

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
ОПТИМИЗИРОВАННЫХ  
АЛГОРИТМОВ  
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

ХАХАНОВ В.И., МОНЖАРЕНКО И.В.,  
БЕДРАТЫЙ Р.А.

Реализация тестовых методов диагностирования средств цифровой вычислительной техники [1, 2] предполагает наличие сервисного оборудования, включающего интерфейс связи с объектом диагностирования, средства подачи тестов и снятия реакции изделия, логические стимуляторы и анализаторы для поиска дефектов внутри цифрового устройства (ЦУ). Функциональное диагностирование не требует дорогостоящего сервисного диагностического оборудования, но его разрешающая способность – глубина поиска дефектов – значительно ниже, чем у тестовых методов. В условиях высокой стоимости отбраковки компонентов вычислительной техники и выполнения процедуры диагностирования далее предлагается оптимизированный метод условного поиска дефектов для цифровых структур пассивного типа, который достаточно просто реализовать для решения практических задач с целью минимизации временных и материальных затрат восстановления работоспособности вычислительного устройства.

Проектирование алгоритмов поиска дефектов для цифровых изделий основывается на знании структуры объекта диагностирования, что доступно практически для любого вычислительного устройства при реализации стратегии обратного прослеживания. Временные затраты элементарной зондовой проверки определяются выражением:  $T = T_m + T_b + T_k + T_p$ , где  $T_m$  – время поиска координат необходимой микросхемы и требуемого контакта (вывода)  $T_b$  с целью установки ведомого сигнатурного зонда;  $T_k$  – время проверки наличия связи между зондом и выводом;  $T_p$  – время подачи теста на объект диагностирования, снятия эталонной реакции в точке контроля, получения экспериментальной сигнатуры и сравнения ее с эталонной.

Сумма временных затрат, необходимых для проверки цифрового устройства, зависит от числа  $n$  внешних выходных контактов:

$$T_n = \sum_{i=1, n} T_i$$

При выполнении процедуры поиска дефектов по стратегии "до первой неисправности" с последующим восстановлением работоспособности среднее время диагностирования разрыва каждой из  $L$  эквипотенциальных линий при равных вероятностях их возникновения определяется выражением

$$T_L = (\sum_{i=1, m} T^i) / L,$$

где  $m = m_x + m_y + m_z$  – число точек контроля, включающее соответственно входные, внутренние и выходные. Для определения неисправного элемента среднее время, затрачиваемое на поиск дефекта, больше по сравнению с предыдущей оценкой, поскольку число элементов в схеме  $N$  значи-

тельно меньше количества эквипотенциальных линий:

$$T_P = (\sum_{i=1, m} T^i) / P,$$

$P$  – число примитивных элементов в схеме. Для диагностирования дефектов, связанных со входными контактами разъема, приемлемая следующая оценка средних затрат:

$$T_X = (\sum_{i=1, m} T^i) / m_x.$$

Учитывая, что величина затрат одинакова при диагностировании любого типа дефектов (неисправность внутри корпуса микросхемы, разрыв гальванической связи между контактами элементов), средний расход времени на диагностирование дефекта равен

$$T_F = (\sum_{i=1, m} T_m^i + T_b^i + T_k^i + T_p^i) / (L + P + m_x).$$

При фиксированной длине теста имеется возможность обнаружения различных неисправностей, что обуславливает применение данного метода при наладке цифровых изделий на стадии изготовления, когда вероятности возникновения всех типов неисправностей одинаковы.

Учитывая высокие временные затраты на диагностирование неисправных элементов и для поиска дефектов устройства, на этапе эксплуатации целесообразно уменьшать время локализации неисправности.

Пусть для цифрового объекта произвольной функциональной сложности с физически или логически разорванными глобальными обратными связями существует проверяющий тест, активизирующий транспортирование неисправностей, возникающих в примитивах, до наблюдаемых выходов устройства.

Условный алгоритм поиска дефектов  $G = \langle N_1 \cup N, (N_1^-, N_1^+), \{N_1^{D-}, N_1^{D+}\} \cup N^D \rangle$  есть дихотомическое дерево с вершинами  $N_1 \cup N$  – точками контроля, дугами  $(N_1^-, N_1^+)$  – положительными и отрицательными результатами проверок, концевыми вершинами  $\{N_1^{D-}, N_1^{D+}\} \cup N^D$  – результатами диагноза. Алгоритм ориентирован на диагностирование одиночной неисправности с последующим восстановлением работоспособности. Выбор каждой очередной проверки  $P_j$  производится по результатам анализа предыдущих элементарных проверок:  $P_j = F(P_1, \dots, P_{j-1})$ .

Элементарная проверка  $P_j(N_1)$  – процесс подачи теста на объект диагностирования и получения экспериментальной реакции в виде сигнатуры  $S_{\text{экс}}$  физически доступной точки контроля  $N_1$ . Результат проверки является положительным  $P_j(N_1) = 1$ , если экспериментальная (фактическая) реакция (сигнатура) в точке контроля равна эталонной (ожидаемой)  $S_{\text{экс}} = S_{\text{эт}}$ , в противном случае результат проверки отрицателен:  $P_j(N_1) = 0$ .

Применение каждой элементарной проверки  $P_j$  в точке контроля  $N_1$  рассматривается как разбиение подозреваемого пространства линий на два непересекающихся подмножества  $D(N_1) = \{D^+_i, D^-_i\}$  с однозначным определением неисправной области  $D^-_i$ . Стоимости выполнения элементарных проверок равны между собой. Результат диагноза (диагностического эксперимента) – определение технического состояния объекта с точностью до неисправного функционального элемента или конструктива  $N_1^D$ . Условные алгоритмы оцениваются с позиции критериев: минимума средних затрат и

минимума максимального значения в отличие от безусловных алгоритмов, оцениваемых с позиции суммарных затрат [2].

Для минимакса оптимальная стратегия строится в предположении реализации самой неблагоприятной ситуации, для которой максимальная длина последовательности элементарных проверок при поиске отказавшего элемента была бы минимальной. Методы комбинаторной оптимизации: динамического программирования, ветвей и границ и рекурсивный уменьшают число рассматриваемых вариантов по сравнению с полным перебором, однако объем вычислений остается достаточно большим, поскольку задача построения оптимального алгоритма NP-полна.

Для построения допустимых (приемлемых) деревьев поиска дефектов с учетом специфики задач диагностирования используются многошаговые процедуры с оптимизацией после выполнения элементарной проверки частичных решений в соответствии со значением некоторой функции предпочтения, принимающей экстремальное значение. При этом значительно удается сократить число переборов, но без гарантии получения оптимума. Оценить качество такого решения так же сложно, как и построить оптимальный алгоритм.

На основе двух предлагаемых далее стратегий определим рациональную методику построения допустимого решения при условном поиске дефектов по взвешенному дереву диагностирования.

Выбор очередной точки контроля при стратегии половинного деления определяется минимумом функции предпочтения:

$$f_1 = \min_j \left| (D_{i-1} \wedge M_j) - (D_{i-1} / 2) \right|, \quad (1)$$

где  $D_{i-1}$  – вектор подозреваемых дефектов, полученный после зондирования предыдущей координаты  $i-1$  при выполнении проверки  $H_{i-1}$ ;  $M_j$  – строка матрицы достижимостей  $M = \{ |M_{ij}| \}$ , которая определяет векторы единичных координат, идентифицирующих связь (функционально-гальваническую) точки контроля, соответствующей номеру столбца, с вершиной подграфа, определяемой диагональной координатой  $M_{ij}$ .

При условии наличия в схеме одиночного дефекта по результатам проверки состояний выходных контактов схемы формируется вектор  $V = (V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_k)$ , когда  $V_i = 0$ , если на  $i$ -м наблюдаемом выходе зафиксировано равенство эталонной и экспериментальной сигнатур  $S_{эп} = S_{экс}$  и  $V_i = 1$  – в противном случае. Пересечение строк матрицы  $M$ , отмеченных единичными значениями, задает область существования дефекта  $D = \bigcap_{V_i=1} M_i$ , внутри которого далее организуется система проверок с учетом веса "кандидата" в точки контроля, определяемого числом нагруженных на нее контактов-предшественников. Функция предпочтения определяет такую линию, которая разбивает пространство подозреваемых дефектных координат на две более равные группы. В предположении существования в схеме кратного дефекта подозреваемая область на первом шаге определяется объединением строк, соответствующих единичным значениям координат выходных линий вектора экспериментальной проверки:  $D = \bigcup_{V_i=1} M_i$ .

Суммарные затраты на создание бинарного дерева поиска дефектов в зависимости от числа линий объекта  $n$  задаются выражением  $S = (\sum_{i=0}^{n-1} i)$  при  $(i=0, n-1)$ . Стоимость реализации стратегии есть самая длинная ветвь дерева, которая определяется конъюнкцией вершин:

$$R[D(H_i)] = \bigwedge_i H_i \Big|_{\max \{D^+, D^-\}},$$

где  $D(H_i) = \{D^+_i, D^-_i\}$  – разбиение линий для точки  $H_i$ ,  $D^+_i$  – область исправных линий;  $D^-_i$  – область существования дефекта. При последовательной структуре соединения элементов (цепь) максимальная стоимость реализации стратегии ограничена целой частью логарифма, округленной в большую сторону:  $R[D(H_i)] = \lceil \log_2 n \rceil$ , где  $n$  – число точек контроля в цепочке элементов. В случае параллельной структуры независимых элементов (схема, содержащая  $n$  несвязанных инверторов) максимальное число элементарных проверок равно  $n-1$ . Для остальных структур дерево поиска дефектов будет иметь максимальную ветвь проверки, заключенную в интервале

$$\lceil \log_2 n \rceil \leq R[D(H_i)] \leq n-1.$$

Для стратегии обратного прослеживания выбор очередной точки контроля осуществляется на основе вычисления функции

$$f_2 = \max_j \left| D_{i-1} \wedge M_j \right|, \quad (j = 1, n; j \neq i-1),$$

которая находит в качестве очередной линии наблюдения одного из непосредственных предшественников предыдущей проверки при ее отрицательном результате. Если  $H_{i-1}$  была положительной, то до вычисления  $f_2$  выполняется коррекция подозреваемой области

$$D_{i-1} = D^-_{i-2} \setminus D^+_{i-1}.$$

Стратегия обратного прослеживания для структуры типа "цепь" имеет  $n-1$  элементарную проверку, для множества независимых элементов – одну точку контроля. В общем случае стоимость реализации стратегии обратного прослеживания находится в интервале

$$1 \leq R[D(H_i)] \leq n-1.$$

Учитывая различные нижние оценки стоимости реализации стратегий  $f_1$  и  $f_2$  для произвольных структур, воспользуемся критерием минимакса с целью выбора такого дерева поиска дефектов, которое минимизирует максимальную последовательность элементарных проверок на двух предложенных стратегиях в предположении реализации самой неблагоприятной ситуации:

$$R[f(D(H_i))] = \min \{ \max R[f_1(D(H_i))], \max R[f_2(D(H_i))] \}.$$

Использование минимакса позволяет строить взвешенное дерево поиска дефектов, которое предпочтительнее для оператора, поскольку при возникновении любого одиночного дефекта на его поиск потребуются примерно одинаковое число элементарных проверок. В свою очередь, наличие длинных ветвей проверок при выполнении диагностического эксперимента приводит к ошибкам оператора и неверному диагнозу. На практике в 80% случаев более предпочтительной является стратегия половинного деления, дающая дерево поиска дефектов, которое хуже оптимального не более чем на 20%.

На рис. 1 представлена цифровая структура из пятнадцати функциональных элементов, где в качестве точек контроля выступают семнадцать занумерованных невходных эквипотенциальных линий, принадлежащих контактам микросхем. По упомянутой структуре вручную или алгоритмически строится граф функционально-гальванических связей ЦУ, изображенный на рис. 2, который формально задается матрицей достижимостей, представленной в табл.1.

Стратегия условного диагностирования с помощью ведомого логического зонда определяется правилом: если элементарная проверка на выходе микросхемы или примитива отрицательная, а проверки всех его входов дали положительный результат, то делается вывод о наличии дефекта в рассматриваемом компоненте. Процедура построения взвешенного дерева поиска дефектов заключается в вычислении такой очередной точки контроля, которая разделит в идеальном случае пополам исходную область существования дефекта. Дихотомическое дерево диагностирования дефектов функциональных элементов, спроектированное по стратегии  $f_1$ , представлено на рис. 3. Априорно в качестве подозреваемой области выступает вся схема, которая имеет 17 точек контроля. По матрице контрдостижимостей на основе применения (1) вычисляется точка 15, делящая на две равные области исходное множество линий, поскольку  $f_1(H_j) |_{j=15} = (8) - (8, 5) = 0,5$ . Для других точек контроля оценка  $f_1(H_j)$  будет большей, чем 0,5. Полученные подмножества  $D(H_{15}) = \{D^-_{15} = \{3, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 15\}, D^+_{15} = \{1, 2, 7, 10, 12, 13, 14, 16, 17\}\}$  определяют области поиска дефектов при фиксации в точке 15 соответственно отрицательной или положительной проверки. Далее для подмножества  $D^-_{15}$  в качестве оптимальной, доставляющей минимум функционалу  $f_1$ , выбирается  $H_8$ :  $D(H_8) = \{D^-_8 = \{3, 4, 5, 6, 8\}, D^+_8 = \{9, 11, 15\}\}$ , а для  $D^+_{15} - H_{12}$ :  $D(H_{12}) = \{D^-_{12} = \{1, 2, 7, 10, 12\}, D^+_{12} = \{13, 14, 16, 17\}\}$ . Признаком окончания ветви является наличие в результирующем подмножестве единственной точки контроля, которая позволяет установить неисправный компонент (см. рис. 3), идентифицируемый номером выходной линии дефектного примитива. Построенное дерево поиска дефектов имеет максимальную ветвь, содержащую пять элементарных проверок, что является характеристикой алгоритма диагностирования данного ЦУ.

В [1] предложены промышленно-ориентированные методы диагностирования цифровых объектов, использующие структуру объекта, тест, пол-

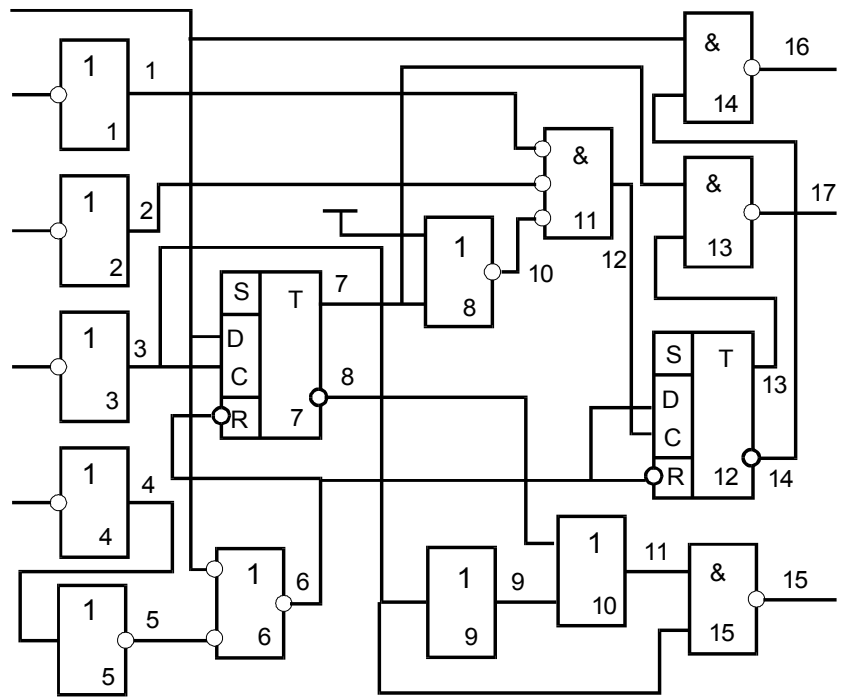


Рис. 1. Структура функциональных элементов

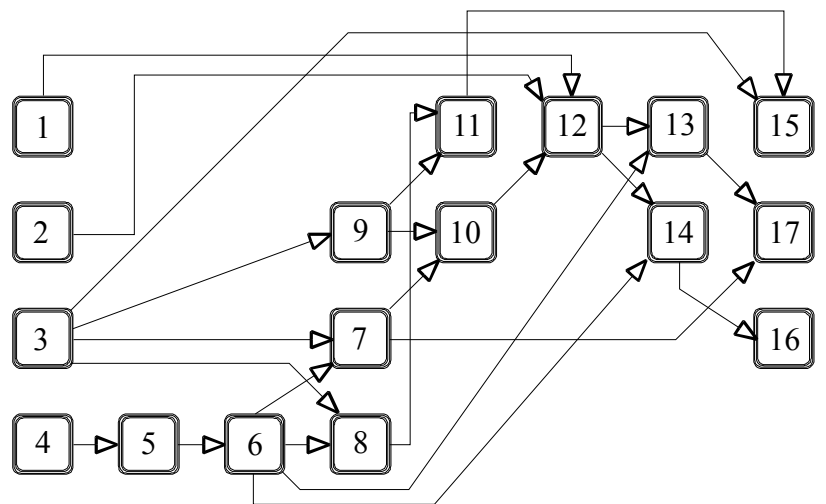


Рис. 2. Граф невходных линий цифровой схемы

Таблица 1

М	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5				1	1												
6				1	1	1											
7			1	1	1	1	1										
8			1	1	1	1		1									
9			1						1								
10			1	1	1	1	1		1	1							
11			1	1	1	1		1	1		1						
12	1	1	1	1	1	1	1		1	1		1					
13	1	1	1	1	1	1	1		1	1		1	1				
14	1	1	1	1	1	1	1		1	1		1		1			
15			1	1	1	1		1	1		1				1		
16	1	1	1	1	1	1	1		1	1		1		1		1	
17	1	1	1	1	1	1	1		1	1		1	1				1

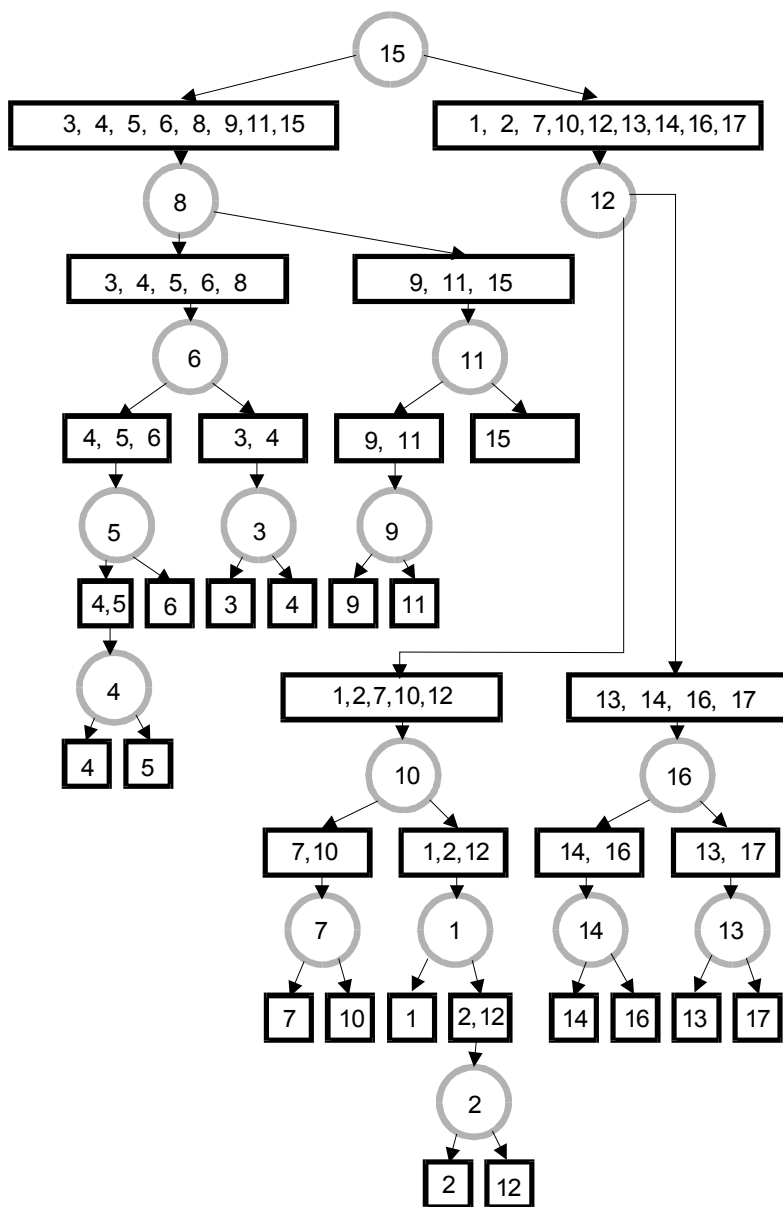


Рис. 3. Взвешенное дерево поиска дефектов

ный относительно одиночных константных неисправностей, сигнатурный анализ, многозначные таблицы неисправностей.

Первый ориентирован на безусловный поиск одиночных и кратных константных дефектов с применением многозначных таблиц неисправностей, графа функционально-гальванических связей ЦУ, позволяет в среднем на 50% сократить область существования дефекта.

Второй метод реализует зондовый контроль и поиск макродефектов (обрывы соединений, короткие замыкания линий, неисправности внутри конструктивных элементов) на основе сигнатурного анализа при производстве и эксплуатации цифровых изделий. Технологичность метода, простота подготовки АПД определяют его практическую применимость в процессах производства и эксплуатации цифровых и микропроцессорных структур.

Предложенный метод реализует стратегии обратного прослеживания и половинного деления на основе анализа матрицы достижимостей эквивалентных линий, что позволяет проектировать взвешенные деревья поиска дефектов в неисправных примитивах или конструктивах, которые отличаются от оптимальных не более чем на 15-20%.

**Литература:** 1. Хаханов В.И. Техническая диагностика элементов и узлов персональных компьютеров. – ISBN 5-7763-9056-7. – К.: ГЗМН, 1997. – 308 с. 2. Автоматизация диагностирования электронных устройств / Ю.В. Мальшенко, В.П. Чипулис, С.Г. Шаршунов / Под ред. В.П. Чипулиса. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.

Поступила в редколлегия 07.08.97

**Хаханов Владимир Иванович**, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники ХТУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика вычислительных устройств, систем, сетей и программных продуктов. Хобби: баскетбол, футбол, горные лыжи. Адрес: 310726, Украина, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26.

**Монжаренко Ирина Витальевна**, аспирантка кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники ХТУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика вычислительных устройств. Хобби: моделирование одежды, путешествия. Адрес: 310726, Украина, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26.

**Бедратый Роман Анатольевич**, студент факультета компьютерной инженерии и управления ХТУРЭ. Научные интересы: проектирование и диагностика вычислительных устройств. Хобби: компьютеры. Адрес: 310057, Украина, Харьков, ул. акад. Богомольца, 7, кв. 25, тел. 40-93-26.