

ДИАГНОСТИКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ,
РЕАЛИЗОВАННЫХ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ

В.Ф. Гурко

Разработка и создание вычислительных сред (ВСр) [1] и методов реализации в них логических схем и автоматов выдвигает задачу диагностики схем, реализованных в вычислительной среде.

В литературе [2,3,4] излагаются вопросы, посвященные тестовому контролю и диагностике неисправностей электрических схем и элементов [5,6].

В данной работе рассматривается диагностика схем, реализованных в ВСр, каждый элемент которой выполняет полный соединительный и функциональный базис („D“, „D“, „F“) [1].

При решении задачи диагностики предполагается, что неисправности — устойчивые и единичные. Ниже рассматриваются следующие виды неисправностей элементов ВСр „D“ → „F“ и „F“ → „D“.

Пусть логическая функция вида:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \bigvee_{k=1}^m \tilde{x}_{i_1 k} \tilde{x}_{i_2 k} \dots \tilde{x}_{i_{\nu_k} k}; \quad \nu_k \leq n, k \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (\#)$$

реализована в ВСр в виде последовательно-параллельной схемы по методу, изложенному в [7,8,9], и занимает прямоугольное поле A размером $[m \times (2n + 2)]$ (рис.1). Строки соответствуют конъюнкциям (#) и имеют номера от 1 до m сверху вниз, столбцы —

— всем переменным и нумеруются слева направо:

$$\{P_1, x_1, \bar{x}_1, \dots, x_n, \bar{x}_n, P_2\}.$$

Одним из эффективных способов резервирования при реализа-

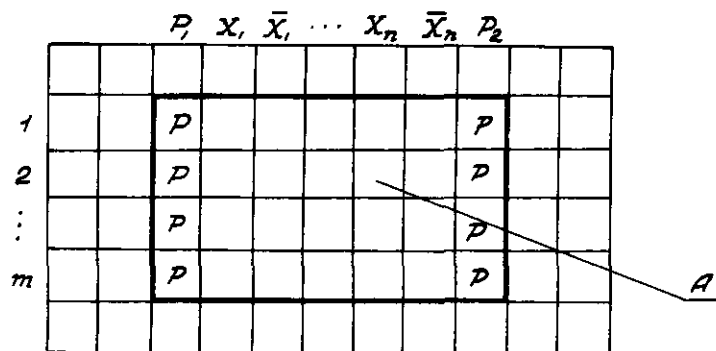


Рис. 1

ции в среде логических функций в виде последовательно-параллельной схемы является введение резервных строк. Такой способ резервирования обеспечивает простоту алгоритма перестройки и позволяет ограничиться локализацией неисправностей с точностью до строки.

Задача диагностики логических функций, реализованных в ВСр, может быть поставлена двояко.

1. Контроль можно вести с перестройкой элементов среды при условии, что ошибки исключены и при настройке сбоя быть не может. Следовательно, нарушение работы схемы может возникнуть только вследствие неисправностей в элементах. Построение теста в этом случае упрощается, однако время контроля может возрасти.

2. Перестройка в процессе контроля не допускается. Считается, что нарушение работы схемы может быть вызвано как неисправностями в элементах, так и неверной настройкой. В этом случае строятся диагностические тесты и анализируется результат контроля для выявления координаты неисправности (хотя бы строки в программе).

1. Проверочный тест с перестройкой

Проверить правильность расположения элементов „P” и „D” в поле A можно путем перестройки элементов в столбце P₂. Проверка производится построчно. Пусть проверяется k-я строка, тогда:

а) в столбце P₂ оставляется только k-й элемент, выполняющий функцию „D”, остальные элементы этого столбца перестраиваются на „D”;

б) если k-я конъюнкция имеет вид

$$x_{i_1}^{\sigma_{i_1}^k} \cdot x_{i_2}^{\sigma_{i_2}^k} \dots x_{i_{\nu_k}}^{\sigma_{i_{\nu_k}}^k},$$

где $\{i_1^k, i_2^k, \dots, i_{\nu_k}^k\} \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$ и в строке нет неисправности, то при подаче любой переменной $x_{i_\epsilon}^{\sigma_{i_\epsilon}^k}$, не равной $\sigma_{i_\epsilon}^k$, на выходе должно быть „0”, а при подаче на вход набора $\sigma_{i_1}^k \times \sigma_{i_2}^k \dots \sigma_{i_{\nu_k}}^k$ на выходе — „1”. Проверка элементов, выполняющих функцию „D” для не входящих в k-ю конъюнкцию переменных и их отрицаний, осуществляется в два такта.

Таким образом, проверка каждой строки занимает $(\nu_k + 3)$ тактов. Обозначим через τ один такт работы среды через θ — один такт перестройки. Тогда для проверки всего поля A требуется время

$$T = \left(\sum_{k=1}^m \nu_k + 3m \right) \tau + m\theta.$$

2. Проверочный тест без перестройки среды

Задача состоит в том, чтобы найти такую последовательность входных сигналов, которая дала бы возможность по значениям выхода судить о том, правильно ли работает схема, и если нет, то в какой строке содержится неисправность.

Для этого строится таблица функций неисправностей [2], состоящая из 2^n строк, соответствующих всем наборам от n переменных, и столько столбцов, сколько существует различных неисправностей. Для k-й строки программы, реализующей конъюн-

кцию

$$x_{i_1}^{\sigma_{i_1}^{\kappa}} x_{i_2}^{\sigma_{i_2}^{\kappa}} \dots x_{i_{\nu_{\kappa}}}^{\sigma_{i_{\nu_{\kappa}}}^{\kappa}},$$

возможны следующие типы неисправностей:

1. Тип „ $F \rightarrow D$ “, соответствующий замене одной из переменных в этой конъюнкции константой „1“. Ей соответствует своя функция неисправности (их число равно ν_{κ}).

2. Тип „ $D \rightarrow F$ “ в элементах, соответствующих не входящим в κ -ю конъюнкцию переменным и их отрицаниям (число таких неисправностей и функций неисправностей равно $2(\pi - \nu_{\kappa})$).

3. Тип „ $D \rightarrow F$ “ для элементов, соответствующих входящим в κ -ю конъюнкцию переменным и их отрицаниям (число таких неисправностей, которым соответствует одна функция неисправности, равно ν_{κ}).

В дальнейшем удобно использовать следующее обозначение функции неисправности: $f_{\kappa, i}^j$, где j - тип неисправности ($j = 1, 2, 3$), κ - номер строки (конъюнкции) ($\kappa = 1, 2, \dots, m$), i - номер переменной ($i = 1, 2, \dots, \pi$).

Итак, κ -й конъюнкции в заданной $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ соответствует всего $\mu_{\kappa} = 2\pi - \nu_{\kappa} + 1$ функций неисправностей, и общее число столбцов в таблице равно

$$\mu = 2m\pi - \sum_{\kappa} \nu_{\kappa} + m + 1.$$

ПРИМЕР. Пусть в среде построена функция

$$f_0 = x_1 x_2 \vee \bar{x}_2 x_3 \vee x_1 \bar{x}_3 x_4 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2.$$

Программа настройки имеет вид (рис. 2). Распределение неисправностей показано в таблице, причем в пустые клетки следует мыс-

	x_1	$\bar{x}_1$	x_2	$\bar{x}_2$	x_3	$\bar{x}_3$	x_4	$\bar{x}_4$	
$\rightarrow$	p	D	F	D	F	D	D	D	p
	p	D	D	F	D	D	F	D	p
	p	D	F	D	D	F	D	D	p
	p	F	D	F	D	D	D	D	p
									$\rightarrow f_0$

Рис. 2

Таблица одиночных неисправностей

$X_1 X_2 X_3 X_4$	$f_{1,1}^1$	$f_{1,2}^1$	$f_{1,3}^1$	$f_{1,4}^1$	$f_{1,5}^1$	$f_{1,6}^1$	$f_{1,7}^1$	$f_{1,8}^1$	$f_{1,9}^1$	$f_{1,10}^1$	$f_{1,11}^1$	$f_{1,12}^1$	$f_{1,13}^1$	$f_{1,14}^1$	$f_{1,15}^1$	$f_{1,16}^1$	$f_{1,17}^1$	$f_{1,18}^1$	$f_{1,19}^1$	$f_{1,20}^1$	$f_{1,21}^1$	$f_{1,22}^1$	$f_{1,23}^1$	$f_{1,24}^1$	$f_{1,25}^1$	$f_{1,26}^1$	$f_{1,27}^1$	$f_{1,28}^1$	$f_{1,29}^1$	$f_{1,30}^1$	$f_{1,31}^1$	$f_{1,32}^1$	$f_{1,33}^1$	$f_{1,34}^1$	$f_{1,35}^1$	$f_{1,36}^1$	$f_{1,37}^1$	$f_{1,38}^1$	$f_{1,39}^1$	$f_{1,40}^1$	$f_{1,41}^1$	$f_{1,42}^1$	$f_{1,43}^1$	$f_{1,44}^1$	$f_{1,45}^1$	$f_{1,46}^1$	$f_{1,47}^1$	$f_{1,48}^1$	$f_{1,49}^1$	$f_{1,50}^1$	$f_{1,51}^1$	$f_{1,52}^1$	$f_{1,53}^1$	$f_{1,54}^1$	$f_{1,55}^1$	$f_{1,56}^1$	$f_{1,57}^1$	$f_{1,58}^1$	$f_{1,59}^1$	$f_{1,60}^1$	$f_{1,61}^1$	$f_{1,62}^1$	$f_{1,63}^1$	$f_{1,64}^1$	$f_{1,65}^1$	$f_{1,66}^1$	$f_{1,67}^1$	$f_{1,68}^1$	$f_{1,69}^1$	$f_{1,70}^1$	$f_{1,71}^1$	$f_{1,72}^1$	$f_{1,73}^1$	$f_{1,74}^1$	$f_{1,75}^1$	$f_{1,76}^1$	$f_{1,77}^1$	$f_{1,78}^1$	$f_{1,79}^1$	$f_{1,80}^1$	$f_{1,81}^1$	$f_{1,82}^1$	$f_{1,83}^1$	$f_{1,84}^1$	$f_{1,85}^1$	$f_{1,86}^1$	$f_{1,87}^1$	$f_{1,88}^1$	$f_{1,89}^1$	$f_{1,90}^1$	$f_{1,91}^1$	$f_{1,92}^1$	$f_{1,93}^1$	$f_{1,94}^1$	$f_{1,95}^1$	$f_{1,96}^1$	$f_{1,97}^1$	$f_{1,98}^1$	$f_{1,99}^1$	$f_{1,100}^1$	$f_{1,101}^1$	$f_{1,102}^1$	$f_{1,103}^1$	$f_{1,104}^1$	$f_{1,105}^1$	$f_{1,106}^1$	$f_{1,107}^1$	$f_{1,108}^1$	$f_{1,109}^1$	$f_{1,110}^1$	$f_{1,111}^1$	$f_{1,112}^1$	$f_{1,113}^1$	$f_{1,114}^1$	$f_{1,115}^1$	$f_{1,116}^1$	$f_{1,117}^1$	$f_{1,118}^1$	$f_{1,119}^1$	$f_{1,120}^1$	$f_{1,121}^1$	$f_{1,122}^1$	$f_{1,123}^1$	$f_{1,124}^1$	$f_{1,125}^1$	$f_{1,126}^1$	$f_{1,127}^1$	$f_{1,128}^1$	$f_{1,129}^1$	$f_{1,130}^1$	$f_{1,131}^1$	$f_{1,132}^1$	$f_{1,133}^1$	$f_{1,134}^1$	$f_{1,135}^1$	$f_{1,136}^1$	$f_{1,137}^1$	$f_{1,138}^1$	$f_{1,139}^1$	$f_{1,140}^1$	$f_{1,141}^1$	$f_{1,142}^1$	$f_{1,143}^1$	$f_{1,144}^1$	$f_{1,145}^1$	$f_{1,146}^1$	$f_{1,147}^1$	$f_{1,148}^1$	$f_{1,149}^1$	$f_{1,150}^1$	$f_{1,151}^1$	$f_{1,152}^1$	$f_{1,153}^1$	$f_{1,154}^1$	$f_{1,155}^1$	$f_{1,156}^1$	$f_{1,157}^1$	$f_{1,158}^1$	$f_{1,159}^1$	$f_{1,160}^1$	$f_{1,161}^1$	$f_{1,162}^1$	$f_{1,163}^1$	$f_{1,164}^1$	$f_{1,165}^1$	$f_{1,166}^1$	$f_{1,167}^1$	$f_{1,168}^1$	$f_{1,169}^1$	$f_{1,170}^1$	$f_{1,171}^1$	$f_{1,172}^1$	$f_{1,173}^1$	$f_{1,174}^1$	$f_{1,175}^1$	$f_{1,176}^1$	$f_{1,177}^1$	$f_{1,178}^1$	$f_{1,179}^1$	$f_{1,180}^1$	$f_{1,181}^1$	$f_{1,182}^1$	$f_{1,183}^1$	$f_{1,184}^1$	$f_{1,185}^1$	$f_{1,186}^1$	$f_{1,187}^1$	$f_{1,188}^1$	$f_{1,189}^1$	$f_{1,190}^1$	$f_{1,191}^1$	$f_{1,192}^1$	$f_{1,193}^1$	$f_{1,194}^1$	$f_{1,195}^1$	$f_{1,196}^1$	$f_{1,197}^1$	$f_{1,198}^1$	$f_{1,199}^1$	$f_{1,200}^1$	$f_{1,201}^1$	$f_{1,202}^1$	$f_{1,203}^1$	$f_{1,204}^1$	$f_{1,205}^1$	$f_{1,206}^1$	$f_{1,207}^1$	$f_{1,208}^1$	$f_{1,209}^1$	$f_{1,210}^1$	$f_{1,211}^1$	$f_{1,212}^1$	$f_{1,213}^1$	$f_{1,214}^1$	$f_{1,215}^1$	$f_{1,216}^1$	$f_{1,217}^1$	$f_{1,218}^1$	$f_{1,219}^1$	$f_{1,220}^1$	$f_{1,221}^1$	$f_{1,222}^1$	$f_{1,223}^1$	$f_{1,224}^1$	$f_{1,225}^1$	$f_{1,226}^1$	$f_{1,227}^1$	$f_{1,228}^1$	$f_{1,229}^1$	$f_{1,230}^1$	$f_{1,231}^1$	$f_{1,232}^1$	$f_{1,233}^1$	$f_{1,234}^1$	$f_{1,235}^1$	$f_{1,236}^1$	$f_{1,237}^1$	$f_{1,238}^1$	$f_{1,239}^1$	$f_{1,240}^1$	$f_{1,241}^1$	$f_{1,242}^1$	$f_{1,243}^1$	$f_{1,244}^1$	$f_{1,245}^1$	$f_{1,246}^1$	$f_{1,247}^1$	$f_{1,248}^1$	$f_{1,249}^1$	$f_{1,250}^1$	$f_{1,251}^1$	$f_{1,252}^1$	$f_{1,253}^1$	$f_{1,254}^1$	$f_{1,255}^1$	$f_{1,256}^1$	$f_{1,257}^1$	$f_{1,258}^1$	$f_{1,259}^1$	$f_{1,260}^1$	$f_{1,261}^1$	$f_{1,262}^1$	$f_{1,263}^1$	$f_{1,264}^1$	$f_{1,265}^1$	$f_{1,266}^1$	$f_{1,267}^1$	$f_{1,268}^1$	$f_{1,269}^1$	$f_{1,270}^1$	$f_{1,271}^1$	$f_{1,272}^1$	$f_{1,273}^1$	$f_{1,274}^1$	$f_{1,275}^1$	$f_{1,276}^1$	$f_{1,277}^1$	$f_{1,278}^1$	$f_{1,279}^1$	$f_{1,280}^1$	$f_{1,281}^1$	$f_{1,282}^1$	$f_{1,283}^1$	$f_{1,284}^1$	$f_{1,285}^1$	$f_{1,286}^1$	$f_{1,287}^1$	$f_{1,288}^1$	$f_{1,289}^1$	$f_{1,290}^1$	$f_{1,291}^1$	$f_{1,292}^1$	$f_{1,293}^1$	$f_{1,294}^1$	$f_{1,295}^1$	$f_{1,296}^1$	$f_{1,297}^1$	$f_{1,298}^1$	$f_{1,299}^1$	$f_{1,300}^1$	$f_{1,301}^1$	$f_{1,302}^1$	$f_{1,303}^1$	$f_{1,304}^1$	$f_{1,305}^1$	$f_{1,306}^1$	$f_{1,307}^1$	$f_{1,308}^1$	$f_{1,309}^1$	$f_{1,310}^1$	$f_{1,311}^1$	$f_{1,312}^1$	$f_{1,313}^1$	$f_{1,314}^1$	$f_{1,315}^1$	$f_{1,316}^1$	$f_{1,317}^1$	$f_{1,318}^1$	$f_{1,319}^1$	$f_{1,320}^1$	$f_{1,321}^1$	$f_{1,322}^1$	$f_{1,323}^1$	$f_{1,324}^1$	$f_{1,325}^1$	$f_{1,326}^1$	$f_{1,327}^1$	$f_{1,328}^1$	$f_{1,329}^1$	$f_{1,330}^1$	$f_{1,331}^1$	$f_{1,332}^1$	$f_{1,333}^1$	$f_{1,334}^1$	$f_{1,335}^1$	$f_{1,336}^1$	$f_{1,337}^1$	$f_{1,338}^1$	$f_{1,339}^1$	$f_{1,340}^1$	$f_{1,341}^1$	$f_{1,342}^1$	$f_{1,343}^1$	$f_{1,344}^1$	$f_{1,345}^1$	$f_{1,346}^1$	$f_{1,347}^1$	$f_{1,348}^1$	$f_{1,349}^1$	$f_{1,350}^1$	$f_{1,351}^1$	$f_{1,352}^1$	$f_{1,353}^1$	$f_{1,354}^1$	$f_{1,355}^1$	$f_{1,356}^1$	$f_{1,357}^1$	$f_{1,358}^1$	$f_{1,359}^1$	$f_{1,360}^1$	$f_{1,361}^1$	$f_{1,362}^1$	$f_{1,363}^1$	$f_{1,364}^1$	$f_{1,365}^1$	$f_{1,366}^1$	$f_{1,367}^1$	$f_{1,368}^1$	$f_{1,369}^1$	$f_{1,370}^1$	$f_{1,371}^1$	$f_{1,372}^1$	$f_{1,373}^1$	$f_{1,374}^1$	$f_{1,375}^1$	$f_{1,376}^1$	$f_{1,377}^1$	$f_{1,378}^1$	$f_{1,379}^1$	$f_{1,380}^1$	$f_{1,381}^1$	$f_{1,382}^1$	$f_{1,383}^1$	$f_{1,384}^1$	$f_{1,385}^1$	$f_{1,386}^1$	$f_{1,387}^1$	$f_{1,388}^1$	$f_{1,389}^1$	$f_{1,390}^1$	$f_{1,391}^1$	$f_{1,392}^1$	$f_{1,393}^1$	$f_{1,394}^1$	$f_{1,395}^1$	$f_{1,396}^1$	$f_{1,397}^1$	$f_{1,398}^1$	$f_{1,399}^1$	$f_{1,400}^1$	$f_{1,401}^1$	$f_{1,402}^1$	$f_{1,403}^1$	$f_{1,404}^1$	$f_{1,405}^1$	$f_{1,406}^1$	$f_{1,407}^1$	$f_{1,408}^1$	$f_{1,409}^1$	$f_{1,410}^1$	$f_{1,411}^1$	$f_{1,412}^1$	$f_{1,413}^1$	$f_{1,414}^1$	$f_{1,415}^1$	$f_{1,416}^1$	$f_{1,417}^1$	$f_{1,418}^1$	$f_{1,419}^1$	$f_{1,420}^1$	$f_{1,421}^1$	$f_{1,422}^1$	$f_{1,423}^1$	$f_{1,424}^1$	$f_{1,425}^1$	$f_{1,426}^1$	$f_{1,427}^1$	$f_{1,428}^1$	$f_{1,429}^1$	$f_{1,430}^1$	$f_{1,431}^1$	$f_{1,432}^1$	$f_{1,433}^1$	$f_{1,434}^1$	$f_{1,435}^1$	$f_{1,436}^1$	$f_{1,437}^1$	$f_{1,438}^1$	$f_{1,439}^1$	$f_{1,440}^1$	$f_{1,441}^1$	$f_{1,442}^1$	$f_{1,443}^1$	$f_{1,444}^1$	$f_{1,445}^1$	$f_{1,446}^1$	$f_{1,447}^1$	$f_{1,448}^1$	$f_{1,449}^1$	$f_{1,450}^1$	$f_{1,451}^1$	$f_{1,452}^1$	$f_{1,453}^1$	$f_{1,454}^1$	$f_{1,455}^1$	$f_{1,456}^1$	$f_{1,457}^1$	$f_{1,458}^1$	$f_{1,459}^1$	$f_{1,460}^1$	$f_{1,461}^1$	$f_{1,462}^1$	$f_{1,463}^1$	$f_{1,464}^1$	$f_{1,465}^1$	$f_{1,466}^1$	$f_{1,467}^1$	$f_{1,468}^1$	$f_{1,469}^1$	$f_{1,470}^1$	$f_{1,471}^1$	$f_{1,472}^1$	$f_{1,473}^1$	$f_{1,474}^1$	$f_{1,475}^1$	$f_{1,476}^1$	$f_{1,477}^1$	$f_{1,478}^1$	$f_{1,479}^1$	$f_{1,480}^1$	$f_{1,481}^1$	$f_{1,482}^1$	$f_{1,483}^1$	$f_{1,484}^1$	$f_{1,485}^1$	$f_{1,486}^1$	$f_{1,487}^1$	$f_{1,488}^1$	$f_{1,489}^1$	$f_{1,490}^1$	$f_{1,491}^1$	$f_{1,492}^1$	$f_{1,493}^1$	$f_{1,494}^1$	$f_{1,495}^1$	$f_{1,496}^1$	$f_{1,497}^1$	$f_{1,498}^1$	$f_{1,499}^1$	$f_{1,500}^1$	$f_{1,501}^1$	$f_{1,502}^1$	$f_{1,503}^1$	$f_{1,504}^1$	$f_{1,505}^1$	$f_{1,506}^1$	$f_{1,507}^1$	$f_{1,508}^1$	$f_{1,509}^1$	$f_{1,510}^1$	$f_{1,511}^1$	$f_{1,512}^1$	$f_{1,513}^1$	$f_{1,514}^1$	$f_{1,515}^1$	$f_{1,516}^1$	$f_{1,517}^1$	$f_{1,518}^1$	$f_{1,519}^1$	$f_{1,520}^1$	$f_{1,521}^1$	$f_{1,522}^1$	$f_{1,523}^1$	$f_{1,524}^1$	$f_{1,525}^1$	$f_{1,526}^1$	$f_{1,527}^1$	$f_{1,528}^1$	$f_{1,529}^1$	$f_{1,530}^1$	$f_{1,531}^1$	$f_{1,532}^1$	$f_{1,533}^1$	$f_{1,534}^1$	$f_{1,535}^1$	$f_{1,536}^1$	$f_{1,537}^1$	$f_{1,538}^1$	$f_{1,539}^1$	$f_{1,540}^1$	$f_{1,541}^1$	$f_{1,542}^1$	$f_{1,543}^1$	$f_{1,544}^1$	$f_{1,545}^1$	$f_{1,546}^1$	$f_{1,547}^1$	$f_{1,548}^1$	$f_{1,549}^1$	$f_{1,550}^1$	$f_{1,551}^1$	$f_{1,552}^1$	$f_{1,553}^1$	$f_{1,554}^1$	$f_{1,555}^1$	$f_{1,556}^1$	$f_{1,557}^1$	$f_{1,558}^1$	$f_{1,559}^1$	$f_{1,560}^1$	$f_{1,561}^1$	$f_{1,562}^1$	$f_{1,563}^1$	$f_{1,564}^1$	$f_{1,565}^1$	$f_{1,566}^1$	$f_{1,567}^1$	$f_{1,568}^1$	$f_{1,569}^1$	$f_{1,570}^1$	$f_{1,571}^1$	$f_{1,572}^1$	$f_{1,573}^1$	$f_{1,574}^1$	$f_{1,575}^1$	$f_{1,576}^1$	$f_{1,577}^1$	$f_{1,578}^1$	$f_{1,579}^1$	$f_{1,580}^1$	$f_{1,581}^1$	$f_{1,582}^1$	$f_{1,583}^1$	$f_{1,584}^1$	$f_{1,585}^1$	$f_{1,586}^1$	$f_{1,587}^1$	$f_{1,588}^1$	$f_{1,589}^1$	$f_{1,590}^1$	$f_{1,591}^1$	$f_{1,592}^1$	$f_{1,593}^1$	$f_{1,594}^1$	$f_{1,595}^1$	$f_{1,596}^1$	$f_{1,597}^1$	$f_{1,598}^1$	$f_{1,599}^1$	$f_{1,600}^1$	$f_{1,601}^1$	$f_{1,602}^1$	$f_{1,603}^1$	$f_{1,604}^1$	$f_{1,605}^1$	$f_{1,606}^1$	$f_{1,607}^1$	$f_{1,608}^1$	$f_{1,609}^1$	$f_{1,610}^1$	$f_{1,611}^1$	$f_{1,612}^1$	$f_{1,613}^1$	$f_{1,614}^1$	$f_{1,615}^1$	$f_{1,616}^1$	$f_{1,617}^1$	$f_{1,618}^1$	$f_{1,619}^1$	$f_{1,620}^1$	$f_{1,621}^1$	$f_{1,622}^1$	$f_{1,623}^1$	$f_{1,624}^1$	$f_{1,625}^1$	$f_{1,626}^1$	$f_{1,627}^1$	$f_{1,628}^1$	$f_{1,629}^1$	$f_{1,630}^1$	$f_{1,631}^1$	$f_{1,632}^1$	$f_{1,633}^1$	$f_{1,634}^1$	$f_{1,635}^1$	$f_{1,636}^1$	$f_{1,637}^1$	$f_{1,638}^1$	$f_{1,639}^1$	$f_{1,640}^1$	$f_{1,641}^1$	$f_{1,642}^1$	$f_{1,643}^1$	$f_{1,644}^1$	$f_{1,645}^1$	$f_{1,646}^1$	$f_{1,647}^1$	$f_{1,648}^1$	$f_{1,649}^1$	$f_{1,650}^1$	$f_{1,651}^1$	$f_{1,652}^1$	$f_{1,653}^1$	$f_{1,654}^1$	$f_{1,655}^1$	$f_{1,656}^1$	$f_{1,657}^1$	$f_{1,658}^1$	$f_{1,659}^1$	$f_{1,660}^1$	$f_{1,661}^1$	$f_{1,662}^1$	$f_{1,663}^1$	$f_{1,664}^1$	$f_{1,665}^1$	$f_{1,666}^1$	$f_{1,667}^1$	$f_{1,668}^1$	$f_{1,669}^1$	$f_{1,670}^1$	$f_{1,671}^1$	$f_{1,672}^1$	$f_{1,673}^1$	$f_{1,674}^1$	$f_{1,675}^1$	$f_{1,676}^1$	$f_{1,677}^1$	$f_{1,678}^1$	$f_{1,679}^1$	$f_{1,680}^1$	$f_{1,681}^1$	$f_{1,682}^1$	$f_{1,683}^1$	$f_{1,684}^1$	$f_{1,685}^1$	$f_{1,686}^1$	$f_{1,687}^1$	$f_{1,688}^1$	$f_{1,689}^1$	$f_{1,690}^1$	$f_{1,691}^1$	$f_{1,692}^1$	$f_{1,693}^$
-------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	--------------

ленно перенести соответствующие значения функции f_0 .

Очевидно, что составление таблицы функций неисправностей и построение тестов для больших схем — очень трудоемкая операция, которая может быть выполнена только на ЭВМ. Однако при составлении таблицы функций неисправностей может оказаться, что некоторые столбцы тождественно совпадают, то есть соответствующие функции неисправностей неразличимы. Так, в рассмотренном примере

$$f'_{1,2} = f'_{2,3} = f'_{3,4} = f'_{4,1} \quad \text{и} \quad f'_{1,1} = f'_{4,2}$$

При большом числе неразличимых функций неисправностей построение таблицы и теста теряет смысл. Поэтому представляет интерес поиск критериев, позволяющих по записи дизъюнктивных нормальных форм д.н.ф. определять, существуют ли неразличимые неисправности, если реализацию д.н.ф. проводить в виде последовательно-параллельной схемы.

Как отмечалось в работе [2], совпадение некоторых функций неисправностей можно предсказать непосредственно по схеме. В самом деле, если допустимой неисправностью является неисправность „D” → „F” (что в некоторых случаях эквивалентно разрыву), то при последовательном выключении элементов мы не можем установить, в каком из них неисправность. Аналогично нельзя установить наличие неисправности („F” → „D”) при параллельном соединении. А так как мы рассматриваем реализацию ДНФ в виде последовательно-параллельной схемы, то совпадение функций неисправностей для „D” → „F” говорит о том, что данные неисправности находятся в одной строке, а для „F” → „D” — в разных.

Таким образом, для того, чтобы д.н.ф., реализованная в среде в виде последовательно-параллельной схемы, была диагностируема с точностью до строки достаточно, чтобы все функции неисправностей для „F” → „D” были различимы.

В дальнейшем удобно использовать геометрическую модель. Введем обозначения:

1. Пусть функции $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ поставлено в соответствие подмножество $N_f = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ множества E_n всех вершин n -мерного единичного куба таких, что $f(\alpha_1, \dots, \alpha_n) = 1$.

2. Подмножество $N_{\mathcal{U}_k} \subseteq E_n$ называется интервалом k -го ранга, если оно соответствует конъюнкции $\mathcal{U}_k$ k -го ранга.

3. Элементарные конъюнкции $\mathcal{U}_i$ и $\mathcal{U}_j$ называются ортогональными, если $\mathcal{U}_i \cdot \mathcal{U}_j = 0$.

4. M — множество функций неисправностей для „F” → „D” в f_0 .

5. S' — множество наборов, контролирурующих неисправности типа „F” → „D” в f_0 .

6. $S'_{\kappa,i}$ — множество наборов, контролирующих неисправность i — й переменной в κ — й конъюнкции.

7. $S_{\kappa,i}$ — множество вершин интервала, соответствующего конъюнкции, ортогональной к $\mathcal{U}_\kappa$ по i — й переменной.

8. Λ — пустое множество.

Очевидно, число функций неисправностей для „F” → „D” равно рангу конъюнкции, а мощность множества наборов

$$S'_{\kappa,i} \leq 2^{n-k} \quad (S'_{\kappa,i} \subseteq S_{\kappa,i})$$

Это следует из того, что для контроля i — й переменной в $\mathcal{U}_\kappa$ необходимо во множестве наборов, на которых $\mathcal{U}_\kappa$ равно единице, заменить значение контролируемой переменной на противоположное, а затем исключить из $S_{\kappa,i}$ наборы, на которых остальные конъюнкции равны единице.

ЛЕММА I. Для того, чтобы множество функций неисправностей M было различимо, необходимо и достаточно, чтобы для любой пары неисправностей выполнялось условие:

$$S'_{\kappa,i} \neq S'_{\ell,j} \quad (I)$$

НЕОБХОДИМОСТЬ. Предположим, что функции неисправностей различимы. Тогда существует набор $s \in S'$ такой, что

$$f'_{\kappa,i}(s) \neq f'_{\ell,j}(s)$$

А так как функция неисправностей в случае неисправности „F” → „D” принимает значение единицы только на множестве наборов, контролирующих данную неисправность, то набор s в этом случае принадлежит только одному из контролирующих наборов $S'_{\kappa,i}$ или $S'_{\ell,j}$.

ДОСТАТОЧНОСТЬ. Из условия

$$S'_{\kappa,i} \neq S'_{\ell,j}$$

следует, что существует набор $S \in S^1$ такой, что одна функция неисправности на этом наборе равна единице, а другая — нулю. Отсюда получаем, что

$$f_{\kappa,i}^1 \neq f_{\kappa,j}^1$$

ПРИМЕР. Проиллюстрируем сказанное на функции f_0 . На рис. 3 изображено покрытие интервалами для данной функции.

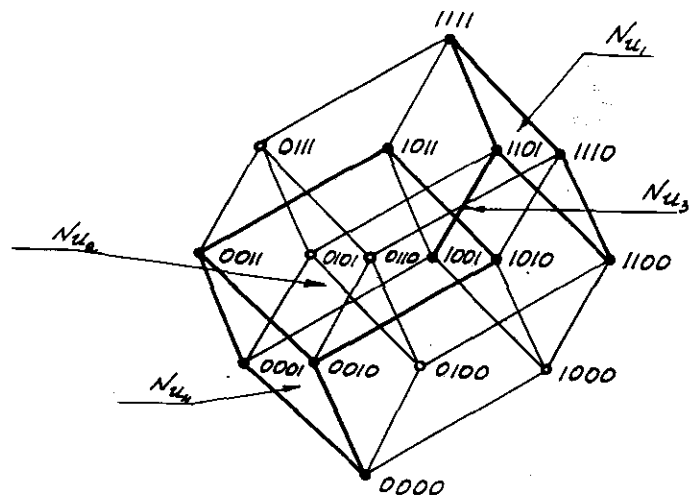


Рис. 3

Выпишем подмножества вершин интервалов, соответствующих элементарным конъюнкциям u_1, u_2, u_3, u_4 :

$$N_{u_1} = \begin{Bmatrix} 1100 \\ 1101 \\ 1110 \\ 1111 \end{Bmatrix}, \quad N_{u_2} = \begin{Bmatrix} 0010 \\ 0011 \\ 1010 \\ 1011 \end{Bmatrix}, \quad N_{u_3} = \begin{Bmatrix} 1001 \\ 1101 \end{Bmatrix}, \quad N_{u_4} = \begin{Bmatrix} 0000 \\ 0001 \\ 0010 \\ 0011 \end{Bmatrix}.$$

Заменяя значения контролируемых переменных на противоположные и исключая наборы, на которых функция равна единице, получаем:

$$S_{1,1}^1 = \begin{Bmatrix} 0100 \\ 0101 \\ 0110 \\ 0111 \end{Bmatrix}, \quad S_{1,2}^1 = \{1000\},$$

$$\begin{aligned} S_{2,2}^1 &= \begin{Bmatrix} 0110 \\ 0111 \end{Bmatrix}, & S_{2,3}^1 &= \{1000\}, \\ S_{3,1}^1 &= \{0101\}, & S_{3,4}^1 &= \{1000\}, \\ S_{4,1}^1 &= \{1000\}, & S_{4,2}^1 &= \begin{Bmatrix} 0100 \\ 0101 \\ 0110 \\ 0111 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

Применяя критерий (I), видим, что для данной функции единичные неисправности $f_{1,2}^1, f_{2,3}^1, f_{3,4}^1$ и $f_{4,1}^1$, а также $f_{1,1}^1$ и $f_{4,2}^1$ неразличимы. Неисправность $f_{3,3}^1$ не влияет на работоспособность схемы.

Введем на множестве вершин единичного n -мерного куба метрику $[10]$.

$$\rho(\beta, \gamma) = |\beta_1 - \gamma_1| + |\beta_2 - \gamma_2| + \dots + |\beta_n - \gamma_n|.$$

Пусть m — некоторая точка единичного n -мерного куба. Совокупность точек ρ единичного n -мерного куба, для которых выполняется условие $\rho(m, \rho) = 1$, назовем окрестностью первого порядка и обозначим ее через $Q_1(m)$. Окрестностью $Q_2(m)$ второго порядка точки m будем называть совокупность точек ρ единичного n -мерного куба, для которых $\rho(m, \rho) \leq 2$.

ЛЕММА 2. Множество функций неисправностей m различимо, если в каждом

$$S_{\kappa,i}^1 \quad (i=1,2,\dots,\nu_\kappa; \kappa=1,2,\dots,m)$$

существует точка $S \in S_{\kappa,i}^1$ такая, что

$$Q_1(S) \cap N_f \setminus N_{u_\kappa} = \Lambda \quad (2)$$

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Поскольку

$$Q_1(S) \cap N_f \setminus N_{u_\kappa} = \Lambda,$$

то точка $S \in S_{\kappa,i}^1$ и не принадлежит более ни одному контролирующему множеству, проверяющему другие неисправности.

ЛЕММА 3. Множество функций неисправностей m различимо, если в каждом N_{u_κ} ($\kappa=1,\dots,m$) найдется точка α такая, что

$$Q_2(\alpha) \cap N_f \setminus N_{u_\kappa} = \Lambda \quad (3)$$

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. В множество наборов $Q_i(\alpha)$ входит по одному набору из каждого множества наборов, контролирующих все неисправности κ - й конъюнкции, а так как $Q_2(\alpha) \cap N_2 \cap N_3 = 1$, то ни один из наборов $Q_i(\alpha)$ не принадлежит множеству наборов, контролирующих неисправности всех остальных конъюнкций.

Проверить различимость функций неисправностей можно по любому из указанных критериев. Однако критерии 2 и 3 являются достаточными условиями различимости функций неисправностей и поэтому более жесткими, чем I.

Как отмечалось выше, не для любой д.н.ф., реализованной в ВСр в виде последовательно-параллельной схемы, можно построить диагностический тест, позволяющий обнаружить неисправность хотя бы с точностью до строки. Поэтому в тех случаях, когда ставится задача диагностики функции с точностью до строки, необходимо декомпозировать f на подфункции f_i ($f = \vee f_i$), удовлетворяющие условиям диагностики, и реализацию каждой f_i проводить в виде отдельной последовательно-параллельной схемы. Для получения оптимального разбиения (декомпозиции) используется полный перебор всех возможных сочетаний элементарных конъюнкций. Реализация f проводится с учетом возможности ведения контроля каждой подфункции.

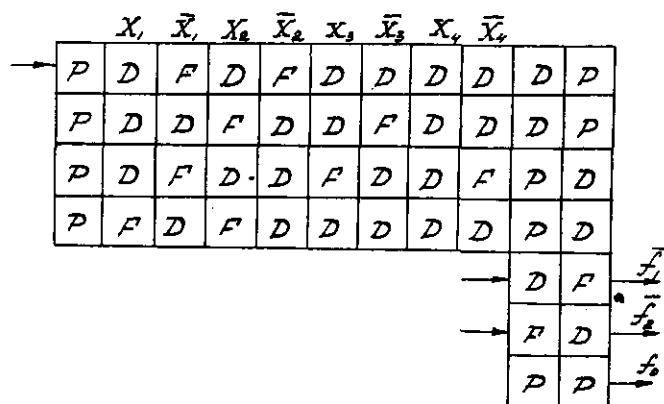


Рис. 4

ПРИМЕР. Применим критерий (I) для декомпозиции функции f_0 на подфункции f_i , удовлетворяющие условиям диагностики. Перебирая все возможные сочетания конъюнкций, получаем $f_0 = f_1 \vee f_2$, где подфункция f_1 включает первую и вторую, а f_2 - третью и четвертую конъюнкции.

Один из возможных вариантов программы настройки $f_0 = f_1 \vee f_2$ показан на рис. 4.

Таким образом, построив для каждой подфункции свой диагностический тест, путем последовательной диагностики f_i можно однозначно найти неисправность в f .

Л и т е р а т у р а

1. ЕВРЕЙНОВ Э.В., КОСАРЕВ Ю.Г. Однородные вычислительные системы высокой производительности, Новосибирск, "Наука", 1967.
2. ЧЕГИС И.А., ЯБЛОНСКИЙ С.В. Логические способы контроля работы электрических схем. - "Труды Математического института им. В.А.Стеклова", 1958, том. 51, 270-360.
3. KANTZ W.H. Testing and diagnosis of cellular arrays. Proc. 8th Ann. Sump. on Switching and Automata Theory, 161-175.
4. ARMSTRONG D.B. On finding a nearly minimal set of fault detection tests for combinational logic nets. IEEE Trans. EC-15, 1966, p.63-73.
5. ПРАНГИШВИЛИ И.В., ИГНАТУШЕНКО В.В. О методах построения контрольно-диагностических тестов для однородных микросистемных структур. - "Техн. кибернетика", М., "Изв. АН СССР", № 6.
6. ЧАРАЕВ Г.Г. Контроль исправности и диагностика неисправностей неполностью однородной двумерной структуры. - "Автоматика и телемеханика", М., 1968, № 7.
7. БАНДМАН О.Л. Реализация автоматов в криотронной вычислительной среде. - "Труды I Всесоюзной конференции по вычислительным системам", Новосибирск, "Наука", 1968, вып. 3.
8. МЕЛИХОВ А.Н., ТОПОЛЬСКИЙ Н.Г. Об одном методе синтеза автоматов в вычислительной среде. - "Цифровые модели и интегрирующие машины", Таганрог, 1970, 265-275.
9. ARNOLD Th., TAN C.J., NEWBORN M.M. Iteratively Realized Sequential Circuits. IEEE Trans. C-19, N 1, Jan. 1970, p.54-66.
10. КАУСДОРФ Ф. Теория множеств. М.-Л., Гостехиздат, 1937.

Поступила в редакцию
19. VI. 1971