

УДК 681.326.74.06

## ОБРАБОТКА РЕАКЦИЙ ДИСКРЕТНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ

**С. Н. Никифоров,**

канд. техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Исследуются возможные типы искажений булевой матрицы реакций объекта диагностирования — амплитудные и фазовые. На основании анализа количества возможных вырождений матрицы реакций объекта диагностирования выводятся математические выражения для вычисления объемов памяти при реализации комбинационных и последовательных методов диагностирования. Предлагаются два новых метода обработки реакций объекта диагностирования, позволяющие существенно сократить объемы памяти.

Постановка диагноза в дискретных объектах построена, в основном, на методах сравнения показателей объекта диагностирования (ОД), характеризующих его состояние, с их эталонными значениями. Для дискретных объектов (например, таких как логические блоки, схемные платы) в качестве показателей могут использоваться токовые режимы интегральных схем, тепловое излучение монтажа и интегральных схем и др., но основными показателями являются последовательности выходных сигналов как наиболее доступные и удобные по виду для обработки. При этом в качестве «эталона» могут применяться выходные сигналы эталонного объекта; сигналы, формируемые генератором эталонных сигналов; сигналы, хранящиеся в различного вида запоминающих устройствах.

Поэтому диагностирование базируется на решении двух основных задач:

— получении выходных сигналов, содержащих всю диагностическую информацию об ОД, с помощью полного теста диагностирования (если ОД пассивного типа) или определения длины выходной последовательности для ОД активного типа;

— сравнении выходных сигналов с их эталонным значением, т. е. логической обработки выходных сигналов ОД с целью обнаружить в нем дефекты и их локализовать.

Предположим, что в реакциях ОД содержится вся необходимая для получения диагноза с заданной глубиной информация о дефектах ОД, т. е. для пассивных ОД разработан полный тест, а для активных определена длина выходной последовательности.

Тогда все множество выходных сигналов ОД  $r_{ij}$ ,  $j = \{1, l\}$ ;  $i = \{1, m\}$  можно представить в виде матрицы

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{l1} & r_{l2} & \dots & r_{lm} \end{pmatrix},$$

где  $m$  — количество выходов ОД;  $l$  — длина тестовой последовательности.

Возникновение в ОД дефекта (дефектов) приводит к искажению компонентов векторов реакций  $r_{ij}$  и, следовательно, к вырождению матрицы  $\mathbf{R}$ .

Тогда задача диагноза выглядит следующим образом: фиксация матрицы  $\mathbf{R}$  и идентификация вырождений матрицы  $\mathbf{R}_0$ , которая соответствует исправному ОД.

Все многообразие существующих методов диагностирования можно разбить на две группы: комбинационные и последовательные [1].

При комбинационных методах процедура проверки работоспособности и поиска дефектов сводится к тому, что сначала получают все реакции от ОД, т. е. реализуется функция  $F_1$ , а потом производится обработка информации — реализуется функция  $F_2$ . Учитывая это, общий объем памяти в условных единицах объема (у. е. о.) можно определить по следующему выражению:

$$V_{\text{комб}} = V(F_1) + V(F_2),$$

где  $V(F_1)$  — объем памяти для регистрации реакций ОД;  $V(F_2)$  — объем памяти для логической обработки, причем за у. е. о. можно принять ячейку памяти.

Для осуществления функции  $F_1$  при комбинационном поиске необходимо запомнить матрицу  $\mathbf{R}$ , из чего следует, что объем памяти должен быть  $(ml)$  у. е. о. Эта величина для комбинационных

методов постоянна, а варьируется  $V(F_2)$  в зависимости от вида решаемой задачи диагностирования. Если производится только *проверка работоспособности*, то в памяти следует хранить еще такую же матрицу, соответствующую работоспособному состоянию ОД:

$$V_{\text{комб}}^{(1)} = V_{(F_1)}^{(1)} + V_{(F_2)}^{(1)} = (ml + ml) = 2ml,$$

где  $V_{\text{комб}}^{(1)}$  — общий объем памяти технических средств диагностирования (ТСД) при проверке работоспособности комбинационным методом.

Если производится *поиск одиночных дефектов*, то для реализации функции  $F_2$  необходимо располагать памятью, которая хранила бы все множество одиночных вырождений матрицы  $\mathbf{R}$ . Так как число элементов матрицы  $\mathbf{R}$  есть  $ml$ , то требуемый объем памяти для реализации  $F_2$  ( $ml \cdot ml$ ) у. е. о., а

$$V_{\text{комб}}^{(2)} = V_{(F_1)}^{(2)} + V_{(F_2)}^{(2)} = [ml + (ml)^2] = ml(1 + ml),$$

где  $V_{\text{комб}}^{(2)}$  — общий объем памяти ТСД при поиске одиночных дефектов комбинационным методом.

При *поиске кратных дефектов* (включая и одиночные) объем памяти для функции  $F_2$  зависит от числа всех возможных вырождений матрицы  $\mathbf{R}$ . Для матрицы размерностью  $t \times l$ , элементы которой могут принимать только бинарные значения «0» или «1», такое число равно  $2^{ml}$ . В связи с этим объем памяти, требуемый для логической обработки,  $[ml \cdot 2^{ml}]$  у. е. о. Общий объем памяти ТСД при поиске одиночных и кратных дефектов комбинационным методом

$$V_{\text{комб}}^{(3)} = V_{(F_1)}^{(3)} + V_{(F_2)}^{(3)} = [ml + m(l2^{ml})] = ml(1 + 2^{ml}).$$

В этот объем включается и  $V_{\text{комб}}^{(1),(2)}$  на проверку работоспособности и поиск одиночных дефектов. Причем рассмотренные способы формирования объема памяти ТСД при комбинационном методе проверки работоспособности, поиске одиночных и кратных дефектов обеспечивают решение указанных задач диагностирования без внесения искажений, т. е. методическая достоверность обработки выходных сигналов  $Q_{\text{комб}} = 1$ .

**Последовательные** методы диагностирования предполагают выполнение функции  $F_1$  не со всей матрицей  $\mathbf{R}$ , а только с одной строкой вектором. После чего осуществляется функция  $F_2$ , на основании результатов которой переходят к следующей строке матрицы  $\mathbf{R}$ . Таким образом, в связи с тем, что при последовательных методах обработка информации производится не в конце процедуры, как у комбинационных методов, а поэтапно, то нет необходимости хранить в памяти всю матрицу  $\mathbf{R}$ . Достаточно располагать памятью на  $t$  разрядов, т. е. на одну строку, информация которой стирается после логической обработки. Тогда для уже рассмотренных видов диагностирования общие объемы памяти [у. е. о.] при последовательных методах определяются следующим образом:

— при *проверке работоспособности ОД*

$$V_{\text{посл}}^{(1)} = V_{(F_1)}^{(1)} + V_{(F_2)}^{(1)} = (m + ml) = m(1 + l);$$

— при *поиске одиночных дефектов ОД*

$$V_{\text{посл}}^{(2)} = V_{(F_1)}^{(2)} + V_{(F_2)}^{(2)} = [m + m^2l] = m(1 + ml);$$

— при *поиске дефектов произвольной кратности ОД*

$$V_{\text{посл}}^{(3)} = V_{(F_1)}^{(3)} + V_{(F_2)}^{(3)} = (m + ml2^{ml}) = m(1 + l2^{ml}).$$

В  $V_{\text{посл}}^{(3)}$  включаются и  $V_{\text{посл}}^{(1),(2)}$  на проверку работоспособности и поиск одиночных дефектов. Соответственно и последовательные методы диагностирования при выбранных объемах памяти не вносят искажений в диагностическую информацию, которая содержится в матрице  $\mathbf{R}$  выходных сигналов и характеризуется достоверностью  $Q_{\text{посл}} = 1$ .

Полученные формулы сведены в таблицу, использование которой позволяет при заданных значениях длины теста и числа выходов ОД определить требуемый объем памяти ТСД при различных видах диагностирования.

Проведем сравнительный анализ объемов памяти для комбинационных и последовательных методов, для чего воспользуемся выражениями:

— при *проверке работоспособности*

$$U_1 = \frac{V_{\text{комб}}^{(1)}}{V_{\text{посл}}^{(1)}} = 1 + \frac{l-1}{l+1}; \quad (1)$$

— при *поиске одиночных дефектов*

$$U_2 = \frac{V_{\text{комб}}^{(2)}}{V_{\text{посл}}^{(2)}} = l; \quad (2)$$

— при *поиске кратных дефектов*

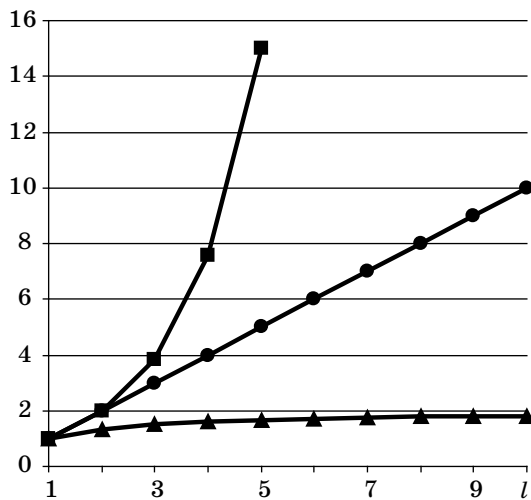
$$U_3 = \frac{V_{\text{комб}}^{(3)}}{V_{\text{посл}}^{(3)}} = \frac{l(1 + 2^{ml})}{1 + l2^m}, \quad (3)$$

где  $U_1, U_2, U_3$  — коэффициенты соотношений между объемами памяти ТСД для комбинационных и последовательных методов при указанных видах диагностирования.

Для полученных выражений (1) – (3) построены графические зависимости (рисунок).

Анализ зависимостей  $U_1 = f(l), U_2 = f(l), U_3 = f(l)$  позволяет сделать следующие выводы:

Методы диагностирования	Объем памяти ТСД, у. е. о.		
	Проверка работоспособности	Поиск одиночных дефектов	Поиск кратных дефектов
Комбинационные	$2ml$	$ml(1 + ml)$	$ml(1 + 2^{ml})$
Последовательные	$m(1 + l)$	$m(1 + ml)$	$m(1 + l2^{ml})$



■ Соотношение объемов памяти блока обработки реакций в зависимости от длины теста  $l$  при использовании комбинационных и последовательных методов обработки реакций: —▲— проверка работоспособности  $U_1$ ; —●— поиск одиночных дефектов  $U_2$ ; —■— поиск кратных дефектов  $U_3$

— объем памяти ТСД при последовательных методах диагностирования соответственно в  $U_1, U_2, U_3$  раз меньше, чем при комбинационных, поэтому с точки зрения сокращения объемов памяти ТСД предпочтительными являются последовательные методы;

— значения  $U_1$  и  $U_2$  не зависят от числа выходов объекта, а определяются только длиной теста или выходной последовательности реакций ОД.

Полученные формулы для расчета необходимого объема памяти ТСД при разных видах диагностирования свидетельствуют о том, что при различных величинах числа выходов ОД  $m$  и длины теста  $l$  применение как комбинационных, так и последовательных методов диагностирования становится нецелесообразным в условиях эксплуатации вследствие больших аппаратных затрат.

Например, если для диагностирования ОД, имеющего 10 выходов ( $m = 10$ ), используется тест длиной  $l = 50$ , то при последовательном методе диагностирования требуется следующий объем памяти, у. е. о.:

— для проверки работоспособности  
 $V_{\text{посл}}^{(1)} = m(1+l) = 10(1+50) = 510$ ;

— для поиска одиночных дефектов  
 $V_{\text{посл}}^{(2)} = m(1+ml) = 10(1+10 \times 50) = 5010$ ;

— для поиска кратных дефектов  
 $V_{\text{посл}}^{(3)} = m(1+l^2m) = 10(1+50 \times 2^{500}) = 1,637E+153$ .

Для комбинационных методов  $V$  в соответствующее число  $U$  больше.

Поэтому возникает необходимость разработки методов диагностирования, основанных на сжатии диагностической информации и позволяющих уменьшить объем памяти.

Оценивая дефекты ОД как отображения в матрице реакций, можно считать, что каждый возникший дефект выразится в искажении компонент векторов реакций ОД и, следовательно, в вырождении матрицы  $\mathbf{R}$ . В результате анализа матрицы  $\mathbf{R}$  [2] определены следующие основные возможные искажения, вызванные одиночными дефектами ОД:

а) изменение общего числа «единиц» («нулей») матрицы, т. е.  $r_{ij} = \bar{r}_{ij0}$ , где  $r_{ij0}$  — эталонное значение компоненты;  $\bar{r}$  — инверсия (назовем это амплитудными искажениями);

б) перемещение «единицы» по строке с сохранением общего числа единиц матрицы, т. е.  $r_{ji} = \bar{r}_{ji0}$

и  $r_{j+1,i} = \bar{r}_{j+1,i0}$ , причем  $r_{ji} = \bar{r}_{j+1,i}$ ;

в) перемещение «единицы» в столбце с сохранением общего числа «единиц» матрицы, т. е.  $r_{ji} = \bar{r}_{ji0}$  и  $r_{j,i+1} = \bar{r}_{j,i+10}$ , причем  $r_{ji} = \bar{r}_{j,i+1}$ .

Последние два вида искажений будем относить к фазовым.

Указанные искажения можно проиллюстрировать матрицами  $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3$ ; матрица  $\mathbf{R}_0$  соответствует ОД, в котором дефекты отсутствуют:

$$\mathbf{R}_0 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \mathbf{R}_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ [1] & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$\mathbf{R}_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & [0] & [1] & 1 \end{vmatrix}; \mathbf{R}_3 = \begin{vmatrix} [0] & 0 & 1 & 0 \\ [1] & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Строго говоря, «одиночными» искажениями может считаться только первый из указанных видов, так как два других уже являются кратными искажениями и как бы состоят из двух разновидностей первого — исчезновение «единицы» в одном месте, появление «единицы» в другом.

Обработка матриц в целях сжатия диагностической информации не должна приводить к потере информации, в противном случае какие-то дефекты не будут обнаружены.

Вычисление определителей для  $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3, \mathbf{R}_0$  не позволяет получить никакой информации о наличии и месте дефекта в ОД, так как

$$\det(\mathbf{R}_0) = \det(\mathbf{R}_1) = \det(\mathbf{R}_2) = \det(\mathbf{R}_3) = 0.$$

Нахождение значений перманентов позволяет только установить факт наличия дефектов, вызвавших изменение общего числа «единиц» в матрице  $\mathbf{R}_0$  [3]:

$$\begin{aligned} \text{per}(R_0) &= 7, \text{ per}(R_1) = 8, \\ \text{per}(R_2) &= 6, \text{ per}(R_3) = 6. \end{aligned}$$

Предложенный в работе [2] метод суммарного вектора заключается в том, что элементы матрицы  $\mathbf{R}$  суммируют по столбцам с помощью  $Q$ -рядного сумматора, т. е. производится подсчет «единиц» матрицы. В результате этого формируется суммарный вектор вида

$$\mathbf{r}_\Sigma = \{\mathbf{r}_{\Sigma 1}, \mathbf{r}_{\Sigma 2}, \dots, \mathbf{r}_{\Sigma l}, \mathbf{r}_{\Sigma Q}\}.$$

Мерность вектора  $\mathbf{r}_\Sigma$  увеличивается из-за переносов из младших разрядов в старшие. Максимальная мерность вектора  $\mathbf{r}_\Sigma$  определяется из следующего выражения:

$$Q_{\max} = m + \log_2 l.$$

Вычислим для рассмотренных примеров значения суммарного вектора:

$$\text{для } \mathbf{R}_0 \quad \mathbf{r}_{\Sigma R_0} = \{01011\};$$

$$\text{для } \mathbf{R}_1 \quad \mathbf{r}_{\Sigma R_1} = \{11011\};$$

$$\text{для } \mathbf{R}_2 \quad \mathbf{r}_{\Sigma R_2} = \{00111\};$$

$$\text{для } \mathbf{R}_3 \quad \mathbf{r}_{\Sigma R_3} = \{01011\}.$$

Неравенства  $\mathbf{r}_{\Sigma R_1} \neq \mathbf{r}_{\Sigma R_0}$  и  $\mathbf{r}_{\Sigma R_2} \neq \mathbf{r}_{\Sigma R_0}$  позволяют обнаруживать в ОД дефекты, приводящие как к изменению общего числа «единиц», так и к перемещению «единицы» в строке с сохранением общего числа «единиц» в матрице  $\mathbf{R}$ . Этот метод реализован в авторском свидетельстве [4].

Однако для матрицы  $\mathbf{R}_3$  (т. е. для случая перемещения «единицы» по столбцам матрицы с сохранением общего числа «единиц»)  $\mathbf{r}_{\Sigma R_3} = \mathbf{r}_{\Sigma R_0}$ , следовательно, дефект ОД не обнаруживается, хотя он и привел к вырождению матрицы  $\mathbf{R}_0$  в  $\mathbf{R}_3$ . Это значит, что блок обработки реакций, реализующий метод суммарного вектора, вносит искажения в сигналы реакций ОД, которые приводят к необнаружению указанного типа дефектов, т. е. повышается вероятность необнаружения дефекта  $P_{\text{необ } k}$ .

Для устранения этого недостатка разработан [2] метод суммарных векторов. При этом формируется не только суммарный вектор  $\mathbf{r}_\Sigma$ , но и  $\mathbf{r}'_\Sigma$ , значение которого находится построчным суммированием элементов матрицы  $\mathbf{R}$ . В результате получается суммарный вектор вида

$$\mathbf{r}'_\Sigma = \{\mathbf{r}_{1\Sigma}, \mathbf{r}_{2\Sigma}, \dots, \mathbf{r}_{l\Sigma}, \dots, \mathbf{r}_{W\Sigma}\}.$$

Максимальная мерность вектора  $\mathbf{r}'_\Sigma$  определяется из выражения

$$W_{\max} = l + \log_2 m.$$

Вычисление вектора  $\mathbf{r}'_\Sigma$  для матрицы  $\mathbf{R}$  эквивалентно вычислению вектора  $\mathbf{r}_\Sigma$  для транспонированной матрицы  $\mathbf{R}^T$ :

$$\mathbf{r}'_\Sigma(\mathbf{R}) = \mathbf{r}_\Sigma(\mathbf{R}^T).$$

Тогда для матриц  $\mathbf{R}_0$  и  $\mathbf{R}_3$

$$\mathbf{r}'_{\Sigma R_0} = \{01001\}; \quad \mathbf{r}'_{\Sigma R_3} = \{11001\},$$

т. е.  $\mathbf{r}'_{\Sigma R_0} \neq \mathbf{r}'_{\Sigma R_3}$  и дефект обнаружен.

Дефекты, приводящие к перемещению «единицы» по столбцам матрицы  $\mathbf{R}$ , характерны для последовательностных ОД, т. е. когда изменяется момент появления сигналов на выходах ОД. Метод суммарных векторов, позволяющий обнаруживать дефекты, приводящие к фазовым искажениям реакций ОД, реализован в устройстве [5].

Таким образом, возможны три типа искажений матрицы  $\mathbf{R}$ , соответствующие дефектам ОД. Для сокращения объема памяти блока обработки реакций без увеличения  $P_{\text{необ } k}$  можно использовать два предложенных метода обработки реакций ОД. Метод суммарного вектора обеспечивает обнаружение дефектов ОД, приводящих к изменению общего числа «единиц» матрицы  $\mathbf{R}$  и к перемещению «единицы» по строкам матрицы  $\mathbf{R}$  с сохранением общего числа «единиц». Метод суммарных векторов, кроме того, позволяет обнаруживать и дефекты, вызывающие перемещение «единицы» по столбцам матрицы  $\mathbf{R}$  с сохранением общего числа «единиц».

## Литература

1. Сердаков А. С. Автоматический контроль и техническая диагностика. Киев: Техника, 1971. 242 с.
2. Калявин В. П., Мозгалевский А. В., Никифоров С. Н. Обнаружение одиночных неисправностей в дискретных устройствах // III Всесоюз. совещание по технической диагностике. М.: Наука, 1975. С. 30–32.
3. Кофман А. Введение в прикладную комбинаторику. М.: Наука, 1975. 479 с.
4. Кизуб В. А., Никифоров С. Н., Скворцов И. В. Устройство для обнаружения неисправностей: А. с. СССР № 478309. Бюл. № 27. 1975.
5. Никифоров С. Н., Скворцов И. В. Устройство для обнаружения неисправностей: А. с. СССР № 514294. Бюл. № 18. 1976.