

## ДИАГНОСТИКА КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ

### 1. Введение

В настоящее время разработчики тестового оборудования предлагают новое поколение высокоинтеллектуальных тестеров с перемещаемыми зондами, состоящих из электромеханической тестирующей головки, обеспечивающей доступ зондов к компонентам и контрольным точкам многослойных печатных плат (МПП), электронной измерительной схемы и персонального компьютера, управляющего ее работой. Развитое программное обеспечение осуществляет автоматическую генерацию тестов на основе данных САПР, в которой проектировалась МПП. Измерительная схема обеспечивает обнаружение замыканий и обрывов в электрических монтажных схемах (ЭМС), выполняет емкостное тестирование пайки, измеряет величину сопротивления, индуктивности и емкости проводников и т.д.

### 2. Постановка задачи

Основной стратегией тестирования в устройстве с перемещаемыми зондами является проверка исправности электрического монтажа. Поэтому одними из важнейших теоретических и практических задач выступают задачи построения тестовых последовательностей, обеспечивающих полноту и диагностическую способность обнаружения различных видов дефектов и неисправностей МПП. Разработанные ранее алгоритмы проверки ЭМС [1 – 3], основанные на методах безусловного перебора замкнутых групп (ЗГ) или кодирования диаграммы Феррера, имеют общий недостаток – избыточность тестовых воздействий. Целью настоящих исследований является разработка математического аппарата, позволяющего строить тестовые последовательности для проверки и диагностики неисправностей ЭМС типа «короткое замыкание» минимальной длины и строго доказывать их проверяющую и диагностическую способность.

### 3. Построение проверяющих и диагностических тестов ЭМС относительно неисправностей типа «короткое замыкание»

Проверку исправности ЭМС МПП наиболее целесообразно проводить в два этапа: на первом этапе - относительно неисправностей типа «обрыв», на втором этапе – относительно неисправностей типа «короткое замыкание». В этом случае граф ЗГ типа «дерево» представляется линейным изоморфным графом с двумя висячими вершинами и  $(p_k - 2)$  узловыми вершинами, где  $p_k$  – количество клемм в  $k$ -ой ЗГ.

Под ЗГ ( $q$ ) понимается группа клемм ЭМС, в которой любая произвольно выбранная клемма электрически связана со всеми остальными клеммами, входящими в состав данной группы, и нет ни одной электрической связи, ведущей за ее пределы.

ЭМС в целом удобно изображать в виде диаграммы Феррера (ДФ) [1, 4], представляющей собой графическое изображение, в котором ЗГ, независимо от их структуры, упорядочены по числу клемм в убывающем порядке (рис. 1).

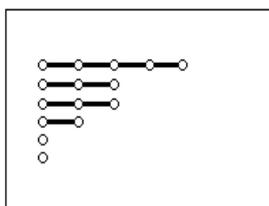


Рис. 1. Диаграмма Феррера  
 454

$$Q = \{q_n\}, \text{ где } n = 1, \dots, k.$$

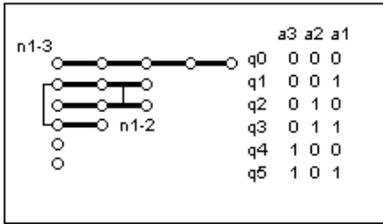


Рис. 2. Кодирование диаграммы Феррера

Методы построения тестов основаны на кодировании ДФ двоичным кодом. Каждой строке (рис. 2) присваивается порядковый номер  $(q_0, q_1, \dots, q_n)$  и его двоичный эквивалент  $(000, 001, \dots)$ .

Процесс тестирования заключается в создании дополнительных электрических связей (рис. 3), объединяющих ЗГ в две подгруппы по признаку одинаковых символов (0 и 1) в каждом двоичном разряде. При этом измерение сопротивления изоляции с целью обнаружения короткого замыкания (КЗ) осуществляется

посредством измерительного прибора (датчика), полюса которого подключаются к одному из представителей обеих подгрупп (рис. 3).

Для проверки ЭМС, состоящей из  $Q$  замкнутых групп, достаточно произвести  $\lceil \log_2 Q \rceil$  измерений, что равно количеству двоичных разрядов, необходимых для кодирования ДФ. Локализацию неисправностей можно осуществлять двумя способами, основанными на условном и безусловном алгоритмах поиска.

Для реализации условного алгоритма локализация КЗ производится на том этапе, на котором обнаружена данная неисправность. Допустим, что в ЭМС (рис. 2) имеется КЗ между  $q_1$  и  $q_2$ , которое обозначим через  $n_{1-2}$  ( $n_{1-2} = n_{2-1}$ ). Эта неисправность обнаруживается на первом тестовом воздействии (контрольном измерении).

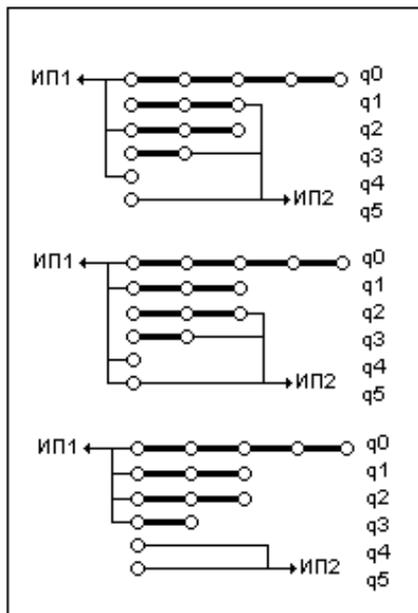


Рис. 3. Процедура тестирования ЭМС

Соответствующая схема измерений позволяет установить принадлежность короткозамкнутых ЗГ к двум подгруппам:

$q_0, q_2, q_4$  и  $q_1, q_3, q_5$  (рис. 4). Уточнение места неисправности можно производить поочередным отключением ЗГ из указанных совокупностей. Основным недостатком условного алгоритма поиска неисправностей является большая избыточность по количеству тестовых воздействий, необходимых для локализации одиночной

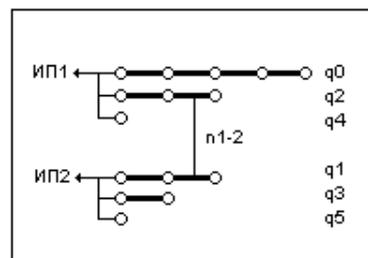


Рис. 4. Локализация неисправности  $n_{1-2}$

неисправности, и сложность его программной реализации. Рассмотрим безусловный алгоритм поиска неисправностей, преимущества которого будут показаны ниже.

Введем следующие понятия и определения, необходимые для описания метода.

**Допущение 1.** В ЭМС возможны одиночные константные неисправности типа КЗ между любой, произвольно выбранной ЗГ.

Как известно, количество таких неисправностей определяется выражением

$$N = \frac{Q!}{2!(Q-2)!}.$$

Для ЭМС, состоящей из 6 замкнутых групп,  $N = 15$  :

$$n_{1-2}, n_{1-3}, n_{1-4}, n_{1-5}, n_{1-6}, n_{2-3}, n_{2-4}, n_{2-5}, n_{2-6}, n_{3-4}, n_{3-5}, n_{3-6}, n_{4-5}, n_{4-6}, n_{5-6}.$$

**Определение 1.** Проверяющим тестом ( $T_n$ ) называется множество входных наборов, подаваемых на ЭМС, позволяющее обнаруживать любую одиночную неисправность.

Под входным набором ( $a_n$ ) понимается совокупность соединений между ЗГ и подключений к ним датчика неисправностей, обеспечивающая процесс контроля сопротивления изоляции между двумя подгруппами ЗГ.

$$A = \{a_n\}, \text{ где } 1 \leq n \leq \lceil \log_2 Q \rceil.$$

Проверяющий тест для ЭМС, изображенной на рис. 2, выглядит следующим образом:

$$T_n = \{a_1, a_2, a_3\} = \{(0,2,4-1,3,5), (0,1,4,5-2,3), (0,1,2,3-4,5)\}.$$

Запись 0,2,4-1,3,5 означает, что данный входной набор обеспечивает контроль сопротивления изоляции между подгруппами ЗГ:  $q_0, q_2, q_4$  и  $q_1, q_3, q_5$ . Причем ЗГ, входящие в одну подгруппу, электрически связаны между собой посредством дополнительных электрических соединений.

Множество реакций ЭМС на входные наборы обозначим через  $F$ .

$$F = \{f_n\},$$

где  $1 \leq n \leq \lceil \log_2 Q \rceil$ .

Отношения между входными наборами и реакциями на них ЭМС можно представить в табличной форме (табл. 1 и 2).

Таблица 1. Неисправность  $n_{1-2}$

$\frac{F}{A}$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
$a_1$	1		
$a_2$		1	
$a_3$			0

Таблица 2. Неисправность  $n_{1-3}$

$\frac{F}{A}$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
$a_1$	0		
$a_2$		1	
$a_3$			0

Строками таблицы являются входные наборы  $a_n$ , а столбцами – реакции ЭМС  $f_n$ . На пересечении соответствующей строки и столбца проставляется 1, если неисправность обнаруживается на данном входном наборе, в противном случае проставляется 0. Множество входных наборов ( $A$ ) состоит из двух подмножеств:  $B$  – подмножество единичных наборов;  $C$  – подмножество нулевых наборов.

$$A = B \cup C.$$

Единичным набором называется набор, на котором реакция ЭМС равна 1. Если реакция ЭМС равна 0, то такой набор называется нулевым. Так, для неисправности  $n_{1-3}$ :  $A = \{a_1, a_2, a_3\}$ ;  $B = \{a_2\}$ ;  $C = \{a_1, a_3\}$ .

Каждый входной набор  $a_n$  покрывает (контролирует) определенное подмножество возможных неисправностей ( $N_{an}$ ). Например,  $N_{a1} = \{a_{0-1}, a_{0-3}, a_{0-5}, a_{2-1}, a_{2-3}, a_{2-5}, a_{4-1}, a_{4-3}, a_{4-5}\}$ . Анализ полученных закономерностей позволяет сформулировать следующую лемму.

**Лемма 2.** ЭМС считается исправной, если  $B=0$  и не существует такой неисправности, для которой  $A=C$ .

**Доказательство.** Так как все ЗГ, входящие в состав ЭМС, пронумерованы в прямом последовательном порядке, то двоичные коды любой пары ЗГ различаются хотя бы в одном двоичном разряде. Например, двоичные коды нулевой и первой ЗГ (000 и 001) различаются в первом разряде, а двоичные коды первой и второй ЗГ (001 и 010) различаются в первом и втором разрядах. Это свойство двоичного кодирования приводит к тому, что любая пара ЗГ хотя бы один раз окажется в разных подгруппах, между которыми осуществляется измерение. Следовательно, любая одиночная неисправность будет обнаружена, проверяющий тест  $T_n$  является полным проверяющим тестом, а ЭМС, для которой  $B=0$ , считается исправной. Любая неисправность ЭМС типа КЗ является существенной. Поэтому невозможно существование такой неисправности, для которой  $A=C$ . Лемма доказана.

С целью организации безусловного алгоритма локализации КЗ можно использовать словарь неисправностей (СН), представляющий собой таблицу, в которой отражена связь множества реакций ЭМС на входные наборы проверяющего теста и множества возможных неисправностей. Вследствие большого количества возможных неисправностей, задача составления полного СН для ЭМС значительного объема является достаточно трудоемкой. Однако список неисправностей можно значительно сократить, если использовать свойства отношений между подмножествами неисправностей, которые покрываются входными наборами  $T_n$ . С этой целью сформулируем следующую лемму.

**Лемма 3.** Любая, произвольно выбранная, одиночная неисправность принадлежит пересечению подмножеств неисправностей, покрываемых единичными входными наборами, за исключением неисправностей, принадлежащих одновременно и объединению подмножеств неисправностей, покрываемых нулевыми входными наборами.

$$n_j \in \{(N_{a_i} \cap N_{a_k} \cap \dots \cap N_{a_l}) / (N_{a_m} \cup N_{a_n} \cup \dots \cup N_{a_p})\}, \quad (1)$$

где  $\{a_i, a_k, \dots, a_l\} \in B$ ;  $\{a_m, a_n, \dots, a_p\} \in C$ .

**Доказательство.** Вследствие допущения 1 на всех единичных наборах обнаруживается одна и та же одиночная неисправность. Поэтому  $n_j \in \{(N_{a_i} \cap N_{a_k} \cap \dots \cap N_{a_l})\}$ , где  $\{a_i, a_k, \dots, a_l\} \in B$ . Так как рассматривается класс константных неисправностей, последние не могут принадлежать одновременно подмножествам неисправностей, покрываемых как единичными, так и нулевыми входными наборами. Следовательно, такие неисправности должны быть исключены из общего списка. Поэтому правомерность выражения (1) доказана.

Рассмотрим в качестве примера неисправность  $n_{1-2}$ , описанную в табл. 1.

$$\begin{aligned} n_{1-2} &\in \{(N_{a1} \cap N_{a2}) / N_{a3}\}; \quad N_{a1} = \{n_{0-1}, n_{0-3}, n_{0-5}, n_{2-1}, n_{2-3}, n_{2-5}, n_{4-1}, n_{4-3}, n_{4-5}\}; \\ N_{a2} &= \{n_{0-2}, n_{0-3}, n_{1-2}, n_{1-3}, n_{4-2}, n_{4-3}, n_{5-2}, n_{5-3}\}; \quad N_{a3} = \{n_{0-4}, n_{0-5}, n_{1-4}, n_{1-5}, n_{2-4}, n_{2-5}, n_{3-4}, n_{3-5}\}; \\ N_{a1a2} &= N_{a1} \cap N_{a2} = \{n_{0-3}, n_{1-2}, n_{4-3}\}; \quad N_{a1a2} / N_{a3} = \{n_{0-3}, n_{1-2}\}; \quad n_{1-2} \in \{n_{0-3}, n_{1-2}\}. \end{aligned}$$

В результате вычислений получим множество эквивалентных неисправностей  $\{n_{0-3}, n_{1-2}\}$ , которому принадлежит и рассматриваемая неисправность  $n_{1-2}$ .

Выражение (1) по заданной реакции ЭМС позволяет сгенерировать минимальный список эквивалентных возможных неисправностей (табл. 3), соответствующих каждому набору реакций ЭМС.

Таблица 3. Словарь неисправностей

Реакция ЭМС			Список возможных эквивалентных неисправностей
$f_1$	$f_2$	$f_3$	
0	0	0	ЭМС исправна
1	0	0	$n_{0-1}, n_{2-3}, n_{4-5}$
0	1	0	$n_{0-2}, n_{1-3}$
1	1	0	$n_{0-3}, n_{1-2}$
0	0	1	$n_{0-4}, n_{1-5}$
1	0	1	$n_{0-5}, n_{1-4}$
0	1	1	$n_{2-4}, n_{3-5}$
1	1	1	$n_{3-4}, n_{2-5}$

Использование полученного таким образом СН значительно ускоряет процесс локализации КЗ. В этом случае среднее количество проверок, необходимое для обнаружения и локализации одиночной неисправности, определяется выражением:

$$l = l_n + l_o,$$

где  $l_n$  – длина проверяющего теста;  $l_o$  – длина диагностического теста.

$$l \approx \lceil \log_2 Q \rceil + \frac{Q}{4}.$$

#### 4. Выводы

Предложенный в работе подход к диагностике неисправностей ЭМС, основанный на кодировании диаграммы Феррера и математическом аппарате диагностики логических схем, позволяет корректно строить и доказывать полноту проверяющих и диагностических тестов. Разработанный безусловный алгоритм диагностики КЗ основан на использовании СН, что позволило избавиться от недостатков, свойственных известному условному алгоритму, и строить тестовые последовательности по проверке исправности ЭМС и диагностике одиночных константных неисправностей с меньшим количеством тестовых проверок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hardy G.H. and Wright E.M. An Introduction to the Theory of Numbers. – London: Oxford Univ. Press, 1954. – 273 p.
- Kauts William H. Testing for faults in wiring networks // IEEE Trans. Comput. – 1974. – 23, N 4. – P. 358 – 363.
- Забара С.С. и др. Об одном методе технической диагностики сложного электромонтажа // Управляющие системы и машины. – 1977. – № 2. – С. 107 – 111.
- Стрельников В.П., Федухин А.В. Метод построения полных проверяющих тестов для электрических монтажных схем // Математические машины и системы. – 1997. – № 1. – С.115 – 124.