

Шуть В.Н., Головки В.А., Муравьев Г.Л.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ В ЛОГИЧЕСКИХ ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ЗАМЕНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОКОНТАКТНОГО ЗОНДА КОМПАРАТОРА

Рост объёма выпуска средств цифровой техники при значительном усложнении функциональных схем логических типовых элементов замены (ЛТЭЗ), повышает актуальность создания автоматизированных систем диагностики логических плат (АСДЛП), позволяющих проводить достаточно быстрый и достоверный поиск неисправностей в печатных платах.

В области технической диагностики, как в зарубежной, так и в отечественной практике, [1,2] популярна тенденция отказа от объёмных, дорогостоящих тестов в пользу систем с программным управляемым зондом.

Локализуемая возможность диагностических тестов ограничена функционально-неразличными группами элементов. Без дополнительных замеров сигналов в таких группах с помощью зондов невозможно однозначно определить неисправный элемент.

В литературе [3, 4, 5] описан диагностический терминал на базе ЭВМ, управляющая программа которого на основании анализа Y_i - компоненты и внешних контактов объекта диагностирования вырабатывает следующий шаг перехода к Y_{i+1} - компоненте. Управляемый зонд перемещается вдоль существенного пути от места проявления неисправности (внешне-го вывода) до её действительного положения.

Существенным недостатком такого способа является большой объём необходимой памяти ЭВМ, так как в ней должна храниться информация о состоянии каждой точки ЛТЭЗ на каждом тестовом наборе входной последовательности.

Сократить объём необходимой для диагностики информации позволяет способ сигнатурного сжатия [6, 7, 8] путём прослеживания сигнатур вдоль существенного пути от выходов к входам элемента, у которого входные сигнатуры верны, а выходная – нет.

Получение информации о состоянии внутренних узлов ЛТЭЗ в форме двойной последовательности или сигнатур сопряжено с большими объёмами предварительных вычислений.

Указанные способы требуют корректности входной последовательности T и не позволяют вести автоматизированную диагностику на псевдослучайных последовательностях в схемах с критическими состояниями, вызванными неисправностями элементов и связей [4]. Необходимо отметить и невозможность локализации неисправности в контурах обратной связи, так как неисправность одного элемента в контуре даёт неверный логический уровень или сигнатуру на всех элементах, входящих в контур обратной связи.

Возможная ошибка оператора в выборе и установке измерительного зонда на вывод очередной микросхемы уводит программу поиска в сторону и в конечном итоге неверно идентифицирует место неисправности.

Устранить недостатки позволяет разработанный в насто-

ящей работе зондовый поиск неисправностей многоконтактным логическим компаратором (ЗПНЛК).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В целях обеспечения корректности проводимых теоретических выкладок к рассмотрению метода ЗПНЛК сформулируем условия рассматриваемой задачи.

Пусть задан ЛТЭЗ, выполненный на средних и больших ИС TTL. Функциональная схема ЛТЭЗ содержит любые логические элементы (ЛЭ) и элементы памяти в виде контуров обратных связей, триггеров, регистров и элементов интегральной памяти (ИС ОЗУ), объединённые в структуру любого вида. Все элементы схемы работают в стандартных логических условиях, свойственных ИС TTL. Предполагается, что схема ЛТЭЗ работает в нормальных условиях по питанию.

Будем рассматривать как одиночные, так и кратные неисправности двух классов:

- а) неисправности, связанные с неправильным монтажом;
- б) неисправности, связанные с ошибочным функционированием логических элементов.

Рассматриваемые неисправности этих классов характеризуются следующими внешними проявлениями:

- сигнал const 0 (или const 1) на одном из выводов ИС;
- несоответствие функции, выполняемой контролируемой ИС, таблице истинности для ИС данного типа.

Зададимся входной последовательностью T , построенной на наборах функционирования схемы проверяемого ЛТЭЗ.

Принимаем модели одиночной и краткой неисправности, определённые в работе [9].

При указанных условиях ставится задача обоснования автоматизированной процедуры поиска неисправностей по методу ЗПНЛК и построения блок-схемы алгоритма.

Формализация исходных посылок к решению задачи ЗПНЛК

Определение 1. Методом зондового поиска неисправностей с использованием логического компаратора (ЗПНЛК) назовём процедуру диагностики контролируемого ЛТЭЗ, при которой поиск неисправностей производится с использованием информации о состоянии внутренних узлов φ проверяемого узла.

Информация о состоянии функционирования узла φ снимается со всех выводов микросхемы Y_i и анализируется на соответствие закону функционирования с помощью логического компаратора цифровых ИС, содержащего необходимый набор эталонных ИС.

Определение 2. Внутренний узел φ ($\varphi \in F$) состоит из ИС Y_i ($Y_i \in Y$) с числом входов m_i и выходов n_i и подмножества связей u_i ($u_i \in U$), связывающих входные контакты ИС $\{k_i^{al}$,

$k_i^{a2}, \dots, k_i^{am}$ с выходами других ИС, входящих в состав ЛТЭЗ, или входными контактами $x_j^a (x_j^a \in X^a)$ ЛТЭЗ, где:

- F - множество внутренних узлов ЛТЭЗ;
- Y - множество интегральных схем ЛТЭЗ;
- U - множество связей функциональной схемы ЛТЭЗ;
- X^a - множество внешних входов контактов ЛТЭЗ.

Определение 3. Входным набором ИС $y_i, i=1, r$ где r – число интегральных схем ЛТЭЗ, будем называть двоичный вектор $k_{ip}^a = (k_i^{a1}, k_i^{a2}, \dots, k_i^{am})_{ip}; k_i^{a1}, k_i^{a2}, \dots, k_i^{am} \in 1, 0$, принимаемый входными контактами ИС $k_i^{a1}, k_i^{a2}, \dots, k_i^{am}$ при подаче на входы ЛТЭЗ тестового набора $t_p (t_p \in T), p=1, N$.

Множество входных наборов $k_{ip}^a, t_p \in T, p=1, N$ при последовательном поступлении на входы ЛТЭЗ тестовой последовательности T образует полную входную последовательность $k_{it}^a = \{k_{it1}^a, k_{it2}^a, \dots, k_{itN}^a\}$ на выходах ИС y_i .

Определение 4. Выходным набором зондируемой ИС $y_i, i=1, r$ будем называть двоичный вектор

$$k_{ip}^b = (k_i^{b1}, k_i^{b2}, \dots, k_i^{bm})_{ip}; k_i^{b1}, k_i^{b2}, \dots, k_i^{bm} \in 1, 0,$$

устанавливающийся на выходах ИС y_i при поступлении на входы ЛТЭЗ тестового набора $t_p \in T, p=1, N$.

Полной выходной последовательностью ИС y_i называем совокупность $k_{it}^b = \{k_{it1}^b, k_{it2}^b, \dots, k_{itN}^b\}$, получившуюся на выходах ЛТЭЗ полной входной тестовой последовательности $T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$.

Определение 5. Эталонной выходной последовательностью k_{it0}^b назовём последовательность на выходных контактах $k_{i0}^{b1}, k_{i0}^{b2}, \dots, k_{i0}^{bn}$ эталонной ИС y_{i0} логического компаратора при прохождении на входах ЛТЭЗ последовательности T .

Для исправной зондируемой микросхемы y_i выполняется равенство

$$k_{it}^b = k_{it0}^b \tag{1}$$

Между входной последовательностью k_{it}^a и выходной последовательностью k_{it}^b зондируемой микросхемы y_i выполняется зависимость:

$$k_{it}^b = Q_i(k_{it}^a), \tag{2}$$

где Q_i – передаточная функция интегральной схемы y_i .

Конструкция логического зонда-компаратора и его работа подробно описана в [10]. Оператор устанавливает зонд логического компаратора на проверяемую ИС y_i ЛТЭЗ и запускает входную тестовую последовательность T для данного ЛТЭЗ. На входы контролируемого внутреннего узла Φ (т. е. на входные контакты ИС y_i) поступает входная последовательность k_{it}^a . Под воздействием входной последовательности k_{it}^a только одна ИС эталонного блока работает синхронно с проверяемой, а именно, микросхема эквивалентная по выполняемой логической функции и наименованию проверяемой.

В случае, если контролируемая микросхема неисправна, возможны два варианта:

а) в эталонном множестве ИС $\{y_{10}, y_{20}, \dots, y_{q0}\}$ не найдётся ни одной микросхемы, работающей под действием входной последовательности k_{it}^a синхронно с проверяемой и, следовательно, все триггеры сигналами несравнения будут уста-

новлены в единичное состояние, а на выходе элемента “И” выработается признак неисправности проверяемой ИС y_i ;

б) микросхема y_{j0} из эталонного множества ИС $\{y_{10}, y_{20}, \dots, y_{q0}\}$, работающая под воздействием входной последовательности k_{it}^a синхронно с проверяемой ИС y_i (т. е. $Q_{j0}(k_{it}^a) = Q_i(k_{it}^a)$) не является эквивалентной по выполняемой логической функции и наименованию проверяемой ИС y_i . В этом случае триггер не установившийся в единичное состояние будет сигнализировать об исправности определённого типа ИС, не соответствующего типу проверяемой ИС, что также является признаком неисправности проверяемой микросхемы y_i .

Итак контролируемая микросхема гарантировано считается исправной при выполнении двух условий:

- а) функция, реализуемая выходами зондируемой ИС, соответствует её наименованию или иначе, микросхема y_i ведёт себя на входной последовательности k_{it}^a точно также, как и эталонная y_{i0} на той же последовательности;
- б) за время проверки каждый вывод микросхемы, за исключением схемно-константных выводов, имел хотя бы одно переключение, т. е. все активно работающие выводы внутреннего узла ЛТЭЗ переключаются.

Последнее условие проверяется блоком контроля переключений и зависит от полноты тестовой последовательности T .

Определение 6. Зондированием внутреннего узла Φ назовём процедуру определения правильности функционирования ИС y_i путём снятия информации с контрольных точек узла Φ (т. е. с выводов ИС y_i) и сравнения выходной последовательности k_{it}^b в логическом компараторе с эталонной выходной последовательностью k_{it0}^b , генерируемой эталонной ИС y_{i0} блока эталонных микросхем компаратора.

Определение 7. μ - узлом назовём внутренний узел Φ , выходная последовательность k_{it}^b , которого не совпадёт с эталонной выходной последовательностью k_{it0}^b , генерируемой эталонной ИС y_{i0} того же наименования, что и ИС y_i .

Считаем, что признак принимает значения:

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & \text{если } k_{it}^b \neq k_{it0}^b \\ 0, & \text{если } k_{it}^b = k_{it0}^b \end{cases} \tag{3}$$

Константные неисправности вида const 0 (const 1) по одному из проверяемых выводов зондируемой ИС y_i являются частным случаем одиночных логических неисправностей (ОЛН) и определяются блоком контроля переключений компаратора (рис.1). В случае, если при прогоне последовательности T значение логического уровня на каком либо выводе ИС не изменилось, выдаётся оригинал ϵ . В основном такая проверка необходима по выходам, так как постоянный уровень на одном из входов проверяемой ИС y_i (например, в результате пробоя перехода) будет также и постоянным уровнем на одноимённом входе эталонной ИС y_{i0} логического компаратора, что ограничит входную последовательность k_{it}^a и не позволит обнаружить неисправность, та как признак μ_i согласно выражения (3) не зависит от входной последовательности k_{it}^a . Обозначим такую проверку для S – входа ИС y_i :

$$\varepsilon_i^{as} = \begin{cases} 1, \text{если } \bigvee_{p=2}^N (k_{i(p-1)}^{as} \oplus k_{ip}^{as}) = 0; s = \overline{1, m}; t_p \in T; p = \overline{2, N}; \\ 0, \text{если } \bigwedge_{p=2}^N (k_{i(p-1)}^{as} \oplus k_{ip}^{as}) = 1. \end{cases} \quad (4)$$

Для внутреннего узла Φ_i в целом имеем признак

$$\varepsilon_i^a = \begin{cases} 1, \text{если } \bigvee_{s=1}^{s=m} \varepsilon_i^{as} = 1; \\ 0, \text{если } \bigwedge_{s=1}^{s=m} \varepsilon_i^{as} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Для проведения автоматизированного поиска неисправностей ЛТЭЗ по методу ЗПНЛК и диагностики некоторых видов дефектов необходима также проверка на наличие константных ОЛН по выходам зондируемых ИС. Обозначим такую проверку для W – выхода зондируемой ИС y_i :

$$\varepsilon_i^{bw} = \begin{cases} 1, \text{если } \bigvee_{p=2}^N (k_{i(p-1)}^{bw} \oplus k_{ip}^{bw}) = 0; w = \overline{1, N}; t \in T; p = \overline{2, N}; \\ 0, \text{если } \bigwedge_{p=2}^N (k_{i(p-1)}^{bw} \oplus k_{ip}^{bw}) = 1. \end{cases} \quad (6)$$

Для внутреннего узла Φ_i в целом имеем признак

$$\varepsilon_i^b = \begin{cases} 1, \text{если } \bigvee_{w=1}^{w=n} \varepsilon_i^{bw} = 1; \\ 0, \text{если } \bigwedge_{w=1}^{w=n} \varepsilon_i^{bw} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Определение 8. Внешним узлом Ψ_j ($\Psi_j \in \Phi$) назовём выходной контакт x_j^b ЛТЭЗ ($x_j^b \in X^b$) и линию связи u_j ($u_j \in U$), связывающую выходной контакт x_j^b с выходом внутреннего узла ЛТЭЗ, где:

Φ – множество внешних узлов ЛТЭЗ;

X^b – множество внешних выходных контактов ЛТЭЗ.

Обозначим выходную последовательность, получающуюся на выходном контакте x_j^b ЛТЭЗ при прохождении тестовой последовательности T , как z_j^b полную выходную последовательность образующуюся на выходах ЛТЭЗ при последовательном прохождении тестовой последовательности T , обозначим $Z^b \{z_1^b, z_2^b, \dots, z_f^b\}$, где f – число выходных контактов ЛТЭЗ.

Эталонную выходную последовательность ЛТЭЗ обозначим Z_0^b .

Определение 9. η -узлом назовём такой внешний узел Ψ_j , значение выходной последовательности z_j^b которого не совпадает с эталонной выходной последовательностью z_{j0}^b для этого внешнего узла, по крайней мере, на одном входном наборе t_p ($t_p \in T$) т. е. имеем признак

$$\eta_j = \begin{cases} 1, \text{если } z_j^b \neq z_{j0}^b; \\ 0, \text{если } z_j^b = z_{j0}^b. \end{cases} \quad (8)$$

Определение 10. M – волной назовём подмножество F_M ($F_M \in F$) внутренних узлов Φ ЛТЭЗ, имеющих прямую непосредственную связь по выходу или опосредованную через

выходы предыдущих фронтов M – волны с внешним η -узлом ЛТЭЗ.

Очевидно, что M – волна содержит в себе, по крайней мере, один μ – узел (или узел с признаком $\varepsilon^a = 1$), неисправность которого передаётся через внутренние узлы предыдущих фронтов M – волны на внешний η -узел ЛТЭЗ.

Определение 11. Генератором M - волны назовём внутренний узел Φ^η ($\Phi^\eta \in F_M$), имеющий непосредственную связь по выходу с внешним η -узлом ЛТЭЗ.

Определение 12. Генерацией M – волны называем процедуру формирования M – волны, при которой производится последовательная выборка внутренних узлов Φ ЛТЭЗ, имеющих прямую (для генератора M – волны Φ^η -узла) или опосредованную через входы узлов предыдущих фронтов M – волны связь по выходу с внешним η -узлом и занесения их в список $\langle H_{ij} \rangle$ – микросхем, подлежащих зондированию с использованием логического компаратора.

Определение 13. k – фронтом M – волны называем подмножество внутренних узлов F_M^k ($F_M^k \in F_M$), каждый из которых имеет хотя бы одну прямую связь с любым узлом, входящим в состав подмножества $F_M^{(k-1)}$ предыдущего фронта M – волны и не входит в состав подмножества ни одного из предыдущих фронтов M – волны. При этом, очевидно, что первым фронтом M – волны является узел-генератор M – волны т. е. $F_M^1 \sim \Phi^\eta$.

Определение 14. Опросом M – волны называем процедуру поиска неисправности ЛТЭЗ с использованием многоконтактного зонда при которой производится последовательное зондирование с выбранным приоритетом внутренних узлов Φ , входящих в состав M – волны и занесенных в список $\langle H_{ij} \rangle$ вплоть до установления узла с признаком $\mu = 1$.

Следует отметить, что в отличие от метода ЗПН [1;4], где поиск неисправности ведётся последовательным опросом узлов Φ от внешнего вывода проявления неисправности вдоль существенного пути до её источника, в методе ЗПНЛК зондирование может начаться с любого элемента M – волны и выполняться в любом порядке. Такая особенность ЗПНЛК заключена в законченности для Φ – узла операции зондирования, результат которого не зависит от состояния остальных элементов M – волны. Порядок опроса элементов M – волны определяется лишь группой установленных заранее критериев очередности опроса, на основании которых ЭВМ анализирует содержимое списка $\langle H_{ij} \rangle$ и преобразовывает его в $\langle H_{2j} \rangle$ список очередности опроса узлов M – волны. Состав, число и весовые коэффициенты критериев очередности опроса узлов Φ зависят от конкретных условий производства и характера налаживаемых ЛТЭЗ, их функционального состава. Можно указать наиболее общие критерии очередности опроса внутренних узлов, к числу которых относятся:

- а) вероятность выхода из строя (интенсивность отказов) того или иного типа ИС, используемых в ЛТЭЗ;
- б) коэффициент разветвления по выходу ИС (т. к. предполагается, что наиболее вероятны дефекты максимально нагруженных ИС);
- в) число связей узла Φ с другими узлами $\Phi_k, \Phi_l, \dots, \Phi_n \in F_M$ (предполагается, что наибольшее влияние на проявление де-

фекта по выходу x_j^b ЛТЭЗ, имеющему признак $\eta = 1$, оказывают внутренние узлы, связанные с максимальным числом других внутренних узлов, входящих в M – волну.);

г) критерий учитывающий удобство оператора при последовательном зондировании ИС, установленных на поверхности ЛТЭЗ. (при этом наиболее удобным с точки зрения психологии оператора является горизонтальное сканирование ИС в направлении слева-направо и сверху-вниз);

д) при автоматическом перемещении зонда – критерий, учитывающий минимальность пути перемещения, охватывающего все ИС, включенные в список $\langle H_{ij} \rangle$.

Список критериев очередности опроса может быть продлён или сокращён в зависимости от условий производства и стоящихся задач при диагностике ЛТЭЗ.

После установления списка критериев очередности опроса их сводят в матрицу критериев опроса вида

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1k} \\ v_{12} & v_{22} & \dots & v_{2k} \\ \dots & v_{ij} & \dots & \dots \\ v_{l1} & v_{l2} & \dots & v_{lk} \end{pmatrix},$$

где $i = 1, 2, \dots, l$ – номер внутреннего узла в списке $\langle H_{ij} \rangle$; $j = 1, 2, \dots, k$ – номер учитываемого критерия очередности опроса.

Параметры матрицы V , имеющие качественные выражения приводятся к такому виду, чтобы большему численному значению критерия соответствовал приоритет в очередности зондирования той или иной ИС. Критерии, не удовлетворяющие этому условию, пересчитываются по формуле

$$\omega_{ij} = \frac{1}{v_{ij}}. \tag{9}$$

В результате получается матрица приведённых параметров $W = //\omega_{ij} //$. Затем производится нормирование параметров матрицы

$$h_{ij} = \frac{\omega_{max j} - \omega_{ij}}{\omega_{max j}}, \tag{10}$$

где $\omega_{max j}$ – максимальное значение j – го критерия очередности опроса.

В результате получают матрицу нормированных критериев очередности опроса $H = //h_{ij} //$

УДК 681 325 65

Шуть В.Н., Муравьёв Г.Л.

ОПТИМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ

В [1] разработана процедура оптимального зондового поиска неисправностей в логических структурах. Данная процедура реализована в алгоритме автоматизированного поиска неисправностей.

Блок – схема алгоритма приведена на рис. 1. Поиск неисправностей логических ТЭЗ осуществляется следующим образом. К испытательной установке стыкуется ЛТЭЗ. В память ЭВМ предварительно вводятся исходные данные о структуре схемы контролируемого ЛТЭЗ в виде матриц А, В, С, D, E, G и массивов К, L.

Для обобщённого анализа узлов, входящих в список $\langle H_{ij} \rangle$ на предмет установления очередности зондирования ИС y_i из множества F_M вводится оценочная функция

$$R_i = \sum_{j=1}^k h_{ij} \beta_j, \tag{11}$$

где β_j – весовой коэффициент j – го критерия оценки.

При этом на коэффициенты важности накладывается следующее ограничение

$$\sum_{j=1}^k \beta_j = 1. \tag{12}$$

Первоочередным приоритетом в очередности опроса микросхем пользуются ИС с максимальным значением оценочной функции R_i .

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Соколов Ю.А. Анализ технических средств зондового поиска неисправностей в дискретных устройствах. “Вопросы радиоэлектроники”, серия ЭВТ, 1987г, вып. 11.
2. Аллен Д.Р. Логический тестер для наладки цифровых интегрально-схемных плат. “Электроника”, №23, 1973г.
3. Патент 4192451 (США). Digital diagnostic system employing sygnature analysis. S. Swerling, S. Smith, T. Wiesmann.
4. Соколов Ю.А. К вопросу зондового поиска неисправностей типа “перемычка” в логических платах - “Вопросы радиоэлектроники”, серия ЭВТ, 1979г, вып. 11.
5. Соколов Ю.А., Червоненко В.Н., Курносина Н.Г., Установка зондового поиска неисправностей логических плат. - “Вопросы радиоэлектроники”, серия ЭВТ, 1982г, вып. 12.
6. Гордон Г., Надиг Э. Локализация неисправностей в микропроцессорных системах при помощи шестнадцатеричных ключевых кодов – “Электроника”, 1977г, №5.
7. Nadig H.J. Testing a microprocessor product using a sygnature analysis. – STS, LSI and Board, 1978.
8. Ярмолик В.Н., Кобяк И.П., Шуть В.Н., Многоканальный сигнатурный анализатор. Авт. свид. №1193678 – “Бюллетень изобр.”, №43, 1983г.
9. Карибский В.В., Пархоменко П.П. и др. Основы технической диагностики, М, “Энергия”, 1976г.
10. Шуть В.Н. Логический компаратор для контроля цифровых схем. Авт. свид. №1048430 – “Бюллетень изобр.”, №38, 1983г.