

В.И. ХАХАНОВ  
**ТЕХНОЛОГИИ УСЛОВНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ  
ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

**1 Алгоритм обратного прослеживания**

Представленный ниже алгоритм условного диагностирования, не дифференцируемый строго на процедуры контроля и поиска дефектов, описывается обобщенным уравнением диагноза:

$$F^*(F, T, D) \mid_{F, T, g^*} = \cup_i (g(T, F) \cap g^*(T, F, D_i)) = \emptyset,$$

где  $g, g^*$  – эталонная и экспериментальная реакции наблюдаемых линий цифрового устройства (ЦУ);  $F, T, D$  – функционал, проверяющий тест, наперед заданные дефекты.

Использование сигнатурного анализа [1,2] определяет элементарную проверку  $P_i = g^*(T, F, D_i)$  как получение сжатой реакции при подаче проверяющего теста  $T$  на выбранном наблюдаемом контакте  $i$  схемы. Проверка  $P_i$  считается положительной, если в точке контроля  $i$  эталонная сигнатура, вычисленная при отсутствии неисправностей в схеме, равна экспериментальной:  $S_M = S_R$ . Если же  $S_M \neq S_R$ , проверка  $P_i$  отрицательная. В общем случае идентификация проверки определяется выражением

$$P_i = \begin{cases} P_i^+ \Leftarrow [g^*(T, F, D_i) \cap g(T, F) = g(T, F)]; \\ P_i^- \Leftarrow [g^*(T, F, D_i) \cap g(T, F) = \emptyset]. \end{cases}$$

Точкой контроля  $i$  является внешний контакт примитива, микросхемы, типового элемента замены (ТЭЗ), цифрового устройства. Два логических исхода проверки задают альтернативные пути поиска дефекта или определения технического состояния объекта:

$$D_s = \begin{cases} \{D_0, D^+\} \Leftarrow P_i = P_i^+; \\ D^- \Leftarrow P_i = P_i^-, \end{cases}$$

где  $D_s = D_0 \cup D$ ;  $D^+ \cup D^- = D$ ;  $D^+ \cap D^- = \emptyset$ ;  $D_0$  – исправное техническое состояние;  $D$  – предполагаемая область существования дефектов;  $D^+$  ( $D^-$ ) – область неисправностей, определяемая положительной (отрицательной) проверкой  $P^+$  ( $P^-$ ).

Поэтому алгоритм диагностирования методом обратного прослеживания является условным и зондовым, он использует сигнатурный логический анализатор. Длительность и стоимость выполнения условного диагностического эксперимента на порядок выше, чем у безусловного. В отличие от метода половинного деления [1,3] он ориентирован на поиск не

только логических дефектов, но и на обнаружение разрывов линий. Стратегия обратного прослеживания неисправности по структуре объекта, связанная с введенным классом макродефектов, изначально была ориентирована на последовательное выполнение проверок линий функционально-логического подграфа [4] в целях восстановления работоспособности цифрового модуля на стадии производства или эксплуатации при использовании в качестве средства диагностирования "ложа из гвоздей" или автоматического зонда [5].

Диагностическая модель устройства представлена графом функционально-гальванических связей контактов микросхем и ЦУ:

$$G = \{L_{ij} \in L, F_{tr}^k \in F\},$$

где  $L_{ij}$  – (дуга) гальваническое отношение одного потенциала между контактами различных конструктивов или примитивов;  $F_{tr}^k$  – (дуга или дуги  $F_{tr}^k$  k-го ПЭ) функциональное отношение между входной  $t$  и выходной  $r$  переменной. Для построения алгоритма диагностирования необходимы: полный проверяющий тест относительно одиночных константных неисправностей  $T$ , эталонные сигнатуры  $S_{gr}$  всех внешних контактов микросхем и ТЭЗа, граф функционально-гальванических связей  $F^G$  цифрового модуля:

$$W = \{G, T, S_M\}.$$

Чтобы приблизить модели неисправностей к реальным, введем следующие типы состояний объекта:

$$D_S = \{D_0, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5\},$$

где  $D_0$  – исправное состояние объекта, определяется совпадением  $S_M = S_R$  по всем выходным контактам устройства:

$$D_0 \Leftarrow [g(T, F) \cap g^*(T, F, D_i) = g(T, F)];$$

$D_1$  – отсутствие гальванической связи между контактами различных микросхем:

$$D_1 \Leftarrow [S_M(L_i) = S_R(L_i) \& S_M(L_j) \neq S_R(L_j)];$$

$D_2$  – неисправность на выходе k-го элемента или внутри его:

$$D_2 \Leftarrow \{\forall t[S_M(F^k_t) = S_R(F^k_t)] \& \exists r[S_M(F^k_r) \neq S_R(F^k_r)]\};$$

$D_3$  – отсутствие связи между входом и шиной константы  $\equiv 0, \equiv 1$ :

$$D_3 \Leftarrow [S_M(\{\equiv 0, \equiv 1\}) = S_R(\{\equiv 0, \equiv 1\}) \& S_M(L_j = \{\equiv 0, \equiv 1\}) \neq S_R(L_j)];$$

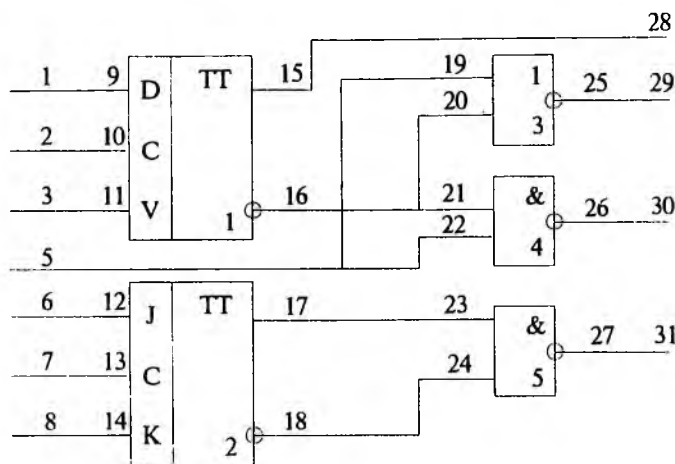
$D_4$  – неисправность внешнего входного контакта цифрового объекта:

$$D_4 \Leftarrow [S_M(L_i) \neq S_R(L_i) \& S_M(L_j) \neq S_R(L_j)];$$

$D_5$  – неисправность выходов, объединенных в монтажную логику:

$$D_5 \Leftarrow \{\forall i[S_M(L_i) \neq S_R(L_i)] \& [S_M(L_j) \neq S_R(L_j)]\}.$$

Построим алгоритм поиска дефектов методом обратного прослеживания для схемы, изображенной на рисунке.



Априорно все доступные контакты идентифицируются порядковыми номерами или топологическими идентификаторами (координата микросхемы, номер ножки). Последовательность диагностирования контактов на топологии схемы определяется двумя направлениями: справа-налево – при отрицательной проверке; снизу-вверх – при положительной. (Направления могут быть и другими). Такая стратегия задает в качестве очередной точки контроля при отрицательной проверке  $P_i^-$  на выходе элемента его первый нижний входной контакт.

При фиксации положительного результата  $P_i^+$  на входном контакте примитива очередная точка контроля задается расположенной выше входной ножкой. Если в последнем случае проверка отрицательная, очередная точка контроля определяется выходным контактом элемента, связанного с рассматриваемым входом. Если в диагностическом эксперименте рассматривается очередная точка контроля  $P_i$ , не являющаяся выходным контактом схемы, то все предыдущие проверки линий-преемников имели отрицательный результат.

Для предложенного примера построенный алгоритм диагностирования представлен в таблице.

$P_i$	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17
$P_i^+$	30	29	28	$D_0$	$D_1$	$D_1$	$D_1$	23	$D_2$	21	$D_2$	19	$D_2$	$D_1$	$D_1$
$P_i^-$	27	26	25	15	24	22	20	18	17	5	16	16	5	14	14
Sign	21FE	31FE	41FE	51FE	21FE	31FE	41FE	11F4	1133	11F1	1110	1110	11F1	11F4	1133
$P_i$	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	3	2	1
$P_i^+$	$D_1$	$D_1$	13	12	$D_2$	10	9	$D_2$	$D_1$	$D_1$	$D_1$	$D_1$	$D_1$	$D_1$	$D_1$
$P_i^-$	11	11	8	7	6	3	2	1	$D_4$	$D_4$	$D_4$	$D_4$	$D_4$	$D_4$	$D_4$
Sign	1110	51FE	115E	110E	133E	11HE	11PE	13FE	115E	110E	133E	11F1	11HE	11PE	13FE

Первой точкой контроля является контакт 31. Он имеет эталонную сигнатуру  $S_M=21FE$ . (Все другие контакты также имеют собственные сигнатуры.)

Результат сравнения эталонной и экспериментальной сигнатур формирует точки контроля на следующем шаге диагностирования при двух альтернативах:  $P^+$  – проверка положительная,  $P^-$  – проверка отрицательная.

Состояние  $D_0$  фиксируется, если все выходы дают положительную проверку;  $D_1$  – на гальванической связи зафиксирована положительная проверка при отрицательной предыдущей;  $D_2$  – при отрицательной проверке на выходе все входы имеют положительный результат сравнения сигнатур;  $D_3$  – отрицательная проверка на входе, связанном с шинами  $\equiv 0, \equiv 1$ ;  $D_4$  – отрицательная проверка на внешнем входе цифрового устройства.

Таблица поиска дефектов имеет число строк, равное количеству наблюдаемых контактов, и позволяет осуществлять диагностический эксперимент в диалоговом режиме без наличия принципиальной электрической схемы объекта. Функции оператора при неавтоматическом диагностировании заключаются в инициализации команд для подачи теста, установке зонда сигнатурного анализатора в координату точки контроля, высвечиваемой на дисплее, принятии окончательного решения о состоянии объекта.

Диагностирование (см. таблицу) продемонстрируем на примере разрыва связи между контактами 8 и 14. Проверка начальной координаты 31 дает отрицательный результат, что определяет очередной точкой контроля контакт 27. Его проверка имеет отрицательное значение, следовательно, переходим на координату 24. Далее фиксируем отрицательные проверки на линиях 18, 14, после чего на контакте 8 получаем положительный результат. Вывод: техническое состояние  $D_1$  – нет связи между контактами 8 и 14.

### 1.1 Процедура структурного анализа

Применение алгоритма обратного прослеживания для поиска дефектов на стадии эксплуатации цифровых модулей связано с уменьшением количества точек контроля при установлении диагноза. В этом случае необходимо выполнять структурный анализ схемы относительно элементарных проверок внешних выходов. Если в схеме предполагается одиночный (кратный) макродефект, неисправность ограничивается областью  $G^{\cap}$  ( $G^{\cup}$ ), получаемой пересечением (объединением) подсхем  $G_j$ , относящихся к тем наблюдаемым выходам  $L_j^Y$ , на которых зафиксированы отрицательные результаты проверки [6]:

$$G^{\cap} = \bigcap_j \{ \cap G_j \leftarrow [S_M(L_j^Y) \neq S_R(L_j^Y) | j=1, m] \}; \quad (1)$$

$$(G^{\cup} = \bigcup_j \{ \cup G_j \leftarrow [S_M(L_j^Y) \neq S_R(L_j^Y) | j=1, m] \}), \quad (2)$$

где  $G_j$  – подграф внутренних точек контроля схемы, являющихся предшественниками для линии  $L_j^Y$ ;  $m$  – число внешних выходов схемы. Ограничение наличия в схеме одиночного дефекта является достаточно сильным, поэтому должны существовать весомые аргументы, чтобы его принять.

Для теста, активизирующего проверку каждого одиночного дефекта на всех выходах ЦУ, подозреваемая область при наличии одиночного (кратного) дефекта определяется разностью между подграфами с отрицательными и положительными по выходам результатами испытаний:

$$G = G^{\cap} \forall j \{ \cup G_j \Leftarrow [S_M(L_j^Y) = S_R(L_j^Y)] j=1,m \},$$

$$(G = G^{\cup} \forall j \{ \cup G_j \Leftarrow [S_M(L_j^Y) = S_R(L_j^Y)] j=1,m \}).$$

Поскольку проектирование теста, активизирующего каждый из дефектов до всех наблюдаемых выходов, задача дорогостоящая, на практике для уменьшения подозреваемой области следует пользоваться выражениями (1) или (2).

**Пример.** Пусть существует одиночный дефект  $D_1(10,2)$ , который при диагностировании внешних выходов проявился на линиях 28 и 30.

В случае разрыва связи между линиями 2 и 10 (см. рисунок) последовательность выполнения проверок по таблице без структурного анализа имеет стоимость

$$(P_{30}^-, P_{26}^-, P_{22}^+, P_{21}^-, P_{16}^-, P_{11}^+, P_{10}^-, P_{2}^+) \Rightarrow D_1(10,2).$$

С использованием структурного анализа подозреваемая область определяется подграфом линий:

$$G = G_{28} \cap G_{30} = \{L_1, L_9, L_2, L_{10}, L_3, L_{11}\}.$$

Стоимость диагностирования, равная числу элементарных проверок для установления диагноза на подграфе  $G$ , определяется последовательностью

$$(P_{11}^-, P_{10}^-, P_{2}^+) \Rightarrow D_1(10,2),$$

что в 2,6 раза меньше базового алгоритма обратного прослеживания без структурного моделирования результатов сравнения эталонных и экспериментальных сигнатур по наблюдаемым выходам схемы.

## 2 Алгоритм половинного деления

Для изложения стратегии половинного деления введем вектор моделирования неисправной области  $M = (M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_n)$ , где  $n$  – общее число точек контроля цифрового модуля. Подмножество наблюдаемых выходных контактов устройства обозначим в виде  $M^Y \subset M$ ,  $M^Y \neq \emptyset$ . Значение координаты вектора  $M_i \in M$  формируется в соответствии с выражением

$$(M_i = 1) \Leftarrow [S_M(L_i) \neq S_R(L_i) \& S_M(L_j^Y) \neq S_R(L_j^Y) \& L_j^Y = f(L_i)];$$

в противном случае –  $M_i = 0$ .

В результате диагностического эксперимента по наблюдаемым выходам формируется подмножество  $M^Y \subset M$  вектора моделирования:

$$M_i^Y = \begin{cases} 1 \Leftarrow S_M(L_i^Y) \neq S_R(L_i^Y); \\ 0 \Leftarrow S_M(L_i^Y) = S_R(L_i^Y). \end{cases} \quad (3)$$

Для  $M^Y \subset M$  вычисляется подграф точек контроля цифровой схемы  $M' \subseteq M$ , неисправные сигнатуры которых могут сформировать определен-

ное по (3) подмножество  $M^Y \subset M$ . Построение вектора моделирования неисправной области  $M$  для вычисленного подмножества  $M^Y \subset M$  с использованием графа цифровой схемы основано на следующих правилах.

### 2.1 Процедура структурного моделирования

1. Состояния наблюдаемых линий определяются в соответствии с выражением (1) и не могут быть модифицированы с помощью двух следующих правил (пункты 2 и 3).

2. Входные контакты примитива  $t$  подозреваются неисправными, если существует выходной дефектный контакт:  $(\forall i(M_i(X_i) = 1) \Leftrightarrow (\exists i(M_i(Y_i) = 1))$ .

3. При различных технических состояниях (исправное и неисправное) входов одного потенциала разных примитивов  $t$  и  $f$  значение линии разветвления подозревается дефектным:  $M_i = M_i(X_i) \vee M_i(X_f)$ .

С учетом приведенных правил процедуры структурного моделирования и вычисленного подмножества  $M^Y \subset M$  алгоритм определения состояний невыходных координат вектора моделирования неисправной области  $M$  заключается в последовательной обработке примитивов ациклической схемы методом обратного прослеживания от внешних выходных контактов схемы ко входным.

Для примера, представленного на рисунке, продемонстрируем выполнение процедуры структурного моделирования, исходя из условия, что

$$M^Y = \{M_{28} = 1, M_{29} = 0, M_{30} = 1, M_{31} = 0\}.$$

Результат моделирования на основе выполнения правил 2 и 3 дает вектор единичных переменных:

$$M = (1 \ 2 \ 3 \ 5 \ 9 \ 10 \ 11 \ 15 \ 16 \ 21 \ 22 \ 26 \ 28 \ 30).$$

На подграфе  $G'(M)$ , который представлен матрицей  $Q = \|Q_{ij}\|$ , организуется условный диагностический эксперимент с выбором точки контроля, делящей подозреваемую область пополам.

### 2.2 Процедура выбора контрольной точки

Чтобы изложить стратегию выбора очередного контакта при зондировании схемы, количество единичных координат в вектор-строке предшественников для точки контроля  $i$  матрицы  $Q = \|Q_{ij}\|$  достижимостей обозначим через  $A_i = \text{card}(Q_{ij})_{j=1..n}$ ; в вектор-столбце преемников – через  $B_i = \text{card}(Q_{ji})_{j=1..n}$ . Определим также множество точек контроля предшественников и преемников в виде  $\{A_i\}$ ,  $\{B_i\}$ . Тогда при стратегии выбора контрольной точки, делящей подозреваемую область пополам, необходимо максимизировать по параметру  $i$  выражение  $(A_i + B_i)/n$  ( $n$  – мерность матрицы  $Q$ , соответствующей подграфу  $G'(M)$ ), которое показывает мощность делимого подграфа  $(A_i + B_i)$  по отношению к исходному  $G'(M)$ . Кроме того, минимизация разности предшественников и преемников точки контроля  $i$   $(A_i - B_i)/n$  показывает точность половинного деления структуры  $G'(M)$ . В результате получаем функционал

$$f = \text{MAX}_i [(A_i + B_i)/n - (A_i - B_i)/n] = \text{MAX}_i [(2/n)(B_i)]. \quad (4)$$



После выполнения элементарной проверки на линии  $P_{16}$  область подозреваемых дефектов определяется вектором переменных  $M(P_{16}) = (1\ 2\ 3\ 9\ 10\ 11\ 16)$ , для которого подграф цифровой схемы задается уже в виде матрицы

$$Q(P_{16}) = \begin{vmatrix} & 1 & 2 & 3 & 9 & 10 & 11 & 16 \\ 1 & 1 & & & & & & \\ 2 & & 1 & & & & & \\ 3 & & & 1 & & & & \\ 9 & 1 & & & 1 & & & \\ 10 & & 1 & & & 1 & & \\ 11 & & & 1 & & & 1 & \\ 16 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

Вычисление функционала  $f$  по данной матрице дает очередную точку контроля  $P_9$ , в которой фиксируется положительная проверка, определяющая область существования дефекта в виде вектора линий:

$$M(P_9) = M(P_{16}) \setminus \{B_9\} = (1\ 2\ 3\ 9\ 10\ 11\ 16) \setminus \{1, 9\} = (2\ 3\ 10\ 11\ 16).$$

Данной области неисправных линий соответствует матрица

$$Q(P_9) = \begin{vmatrix} & 2 & 3 & 10 & 11 & 16 \\ 2 & 1 & & & & \\ 3 & & 1 & & & \\ 10 & 1 & & 1 & & \\ 11 & & 1 & & 1 & \\ 16 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

по которой вычисление функционала  $f$  определяет следующей точкой контроля  $P_{10}$ . Элементарная проверка в  $P_{10}$  дает отрицательный результат, что позволяет вычислить по (6) область дефектов:

$$M(P_{10}) = \{A_{10}\} = (2, 10).$$

Очередная проверка на линии  $P_2$  дает положительный результат, что является основанием для диагноза – неисправность  $D_1(10,2)$ .

Таким образом, процедура диагностирования наперед заданного дефекта  $D_1(10,2)$  имеет стоимость, определяемую четырьмя проверками:

$$(P_{16}^-, P_9^+, P_{10}^-, P_2^+) \Rightarrow D_1(10,2),$$

что только на одну больше, чем при структурном анализе, и это естественно, поскольку процедура структурного моделирования ориентирована на поиск как одиночных, так и кратных дефектов.

Предложенные алгоритмы реализуют условное диагностирование макродефектов на основе использования процедур: структурного анализа и структурного моделирования, а также методов: обратного прослеживания и половинного деления подозреваемой области, когда очередная точка контроля при анализе матрицы достижимостей вычисляется по критерию MAXMINa.

Выборочная статистика (на девяти схемах) числа зондирований для установления диагноза дефекта  $D_1$  на одном из входов ЦУ дает среднюю оценку относительного уменьшения количества точек контроля, равную

$$q = \text{card}(\text{АОП}_6) / \text{card}(\text{АОП}_c) = 2,75.$$

Список литературы: 1. *Ярмолик В.Н.* Контроль и диагностика цифровых узлов ЭВМ. Минск: Наука и техника, 1989. 234с. 2. *Гордон Д., Надиг Х.* Локализация неисправностей в микропроцессорных системах при помощи шестнадцатеричных ключевых кодов // *Электроника*. 1977. № 5. С.23-33. 3. *Пархоменко П.П., Согомонян Е.С.* Основы технической диагностики (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / Под ред. П.П. Пархоменко. М.: Энергия, 1981. 320 с. 4. *Кривуля Г.Ф., Кизуб В.А., Коновалов В.Б., Хаханов В.И.* Автоматизированная система диагностирования цифровых модулей // *Электронное моделирование*. 1987. №2. С.57-61. 5. *Байда Н.П., Кузьмин И.В., Шпилевой В.Т.* Микропроцессорные системы поэлементного диагностирования. М.: Радио и связь, 1987. 256 с. 6. *Хаханов В.И.* Техническая диагностика элементов и узлов персональных компьютеров. К.: ИЗМН. 1997. 308 с.

Поступила в редколлегию 12.10.98