

Józef DWORZECKI

Instytut Informatyki Czasu Rzeczywistego  
Politechniki Śląskiej

PROJEKTOWANIE OBWODÓW DRUKOWANYCH PAKIETÓW URZĄDZEŃ CYFROWYCH  
Z UWZGLĘDNIENIEM ASPEKTÓW DIAGNOSTYKI USZKODZEŃ

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono problemy określania optymalnych warunków diagnostyki uszkodzeń typu zwarcia między ścieżkami obwodu drukowanego powstałych w trakcie lutowania podczas montażu układów u producenta. Przedstawiony w artykule algorytm umożliwia podział zbioru połączeń na zadaną liczbę warstw pakietu oraz określenie wzajemnego położenia połączeń na każdej warstwie z uwzględnieniem minimalizacji czasu lokalizacji uszkodzeń typu zwarcia.

1. WPROWADZENIE

Wzrost złożoności układów cyfrowych spowodował, że testowanie tych układów jest poważnym problemem. Znaczną część uszkodzeń pakietów układów cyfrowych stanowią uszkodzenia typu "sklejenie z 0" lub "sklejenie z 1" (s-a-1;  $l = 0, 1$ ) wyprowadzeń układów scalonych (modułów). Tego typu uszkodzenia występują przeważnie w układach już pracujących u użytkownika. Natomiast u producenta pakietów występują ponadto uszkodzenia, wśród których można wyróżnić:

- zwarcia między ścieżkami,
- nieprawidłowe wlutowanie układu scalonego (modułu),
- nieprawidłowości druku (przerwy w druku, błędne połączenia),
- błędy w lutowaniu (brak lutowania, "zimny" lut).

Różne też jest traktowanie przez użytkownika urządzeń cyfrowych i producenta zagadnień testowania i diagnostyki uszkodzeń. Coraz częściej testowanie urządzeń u użytkownika sprowadza się do zlokalizowania pakietu, w którym występuje uszkodzenie i wymiany tego pakietu.

Na tym poziomie testowania nie jest istotna lokalizacja uszkodzenia na pakiecie. W ten sposób znacznie skraca się czas przerwy w pracy urządzenia lub systemu.

Testowanie u producenta musi natomiast prowadzić do lokalizacji uszkodzenia z dokładnością do modułu w przypadku uszkodzeń typu s-a-1, ( $l = 0, 1$ ) lub musi określić rodzaj i miejsce innego typu uszkodzenia (np. zwarcie między ścieżkami). Wynika stąd konieczność stosowania przez producen-

ta skomplikowanych urządzeń testujących, np. specjalizowanych minikomputerów. Istnieją jednak nadal takie ograniczenia, jak:

- pojemność pamięci minikomputera,
- czas testowania,
- liczba dodatkowych sygnałów, które można doprowadzić do i/lub z badanego pakietu.

Spośród nich szczególnie czas testowania odgrywa istotną rolę w warunkach przemysłowych przy badaniu "on-line".

Czas testowania pojedynczego pakietu zależy od następujących czynników:

- a) liczby testów detekcyjnych i diagnostycznych wynikającej z umiejętności opracowywania tych testów,
- b) doboru dodatkowych punktów kontrolnych (dodatkowych wyjść i wejść na pakiecie) stosowanych dla uproszczenia i przyspieszenia procedury testowania [2].

Zbyt duża ich ilość wydłuża czas przygotowania pakietu do testowania i może być przyczyną błędnych podłączeń, co dodatkowo w efekcie zwiększa czas testowania.

Wymienione wyżej elementy mające wpływ na czas testowania zależą również od konkretnej realizacji układu cyfrowego na pakiecie.

Przez "konkretną realizację" należy rozumieć:

- a) strukturę funkcjonalną pakietu,
- b) przydzielenie poszczególnych funkcyjnych rozpatrywanego układu cyfrowego do poszczególnych modułów na pakiecie,
- c) rozmieszczenie poszczególnych układów scalonych (modułów),
- d) ustalone w procesie trasowania połączenia pomiędzy wyprowadzeniami poszczególnych układów scalonych.

Wyznaczone w procesie trasowania połączenia determinują zbiór uszkodzeń typu "zwarcie" między ścieżkami (s-c), które mogą wystąpić w czasie montażu pakietu. Uszkodzenia te mogą okazać się wykrywalne lub trudne do zlokalizowania, wydłużając znacznie czas testowania. Należałoby przewidzieć tę sytuację przed wykonaniem połączeń na pakiecie.

Proces projektowania pakietu składałby się więc z przedstawionych poniżej pięciu faz:

- 1) Określenie przydziału poszczególnych funkcyjnych układu do modułów na podstawie kosztu wykrywania i lokalizacji uszkodzeń typu "s-a-1" ( $1 = \emptyset, 1$ ). "Koszt" związany jest z liczbą testów detekcyjnych i diagnostycznych oraz dodatkowych punktów kontrolnych niezbędnych do zlokalizowania uszkodzeń.
- 2) Określenie kosztu wykrycia i lokalizacji uszkodzenia typu "s-c" pomiędzy wybranymi przez konstruktora (w ogólnym przypadku - wszystkimi) parami połączeń.

3) W oparciu o przyjęte przez konstruktora kryteria nastąpiłby wybór:

- a) par połączeń, dla której koszt wykrycia zwarcia między nimi jest najniższy lub
- b) par połączeń o koszcie najwyższym.

W ten sposób uzyskano zbiór połączeń, które:

- a) w procesie trasowania połączeń należy poprowadzić obok siebie,
- b) w procesie trasowania nie powinny być poprowadzone obok siebie.

4) Uzyskane w pkt. 1-3 wyniki są ograniczeniami dla algorytmów rozmieszczenia modułów na pakiecie i trasowania połączeń. Można je również wykorzystać do sprawdzenia, czy zrealizowany przez te procedury pakiet zapewnia założony stopień testowalności i diagnozowalności uszłodożeń. Miarę stopnia testowania i diagnozowalności  $\delta$  można określić przykładowo w następujący sposób:

$$\delta = \frac{|Y - X|}{X}$$

gdzie:

- X - koszt procesu testowania i diagnozowania pakietu, w którym uwzględniono wyniki uzyskane w fazach 1-3,
- Y - koszt procesu testowania i diagnozowania pakietu zrealizowanego przez konstruktora.

5) W oparciu o wyniki, parametry charakterystyczne przebiegu procesów rozmieszczania oraz trasowania (takie jak np. czas działania algorytmów, liczba połączeń nie wyznaczonych przez algorytm trasowania) można zmieniać ograniczenia dla tych algorytmów, uwzględniając jednak nadal warunki testowania i diagnozowania.

## 2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Żałóźmy, że układ cyfrowy ma być zmontowany na druku wielowarstwowym. Układ ten jest scharakteryzowany swoją strukturą funkcjonalną. Rozważania będą prowadzone przy następujących założeniach:

- a) dany układ cyfrowy tworzy sieć kombinacyjną - założenie to jest zgodne ze współczesnymi technikami testowania układów sekwencyjnych, które polegają na rozcięciu pętli sprzężeń zwrotnych, wprowadzeniu dodatkowych punktów wejściowych i wyjściowych oraz testowaniu za ich pomocą wydzielonych części układu,
- b) zadany jest przydział połączeń do poszczególnych warstw,

c) w układzie mogą wystąpić następujące uszkodzenia:

- pojedyncze typu  $s-a-1$ , ( $l = \emptyset, 1$ ). Założenie o jednokrotności występowania tych uszkodzeń jest zgodne z praktyką - układy scalone przed wlutowaniem na pakiecie są testowane i intensywność ich uszkodzeń jest rzędu  $10^{-6}$ - $10^{-10}$  1/h,
- zwarcie między dwoma, sąsiednimi ścieżkami: najczęściej są tu uszkodzenia wielokrotne, jednak można przyjąć z dużym prawdopodobieństwem, że w testowanej części układu (patrz punkt a) występuje jedno takie uszkodzenie.

W wyniku zwarcia między sąsiednimi, prowadzonymi równolegle ścieżkami, układ może okazać się trudny do testowania oraz trudny do diagnozowania.

Można więc problem, którego rozwiązanie prezentuje niniejsza praca, sformułować następująco:

- określić wzajemne sąsiedztwo ścieżek, dla którego koszt diagnostyki pojedynczego uszkodzenia logicznego (ze względu na przyjęte współczynniki kosztu) będzie minimalny lub prawie minimalny.

### 3. PODSTAWY TEORETYCZNE METODY

3a. Przyjmijmy, że dla układu cyfrowego  $N$  dane są:

- a) zbiór prawdopodobnych uszkodzeń typu  $s-a-1$  ( $l = \emptyset, 1$ ),
- b) zbiór testów detekcyjnych i diagnostycznych,
- c) zbiór par połączeń, dla których w przypadku wystąpienia zwarcia między nimi są wyznaczone testy diagnostyczne. Zbiór ten wyznaczony został w trzeciej fazie procesu projektowania pakietu.

Wzajemne położenie ścieżek można by określić przeglądając wszystkie możliwe rozwiązania i wybrać na tej podstawie wariant najlepszy (tzn. o najmniejszym koszcie). Takie podejście do tego problemu wymaga dużego nakładu obliczeń (np. dla  $n = 10$  ścieżek należałoby rozpatrzyć  $z = \frac{n!}{2} = 1814440$  możliwych rozwiązań). Dlatego też konieczne jest inne podejście, zapewniające optymalne lub prawie optymalne rozwiązanie ze względu na przyjęte kryterium oceny. Takim kryterium oceny rozwiązania może być, np. liczba dodatkowych testów, poza zbiorem testów detekcyjnych i diagnostycznych, użytych do wykrycia i/lub lokalizacji zwarcia.

Przyjmijmy, że określony został zbiór testów detekcyjnych  $T = \{t_0, t_1, \dots, t_z\}$  oraz zbiór uszkodzeń typu "zwarcie" ( $l = \emptyset, 1$ ):

$F = \{f_1, f_2, \dots, f_k\}$ . Określone zostały również uszkodzenia typu "zwarcie" ( $s-c$ ):  $F_{sc} = \{f_{k+1}, f_{k+2}, \dots, f_{k+m}\}$ , gdzie  $m \leq \frac{n(n-1)}{2}$ , gdzie  $n$  oznacza liczbę analizowanych ścieżek.

Zbiory  $T, F, F_{sc}$  można przedstawić w postaci macierzy  $A$  (np. na rys.1), w której kolumnie odpowiada test  $t_i$ , a wierszowi - uszkodzenie  $f_j$ . Ele-

ment  $a_{ij}$  macierzy  $\underline{A}$  określa, czy dany test  $t_j$  wykrywa uszkodzenie ( $a_{ij} = 1$ ), czy też nie ( $a_{ij} = \emptyset$ ).

Dla określenia zbioru testów diagnostycznych i ich kolejności zostanie wykorzystana metoda Chang'a przedstawiona w pracy [3]. Metoda ta, w swej najprostszej postaci, polega na określeniu testu ( $t_k$ ) rozróżniającego największą liczbę par uszkodzeń, podzieleniu zbioru uszkodzeń (macierzy  $\underline{A}$ ) na bloki, w których zgrupowane są osobno uszkodzenia wykrywane ( $a_{ik} = 1$ ) oraz nie wykrywane ( $a_{jk} = 0$ ) przez wybrany test (przykład podziału na bloki przedstawia rys. 2). Ten schemat postępowania jest kontynuowany, aż uzyskany zostanie podział na bloki jednoelementowe. Wybór testu w kolejnych etapach oparty jest na wyznaczeniu wag dla nie wybranych w poprzednich etapach testów. Wagę testu wyznacza się przez dodanie wag częściowych wyznaczonych w każdym bloku macierzy  $\underline{A}$ , a określonych jako iloczyn liczby zer ( $n_0$ ) i jedynek ( $n_1$ ) w kolumnie odpowiadającej danemu testowi, a więc:

$$w_i = \sum_{j=1}^r w_{ij} \quad (3.1)$$

$$w_{ij} = (n_0 \cdot n_1)_{i,j} = n_{0,i,j} \cdot n_{1,i,j} \quad (3.2)$$

gdzie:

- $w_i$  - waga wyznaczona dla testu  $t_i$ ,
- $w_{i,j}$  - waga wyznaczona dla testu  $t_i$  w bloku  $j$ -tym macierzy  $\underline{A}$ ,
- $r$  - liczba bloków, na którą podzielona została macierz  $\underline{A}$  na danym etapie wyznaczania zbioru testów diagnostycznych.

Tak określona waga dla testów jest w tym przypadku nieprzydatna. Wynika to z faktu uwzględnienia w macierzy  $\underline{A}$  zbioru uszkodzeń typu "s-c" (tzn. zbioru  $F_{sc}$ ). Zbiór  $F_{sc}$  utworzono analizując stopień wykrywalności (diagnozowalności) zwarcia pomiędzy połączeniami, a więc zawiera on również uszkodzenia, które w zrealizowanym już pakiecie układu cyfrowego praktycznie nie wystąpię (np. ze względu na odległość między ścieżkami). Należy więc dla wagi, określonej dla uszkodzeń typu "s-c", wprowadzić pewien współczynnik korygujący  $\left(\frac{\psi_1}{I_H}\right)$  we wzorze (3.2)

$$w_i = n_{0,i,j} \left(\frac{\psi_1}{I_H}\right) \cdot n_{1,i,j} \left(\frac{\psi_1}{I_H}\right), \quad (3.3)$$

gdzie: współczynnik korygujący  $\left(\frac{\psi_1}{I_H}\right)$  jest zdefiniowany w pkt. 3b.

3b. Dla zbioru uszkodzeń typu "s-c utworzony zostanie graf G, wg zasad opisanych poniżej.

Wierzchołki grafu reprezentują poszczególne ścieżki (połączenia) pomiędzy funktoarami układu cyfrowego. Gałąź łącząca dwa wierzchołki oznacza, że możliwa jest sąsiedztwo odpowiadających im ścieżek (tzn. że koszt usunięcia zwarcia między nimi nie przekracza przyjętego poziomu). Gałęzie te wyznaczono w oparciu o zbiór  $F_{sc}$ . Brak gałęzi łączącej wierzchołki "i" z "j" oznacza, że ścieżki "i" oraz "j" nie mogą być poprowadzone obok siebie (mogą to być zalecenia konstruktora). Każdej gałęzi przypisano pewną cechę, której znaczenie opisano poniżej. Powstałe w ten sposób sieć  $S = \langle G, \{\psi_1\}, \{\psi_k\} \rangle [6]$ , gdzie:

$G = \langle W, U, P \rangle$  graf bez pętli,  
 $|W| = n$  ilość wierzchołków w grafie G,  
 $|U| = m$  ilość gałęzi w grafie G,  
 $P \subset W \times U \times W$  relacja trójczłonowa [6, s. 26] pomiędzy wierzchołkami i gałęziami w grafie,  
 $\psi_1: W \rightarrow R_1$  funkcja określona na zbiorze wierzchołków grafu. Przyjmujemy, że  $\{\psi_1\} = \emptyset$ ,  
 $\psi_k: U \rightarrow R_2$  funkcja określona na zbiorze wierzchołków grafu. W rozważonym przypadku  $R_2$  jest zbiorem wag poszczególnych gałęzi.

Wybranie pewnego wzajemnego sąsiedztwa ścieżek wyznacza w grafie G łańcuch, łączący wszystkie wierzchołki grafu. Łańcuch taki, przechodzący przez wszystkie wierzchołki (i przez każdy z nich tylko jeden raz), nosi nazwę łańcucha Hamiltona [4]. Zadanie poszukiwania wzajemnego sąsiedztwa ścieżek można więc sprowadzić do zagadnienia poszukiwania łańcucha Hamiltona w grafie G. Liczba łańcuchów jest związana z liczbą gałęzi w grafie (w grafie pełnym jest ich  $\frac{n!}{2}$ ).

W grafie niepełnym liczba łańcuchów jest oczywiście mniejsza i zależy od liczby pozostałych gałęzi. Przy czym niektóre z gałęzi występują w większej liczbie łańcuchów Hamiltona niż pozostałe.

Niech  $\psi_k = p$ , gdzie p - liczba łańcuchów Hamiltona, w których występuje k-ta gałąź. Liczba wszystkich łańcuchów Hamiltona występujących w grafie G oznaczona została przez  $I_H$ . W celu wyznaczenia wagi dla testu  $t_1$  wprowadzone zostały następujące wielkości:

$$\left. \begin{aligned} \beta_{ij}^0 &= (1 - a_{ij}) \quad \text{dla wszystkich } a_{ij} = 0 \\ \beta_{ij}^1 &= a_{ij} \quad \quad \quad \text{dla wszystkich } a_{ij} = 1 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{dla uszkodzeń} \\ \text{typu s-a-1} \end{array} \quad (3.4)$$

$$\alpha_{ij}^0 = (1 - a_{ij}) \frac{\psi_1}{I_H} \quad (3.6)$$

$$\alpha_{ij}^1 = \frac{\psi_1}{I_H} \quad (3.7)$$

stąd:

$$n_{01} = \sum_{j=1}^{k_1} \beta_{1j}^0 + \sum_{j=1}^{m_1} \alpha_{1j}^0 \quad (3.8)$$

$$n_{11} = \sum_{j=1}^{k_2} \beta_{1j}^1 + \sum_{j=1}^{m_2} \alpha_{1j}^1 \quad (3.9)$$

gdzie:

$k_1 + k_2 = k$  - liczba uszkodzeń typu "s-a-1",

$m_1 + m_2 = m$  - liczba uszkodzeń typu "s-c".

Wtedy waga testu  $t_1$ :

$$w_1 = n_{01} \cdot n_{11} \quad (3.10)$$

Spośród zbioru testów wybieramy zostaje test posiadający największą wagę. Następuje podział macierzy  $\underline{A}$  na dwie części (bloki), z których jedna grupuje uszkodzenia nie wykrywane przez wybrany test, natomiast druga - wykrywane. Dla nie wybranych testów ponownie są wyznaczone wagi, określone jako suma wag wyznaczonych w poszczególnych blokach:

$$w_1 = \sum_{l=1}^r w_{1,l} \quad (3.11)$$

gdzie:  $w_{1,l} = n_{01,l} \cdot n_{11,l}$ , a "l" numer bloku, dla którego wyznaczona jest waga  $w_{1,l}$ .

W oparciu o test posiadający największą wartość " $w_1$ " następuje ponowny podział macierzy  $\underline{A}$  na bloki (każdy blok oddzielnie na dwie części).

Próbie wyznaczenia łańcucha Hamiltona można podjąć w momencie wydzielania co najmniej "(n-1)" bloków.

Metodę wyznaczenia łańcuchów Hamiltona przedstawiono w pkt. 4. Jeżeli wyznaczenie łańcucha Hamiltona jest niemożliwe, następuje ponowne obliczenie wag dla pozostałych testów i ponowny podział na nowe bloki.

## 4. METODA WYZNACZANIA ŁAŃCUCHÓW HAMILTONA W GRAFIE NIEPEŁNYM

Do wyznaczania łańcuchów Hamiltona wykorzystana została metoda R.M.Roberts'a i B. Floresa opisana w pracy [4]. Metoda ta została opracowana dla grafów zorientowanych, przedstawionych w postaci:

$$G = \langle W, \Gamma \rangle$$

$W$  - zbiór wierzchołków:  $|W| = n$ ,

$\Gamma$  - funkcja określona na zbiorze wierzchołków, której wartościami są odpowiednie podzbiory zbioru wierzchołków:

$$\Gamma : W \rightarrow 2^W \text{ podzbiorów,}$$

a więc  $\Gamma(x)$  - zbiór następników wierzchołka "x",

$$\Gamma^{-1}(x) - \text{zbiór poprzedników wierzchołka "x".}$$

Dla grafów niezorientowanych:

$$\Gamma(x) = \Gamma^{-1}(x).$$

Metoda rozpoczyna się od budowy macierzy  $M = [m_{ij}]_{k,n}$ , gdzie element  $m_{ij}$  jest  $i$ -tym wierzchołkiem  $\Gamma(x_j)$ , dla którego w grafie  $G = \langle W, \Gamma \rangle$  istnieje marszruta  $(x_1, x_q)$ .

Wierzchołki  $x_q$  w ciągu  $\Gamma(x_j)$  porządkowane są tworząc "r" wyznaczonych przez podział  $A$  bloków. W ten sposób uzyskano elementy  $j$ -tej kolumny macierzy  $M$ .

Jako początkowy wybiera się dowolny wierzchołek z dowolnego bloku (np.  $x_k$  lub jeden z wierzchołków, dla których stopień  $st = 1$ ). Jest to pierwszy element ciągu  $S$ . Ciąg  $S$  zawiera już określone wierzchołki budującego się łańcucha.

Do  $S$  dołącza się pierwszy możliwy wierzchołek w kolumnie, np. wierzchołek  $x_p$  - ale taki, który nie znajduje się w bloku, z którego wybrano  $x_k$ . Następnie do  $S$  dołącza się pierwszy możliwy wierzchołek z kolumny wierzchołka  $x_p$ . Wybrany wierzchołek oraz blok muszą się różnić od poprzednio wykorzystanych wierzchołków i bloków. Pojęcie "możliwy wierzchołek" oznacza wierzchołek nie należący jeszcze do  $S$ . Jakiś wierzchołek nie zostanie włączony w kroku  $r$ -tym do ciągu  $S = x_k, x_p, \dots, x_{r-1}, x_r$ , jeżeli:

1<sup>o</sup> w kolumnie  $x_r$  brak możliwego wierzchołka,

2<sup>o</sup> łańcuch określony przez  $S$  zawiera  $(n-1)$  gałęzi, a więc jest łańcuchem hamiltonowskim.

W przypadku gdy wierzchołek nie może być włączony do ciągu  $S$ , realizowana jest operacja powracania. Polega ona na usunięciu ostatniego dołączonego wierzchołka  $x_r$  z  $S$  i dołączeniu do  $S$  pierwszego możliwego



wierzchołka następnego w kolumnie  $x_{r-1}$  macierzy  $\underline{M}$ . Jeżeli w tej kolumnie nie ma żadnego innego możliwego wierzchołka, to wykonuje się następny krok powrotu. Wyznaczanie łańcuchów o początku w wierzchołku  $x_k$  kończy się, gdy  $S$  składa się tylko z  $x_k$  i następny krok powrotu czyni  $S$  zbiorem pustym.

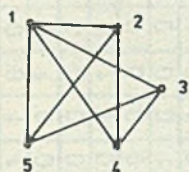
Metodę należy zastosować dla wszystkich wierzchołków grafu.

## 5. PRZYKŁAD

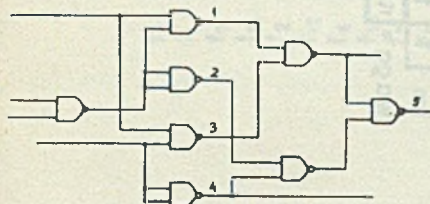
Przyjmijmy, że zostanie poddany analizie układ kombinacyjny, z rys. 1, w którym mogą wystąpić:

- uszkodzenia typu "s-a-1" ( $l = \emptyset, 1$ ):  $f_1 \dots f_6$ ,
- uszkodzenia typu "s-c" ( $f_{12} \dots f_{35}$ ) między pięcioma, prowadzonymi obok siebie ścieżkami, przy czym niektóre ze ścieżek nie mogą sąsiadować obok siebie (brak gałęzi łączącej wierzchołki odpowiadające określonym ścieżkom).

Fragment rozpatrywanego układu oraz odpowiadającą mu macierz  $\underline{A}$  oraz graf  $G$  przedstawia rys. 1. Na rys. 2 przedstawiono kolejno podział macierzy  $\underline{A}$  na dwa i cztery bloki oraz odpowiadającą temu podziałowi macierz  $\underline{M}$ .



Graf  $G$



	$t_0$	$t_1$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$	$t_{15}$	$\gamma_i$	
$f_1$	0	0	0	0	0	1	0	0	X	
$f_2$	1	0	0	0	0	0	0	0		
$f_3$	0	1	1	0	0	0	0	0		
$f_4$	0	0	0	1	0	0	0	0		
$f_5$	0	0	0	0	1	1	0	0		
$f_6$	0	0	1	0	1	0	1	0		
$f_{12}$	1	1	0	0	0	0	0	1		$10/24$
$f_{13}$	0	1	0	0	1	0	1	1		$10/24$
$f_{14}$	0	0	1	1	0	1	0	0		$10/24$
$f_{15}$	1	1	0	1	1	0	1	0		$10/24$
$f_{24}$	0	0	0	0	1	0	1	0	$9/24$	
$f_{25}$	1	0	0	0	1	1	0	1	$14/24$	
$f_{34}$	1	0	1	0	1	1	0	1	$14/24$	
$f_{35}$	1	1	0	1	1	1	0	0	$14/24$	
waga $\approx$	22.3	20.2	19.4	18.1	24.8	24.1	18	15.9		

Rys. 1. Graf  $G$  i macierz  $\underline{A}$

	$t_8$	$t_0$	$t_1$	$t_6$	$t_7$	$t_9$	$t_{10}$	$t_{15}$
$f_1$	0	0	0	0	0	1	0	0
$f_2$	0	1	0	0	0	0	0	0
$f_3$	0	0	1	1	0	0	0	0
$f_4$	0	0	0	0	1	0	0	0
$f_{12}$	0	1	1	0	0	0	0	1
$f_{14}$	0	0	0	1	1	1	0	0
$f_5$	1	0	0	0	0	1	0	0
$f_6$	1	0	0	1	0	0	1	0
$f_{13}$	1	0	1	0	0	0	1	1
$f_{15}$	1	1	1	0	0	0	1	0
$f_{24}$	1	0	0	0	0	0	1	0
$f_{25}$	1	1	0	0	1	0	0	1
$f_{34}$	1	1	0	1	0	1	0	1
$f_{35}$	1	1	1	0	1	1	0	0
waga $\approx$	11,2	10	10,5	10,5	11,2	7,8	7,8	

	$t_8$	$t_0$	$t_1$	$t_6$	$t_7$	$t_9$	$t_{10}$	$t_{15}$
$f_1$	0	0	0	0	0	1	0	0
$f_3$	0	0	1	1	0	0	0	0
$f_4$	0	0	0	0	1	0	0	0
$f_{14}$	0	0	0	1	1	1	0	0
$f_2$	0	1	0	0	0	0	0	0
$f_{12}$	0	1	1	0	0	0	0	0
$f_5$	1	0	0	0	0	1	0	0
$f_6$	1	0	0	1	0	0	1	0
$f_{13}$	1	0	1	0	0	0	1	1
$f_{24}$	1	0	0	0	0	0	1	0
$f_{15}$	1	1	1	0	1	0	1	0
$f_{25}$	1	1	0	0	1	0	0	1
$f_{34}$	1	1	0	1	0	1	0	1
$f_{35}$	1	1	1	0	1	1	0	0
waga $\approx$	5	5,7	3,7	6	2,7	2,2		

	1	2	3	4	5	
M =	4	—	—	1	—	I
	2	1	—	—	—	II
	3	4	1	2	—	III
	5	5	4	3	1	IV
	—	—	5	—	2	
—	—	—	—	8		

Rys. 2. Podział A na dwa i cztery bloki

	$t_8$	$t_0$	$t_9$	$t_1$	$t_6$	$t_7$	$t_{10}$	$t_{15}$
$f_3$	0	0	0	1	1	0	0	0
$f_4$	0	0	0	0	0	1	0	0
$f_1$	0	0	1	0	0	0	0	0
$f_{14}$	0	0	1	0	1	1	0	0
$f_2$	0	1	0	0	0	0	0	0
$f_{12}$	0	1	0	1	0	0	0	0
$f_8$	1	0	0	0	1	0	1	0
$f_{13}$	1	0	0	1	0	0	1	1
$f_{24}$	1	0	0	0	0	0	1	0
$f_5$	1	0	1	0	0	0	0	0
$f_{15}$	1	1	0	1	0	1	1	0
$f_{25}$	1	1	0	0	0	1	0	1
$f_{34}$	1	1	1	0	1	0	0	1
$f_{35}$	1	1	1	1	0	1	0	0

Łańcuchy Hamiltona:

- 1-4-2-5-3
- 2-4-1-5-3
- 2-5-3-1-4
- 3-4-1-2-5
- 3-4-2-1-5
- 3-5-2-1-4
- 4-2-1-5-3
- 4-3-5-1-2
- 4-3-5-2-1
- 5-2-1-3-4

$\underline{M} =$

	1	2	3	4	5	
4	—	—	1	—	—	I
2	1	—	—	—	—	II
3	4	1	2	—	—	III
5	5	—	—	1	—	IV
—	—	—	—	2	—	
—	—	4	3	3	—	V
—	—	5	—	—	—	

Rys. 3. Wyznaczenie łańcuchów Hamiltona

Ponieważ nie można wyznaczyć żadnego łańcucha Hamiltona, dokonano dalszego podziału macierzy  $A$  (rys. 3). Na podstawie macierzy  $M$  wyznaczono dziesięć łańcuchów Hamiltona. Wybranie jednego z nich można dokonać np. w oparciu o sumę "kosztów" usunięcia zwarć wynikających z położenia łączy określonego przez łańcuch Hamiltona.

## 6. WNIOSKI

Przedstawiony algorytm umożliwia określenie wzajemnego położenia "n" łączy zapewniającego łatwe testowanie układu. Zastosowane kryterium określania wagi testów opiera się na spostrzeżeniu, że najzwyklej można uzyskać konkretny łańcuch Hamiltona, tworząc go spośród gałęzi najczęściej występujących w zbiorze wszystkich, możliwych dla grafu  $G$  łańcuchów. Pewną niedogodnością jest sposób określania wagi testów, wymagający znajomości parametrów  $\psi_k$  oraz  $I_H$ .

Powyższa metodyka może być zastosowana przy projektowaniu obwodów drukowanych dowolnych układów elektronicznych, w tym liniowych, dla których utworzyć można kombinacyjny model diagnostyczny ze zbiorem uszkodzeń typu s-a-1 ( $l = 0,1$ ) oraz typu "bridge" (s-c).

## 7. LITERATURA

- [1] Budka M.: Synteza łatwodiagnostycznych modułowych struktur układów cyfrowych. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1976.
- [2] Budka M.: The method for test set and points selection for fault diagnosis of digital circuits. FTSD'78, Proceedings, 1 st Conference, Gdańsk 1978.
- [3] Chang H.Y.: An algorithm for selecting an optimum set of diagnostic tests. IEEE Trans. on Electr. Computers, Vol. EC-14, No 5, October 1965.
- [4] Christofides N.: Teoria grafów. Algoritmickieskiej podchod. Wydawnictwo "Mir", Moskwa 1978.
- [5] Dworzecki J.: Procedura określania wzajemnego położenia łączy obwodów drukowanych pakietów cyfrowych z uwzględnieniem aspektów testowania na etapie uruchamiania. Materiały FTSD'80, Katowice 1980.
- [6] Korzan B.: Elementy teorii grafów i sieci - metody i zastosowania. WNT, Warszawa 1978.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Jan Zabrodzki

Wpłynęło do Redakcji: 11.08.1981 r.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПАКЕТОВ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ  
С УЧЕТОМ ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

## Р е з ю м е

В статье рассматриваются проблемы определения оптимальных условий диагностики неисправностей типа "короткое замыкание" (анг. bridging) между печатными соединениями возникающих во время пайки цифрового устройства у производителя. Описанный в статье алгоритм делает возможным распределение сбора соединений на определенное число слоев печатного пакета учитывая минимализацию времени локализации непоправок типа "короткое замыкание".

DESIGN OF PRINTED CIRCUITS BOARDS OF DIGITAL DEVICES  
TAKING THE PROBLEM OF FAULT-DIAGNOSIS INTO CONSIDERATION

## S u m m a r y

This paper is connected with the problem of an assurance of optimal conditions for the diagnosis of bridge-type failures caused by short-circuit between two paths of printed circuit board occurring in soldering process. The algorithm presented in the paper makes possible to divide the set of connections among the given number of printed circuit layers and to determine the topology of printed circuit of every layer of considered board, taking into account the minimalization of bridge-type failures isolation time..