] предложено использовать формулы:

$$\begin{aligned} D^1(X) &= B(X) \cdot C^0(X), \\ D^0(X) &= B(X) \cdot C^1(X). \end{aligned} \qquad (1)$$

Эти формулы позволяет выделить общую часть при получении функций обнаружения неисправностей константа 1 и константа 0.

Обозначим через $f(X)$ функцию, реализуемую выходом подсхемы, соответствующей полюсу $v$ (рис. 1б)). Тогда функции 1-управляемости – $C^1(X)$, и 0-управляемости – $C^0(X)$, имеют вид:

$$\begin{aligned} C^1(X) &= f(X), \\ C^0(X) &= \overline{f}(X). \end{aligned} \qquad (2)$$

Функция наблюдаемости $B(X)$ для многовыходной схемы определяется по формуле:

$$B(X) = B_1(X) \vee B_2(X) \vee \ldots \vee B_m(X). \qquad (3)$$

Как отмечается в работах [3, 4] и следует из определения функции наблюдаемости, функция наблюдаемости $B_i(X)$ для отдельного выхода $i$ имеет вид:

$$B_i(X) = \varphi_i^1(X) \oplus \varphi_i^0(X),\ i = \overline{1, m}.$$

Одним из методов получения ОДНФ и ROBDD представлений функции $\varphi_i^1(X) \oplus \varphi_i^0(X)$, предложенным в работах [3, 4], является их получение по формуле:

$$B_i(X) = \varphi_i^1(X) \oplus \varphi_i^0(X) = \varphi_i^1(X)\overline{\varphi}_i^0(X) \vee \overline{\varphi}_i^1(X)\varphi_i^0(X), \qquad (4)$$

Итак, ОДНФ и ROBDD представления функций обнаружения неисправности можно получить по формулам (1), получив соответствующие представления функции управляемости по формулам (2), а функции наблюдаемости по формулам (3) и (4). Для получения ОДНФ функции $B(X)$, необходимо выполнить ортогонализацию формулы (3) [3-5]. При получении ROBDD функций примем во внимание, что ROBDD отрицания функции можно получить из ROBDD самой функции путем замены значений терминальных вершин на противоположные.

Получив функцию обнаружения неисправности константа $\alpha$, $\alpha \in \{0,1\}$, – $D^{\alpha}(X)$, в виде ОДНФ или ROBDD, можно вычислить вероятность обнаружения неисправности $P(D^{\alpha}(X))$ для заданного распределения вероятностей единичных значений входных переменных схемы $P(X)$ как вероятность единичного значения функции не сложными известными способами, подробно описанными в работах [3, 7].

Метод вычисления вероятности обнаружения неисправности, с использованием формул (1)–(4) для построения функций обнаружения неисправности в виде ОДНФ и ROBDD, подробно рассмотрен в работе [7].

Вычислив вероятность обнаружения неисправности константа $\alpha$, $\alpha \in \{0,1\}$, $P(D^{\alpha}(X) = 1)$ можно определить, является ли неисправность труднообнаружимой.

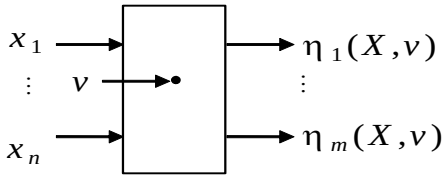



Рисунок 3. – Схема $C$, где полюсу $v$ сопоставлена входная переменная $v$

Сопоставим рассматриваемому полюсу схемы переменную $v$. Затем, получим функцию $\eta_i(X, v)$, $i = \overline{1, m}$, реализуемую $i$-ым выходом схемы, рассматривая переменную $v$ в качестве входной (рис. 3).

$\eta_i(X, v)$ порождает функции $\varphi_i(X)$, $\varphi_i^0(X)$ и $\varphi_i^1(X)$:

$\varphi_i(X) = \eta_i(X, f(X))$;

для неисправности константа 1:

$$\varphi_i^1(X) = \eta_i(X,1);$$

для неисправности константа 0:

$$\varphi_i^0(X) = \eta_i(X,0).$$

Как отмечается в работе [5], $B_i(X)$ – это булева производная функции $\eta_i(X, v)$ по переменной $v$, то есть $B_i(X) = \frac{\partial \eta_i(X, v)}{\partial v}$. Формулы (1) для функций обнаружения неисправности соответствуют известному результату: тестовые наборы для константной неисправности 1(0) являются решениями уравнения $\frac{\partial \eta_i(X, v)}{\partial v} \cdot \overline{f}(X) = 1$ ($\frac{\partial \eta_i(X, v)}{\partial v} \cdot f(X) = 1$).

Отметим, что предложенная формула (4), также представляет метод вычисления булевой производной булевой функции.

Как отмечается в [6, 7] и следует из формулы (1):

$$D^1(X) \vee D^0(X) = B(X)C^0(X) \vee B(X)C^1(X) = B(X)\overline{f}(X) \vee B(X)f(X) = B(X).$$

Эта формула говорит о том, что объединение множеств тестов для неисправности константа 1 и неисправности константа 0 на полюсе $v$ образует множество входных наборов схемы, на которых наблюдается значение на полюсе $v$.

Назовем две булевы функции *взаимно ортогональными*, если области их единичных значений не пересекаются.

Так как функции $D^1$ и $D^0$ взаимно ортогональны, то: $P(B) = P(D^1) + P(D^0)$.

Следовательно, для неисправности константа $\alpha$, $\alpha \in \{0,1\}$:

$$P(D^{\overline{\alpha}}) = P(B) - P(D^{\alpha}), \quad (5)$$

Здесь, $P(B)$ – это наблюдаемость полюса $v$. Напомним, что *наблюдаемость* полюса элемента схемы есть вероятность того, что на случайном входном наборе произойдет смена значения хотя бы на одном из выходов схемы при различных значениях на рассматриваемом полюсе.

Из (5) следует, что для определения того, являются ли неисправности константа 1 и константа 0 труднообнаружимыми, достаточно получить ОДНФ или ROBDD представление функции обнаружения неисправности по формулам (1) только для одной из неисправностей.

Из (1) следует, что:

$$P(D^{\alpha}) \le P(B). \quad (6)$$

Если вероятность $P(B) < P_{th}$, то из (6) следует, что обе константные неисправности 0 и 1 на полюсе $v$ являются труднообнаружимыми.

**Литература**

1. Bardell P., McAnney W., Savir J. Built-In Test for VLSI: Pseudo-random Techniques. New York: John Wiley & Sons, 1987. P. 353.

2. Krieger R., Becker B., Okmen C., OBDD-based Optimization of Input Probabilities for Weighted Random Pattern Generation, *Proc. Fault Tolerant Computing Conference*. 1995. pp. 120-129.

3. Голубева, О. И. Разработка и исследование методов моделирования и оценки мер тестопригодности логических схем: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Томск, 2000. – 112 с.

4. Голубева, О. И. Разработка и исследование методов моделирования и оценки мер тестопригодности логических схем: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Томск, 2000. – 23 с.

5. Голубева, О. И. Функции обнаружения константной неисправности, управляемости и наблюдаемости полюса элемента комбинационной схемы // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2015. – №1 (30). – С. 77–86.

6. Голубева, О. И. Определение труднообнаружимых неисправностей на основе функции обнаружения константной неисправности. // Высокие технологии. Проблемы и решения: сборник избранных статей десятой и одиннадцатой международных научно-практических конференций “Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования в физиологии и медицине” – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 33 – 35.

7. Голубева, О. И. Точные оценки управляемости, наблюдаемости и вероятности обнаружения неисправности для комбинационных схем, основанные на ОДНФ и ROBDD представлениях функций // Таврический научный обозреватель. — 2017. — №2 (19). – С. 145 – 150.