

ДИАГНОСТИКА ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ, РАБОТАЮЩИХ
СО СБОЯМИ

А.К. Олефир

I. Постановка задачи

При наладке и эксплуатации ЭВМ большой практический интерес представляет создание алгоритмов поиска элементов, работающих ненадежно (со сбоями). Ненадежно работающим элементом (НЭ) назовем элемент, передаточная функция которого с некоторой вероятностью p ($p \ll 1$) меняет свое значение, величина p заранее неизвестна.

В настоящее время известны работы лишь по контролю ЭВМ и диагностике отказавших элементов (ОЭ), т.е. элементов, имеющих устойчивый отказ. При построении диагностических тестов для поиска ОЭ обычно пользуются таблицей неисправностей [1]. Эта таблица (например, таблица I, взятая для произвольного блока) однозначно связывает наборы входных переменных и те элементы блока, которые проверяются на этих наборах. Так, при отказе элемента a_n неверные результаты будут получены при входных наборах m_2, m_7, m_{11} (индексы записаны в восьмеричной системе). Таблицы неисправностей и тест-программы [1-7] составляются при следующих допущениях: I) для каждого элемента определена

функция, реализуемая им в качестве ОЭ; 2) поток отказов является ординарным; 3) неисправность носит устойчивый характер; 4) перед подачей входных воздействий устройство находится в определенном состоянии.

В данной работе ставится следующая задача. Предполагается, что ЭВМ состоит из устройств или блоков, а каждый блок состоит из стандартных элементов. При рассмотрении устройств, работающих со сбоями, считается, что 1) в блоке имеется не более одного НЭ, все остальные элементы исправны; 2) функция, реализуемая НЭ, совпадает с функцией, реализуемой ОЭ; 3) перед подачей входных воздействий блок находится в определенном состоянии; 4) изменение передаточной функции НЭ происходит не более одного раза за время выполнения одного цикла испытаний. Требуется указать наиболее вероятный элемент, по вине которого происходит сбой. Рассмотрим применение диагностических программ для поиска НЭ и специальную программу для диагностики устройств, работающих со сбоями.

2. Диагностические тесты

Пусть дан блок, состоящий из элементов a_1, a_2, \dots, a_e . Входными наборами $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n$ будем называть совокупность входных воздействий, на которых проверяются элементы в соответствии с таблицей неисправностей. Будем считать, что таблица неисправностей для данного блока известна. Хотя рассуждения ведутся относительно блока, элементов блока и неисправного элемента, результаты верны для любой системы, состоящей из подсистем a'_1, a'_2, \dots, a'_e , для которой известна таблица неисправностей, связывающая эти подсистемы с некоторыми испытаниями $\pi'_1, \pi'_2, \dots, \pi'_n$.

Поиск ОЭ с помощью таблицы неисправностей [1], [4] заключается в проверке правильности работы блока на входных наборах (всех или достаточной их части). Результаты этой проверки сводятся в столбец, совпадение некоторого с одним из столбцов таблицы неисправностей однозначно устанавливает отказавший элемент. От этого так называемого комбинационного метода отличается поиск ОЭ с помощью условного диагностического теста [6], [8], в котором последовательность входных наборов зависит от результата предыдущего испытания.

С целью получения наиболее короткого диагностического теста предлагается строить условный диагностический тест на осно-

ве минимальных контрольных тестов (МКТ). Для этого используется таблица неисправностей. Обозначим через A множество элементов блока и свяжем некоторой функцией Γ входные наборы и элементы, проверяемые на этих наборах:

$\Gamma_{\pi_1} = A_1; \Gamma_{\pi_2} = A_2; \dots; \Gamma_{\pi_n} = A_n$,
 где $A_i \subset A$ и $A_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ik}\}$ является подмножеством элементов, проверяемых на наборе π_i .

Минимальным контрольным тестом называется такое подмножество T минимальной мощности, где $T \subset M$, а

$$M = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\},$$

что для любого $a_j \in A$ всегда найдется $\pi_i \in T$ такое, что $a_j \in \Gamma_{\pi_i}$.

Основной принцип построения диагностического теста на основе МКТ состоит в следующем. Вначале строится МКТ для всего блока. Затем для каждого этапа испытаний π_i строится МКТ для условного блока, состоящего из элементов A_i , за исключением элементов, входящих во все подмножества A_j ($j < i$).

Построенный этим методом по таблице I диагностический тест показан на рис. I. Направление стрелок указывает следующее испытание в зависимости от исхода предыдущего испытания: вправо - в случае правильного результата, вниз - в случае неправильного результата. Прямоугольниками показаны входные наборы, а кружками - ОЭ. Символ a_0 соответствует отсутствию ОЭ.

Нетрудно убедиться, что непосредственное применение описанных методов для поиска НЭ в блоке оказывается невозможным. Так, для локализации элемента a_7 (ОЭ) необходимым и достаточным является последовательность испытаний:

$[a_7]: \pi_1, \pi_7, \pi_2, \pi_{10}, \pi_{16}$
 (Знак отрицания ставится над теми входными наборами, на которых получается неправильный результат). Многократное выполнение в блоке со сбоями последовательности испытаний:

$$\pi_1, \pi_7, \pi_2, \pi_{10}, \pi_{11}$$

и получение неверного результата при испытании π_{10} не будет достаточным условием для перехода к выполнению испытания π_{16} , так как $\Gamma_{\pi_1} \cap \Gamma_{\pi_{10}} \neq \emptyset$, и неисправными могут оказаться не только элементы a_1 или a_7 , но и a_4 или a_{20} , вследствие того, что

$$\Gamma_{\pi_{10}} = \{a_1, a_4, a_7, a_{20}\}.$$

Будем считать, что если блок дает неверные результаты на наборах m_1, m_2, \dots, m_k и $|A_k| > 1$,

где $A_k = \Gamma_{m_1} \cap \Gamma_{m_2} \cap \Gamma_{m_3} \cap \dots \cap \Gamma_{m_k}$,
то для локализации НЭ информация будет неполной.

Сформулируем теперь нашу задачу следующим образом: для данного блока известна таблица неисправностей, необходимо указать НЭ при неполной информации.

3. Методика обнаружения НЭ

Диагностический тест (рис.1) представляет последовательность испытаний и условия локализации ОЭ:

$$[a_1]: m_1, m_7, m_2, \bar{m}_{10}, m_{16}.$$

$$[a_2]: \bar{m}_1, m_{13}, \bar{m}_{12}, \bar{m}_4.$$

$$[a_3]: m_4, \bar{m}_7, \bar{m}_6, \bar{m}_{17}.$$

и так далее.

Отсюда следует такая методика обнаружения НЭ: многократно выполняются все входные наборы, отбираются те из них, на которых блок дает ошибки, и путем сопоставления с тестом или последовательностями

$$[a_i]: m_{i1}, m_{i2}, \dots, \bar{m}_{i1}^*, \bar{m}_{i2}^*, \dots,$$

локализуемыми ОЭ, устанавливается НЭ. Процесс установления НЭ имеет вероятностный характер, так как информация неполная.

Допустим, что после многократной работы на всех входных наборах стали известны результаты испытания: на некоторых K наборах блок выдал неверные результаты в N случаях. Для простоты будем считать, что это наборы с i -го по K -ый. Теперь мы можем отбросить как недопустимые все столбцы (т.е. элементы), в каждом из которых стоит ноль хотя бы в одном из первых K наборов. Оставшиеся столбцы назовем допустимыми и будем считать, что неисправности допустимы в τ элементах:

$$a_1, a_2, \dots, a_\tau (\tau \leq \ell).$$

Назовем событием B имеющееся у нас распределение сбоев по первым K наборам входных переменных. Для промежуточных выкладок удобно задать это распределение:

$$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k,$$

Таблица I.

Входные наборы	Элементы блока																
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}	a_{20}	
m_1		I		I		I				I		I					I
m_2		I				I		I	I		I						
m_3				I													
m_4		I			I			I			I						I
m_5								I									
m_6			I														I
m_7			I		I	I			I					I			I
m_{10}	I			I			I										I
m_{11}						I			I						I		
m_{12}		I								I							
m_{13}	I			I			I					I					I
m_{14}						I											I
m_{15}	I		I						I						I		
m_{16}	I		I													I	I
m_{17}				I												I	

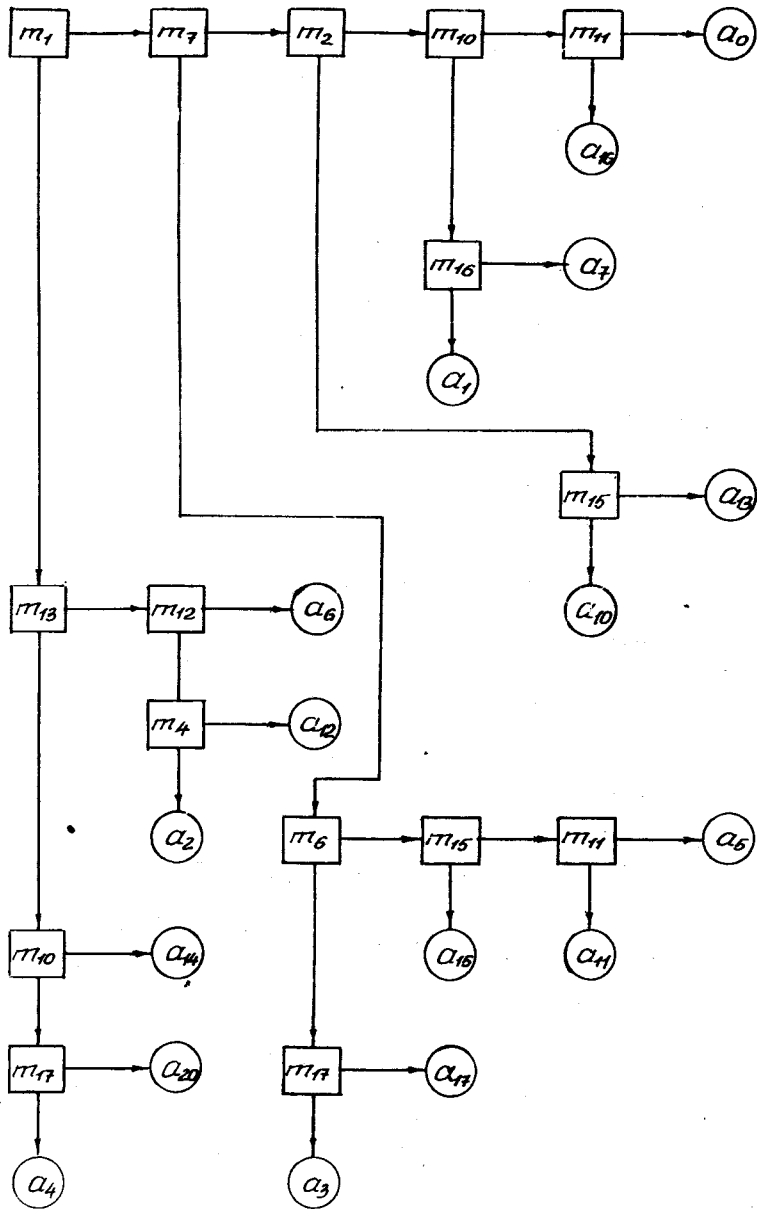


Рис. I. I диагностический тест.

где z_i - количество сбоев на i -м наборе,

$$z_i > 0, z_1 + z_2 + \dots + z_k = N.$$

Поскольку событие B (по условию) может наступить каждый раз только с одним из элементов a_1, a_2, \dots, a_z , то можно воспользоваться формулами Байеса [9]. При этом до наступления события B неисправности a_1, a_2, \dots, a_z считаем равновероятными, т.е. априорные вероятности

$$P(a_i) = \frac{1}{z}, i = 1, 2, \dots, z.$$

Подсчитаем условную вероятность наступления события B , если до испытания имеется НЭ a_i . Пусть допустимый НЭ a_i проверяется на f_i входных наборах ($k \leq f_i$). Тогда наступление рассматриваемого события B дает следующее распределение сбоев по этим f_i наборам:

$$z_1, z_2, \dots, z_k, z_{k+1}, \dots, z_{f_i}$$

$$\text{где } z_{k+1} = z_{k+2} = \dots = z_{f_i} = 0 \text{ и } \sum_{j=1}^{f_i} z_j = N.$$

Мы можем применить схему независимых испытаний, считая, что результатом каждого из N испытаний является получение правильного ответа на одном из входных наборов (правильные ответы не фиксируются). Поэтому вероятность получить распределение сбоев

$$z_1, z_2, \dots, z_{f_i} \text{ равна [9]:}$$

$$P(B/a_i) = \frac{N!}{z_1! z_2! \dots z_{f_i}!} \cdot \left(\frac{1}{f_i}\right)^{z_1} \cdot \left(\frac{1}{f_i}\right)^{z_2} \cdot \dots \cdot \left(\frac{1}{f_i}\right)^{z_{f_i}}.$$

Так как $z_j = 0$ при $j > k$, то $\left(\frac{1}{f_i}\right)^{z_j} = 1$

$$\text{и } P(B/a_i) = \frac{N!}{z_1! z_2! \dots z_k!} \cdot \frac{1}{f_i^N} = Q \cdot \frac{1}{f_i^N},$$

где через Q обозначена величина $\frac{N!}{z_1! z_2! \dots z_k!}$, общая для всех вероятностей $P(B/a_i)$. Теперь можно по формуле Байеса подсчитать вероятность того, что сбой дает элемент a_i , если стало известно наступление события B :

$$P(a_i/B) = \frac{P(a_i) \cdot P(B/a_i)}{\sum_{j=1}^z P(a_j) \cdot P(B/a_j)} =$$

Таблица 2.

α_i	$P(\alpha_i/B)$		
	$\alpha_{13}=1$ $N=1$	$\alpha_1=1$ $\alpha_{13}=1$ $N=2$	$\alpha_1=2$ $\alpha_{13}=2$ $N=4$
α_1	0,147	0	0
α_4	0,118	0,113	0,023
α_7	0,294	0	0
α_{14}	0,294	0,709	0,919
α_{20}	0,147	0,178	0,058
			$\alpha_1=3$ $\alpha_{13}=3$ $N=6$
			0
			0,004
			0
			0,980
			0,016

связывается новый ЦКТ, который составляется как МКТ для условного блока, содержащего элементы $A_{i,j}$, где $A_{i,j} = \Gamma_{m_i} \Pi_{m_j}$. Построение повторяется до тех пор, пока после выбора очередного m_i не останется минимальное количество элементов.

При использовании описанного диагностического теста возможен случай, когда некоторый НЭ не проверяется на данном ЦКТ, например, α_7 (рис.2) после последовательности:

$$m_1, m_7, m_2, m_{10}, m_{16}, m_{17}.$$

Здесь $\alpha_7 \in \Gamma_{m_{10}}$, но $\alpha_7 \notin \Gamma_{m_{16}}$ и $\alpha_7 \notin \Gamma_{m_{17}}$. Поэтому, если в указанной последовательности отсутствуют случаи m_{16} и m_{17} , тест-программа указывает в качестве НЭ элемент α_7 . Это отмечено на рис.2 пунктирной стрелкой. Для достижения наперед заданной достоверности результатов диагностики, выражаемой через вероятность p_7 , необходимо провести достаточное количество испытаний m_{16} и m_{17} . Если в результате N_Σ выполнений ЦКТ было отмечено N_7 сбоев, вероятность сбоя p можно считать равной

$$p = \frac{N_7}{N_\Sigma}$$

Нетрудно убедиться в том, что достоверность диагностики с вероятностью p_7 будет обеспечена после N_2 испытаний, где

$$N_2 = \frac{\lg(1-p_7)}{\lg(1-p)}$$

5. Заключение

В работе рассмотрены два метода локализации НЭ при неполной информации. В обоих случаях считается, что для проверяемого устройства известна таблица неисправностей.

Первый метод - комбинационный - известен для поиска ОЭ. В данной работе предложен метод использования комбинационного поиска для локализации НЭ. Показана возможность по результатам испытаний вычислить условную вероятность того, что сбой происходит по вине конкретного элемента из списка элементов блока.

Второй метод, основанный на применении условных тестов, позволяет указать множество допустимых неисправностей при сокращении тестовой последовательности после каждого сбоя. Окончательный результат имеет вероятностный характер.

Методика локализации НЭ опробована для отдельных блоков ЭВМ.

В отдельно взятой ЭВМ возможности диагностики ограничены тем, что выполнение служебных команд теста происходит на элементах, участвующих также в выполнении проверяемых команд. Этот недостаток полностью устраняется в вычислительных системах, где информация из неисправной машины передается в одну из исправных для анализа и принятия решения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. И.А. Четис, С.В. Яблонский. Логические способы контроля работы электрических схем.—Труды математического института им. В.А.Стеклова. М., 1958, т.51, стр. 270-360.
2. Г.А. Миронов. Испытательные программы для контроля электронных цифровых машин. М., Изд-во "Наука", 1964.
3. Э.И. Клячко. Схемный и тестовый контроль автоматических цифровых вычислительных машин. М., Изд-во "Советское радио", 1963.
4. Диагностика неисправностей вычислительных машин.—Сборник статей под редакцией Н.В. Паутина. М., Изд-во "Наука", 1965.
5. В.И. Беляков-Бодин, М.А. Колесников, Ю.М. Торгов, В.В. Шафранский. Контроль работы электронных вычислительных машин.—Труды Вычислительного центра АН СССР М., 1965.

6. T.R. Bashkov, J.Friets, A.Karson. A programming system for detection and diagnosis of machine malfunctions.—IEEE Trans. Elect.Comput., 1963, EC-12, N1, p.10-17.
7. H.Y. Chang. An algorithm for selecting an optimum set of diagnostic tests.—IEEE Trans. Electron. Comput., 1965, EC-14, N5, p.706-711.
8. J.D. Brulé, R.A. Johnson, E.J.Kletsky. Diagnosis of equipment failures.—IRE Trans. Rel.and Qual. Control, 1960, RQC-9, p.23-34.
9. Б.В. Гнеденко. Курс теории вероятностей. М., Изд-во "Наука", 1965.

Вычислительный центр,
г. Красноярск

Поступила в редакцию
25.IX.1966г.