P 3341/82

ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

AUTOMATYKA

Z. 62
GLIWICE
1982

P 3341/82

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 718

MARIAN BUDKA

PROJEKTOWANIE MODUŁOWYCH STRUKTUR UKŁADÓW CYFROWYCH O ZADANYCH WŁAŚCIWOŚCIACH DIAGNOSTYCZNYCH

GLIWICE 1982

OPINIODAWCY

Prof. dr inż. Jerzy Siwiński
Prof. dr hab. inż. Antoni Woźniak

KOLEGIUM REDAKCYJNE

Jan Bandrowski (redaktor naczelny), *Anna Skrzywan-Kosek* (redaktor działu), *Elżbieta Stinzing* (sekretarz redakcji)

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Roma Łoś

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0434-0760

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Nakł. 180+85 Ark. wyd. 4,7 Ark. druk. 5,375 Papier druk. kl. V 70x100 70 g
Oddano do druku 12.03 1982 Podpis. do druku 15.04.1982 Druk ukończ. w kwietniu 1982
Zam. 209/82 B-23 Cena zł 12,—

Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

SPIS TREŚCI

Str.

Zestawienie ważniejszych symboli 5

1. Wstęp 7

2. Wprowadzenie do problemu 9

3. Podstawowe określenia 13

4. Sformułowanie problemu 18

5. Podstawy teoretyczne projektowania modułowych struktur układów cyfrowych o zadanych parametrach diagnostycznych 22

5.1. Podstawowa metoda przydziału elementów funkcjonalnych 22

5.1.1. Kryteria podziału zbioru uszkodzeń 22

5.1.2. Organizacja procedury podziału 26

5.1.3. Oszacowanie dokładności rozwiązania 29

5.1.4. Wykorzystanie zbiorów roboczych testów i punktów kontrolnych do diagnozy 31

5.1.5. Podział z uwzględnieniem prawdopodobieństw występowania uszkodzeń 33

5.2. Procedura przydziału z wykorzystaniem sztucznej redundancji modułowej (SRM) 38

5.3. Procedura przydziału z wykorzystaniem naturalnej redundancji modułowej (NRM) 43

5.4. Szczególne przypadki procedury przydziału 43

5.4.1. Procedura przydziału z ograniczeniami liczności zbioru testów diagnostycznych lub dodatkowych punktów kontrolnych 44

5.4.2. Procedura przydziału z zadanym zbiorem testów diagnostycznych albo dodatkowych punktów kontrolnych .. 45

5.4.3. Procedura przydziału z częściowo zadanym podziałem układu N 46

5.4.4. Procedura przydziału z ograniczeniem liczebności nadmiarowych modułów SRM 47

6. Oszacowanie złożoności obliczeniowej π -procedury 48

7. Przykłady 53

8. Wnioski i uwagi końcowe 72

9. Literatura 75

Streszczenie 80

ZESTAWIENIE WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI

B - zbiór elementów funkcjonalnych tworzących układ N,
B_i^s - element funkcjonalny s-tego typu,
C_u^m - cecha u-tego modułu,
$C_p^{\Sigma F}$ - cecha p-tej sumy bloków,
F - zbiór uszkodzeń,
f_k^i - k-te uszkodzenie elementu funkcjonalnego B_i^s,
F_t - blok uszkodzeń,
J_k - wskaźnik wykorzystywany w k-tym kroku π -procedury,
K_i - koszt diagnozy układu N o strukturze modułowej S_i,
k_i - liczba modułów i-tego rodzaju w zbiorze M,
M - zbiór modułów przeznaczonych do technicznej realizacji układu N,
M_u - u-ty moduł,
m_i - liczba elementów funkcjonalnych i-tego rodzaju zawartych w jednym module,
N - rozpatrywany układ cyfrowy,
n_i - liczba elementów funkcjonalnych i-tego rodzaju,
n_k - liczba par uszkodzeń,
P - dopuszczalny zbiór punktów kontrolnych,
P_k - zbiór roboczy dodatkowych punktów kontrolnych,
R - liczba modułowych struktur układu N,
R_D - wskaźnik redundancji,
S_k - k-ta modułowa struktura układu N,
T - dopuszczalny zbiór testów,
t_j - j-ty test,
T_k - zbiór roboczy testów,
w_i - waga i-tej wielkości ujmującej ilościowo właściwości diagnostyczne układu N,
W_p - wskaźnik Powella,
X - wektor wejść układu N,
Z - wektor wyjść układu N,
Γ - operacja tworzenia bloków F_t,
Δn_k - przyrost liczby par uszkodzeń w k-tym kroku π -procedury,
Λ - operacja kojarzenia elementów funkcjonalnych do modułów,
π - procedura przydziału,

$(\Sigma F)_p$ - p-ta suma bloków,

$(\Sigma F)_p^*$ - p-ta prosta suma bloków,

Ω - operacja tworzenia prostych sum bloków,

W_i - wskaźnik Changa.

1. WSTĘP

Niezawodność złożonych urządzeń i systemów informatyki zależy od wielu czynników w tym głównie od koncepcji rozwiązania, konstrukcji i technologii sprzętu, warunków pracy oraz sposobu realizacji procesów odnowy w przypadkach wystąpienia awarii. Dla tego typu naprawialnych urządzeń i systemów, parametry niezawodnościowe, jak np. średni czas odnowy, zależą od organizacji testowania obiektu, mającego na celu wskazanie (zlokalizowanie) uszkodzonego elementu, modułu, pakietu, urządzenia czy podsystemu, jak również od organizacji samej naprawy, np. wymiany uszkodzonego podzespołu.

W celu uzyskania możliwie najlepszych parametrów niezawodnościowych i użytkowych należy dążyć m.in. do zminimalizowania średniego czasu naprawy.

We współczesnych urządzeniach informatycznych, jak np. jednostka centralna systemu komputerowego, sterownik pamięci dyskowej, układ sterujący monitora ekranowego przez wprowadzenie konstrukcji modułowej dąży się m.in. do zminimalizowania średniego czasu naprawy, rozumianej zwykle jako wymiana modułu. W granicy przy doskonałej organizacji samej naprawy czas ten będzie równy średniemu czasowi zlokalizowania uszkodzonej, wymienialnej jednostki.

Właściwa technika testowania z kolei pozwala skrócić średni czas zlokalizowania uszkodzenia.

Dla zadanych technik testowania, długości procedur detekcyjnych i diagnostycznych, jak również możliwość wykrywania pewnych klas uszkodzeń oraz ich rozróżniania są związane ze strukturą badanego układu, rodzajem prawdopodobnych uszkodzeń itp. Miarami podatności układów i systemów na testowanie są testowalność i diagnozowalność. Zmieniając technikę testowania np. przez wprowadzenie dodatkowych wejść w badanym układzie lub obserwując dodatkowe wyjścia - punkty kontrolna, można powiększyć testowalność lub diagnozowalność układów i systemów.

Istnieję jednak granice, narzucone m.in. przez struktury układów, powiększania podatności na testowanie. Stąd też na etapie projektowania układów i systemów należałoby uwzględniać aspekty testowalności i diagnozowalności poprzez przyjmowanie łatwo testowalnych i (lub) łatwo diagnozowalnych [41], [71] struktur funkcjonalnych układów, struktur modułowych [30], [9], poprzez wyprowadzenie na dodatkowych złączach punktów kontrolnych itp.

Dla zadanej struktury funkcjonalnej układu (np. schemat logiczny pakietu cyfrowego) właściwy dobór struktury modułowej, tzn. przyporządkowa-

nie elementów funkcjonalnych modułom oraz wyznaczenie dodatkowych punktów kontrolnych, jak również odpowiednie wykorzystanie redundancji modułowej [12], [20], sztucznej i naturalnej wpływa na znaczne powiększenie podatności na testowanie.

Przedsięwzięcia te nie obniżają niezawodności mierzonej np. jako MTBF rozpatrywanych układów i systemów poprzez wprowadzenie większej liczby podzespołów, połączeń itp., natomiast ułatwiając lokalizowanie uszkodzeń z żądaną dokładnością, zwykle do wymienialnego podzespołu, powodują skrócenie średniego czasu naprawy.

W niniejszej pracy przedstawiono opracowane przez autora rozwiązanie problemu określania (syntezy) modułowych struktur układów i systemów cyfrowych o podwyższonych właściwościach diagnostycznych, tj. układów, których całkowity koszt diagnozy związany z liczbą testów, liczbą wyjść i dodatkowych punktów kontrolnych jest minimalny lub zbliżony do minimalnego.

2. WPROWADZENIE DO PROBLEMU

W literaturze z zakresu diagnostyki technicznej układów i systemów cyfrowych zaprezentowano szereg metod wyboru testów diagnostycznych dla kombinacyjnej i sekwencyjnej procedury lokalizacji uszkodzeń. Większość tych metod bazuje na wynikach modelowania uszkodzeń przedstawionych w postaci tablicy uszkodzeń [25] [26] [18] [64], chociaż opracowano również metody wyboru testów diagnostycznych bezpośrednio ze struktury układu (np. praca [48]) dla założonych, prostych struktur układów cyfrowych.

Wykorzystanie tablicy uszkodzeń, jak ma to miejsce w pracach Changa [25], [26] czy Powella [64], umożliwia wybór minimalnych lub prawie minimalnych zbiorów testów diagnostycznych, jak również w zasadzie nie ogranicza klasy uszkodzeń prawdopodobnych, jakie mogą wystąpić w układzie. Jedynym założeniem jest to, że występujące uszkodzenia są uszkodzeniami logicznymi, trwałymi i jednokrotnymi. Dla określenia zbioru testów diagnostycznych proponowane są zwykle rekurencyjne metody wyboru testów wg lokalnie optymalnych kryteriów stosowanych w kolejnych etapach procedury. Już dla średnio rozbudowych układów dokonanie wyboru minimalnego lub prawie minimalnego zbioru testów diagnostycznych drogą sprowadzenia problemu do zagadnienia minimalnego pokrycia par uszkodzeń, które należy rozróżnić testami, jest praktycznie niemożliwe. Przykładowo, dla układu kombinacyjnego o 8 wejściach, w których może wystąpić jedno ze 100 prawdopodobnych (założonych) uszkodzeń należałoby rozwiązać problem minimalnego pokrycia testami ze zbioru 256 testów, par uszkodzeń w liczbie 4950.

Podany przykład w ujęciu ilościowym odpowiada 1/4 i 1/6 części typowej karty drukowanej urządzenia cyfrowego z elementami TTL małej i średniej skali integracji.

Wprowadzenie metod wyboru zbiorów testów diagnostycznych bezpośrednio ze struktury analizowanego układu ogranicza radykalnie klasę założonych uszkodzeń oraz klasę układów, których dotyczą [9].

Większość prezentowanych w literaturze metod wyboru zbioru testów diagnostycznych umożliwia określenie tych zbiorów dla diagnozy z założonym stopniem dokładności, tzn. z dokładnością do pojedynczego fizycznego defektu, z dokładnością do bramki, modułu, pakietu, kasety itp.

W zależności od "poziomu" testowania użytkownik jest zainteresowany w diagnozie z różnymi stopniami dokładności. W przypadku diagnozowania systemu komputerowego lokalizowanie uszkodzenia odbywa się zwykle w kolejności: z dokładnością do ramy (urządzenia), pakietu, modułu - układu scalonego, elementu dyskretnego itp.

Obsługa takiego systemu mając za zadanie uzyskanie maksymalnych wartości współczynnika gotowości, tzn. m.in. skrócenia do minimum czasów naprawy, realizuje diagnozę z dokładnością do największego wymienialnego podzespołu, zwykle urządzenia lub pakietu.

W grupie remontowej, której zadaniem jest dokonanie naprawy uszkodzonego pakietu czy urządzenia, dokonuje się diagnozy z dokładnością zwykle do wymienialnego elementu; w przypadku pakietów cyfrowych z dokładnością do modułu - układu scalonego.

Istnieją jednak sytuacje, w których niezbędna jest głębokość diagnozy do pojedynczego defektu fizycznego. Na to miejsce np. w przypadkach szukania przyczyn pewnych powtarzających się uszkodzeń.

W praktyce stosuje się szereg metod testowania [9], [18], [23], [29], [85] z wykorzystaniem wyłącznie pierwotnych (właściwych) wejść i wyjść układu PI - PO, z wykorzystaniem pierwotnych wejść i wyjść układu oraz dodatkowych punktów kontrolnych PI - DO, z wykorzystaniem pierwotnych i dodatkowych wejść oraz wyłącznie z obserwacją właściwych wyjść DI - PO, a w przypadku powiększenia zbioru obserwowalnych wyjść o dodatkowe punkty kontrolne - DI - DO. Wprowadzanie dodatkowych wejść i wyjść do zbioru wejść służących do podawania testów oraz obserwowalnych wyjść związane jest z trudnościami w lokalizowaniu uszkodzeń. Właściwy dobór wejść i obserwowalnych wyjść układu diagnozowanego powinien zapewnić przede wszystkim możliwość zlokalizowenia założonej klasy uszkodzeń z żądaną dokładnością oraz minimalny lub prawie minimalny koszt diagnozy [21], [42] [51], [81], [83], [85].

Bez wnikania w szczegóły różnych definicji kosztów diagnozy zauważyć można, że koszty takie rosną wraz ze wzrostem liczby testów diagnostycznych, liczby wyjść badanego układu, dodatkowych wejść i punktów kontrolnych. Wzrost wartości kosztu diagnozy w tych przypadkach wynika zarówno z obciążenia hipotetycznego testera - czas obliczeń i deszyfracji wyników (testowania) oraz pojemność pamięci operacyjnej, jak i z konieczności rozbudowy badanych układów np. przez wprowadzenie dodatkowych złączy - dodatkowe punkty kontrolne oraz ścieżek połączeń drukowanych do tych złączy na karcie urządzenia cyfrowego.

Wartości poszczególnych wymienionych powyżej wielkości wpływających na wzrost kosztu diagnozy dla danego układu i klasy prawdopodobnych uszkodzeń są zależne między sobą. Przykładowo liczebność zbioru testów diagnostycznych zależy m.in. od zadeklarowanie dodatkowych wejść i wyjść badanego układu i odwrotnie.

Wprowadzanie innych, obok PI - PO, technik testowania wynika, jak już wspomniano powyżej, z trudności napotykanych przy lokalizacji uszkodzeń. Lokalizacja defektów odbywa się z dokładnością do klas równoważnych (nierozróżnialnych) uszkodzeń [25], [35], [5], [58], [72], [77], które bardzo często bez wprowadzenia dodatkowych punktów kontrolnych lub wejść testu-

jących są na tyle liczne, że uniemożliwiają wskazanie uszkodzonego podzespołu np. układu scalonego.

Dla układów wielowyjściowych lub jednowyjściowych z dodatkowymi punktami kontrolnymi rozbicie klas równoważnych uszkodzeń na korzystniejsze zbiory uszkodzeń o mniejszej liczności odbywa się poprzez rozróżnienie kombinacji wyjściowych przy podawaniu testów diagnostycznych. Propozycja taka została zaprezentowana m.in. przez Powella [64]. Tablica uszkodzeń z rozróżnieniem kombinacji wyjściowych zawiera znacznie więcej informacji przydatnej dla diagnozy, niż tablica zerojedynkowa uszkodzeń prezentowana m.in. przez Changa [25], [29] zawierająca jedynie informację o tym czy dany test "przeszedł", czy też nie.

Lokalizacja uszkodzeń z dokładnością do bloku (modułu) wymaga zatem określenia takiej procedury diagnostycznej, w wyniku której możliwe będzie wskazanie uszkodzenia z dokładnością do klasy równoważnych uszkodzeń, przy czym w żadnej z takich klas nie wystąpią uszkodzenia należące do dwóch lub więcej modułów.

Dla oceny właściwości diagnostycznych układów (sieci) cyfrowych wprowadzono wskaźnik zwany diagnozowalnością [4], [9], [31], [37], [43], [51], [55], [77], [78]. Wartość tego wskaźnika zwykle związana jest z liczbą i liczebnością klas równoważnych uszkodzeń i określa "podatność na diagnozowanie" danego układu dla zadanej klasy uszkodzeń, przyjętej techniki testowania PI - PO, PI - DO, DI - PO lub DI - DO, jak również dla zadanego stopnia dokładności diagnozy.

Układ o takiej samej strukturze funkcjonalnej i różnych strukturach modułowych (przyporządkowanie elementów funkcjonalnych modułom) przy żądaniu lokalizacji uszkodzenia z dokładnością do modułu, może posiadać różne wartości wskaźnika diagnozowalności dla poszczególnych struktur modułowych [13].

Zatem obok techniki testowania na "łatwość diagnozy" [11], [17], [2], [27], [30] ma wpływ podział elementów funkcjonalnych np. bramek, multiplekserów, dekoderów, sumatorów, przerzutników na moduły - układy scalone, czy też układów scalonych na pakiety itd.

Problem metod podziału struktur funkcjonalnych układów cyfrowych na moduły - konstrukcyjne bloki od dawna nurtował wielu specjalistów - diagnostyków [1], [30], [65], lecz niewiele wiadomo było o jego rozwiązalności.

Problem przydziału elementów funkcjonalnych do modułów występuje również m.in. przy projektowaniu konstrukcyjnym układów i urządzeń modułowych - w szczególności elektronicznych układów cyfrowych [44]. System komputerowego wspomagania projektowania konstrukcyjnego zorganizowany jest zwykle hierarchicznie i zawiera procedury: trasowania połączeń (np. drukowanych), rozmieszczania modułów i przydziału elementów funkcjonalnych do modułów. Zarówno "rozmieszczanie", jak i "przydział" dobierane są w ten sposób, aby możliwe było dokonanie trasowania połączeń przy możliwie naj-

krótszych długościach poszczególnych ścieżek, sumarycznej długości ścieżek itp. Wprowadzenie aspektów diagnostyki przy przydziale elementów funkcjonalnych do modułów umożliwia m.in. zaproponowanie początkowego przydziału dla procedur rozmieszczania i trasowania połączeń. Bardzo często zadowalające rozwiązania trasowania połączeń uzyskuje się nie ingerując w przydział elementów funkcjonalnych do modułów, zatem przydział optymalny z punktu widzenia właściwości diagnostycznych pozostaje jako obowiązujący.

Jeżeli założyć, że system wspomagania projektowania konstrukcyjnego urządzeń cyfrowych posiada procedury optymalnego z tytułu diagnostyki przydziału elementów funkcjonalnych do modułów, to jak łatwo można zauważyć istnieją bardzo silne powiązania tej procedury z "rozmieszczaniem" i "trasowaniem". Wynika to m.in. z określenia zbioru dodatkowych punktów kontrolnych oraz wejść testujących podczas realizacji procedury przydziału i w związku z tym wystąpi problem wprowadzenia dodatkowych połączeń i (lub) złączy.

Generalnie, od lat poszukuje się metod projektowania układów cyfrowych o odpowiednich (zadanych) lub w ogóle podwyższonych właściwościach diagnostycznych. Jest to niezwykle trudny i skomplikowany problem, w szczególności w przypadkach założenia możliwości występowania w układzie dowolnych uszkodzeń logicznych. Rozwiązywany jest on na drodze wprowadzenia zmian funkcjonalnych w danym układzie np. wprowadzenie bramek blokujących [69] bądź specjalnych realizacji układowych [45],[71]. Niestety zagadnienia te zostały rozwiązane jedynie dla specjalnych, prostych struktur urządzeniowych i tylko niektórych typów uszkodzeń.

Innym podejściem jest ingerencja wyłącznie po stronie konstrukcyjnej - wprowadzanie dodatkowych punktów kontrolnych [42], [82], [83], [85] lub podział sieci na moduły [10] - [23].

W prezentowanych w literaturze metodach wykorzystywane są prawie wyłącznie modele w postaci grafów lub sieci, nawiązujące do klasycznej diagnostyki strukturalnej i obowiązujące dla pewnej klasy uszkodzeń logicznych zwykle s-z-1 i s-z-0 poszczególnych węzłów układu. Wykorzystanie wyników modelowania uszkodzeń np. w postaci tablic uszkodzeń w szczególności z wyróżnionymi kombinacjami wyjściowymi praktycznie nie wprowadza żadnych ograniczeń co do klasy uszkodzeń, jak również dopuszcza coraz częściej wprowadzaną metodykę określania zbiorów testów diagnostycznych i testowania strukturalno-funkcjonalnego. Ma to duże znaczenie m.in. z uwagi na wprowadzanie do budowy pakietów urządzeń cyfrowych układów dużej skali integracji, w tym mikroprocesorów.

Celem autora niniejszej rozprawy było opracowanie metodyki przydziału elementów funkcjonalnych, tworzących dany układ cyfrowy, do konstrukcyjnych bloków - modułów dla uzyskania struktur modułowych o podwyższonych właściwościach diagnostycznych.

3. PODSTAWOWE OKREŚLENIA

Dla zwięzłości dalszych rozważań wprowadzone zostaną definicje i oznaczenia obowiązujące konsekwentnie w pracy. Stanowią one w większości zbiór określeń używanych w pracach [10] - [23].

W pracy rozważane są zagadnienia podwyższania właściwości diagnostycznych układów cyfrowych N (rys. 4.1), w zasadzie kombinacyjnych, zrealizowanych z elementów funkcjonalnych B_i^e zgrupowanych w modułach M_u.

Df. 1. Element funkcjonalny B_i^s jest to najmniejszy niepodzielny ze względów funkcjonalnych podzespół układu cyfrowego N, gdzie e - oznacza typ elementu, zaś i jest numerem kolejnym.

Df. 2. Moduł M_u jest to najmniejszy niepodzielny ze względów konstrukcyjnych podzespół układu cyfrowego N.

Przykładem elementu funkcjonalnego jest funktor NAND dwuwejściowy, zaś modułu - układ scalony UCY 7400 zawierający 4 dwuwejściowe funktory NAND. Innym przykładem elementu funkcjonalnego może być układ scalony UCY 7400, zaś modułu - pakiet urządzenia cyfrowego.

Określenie jaki podzespół jest elementem funkcjonalnym, a jaki modułem zależy od postawienia zadania przydziału.

Df. 3. Zbiór uszkodzeń F jest to zbiór pojedynczych, logicznych i trwałych uszkodzeń f_k^i elementów funkcjonalnych B_i^e, jakie mogą wystąpić w układzie N, gdzie k jest numerem uszkodzenia elementu B_i^e.

Df. 4. Test t_j dla uszkodzenia f_k^i w układzie N jest to taka kombinacja wejściowa X_j, dla której przynajmniej jedno z wyjść Z_r^j w układzie sprawnym i z uszkodzeniem f_k^i ma przeciwną wartość logiczną, tzn.

$$(X_j = t_j) \Longleftrightarrow \left[\bigvee_{l \in R} (R = \{0,1,2,\ldots,m-1\}),\ (z_r^j \oplus z_r^j(f_k^i) = 1) \right],$$

gdzie $z_r^j(f_k^i)$ jest wartością sygnału logicznego na wyjściu Z_r w układzie z uszkodzeniem f_k^i.

Df. 5. Dopuszczalny zbiór testów T jest to zbiór testów t_j, które mogą być wykorzystane w procesie diagnozy (lokalizacja uszkodzenia).

Df. 6. Dopuszczalny zbiór punktów kontrolnych P jest to zbiór możliwych do obserwacji w procesie diagnozy dodatkowych, poza pierwotnymi (PO), wyjść układu N wprowadzonych dla uproszczenia diagnozy.

Df. 7. Zbiór elementów funkcjonalnych B jest to zbiór elementów funkcjonalnych B_i^s, jakie tworzą układ N.

Df. 8. Zbiór modułów M jest to zbiór modułów M_u przeznaczonych do technicznej realizacji układu N.

Uwaga I. Aby możliwa była techniczna realizacja układu N, liczby poszczególnych typów elementów funkcjonalnych B_i^s zawartych w modułach $M_u \in M$ muszą być większe lub równe liczbom tych elementów w układzie N.

Uwaga II. Każdy moduł $M_u \in M$ jest zbiorem pewnej liczby elementów funkcjonalnych.

Df. 9. π-procedura przydziału elementów funkcjonalnych B_i^s do modułów $M_u \in M$ - jest to procedura podziału zbioru F na podzbiory uszkodzeń elementów $B_i^s \in B$ wg określonego kryterium podziału, które to elementy mogę znajdować się w jednym module $M_u \in M$. Kolejne etapy (kroki) procedury numerowane są indeksem k.

Df.10. Zbiór testów T_k jest to podzbiór zbioru T ($T_k \subseteq T$) wybrany w k krokach π-procedury (od 1 do k).

Df.11. Zbiór punktów kontrolnych P_k jest to podzbiór zbioru P($P_k \subseteq P$) wybrany w k krokach π-procedury (od 1 do k).

Df.12. Blok uszkodzeń F_t jest to dowolny podzbiór F, który może być rozróżniony od wszystkich innych podzbiorów F przy wykorzystaniu zbioru T_k i P_k, przy czym $\bigcup_t F_t = F$.

Df.13. Suma bloków $(\Sigma F)_p$ jest to suma bloków $F_t \subseteq F$, przy czym żadne z uszkodzeń elementów B_i^s, których uszkodzenia $f_k^i \in F_t$ nie należy do bloków nie wchodzących do tej sumy.

$$(\Sigma F)_p = \bigcup_t F_t; \quad \bigwedge_i f_k^i \subset F_t; \quad \bigvee_j f_j^i \in F_r, \quad r \neq t$$

Df. 14. Prosta suma bloków $(\Sigma F)_1^*$ - dowolna suma bloków $(\Sigma F)_p$, która przestaje być sumą bloków po usunięciu z niej dowolnego z bloków $F_t \in (\Sigma F)_p$

$$\left[(\Sigma F)_p = (\Sigma F)_1^*\right] \Longleftrightarrow \left[(\Sigma F)_p = \bigcup_t F_t;\ \bigwedge_r (\Sigma F)_p \left[F_r \vee_i f_k^i \in (\Sigma F)_p \middle| F_r\right.\right.$$

$$\left.\left. f_v^i \notin (\Sigma F)_p \middle| F_r\right]\right]$$

Df. 15. Cecha sumy bloków $C_p^{\Sigma F}$ - zbiór par liczb (s, w), z których pierwsza określa typ elementu funkcjonalnego B_i^s, zaś druga liczbę elementów s-tego typu, których uszkodzenia należą do sumy bloków $(\Sigma F)_p$.

Analogicznie zdefiniowana jest cecha prostej sumy bloków.

Df. 16. Cecha modułu C_u^m - zbiór par liczb (s, w), z których pierwsza określa typ elementu funkcjonalnego B_i^s, a druga liczbę elementów tego typu, znajdujących się w module $M_u \in M$.

Problemy równości cechy sumy bloków i cechy modułu przedstawiono w postaci właściwości I i II.

Właściwość I

$$\left[C_p^{\Sigma F} = C_u^m;\ C_p^{\Sigma F} = \left\{(s_{Fi}, w_{Fi})\right\};\ C_u^m = \left\{(s_{mj}, w_{mj})\right\}\right] \Longleftrightarrow$$

$$\left[\left(\bigwedge_i \bigvee_j s_{Fi} = s_{mj}\right) \Leftrightarrow (w_{Fi} = w_{mj}) \cap \left(\bigwedge_j \bigvee_i s_{Fi} = s_{mj}\right) \Leftrightarrow (w_{Fi} = w_{mj})\right]$$

$$\Longleftrightarrow \left[\bigwedge_i \bigwedge_j \left\{\bigvee_{i,j}\right\} (s_{Fi} = s_{mj}) \Leftrightarrow (w_{Fi} = w_{mj})\right]$$

Właściwość II

$$\left[C_p^{\Sigma F} > C_u^m;\ C_p^{\Sigma F} = \left\{(s_{Fi}, w_{Fi})\right\};\ C_u^m = \left\{(s_{mj}, w_{mj})\right\}\right] \Longleftrightarrow$$

$$\left[\left\{\bigvee_{i,j}\right\} (s_{Fi} = s_{mj}) \Leftrightarrow (w_{Fi} > w_{mj})\right]$$

Df. 17. Γ-operacja dokonana na zbiorze F względem zbiorów T_k i P_k oznaczona przez $\Gamma(F)\Big|_{P_k}^{T_k}$ - jest to operacja rozbicia w k-tym kroku π-procedury zbioru F na bloki F_i, które mogą być rozróżnione między sobą w oparciu o zbiór testów T_k przy obserwacji punktów kontrolnych ze zbioru P_k. Jeżeli przez F_w^* oznaczyć bloki w (k-1) kroku π-procedury, a przez $F_r(t_i, p_l)$ bloki uszkodzeń rozróżnio-

ne w k-tym kroku π-procedury poprzez wprowadzenie testu t_i oraz punktu kontrolnego p_l, wówczas operacja $\Gamma(F)\Big|_{P_k}^{T_k}$ jest określona następująco:

$$\left[\Gamma(F)\Big|_{P_k}^{T_k}\right] \Longleftrightarrow \left[\bigwedge_w \bigwedge_r F_v = F_w^* \cap F_r(t_i,p_l).\ F_s = F_w^* \,|\, F_w^* \cap F_r(t_i,p_l)\right.$$

$$\left. F_t = F_r(t_i,p_l) \,|\, F_w^* \cap F_r(t_i,p_l)\right]$$

Utworzone w k-tym kroku π-procedury bloki uszkodzeń F_v, F_s i F_t są rozłączne, tzn.

$$\left[F_w^* \cap F_r(t_i,p_l)\right] \cap \left[F_w^* \,|\, F_w^* \cap F_r(t_i,p_l)\right] \cap \left[F_r(t_i,p_l) \,|\, F_w^* \cap F_r(t_i,p_l)\right] = \emptyset$$

Df. 18. Ω-operacja jest to operacja tworzenia prostych sum bloków $(\Sigma F)_l^*$.

Df. 19. Λ-operacja jest to operacja przydziału elementów funkcjonalnych $B_i^s \in B$ do modułów $M_u \in M$.

Df. 20. Redundancja modułowa jest to nadmiar elementów funkcjonalnych $B_i^s \in M_u$, $M_u \in M$ w stosunku do liczby $B_i^s \in B$, czyli zbioru elementów tworzących układ N.

Df. 21. Naturalna redundancja modułowa jest to redundancja modułowa bez nadmiaru całego modułu dowolnego typu, wynikająca z różnicy liczby elementów funkcjonalnych w minimalnym zestawie $M_u \in M$ i liczby elementów $B_i^s \in B$.

Df. 22. Sztuczna redundancja modułowa jest to redundancja modułowa obejmująca co najmniej jeden cały moduł dowolnego typu wprowadzony celowo dla ułatwienia procesu przydziału.

Df. 23. Wskaźnik redundancji R_D jest to miara redundancji wyrażona liczbą nadmiarowych elementów funkcjonalnych w przypadku redundancji naturalnej oraz liczbą nadmiarowych modułów w przypadku redundancji sztucznej.

Df. 24. Struktura modułowa S_k układu N jest to przyporządkowanie elementów funkcjonalnych $B_i^s \in B$ tworzących układ N modułom $M_u \in M$.

Df. 25. Koszt diagnozy K_i układu N o strukturze S_i jest określony następującą zależnością:

$$K_i = \sum_{j=1}^{h} w_j r_{ji},$$

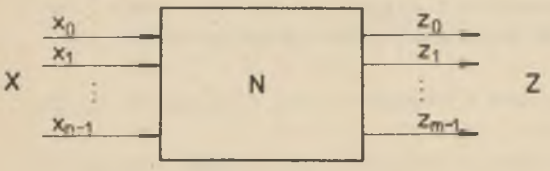
gdzie:

r_{ji} - wielkość ujmujące ilościowo proste właściwości diagnostyczne charakterystyczne dla struktury S_i, jak liczba testów procedury diagnostycznej niezbędna do zlokalizowania uszkodzenia z dokładnością do modułu, liczba dodatkowych punktów kontrolnych, liczba modułów sztucznej redundancji modułowej, liczba par uszkodzeń nierozróżnialnych należących do różnych modułów itp.;

w_j - waga (koszt jednostkowy) j-tej wielkości ujmującej ilościowo proste właściwości diagnostyczne, np. testu, dodatkowego punktu kontrolnego, nadmiarowego modułu itp.

4. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Niech dany będzie układ cyfrowy N o wejściach $X = \{x_0, x_1, \ldots, x_{n-1}\}$ i wyjściach $Z = \{z_0, z_1, \ldots, z_{m-1}\}$ (rys. 4.1). Załóżmy, że rozważane będą kombinacyjne układy cyfrowe lub dowolne układy, dla których można przyjąć jako zastępczy model - układ kombinacyjny. Przyjmijmy, że w układzie N mogą wystąpić pojedyncze, trwałe, logiczne uszkodzenia poszczególnych elementów funkcjonalnych tworzących ten układ.



Rys. 4.1. Układ cyfrowy N

Do technicznej realizacji układu N przeznaczony jest zbiór modułów zawierających odpowiednie elementy funkcjonalne. Problem sformułowany jest następująco:

dla zadanej struktury funkcjonalnej układu N, zadanej klasy pojedynczych uszkodzeń logicznych poszczególnych elementów funkcjonalnych należy znaleźć przydział elementów funkcjonalnych do modułów - strukturę modułową układu N, dla którego całkowity koszt diagnozy (zgodnie z def. 25) jest minimalny lub bliski minimalnemu. Przy określaniu struktury modułowej dopuszczalne jest wprowadzenie dodatkowych punktów kontrolnych $P = \{p_0, p_1, \ldots, p_{k-1}\}$ i dodatkowych wejść testujących $S = \{s_0, s_1, \ldots, s_{l-1}\}$, jak również wykorzystanie naturalnej i sztucznej redundancji modułowej [20].

Wprowadzenie dodatkowych wejść testujących i punktów kontrolnych, jak również sztucznej redundancji modułowej wpływa na zmianę całkowitego kosztu diagnozy.

Zatem poszukiwana jest modułowa struktura układu cyfrowego N, dla której całkowity koszt diagnozy z dokładnością do modułu, przy wykorzystaniu ww. środków podwyższania diagnozowalności, jest minimalny lub zbliżony do minimalnego.

Załóżmy, że dla rozważanego układu N dane są wyniki modelowania uszkodzeń przedstawione w formie tablicy uszkodzeń, w której wiersze przypisane są uszkodzeniom, a kolumny - testom.

Dla znalezienia optymalnego, w myśl powyższych warunków, przydziału elementów funkcjonalnych do modułów należałoby wygenerować wszystkie możliwe struktury modułowe układu N i określić dla nich procedury diagnostyczne np. metodą Change'a [25] czy Powella [64]. Jak okazuje się, już dla

średnio rozbudowanych układów - np. kilkanaście bramek, liczba możliwych modułowych struktur jest bardzo duża. Jeżeli czas obliczeń maszyny cyfrowej niezbędny do określenia zbioru testów diagnostycznych dla zadanego układu N i danej struktury-modułowej, zadanej klasy uszkodzeń itp. wynosi τ , to całkowity czas obliczeń t dla wybrania optymalnej struktury modułowej dany jest zależnością

$$t_{ob} = r \cdot \tau + \tau', \tag{4.1}$$

gdzie:

r - liczba możliwych struktur modułowych dla układu N,

τ' - dodatkowy czas obliczeń wynikający m.in. z konieczności wyboru rozwiązania o minimalnym koszcie diagnozy.

Dla przykładu układ cyfrowy N o 40 bramkach - elementach funkcjonalnych i zbiorze modułów, z których każdy zawiera 4 bramki, posiada około $3{,}54 \cdot 10^{27}$ różnych przydziałów elementów funkcjonalnych do modułów. Jeżeli przyjąć czas $\tau = 1$ s, to całkowity czas obliczeń t ma przybliżoną wartość $t = 3{,}54 \cdot 10^{27}$ s. Przy dopuszczeniu możliwości uzupełniania zbioru obserwowalnych wyjść o dodatkowe punkty kontrolne i wejść układu o dodatkowe wejścia testujące oraz wykorzystując redundancję modułową - czas obliczeń rośnie wielokrotnie.

Jeżeli przyjmiemy, że dany układ cyfrowy N jest zbudowany z r typów elementów funkcjonalnych, zgrupowanych w modułach (po m_i w każdym module), zaś liczba elementów i-tego rodzaju, $i = 1,2,\ldots,r$, w układzie wynosi n_i oraz że w układzie nie wystąpi redundancja modułowa, to liczba różnych struktur modułowych R układu N wyliczona może być z zależności:

$$R = \prod_{i=1}^{r} \frac{(n_i)!}{k_i!\,(m_i!)^{k_i}}, \tag{4.2}$$

gdzie:

$k_i = \frac{n_i}{m_i}$ - liczba modułów i-tego rodzaju.

Zależność 4.2 została ustalona w oparciu o rozumowanie przedstawione poniżej.

Jeżeli układ N zrealizowany jest z r typów elementów funkcjonalnych zgrupowany w r-typach modułów (zał.) odpowiednio po m_i w module i-tego typu, to elementy odrębnych typów tworzą oddzielne podstruktury modułowe tego układu. Wynika to z założenia, że element funkcjonalny i-tego typu nie może być przyporządkowany modułowi j-tego typu, jeżeli $i \neq j$.

Zatem liczba struktur modułowych R wyrażona będzie iloczynem liczb podstruktur modułowych, zawierających elementy funkcjonalne i moduły jednego rodzaju, czyli:

$$R = \prod_{i=1}^{r} R_i, \tag{4.3}$$

gdzie:

R_i - liczba podstruktur modułowych i-tego rodzaju.

Z kolei wartości R_i dla i-tego rodzaju elementów i modułów wyliczy się wg następującego rozumowania.

Każda z podstruktur modułowych i-tego rodzaju zawiera zawiera wszystkie n_i elementów. Jeżeli poszczególne elementy oznaczymy liczbami od 1 do n_i, to przykładowa podstruktura i-tego rodzaju jest przedstawiona na rys. 4.2.

$$\underbrace{|1,\ 2,\ 3,\ 4|}_{\bar{m}_i}\ \underbrace{|\ 5,\ 6,\ 7,\ 8|}_{\bar{m}_i}\ \underbrace{|\ 9,\ 10,\ 11,\ 12|}_{\bar{m}_i}\ \ldots.\ n_i\ |$$

Rys. 4.2. Przykładowa podstruktura modułowa i-tego rodzaju

Liczba podstruktur i-tego rodzaju R_i jest równa liczbie permutacji elementów i-tego rodzaju $n_i!$ podzielonej przez liczbę permutacji modułów $k_i!$ oraz liczba permutacji elementów we wszystkich k_i modułach, tzn. $(m_i!)^{k_i}$. Bowiem zarówno permutacja modułów - zmiana numeru porządkowego modułu, jak i permutacja elementów wewnątrz modułów - zmiana numeru porządkowego elementu wewnątrz modułu, nie wpływa na zmianę podstruktury modułowej, zaś wszystkie te przypadki mają odbicie w mianowniku wyrażenia na R_i.

$$R_i = \frac{n_i!}{k_i!(m_i!)^{k_i}} \tag{4.4}$$

Przedstawione powyżej rozważania dla prostoty dotyczę przypadków,w których w poszczególnych modułach występują elementy funkcjonalne jednego typu. Generalnie w pracy niniejszej nie wprowadza się tego ograniczenia.

W tablicy 1 zamieszczono przykładowe liczby struktur modułowych dla układów zrealizowanych z jednego typu elementów funkcjonalnych i modułów. Stąd też przy oznaczeniach poszczególnych wielkości pominięto indeks i.

Tablica 1

Przykładowe liczby struktur modułowych układów N
zrealizowanych z n elementów funkcjonalnych zgrupowanych po m elementów w module

n	m	2	3	4	5	6	8	9	10	15	18	20	25
6		15	10										
8		105		35									
10		945			126								
12	$\times 10^3$	10,3	15,4	5,7		0,46							
15	$\times 10^6$		1,4		0,12								
18	$\times 10^6$	34,4	190			2,85		0,024					
20	$\times 10^9$	6,54	2,54		0,48				0,00009				
30		$6,1.10^{15}$	$1,2.10^{18}$			$1,1.10^{17}$			$9,2.10^{11}$	$7,7.10^7$			
40		$3,1.10^{23}$	$3,5.10^{27}$		$4,7.10^{26}$		$6,3.10^{22}$		$1,9.10^{20}$			$6,8.10^{10}$	
50		$5,8.10^{31}$			$1,3.10^{37}$				4.10^{29}				$6,3.10^{13}$

5. PODSTAWY TEORETYCZNE PROJEKTOWANIA MODUŁOWYCH STRUKTUR UKŁADÓW CYFROWYCH O ZADANYCH PARAMETRACH DIAGNOSTYCZNYCH

5.1. Podstawowa metoda przydziału elementów funkcjonalnych

Podstawowa metoda przydziału elementów funkcjonalnych tworzących układ N do modułów przeznaczonych do jego technicznej realizacji -π-procedura - obejmuje przypadek równości liczby elementów $B_i^s \in B$ i $B_i^s \in M$, czyli liczby elementów niezbędnych do realizacji danego układu i liczby elementów znajdujących się w modułach przeznaczonych do realizacji tego układu.

Procedura ta z uwagi na jej uniwersalność i elastyczność będzie w dalszej części pracy wykorzystywana po odpowiednich modyfikacjach do rozwiązania wielu różnych przypadków przydziału.

Zakłada się, że podział na bloki w procedurze π odbywa się w oparciu o zbiory testów T_k i dodatkowych punktów kontrolnych P_k.

Koncepcja π-procedury polega na odpowiednim wykorzystaniu metod wyboru testów diagnostycznych dla diagnozy z dokładnością do tzw. hipotetycznego modułu. Jako hipotetyczny moduł przyjmuje się element funkcjonalny lub makroelement (por. 5.4.3).

5.1.1. Kryteria podziału zbioru uszkodzeń

Celem stosowania π-procedury jest uzyskanie przydziału elementów funkcjonalnych $B_i^s \in B$ do modułów $M_u \in M$, tzn. uzyskanie struktury modułowej S_i układu N o minimalnym lub bliskim minimalnemu koszcie diagnozy K_i.

Analizując definicję kosztu diagnozy dla przypadku omawianej procedury, zauważyć można, że przy podziale dąży się do rozróżniania bloków uszkodzeń związanych z hipotetycznymi modułami za pomocą minimalnych zbiorów testów diagnostycznych i zbiorów dodatkowych punktów kontrolnych, przy czym naczelnym zadaniem jest uzyskanie rozwiązania o minimalnej wartości kosztu diagnozy.

Zakładając rekurencyjną organizację π-procedury, bardzo ważnym problemem jest ustalenie kryterium wyboru testów wchodzących do zbioru T_k i dodatkowych punktów kontrolnych wchodzących do zbioru P_k.

Wskaźnik, w oparciu o który będą wybierane w kolejnych etapach procedury testy i dodatkowe punkty kontrolne powinien uwzględniać właściwości rozróżniające pary "test - punkt kontrolny" odniesione do kosztu wprowadzenia tej pary.

Dla wyboru zbiorów testów diagnostycznych dla zadanej struktury modułowej podano w literaturze, m.in. przez Changa [25],[27] i Powella [64], wskaźniki pozwalające w sposób optymalny w kolejnych krokach procedury wybierać testy. Wskaźniki te - wagi przedstawiają wyrażenia (5.1) i (5.2)

$$w_j = \sum_{k=1}^{m} (n_{0_k} \cdot n_{1_k} - \sum_{s=1}^{r} n^s_{0_k} n^s_{1_k}), \tag{5.1}$$

gdzie:

n_{0_k} i n_{1_k} - odpowiednio liczba zer i jedynek w kolumnie tablicy uszkodzeń odpowiadającej j-temu testowi, należących do k-tego bloku wcześniej rozróżnionych uszkodzeń,

$n^s_{0_k}$ i $n^s_{1_k}$ - odpowiednio liczba zer i jedynek w kolumnie tablicy uszkodzeń odpowiadającej j-temu testowi, należących do k-tego bloku wcześniej rozróżnionych uszkodzeń, lecz dodatkowo związanych z s-tym modułem.

$$W_p = \frac{NW(0,0,\ldots,0)}{NT^{NFT}}, \tag{5.2}$$

gdzie:

NFT - liczba uszkodzeń rozpatrywanego układu N,

NW(0,0,...,0) - liczba sposobów rozdzielenia uszkodzeń związanych z poszczególnymi modułami w oparciu o NT kombinacji wyjściowych,

NT - liczba rozpatrywanych kombinacji wyjściowych układu N.

Wyliczenie wag probabilistycznych W_p testów (5.2), podanych przez Powella, jest skomplikowane. Wagi testów zaproponowane przez Changa w sensie oceny właściwości diagnostycznych poszczególnych testów w zasadzie pokrywają się z wagami probabilistycznymi Powella, będąc jednocześnie o wiele prostsze do wyliczenia.

Zdefiniowany przez autora niniejszej monografii [18] [19] [21] wskaźnik rozróżnialności (nierozróżnialności), pozwalający na ilościową ocenę struktury modułowej układu N pod kątem możliwości wskazania uszkodzonego modułu, jest bardzo dogodny dla określenia przydatności testu i punktu kontrolnego do podziału zbioru uszkodzeń F w procedurze $\mathfrak{T}$.

Rozróżnianie bloków uszkodzeń realizowane będzie w oparciu o obserwację właściwych wyjść układu N i dodatkowych punktów kontrolnych przy podawaniu określonych testów na wejścia tego układu. Zatem rozbicie na bloki F_1 odbywać się będzie nie tylko w oparciu o informację, czy dany test t_j "przeszedł" czy też "nie", lecz również w oparciu o kombinację wyjściową układu N dla tego testu.

Próba podziału zbioru F na bloki F_i - które połączone w sumy bloków $(\sum F)_p$ umożliwią rozdzielenie uszkodzeń związanych ze zbiorami elementów funkcjonalnych $B_i^s \in B$, odpowiadającymi w sensie ilościowym i jakościowym (równość cech modułów i cech sum bloków) modułom $M_u \in M$ - powinna odbyć się w oparciu o te testy i dodatkowe punkty kontrolne, które umożliwiają maksymalne rozróżnienie zbiorów uszkodzeń związanych z pojedynczymi elementami funkcjonalnymi lub z góry zadeklarowanymi makromodułami (por. 5.4.3).

W oparciu o przytoczone powyżej rozumowanie dla wyboru w k-tym kroku π-procedury pary "test - dodatkowy punkt kontrolny" lub jednego z nich zaproponowano wskaźnik jakości J_k:

$$J_k = \frac{\Delta n_k(t_1, p_r)}{w_1(t_1)_k + w_2(p_r)_k} \tag{5.3}$$

gdzie:

$n_k(t_1, p_r)$ - przyrost liczby par uszkodzeń rozróżnianych przez wprowadzenie w k-tym kroku π-procedury pary test t_1 - punkt kontrolny p_r lub jednego z nich.

Z kolei $w_1(t_1)_k$ i $w_2(p_r)_k$ oznaczają odpowiednio koszt wprowadzenia testu t_1 i punktu p_r, przy czym

$$w_1(t_1)_k = \begin{cases} w_1, & \text{jeżeli} \quad t_1 \notin T_{k-1} \\ 0, & \text{jeżeli} \quad t_1 \notin T_{k-1} \end{cases} \tag{5.4}$$

$$w_2(p_r)_k = \begin{cases} w_2, & \text{jeżeli} \quad p_2 \notin P_{k-1} \\ 0, & \text{jeżeli} \quad p_r \in P_{k-1} \end{cases} \tag{5.5}$$

Z kolei

$$n_k(t_1, p_r) = n_{k-1}(t_w, p_m) - n_k(t_1, p_r). \tag{5.6}$$

gdzie:

$n_k(t_1, p_r)$ - liczba par uszkodzeń rozróżniona w oparciu o T_k i P_k w k-tym kroku procedury π, jeżeli w tym kroku zostały wybrane t_1 - test i/lub p_r - punkt kontrolny

$$n_k(t_1, p_r) = \sum_{\psi=1}^{\psi_k} \sum_{i=1}^{I_k} \left[\binom{n}{2}^{i}_{\psi} - \sum_{q=1}^{Q_k} \binom{n}{2}^{iq}_{\psi} \right]. \tag{5.7}$$

gdzie:

m^{i}_{ϑ} - liczba kombinacji wyjściowych w tablicy uszkodzeń i-tego typu związanych z F_{ϑ},

m^{iq}_{ϑ} - liczba kombinacji wyjściowych i-tego typu w tablicy uszkodzeń, lecz związanych z q-tym elementem funkcjonalnym B^{s}_{q},

ϑ_k, I_k, Q_k - wartości graniczne wskaźników ϑ, i oraz q w k-tym kroku.

Zatem

$$J_k = \frac{\sum_{\vartheta=1}^{\vartheta_{k-1}} \sum_{i=1}^{I_{k-1}} \left[\binom{m^{i}_{\vartheta}}{2} - \sum_{q=1}^{k-1} \binom{m^{iq}_{\vartheta}}{2}\right] - \sum_{\vartheta=1}^{\vartheta_k} \sum_{i=1}^{I_k} \left[\binom{m^{i}_{\vartheta}}{2} - \sum_{q=1}^{Q_k} \binom{m^{iq}_{\vartheta}}{2}\right]}{w_1(t_1)_k + w_2(p_r)_k} \qquad (5.8)$$

Zdefiniowany powyżej wskaźnik jakości J_k pary "test - punkt kontrolny" jest dogodny dla oceny jej właściwości diagnostycznych w kolejnym k-tym kroku π-procedury, ponieważ jego wartość odpowiada dokładnie liczbie par uszkodzeń, które na pewno muszę być rozróżnione, odniesionej do kosztu wprowadzenia pary "test - punkt kontrolny" lub jednego z nich.

Dodatkową zaletę jest łatwość wyliczenia jego wartości (por. [21]).

Podział zbioru uszkodzeń F układu N odbywać się będzie stopniowo w kolejnych krokach π-procedury, przy czym bloki F_i będą sukcesywnie wydzielane ze zbioru F wg możliwości rozróżniania uszkodzeń, uzyskiwanych przez wprowadzanie par "test - punkt kontrolny" lub pojedynczo testów, albo punktów kontrolnych.

Miarą jakości struktur modułowych S_i w dalszych częściach niniejszej pracy będzie zdefiniowany wcześniej (def. 25) koszt diagnozy K_i praktycznie zawężony do postaci 5.9.

$$K_i = \sum_{j=1}^{4} w_j r_{ji}, \qquad (5.9)$$

gdzie:

r_{1i} - liczba testów w zbiorze testów diagnostycznych,

r_{2i} - liczba dodatkowych punktów kontrolnych (lub wyjść i dodatkowych punktów kontrolnych),

r_{3i} - liczba par nierozróżnialnych uszkodzeń związanych z różnymi modułami,

r_{4i} - liczba modułów sztucznej redundancji modułowej (SRM),

w_1-w_4 - odpowiednio koszty jednostkowe testu, punktu kontrolnego, pary nierozróżnialnych uszkodzeń i dodatkowego modułu SRM.

5.1.2. O r g a n i z a c j a p r o c e d u r y p o d z i a ł u

Organizacja podstawowej procedury podziału zbioru uszkodzeń F na bloki F_i, tworzące sumy bloków $(\Sigma F)_p$, dogodne do dokonania Λ -operacji bazuje na następujących założeniach:

a) przyjmuje się wskaźnik jakości J_k wg wyrażenia (5.3) jako adekwatny dla oceny właściwości diagnostycznych par "test - punkt kontrolny" w kolejnych krokach procedury; wybierana jest para lub jeden z jej elementów, tzn. test albo punkt kontrolny, której wartość wskaźnika J_k ma wartość maksymalną w danym k-tym procesie decyzyjnym,
b) Ω-operacja realizowana drogą lawinowego określania sum bloków zapewnia otrzymanie sum bloków o minimalnej liczbie bloków (por. tw. 5.1), co jest dogodne dla π-procedury z uwagi na zwiększenie prawdopodobieństwa możliwości dokonania Λ-operacji,
c) dla określenia wartości wskaźnika J_k wykorzystywana jest zmodyfikowana tablica uszkodzeń uwzględniająca kombinacje wyjściowe układu N,
d) jako hipotetyczne moduły przyjmuje się poszczególne elementy funkcjonalne $B_i^s \in B$.

Podstawowa procedura π umożliwia dokonanie podziału zbioru uszkodzeń na bloki, w oparciu o które można dokonać Λ -operacji, czyli przyporządkowania elementów funkcjonalnych do modułów w przypadku zgodności liczby i rodzajów elementów funkcjonalnych $B_i^s \in B$ i elementów zawartych w modułach $M_u \in M$. Nie występują również w tym przypadku ograniczenia na ilości testów i dodatkowych punktów kontrolnych, poza warunkami wynikającymi z minimalizacji kosztu diagnozy.

Organizacja procedury bazuje na warunkach dokonania Λ -operacji sformułowanych w tw. 5.1.

Tw. 5.1

Jeżeli nie jest możliwe wykonanie Λ -operacji w k-tym kroku procedury π w oparciu o proste sumy bloków $(\Sigma F)_i^*$ oraz o sumy bloków $(\Sigma F)_j = \bigcup_i \delta_i \sum_{F_i}^*$ gdzie $\delta_i = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$, to dokonanie Λ -operacji jest niewykonalne w oparciu o zbiory T_k i P_k.

Dowód

Warunkiem dokonania Λ -operacji jest, aby $\bigwedge_r \bigwedge_{M_u \in M} \bigvee_{\{u,r\}} (C_r^{\Sigma F} = C_u^m)$.

Wykonanie Λ -operacji może odbywać się jedynie w oparciu o sumy bloków $(\Sigma F)_r$, ponieważ, zgodnie z def. 13, zapewniają one odpowiedni rozdział wszystkich uszkodzeń przyporządkowanych poszczególnym elementom funkcjonalnym $B_i^s \in B$ lub zbiorom tych elementów. Proste sumy bloków $(\Sigma F)_p$ zawierają minimalne ilości bloków F_i, zgodne z def. 14.

Sumy bloków związane z większą liczbą elementów funkcjonalnych $B_i^s \in B$, a zatem i bloków F_i, można uzyskać wyłącznie drogą sumowania prostych sum bloków tzn.

$$(\Sigma F)_j = \bigcup_i \delta_i \Sigma F_i \quad \text{dla} \quad \delta_i = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$$

Jeżeli jednak cechy uzyskanych w powyższy sposób sum bloków lub prostych sum bloków nie są odpowiednio równe cechom modułów $M_u \in M$, to Λ-operacja, bazująca na zbiorach T_k i P_k, jest niewykonalna, ponieważ w k-tym kroku π-procedury nie ma możliwości otrzymania w oparciu o $\Gamma(F)\Big|_{P_k}^{T_k}$ innych bloków F_i niż rozważane, a zatem i sum bloków.

cbdo

Koszt diagnozy otrzymywanej w wyniku procedury π struktury modułowej S_i układu N jest ograniczony od góry. Ograniczenie to formułuje twierdzenie 5.2.

Tw. 5.2

Jeżeli strukturę modułową S_i układu N uzyskano drogą procedury π, to koszt diagnozy K_i dla tej S_i jest ograniczony od góry wartością $K_{i_G} = w_1 \cdot |T_k| + w_2 \cdot |P_k|$, gdzie k jest ostatnim krokiem π-procedury, w przypadku gdy liczba par nierozróżnialnych uszkodzeń związanych z różnymi modułami jest równa zero.

Dowód

Jeżeli strukturę modułową S_i układu N otrzymano w wyniku π-procedury po k krokach, tzn., że dokonano Λ-operacji w oparciu o sumy bloków uzyskane drogą operacji $\Gamma(F)\Big|_{P_k}^{T_k}$. Sumy bloków, w oparciu o które dokonano Λ-operacji, zawierają odpowiednio wszystkie uszkodzenia przypisane modułom $M_u \in M$. Zatem do zlokalizowania dowolnego uszkodzenia $f_i \in F$ z dokładnością do modułu M_u przy zbiorze obserwowalnych, dodatkowych punktów kontrolnych P_k, wystarcza zbiór testów T_k. Oznacza to, że koszt diagnozy K_i dla struktury modułowej S_i jest nie większy od wartości

$$K_{i_G} = w_1 \cdot |T_k| + w_2 \cdot |P_k| .$$

cbdo

Podstawowa π-procedura (opis)

Dane wejściowe: - Tablica uszkodzeń dla wyjść Z oraz punktów kontrolnych P,
- Zbiór modułów M; C_u^m; $M_u \in M$,

- Zbiór elementów funkcjonalnych B,
- Koszty jednostkowe w_1 i w_2.

1^o $k = 1$; $P_k = \phi$; $T_k = \phi$

2^o Wybór pary $\{t_1, p_r\}$ o maksymalnej wartości wskaźnika

$$J_k = \frac{\Delta n_k(t_1, p_r)}{w_1(t_1)_k + w_2(p_r)_k}$$

$$w_1(t_1)_k = \begin{cases} w_1; & \text{gdy} \quad t_1 \notin T_{k-1} \\ 0; & \text{gdy} \quad t_1 \in T_{k-1} \end{cases}$$

$$w_2(p_r)_k = \begin{cases} w_2; & \text{gdy} \quad p_r \notin P_{k-1} \\ 0; & \text{gdy} \quad p_r \in P_{k-1} \end{cases}$$

$$T_k := T_k + \{t_1\}$$

$$P_k := P_k + \{p_r\}$$

3^o $\Gamma(F)\Big|_{P_k}^{T_k} \Longrightarrow (F_i; \quad i = 1,2,\ldots,ii)$

4^o $\Omega \Longrightarrow \left[(\Sigma F)_v^*; \quad v = 1,2,\ldots,vv\right]$

5^o $\left[\bigwedge_{u\in U}\bigwedge_{v\in V}\bigvee_{\{u,v\}} (C_u^m = C_v^{\Sigma F*})\right] \Longrightarrow (\wedge \cap \text{GO TO } 7^o)$

ELSE

$$(\Sigma F)_c = \bigcup_{i=1}^{ii} (\Sigma F)_i^* \cdot \delta_i$$

$$\delta_i = \begin{cases} c=1; & 000\ldots01 \\ c=2; & 000\ldots10 \\ \vdots & \vdots \\ c=cc; & 111\ldots11 \end{cases}$$

6^o $\left[\bigwedge_{u\in U}\bigwedge_{v\in V}\bigvee_{\{u,v\}} (C_u^m = C_v^{\Sigma F})\right] \Longrightarrow (\wedge \cap \text{GO TO } 7^o)$

ELSE k=k+1 GO TO 2^o

7^{o} Wyprowadzenie wyników:

- przyporządkowanie elementów funkcjonalnych modułom $M_u \in M$,
- końcowe zbiory T_k i P_k,
- koszt diagnozy.

8^{o} STOP

Przedstawiona powyżej $\mathfrak{T}$ -procedura może być modyfikowana na szereg sposobów. Jako przykładowe wymienić można przypadki ograniczenia liczności zbioru T_k lub P_k, zadanie jednego z tych zbiorów czy też żądanie a priori grupowania niektórych elementów funkcjonalnych (rozdz. 5.4).

Poza tym procedura $\mathfrak{T}$ będzie wykorzystana jako element syntezy łatwo diagnozowalnych modułowych struktur w przypadkach występowania sztucznej i naturalnej redundancji modułowej (rozdz. 5.2 i 5.3).

5.1.3. Oszacowanie dokładności rozwiązania

Określenie czy uzyskany metodą $\mathfrak{T}$ podział sieci elementów funkcjonalnych na moduły jest optymalny lub oszacowanie odległości uzyskanego rozwiązania od optymalnego w ogólnym przypadku jest niezwykle trudne. Wynika to generalnie z nieznajomości rozwiązania optymalnego oraz dużych nakładów obliczeniowych związanych z koniecznością przeglądnięcia dużej liczby, a często wszystkich możliwych przyporządkowań elementów funkcjonalnych do modułów dla wyznaczenia optymalnej struktury modułowej.

Pewne oszacowanie dokładności rozwiązania, której miarą jest odległość zdefiniowana wyrażeniem 5.1.3.1, przedstawiono poniżej. Obejmuje ono przypadki podstawowe - podział na moduły z wyborem wyłącznie testów lub wyłącznie dodatkowych punktów kontrolnych, jak również przypadek złożony - podział na moduły z wyborem zbioru testów i dodatkowych punktów kontrolnych.

W ogólnym przypadku odległość danego rozwiązania, tzn. struktury modułowej S_i danego układu cyfrowego N, od struktury modułowej optymalnej S_{opt} (tzn. struktury, której koszt całkowity diagnozy K_i jest minimalny) może być zdefiniowany następująco:

$$K_i - K_{opt} = \Delta K_i = \sum_{j=1}^{J} (r_{ji} - r_{ji\ min}) w_j, \qquad (5.1.3.1)$$

gdzie:

ΔK_i - odległość struktur S_i i S_{opt} mierzona różnicą całkowitego kosztu diagnozy K_i i K_{opt},

r_{ji} - wielkość ujmujące ilościowo właściwości diagnostyczne S_i struktury modułowej (np. zbioru testów diagnostycznych, zbioru dodat-

kowych punktów kontrolnych, zbioru modułów redundancji sztucznej, liczbę par uszkodzeń nierozróżnialnych związanych z tymi samymi modułami itp.),

$r_{ji\ min}$ - minimalne wartości ww. wielkości umożliwiające Λ-operację,

w_j - koszt jednostkowy poszczególnych j-tych wielkości (waga).

Rozpatrzmy obecnie pierwszy z wymienionych powyżej podstawowych przypadków, tzn. podział na moduły z wyborem jedynie zbioru testów diagnostycznych.

Jeżeli założyć, że dla uzyskania możliwości wykonania Λ-operacji, czyli skojarzenia elementów funkcjonalnych tworzących dany układ N, z modułami poprzez stosowanie procedury π, niezbędny jest podział zbioru uszkodzeń F na m bloków, to minimalna liczba kroków k_{min} określona jest zależnością 5.1.3.2.

$$k_{min} = \begin{cases} \lg_2 m; & \text{gdy} \quad \lg_2 m \in LN \quad \text{(zbiór liczb naturalnych)} \\ E[\lg_2 m] + 1; & \text{gdy} \quad \lg_2 m \notin LN \end{cases} \tag{5.1.3.2}$$

Zależność 5.1.3.2 jest słuszna, gdy dane diagnostyczne, w naszym przypadku tablica uszkodzeń, zawierają informacje wyłącznie o "przechodzeniu" lub "nie przechodzeniu" poszczególnych testów, tzn. w przypadku gdy tablica uszkodzeń jest tablicą zerojedynkową.

Zależność ta wynika z liczby bloków rozróżnialnych za pomocą k_{min} zerojedynkowych informacji.

$$m \leq 2^{k_{min}} \tag{5.1.3.3}$$

Ponieważ rozpatrywany podstawowy przypadek dotyczy syntezy struktury modułowej z wyborem wyłącznie zbioru testów diagnostycznych, to miara odległości uzyskanej struktury modułowej S_i od S_{opt} jest dana wzorem 5.1.3.4.

$$\Delta K_i = K_i - K_{opt} = w_1(k - k_{min}), \tag{5.1.3.4}$$

gdzie:

k - liczba kroków π-procedury.

Jak łatwo zauważyć liczby kroków k i k_{min} są równe liczbom testów wybranych dla właściwego podziału zbioru F. Czyli:

$$K_i = w_1 \cdot \begin{cases} (k - \lg_2 m); & \text{gdy} \quad \lg_2 m \in LN \\ (k - E[\lg_2 m] - 1), & \text{gdy} \quad \lg_2 m \notin LN \end{cases} \tag{5.1.3.5}$$

Jako drugi podstawowy przypadek potraktować można podział układu N na moduły z zadanym zbiorem testów diagnostycznych, tzn. z wyborem tylko dodatkowych punktów kontrolnych.

Jeżeli przyjąć, że zadany jest zbiór testów diagnostycznych zawierający k testów, to dla rozróżnienia m bloków uszkodzeń (założenie jak wyżej) wymagany jest zbiór dodatkowych punktów kontrolnych o liczności r, spełniającej zależność 5.1.3.6.

$$m \leqslant 2^r \cdot 2^k \qquad (5.1.3.6)$$

Zatem

$$r \geqslant \lg_2 m - k \qquad (5.1.3.7)$$

Minimalna wartość $r = r_{min}$ podana jest zależnością 5.1.3.8 a ΔK_i zależnością 5.1.3.9.

$$r_{min} = \begin{cases} \lg_2 m - k; & m \in LN \\ E\left[\lg_2 m\right] + 1 - k; & m \notin LN \end{cases} \qquad (5.1.3.8)$$

$$K_i = w_2 \cdot \begin{cases} (r - \lg_2 m + k); & m \in LN \\ (r - E\left[\lg_2 m\right] - 1 + k); & m \notin LN \end{cases} \qquad (5.1.3.9)$$

Można rozpatrywać również przypadek syntezy łatwo diagnozowalnych modułowych struktur metodą π z wyborem testów i dodatkowych punktów kontrolnych. Wówczas żądana liczba rozróżnianych bloków uszkodzeń m będzie uzyskana przy wykorzystaniu k testów i r dodatkowych punktów kontrolnych, przy czym r i k spełniają zależność 5.1.3.6.

5.1.4. Wykorzystanie zbiorów roboczych testów i punktów kontrolnych do diagnozy

W dowodzie twierdzenia 5.2 zauważono, że po uzyskaniu możliwości przydziału elementów funkcjonalnych do modułów w wyniku π-procedury po jej k-krokach, zbiory "robocze" testów T_k i dodatkowych punktów kontrolnych P_k wystarczają do przeprowadzenia procesu diagnozy rozważanego układu N o strukturze modułowej S_i. Ponieważ jednak zbiory te były określone przez podejmowanie decyzji optymalnych w kolejnych krokach π-procedury ukierunkowanych na rozróżnienie domniemanych (hipotetycznych) modułów, zatem w niektórych przypadkach może okazać się, że dla diagnozy układu N o struk-

turze modułowej S_i wystarczają zbiory testów i dodatkowych punktów kontrolnych o liczności mniejszej niż końcowe zbiory robocze T_k i P_k.

Sposób wyboru zbioru testów i dodatkowych punktów dla zadanej struktury modułowej S_i i klasy uszkodzeń przedstawiony został w pracy [18] autora niniejszej rozprawy.

Pewną modyfikacją tego sposobu może być pełne wykorzystanie zasad wyboru dodatkowych punktów kontrolnych i testów stosowanych w π-procedurze.

Procedura wyboru zbioru testów diagnostycznych i dodatkowych punktów kontrolnych dla diagnozy układu N o strukturze modułowej S_i.

Dane wejściowe: - Tablica uszkodzeń dla wyjść $z_l \in Z$ i punktów kontrolnych $p_k \in P$;
- Przyporządkowanie uszkodzeń $f_i \in F$ modułom tworzącym układ N;
- Koszty jednostkowe w_1 i w_2.

1^o $k = 1$; $P_k = \phi$; $T_k = \phi$

2^o Wybór pary $\{t_l, p_r\}$ o maksymalnej wartości wskaźnika

$$J_k = \frac{\Delta n_k(t_l, p_r)}{w_1(t_l)_k + w_2(p_r)_k},$$

gdzie:

$$w_1(t_l)_k = \begin{cases} w_1; & \text{gdy} \quad t_l \notin T_{k-1} \\ 0; & \text{gdy} \quad t_l \in T_{k-1} \end{cases}$$

$$w_2(p_r)_k = \begin{cases} w_2; & \text{gdy} \quad p_r \notin P_{k-1} \\ 0; & \text{gdy} \quad p_r \in P_{k-1} \end{cases}$$

$$\Delta n_k(t_l, p_r) = n_{k-1}(t_w, p_m) - n_k(t_l, p_r)$$

$$n_k(t_l, p_r) = \sum_{\vartheta=1}^{\vartheta_k} \sum_{i=1}^{I_k} \left[\binom{m_i}{2^\vartheta} - \sum_{q=1}^{Q_k} \binom{m_{iq}}{2^\vartheta} \right]$$

gdzie:

n_k - liczba par uszkodzeń rozróżnialnych w k-tym kroku π -procedury w oparciu o T_k i P_k, przy czym w tym kroku wprowadzono t_l do T_k oraz p_r do P_k

$$T_k := T_k + \{t_1\}$$

$$P_k := P_k + \{p_r\}$$

3^0 $\Gamma(F)\Big|_{P_k}^{T_k} \Longrightarrow (F_i;\ i = 1,2,\ldots,ii).$

4^0 $\left[\bigwedge_{u\in U}\bigwedge_{i\in I}\bigvee_{\{u,i\}} F_i = F(M_u)\right] \Longrightarrow$

GO TO 5^0; ELSE k=k+1 GO TO 2^0

5^0 Wyprowadzenie wyników: końcowe zbiory T_k i P_k.

6^0 STOP

Przez $F(M_u)$ oznaczono w powyższej procedurze podzbiór zbioru F zawierający wszystkie uszkodzenia przypisane modułom $M_u \in M$.

Modyfikacje przedstawionej powyżej procedury, uwzględniające ograniczenia na liczności zbiorów dodatkowych punktów kontrolnych i testów, jak również zadanie jednego z ww. zbiorów, są analogiczne jak modyfikacje samej procedury przydziału przedstawione w rozdziale 5.4.

5.1.5. Podział z uwzględnieniem prawdopodobieństw występowania uszkodzeń

Zgodnie z przyjętymi w rozdziale założeniami, rozważania dotyczące podziału układu N na moduły z uwzględnieniem aspektów diagnostycznych prowadzone są w oparciu o tzw. prawdopodobne uszkodzenia elementów funkcjonalnych tworzących ten układ. Oznacza to, że niektóre uszkodzenia, które teoretycznie mogą wystąpić w układzie, są pomijane. Kryterium jakie w tym zakresie obowiązuje związane jest z prawdopodobieństwem wystąpienia danego uszkodzenia lub częstotliwością występowanie tego uszkodzenia.

Decyzje o tym, które uszkodzenia należy uwzględnić przy podziale układu N na moduły wg π -procedury podejmuje projektant układu, kierując się relacjami pomiędzy parametrami, takimi jak: p(t) - prawdopodobieństwo wystąpienie, λ - intensywność lub MTTFF (Mean Time To First Failure).

Jeżeli jednak wytypowanej do rozważań grupie uszkodzeń $F = \{f_1, f_2, \ldots, f_n\}$ można przypisać zbiór prawdopodobieństw ich wystąpienia w określonym czasie $P^* = \{p_1^*, p_2^*, \ldots, p_n^*\}$ i istnieją takie $i \neq j$, że $p_i^* \neq p_j^*$, to fakt ten może być wykorzystany przy podziale układu N na moduły z zadanymi wymaganiami diagnostycznymi.

Jeżeli π -procedura prowadzi do zadowalających rozwiązań, tzn. generuje przyporządkowanie elementów funkcjonalnych do modułów zapewniając minimalny lub mniejszy od zadanego koszt diagnozy z dokładnością do modułu, to problem różnic częstotliwości występowania wybranych, prawdopodobnych

uszkodzeń nie ma praktycznie znaczenia. Jest tak dlatego, ponieważ bloki nierozróżnialnych uszkodzeń zostają wówczas przyporządkowane oddzielnym modułom, czyli w przypadku wystąpienia dowolnego z prawdopodobnych uszkodzeń można jednoznacznie wskazać uszkodzony moduł.

Jeżeli natomiast w kolejnym kroku π -procedury nie uzyskuje się przyrostu $\Delta n_k(t_1,p_r)$, a nie można dokonać Λ -operacji z powodu zbyt licznych sum bloków, wówczas należy przy podziale na moduły uwzględnić prawdopodobieństwa czy częstotliwości występowania poszczególnych uszkodzeń.

W zasadzie nieistotne są tutaj bezwzględne wartości wymienionych wyżej miar, lecz ich relacje dla poszczególnych uszkodzeń. Jeżeli jednak wykorzystywałoby się prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzeń $p_i^*(t)$, to zwykle dla porównania ich wartości, za czas t podstawia się MTBF (Mean Time Between Failures) układu N, który można określić a priori znając strukturę tego układu oraz parametry niezawodnościowe jego komponentów.

Wykorzystanie różnych wartości prawdopodobieństw występowania poszczególnych uszkodzeń oparte jest na przedstawionym poniżej rozumowaniu, sformułowanym w postaci twierdzenia 5.3.

W wyniku π -procedury uzyskuje się sumy bloków

$$(\Sigma F)_p = \bigcup_i F_i = \bigcup_i \left\{f_j\right\}_i$$

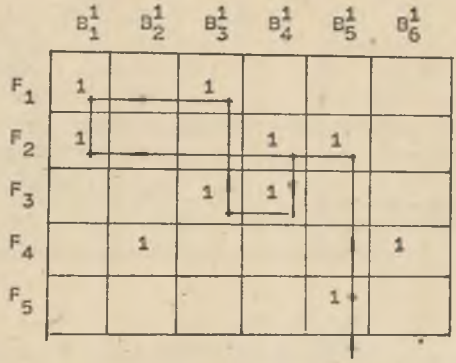
Tworzenie sumy bloków odbywa się poprzez Ω -operację. Jeżeli dla dokonania Λ -operacji w oparciu o daną sumę bloków należałoby usunąć z niej pewną liczbę elementów funkcjonalnych B_p^s poprzez usunięcie z tych sum uszkodzeń przypisanych im, to pozostawić w blokach F_i należy te uszkodzenia, których prawdopodobieństwa wystąpienia są największe.

Sumy bloków utworzone z uzyskanych w wyniku Γ-operacji bloków F_i z usunięciem uszkodzeń o najmniejszych wartościach prawdopodobieństw ich wystąpienia oznaczmy przez $(\Sigma F)_p$.

Strategii usuwania uszkodzeń o najmniejszych prawdopodobieństwach wystąpienia z bloków F_i może być wiele. Najprostsza polega na usunięciu z rozważanych bloków wszystkich uszkodzeń o jednakowych, najmniejszych wartościach prawdopodobieństw. Dalszy ciąg postępowania zgodnie z π-procedurą pozostaje niezmieniony.

Dla przykładu rozważmy Ω -operację dla k-tego kroku π-procedury, jeżeli przynależność uszkodzeń poszczególnych elementów funkcjonalnych B_i^s do bloków F_i przedstawia tabela z rys. 5.1. Wyraz w tej tablicy $a_{ij}=1$, jeżeli przynajmniej jedno uszkodzenie elementu B_i^s należy do bloku F_j. W przeciwnym przypadku $a_{ij} = 0$, co nie jest naniesione dla czytelności tablicy.

Jeżeli Ω -operację rozpocząć od bloku zawierającego najmniejszą liczbę elementów funkcjonalnych, co zgodne jest z zasadniczą strategią π -procedury - tworzenia najmniej licznych sum bloków, to otrzyma się sumy bloków:



Rys. 5.1. Tabela przynależności elementów funkcjonalnych B_i^s do bloków F_i

$$(\Sigma F)_1^* = \{F_5, F_2, F_3, F_1\}; \quad C_1^{\Sigma F^*} = \{(1,4)\}$$

$$(\Sigma F)_2^* = \{F_4\}; \quad C_2^{\Sigma F^*} = \{(1,2)\}$$

Rozważmy przypadek, w którym cechy modułów są dane: $C_1^m = \{(1,3)\}$; $C_2^m = \{(1,3)\}$; ... i kolejne kroki $\mathfrak{T}$ -procedury dają przyrost $\Delta n_k = 0$. W oparciu o sumę bloków $(\Sigma F)_1$ nie można dokonać Λ-operacji, ponieważ $C_1^{\Sigma F^*} > C_1^m$; $i = 1,2,...$

Jeżeli uwzględnić prawdopodobieństwa występowania uszkodzeń w określonym przedziale czasu np. dla $t = MTBF$ całego układu N, to z przynależności niektórych uszkodzeń do danych bloków można zrezygnować. Umożliwia to tworzenie nowych sum bloków i stwarza nowe możliwości wykonalności Λ -operacji.

Rozważmy przynależności elementów B_i^s do bloków F_1, F_2, F_3 i F_5 z rysunku 5.1, jeżeli prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzeń podano w tabeli na rys. 5.2.

Dla przykładowego czasu $t = MTBF$ (całego układu N) $= 10^4$ h przyjmijmy, że $p_1 = p_5 = p_6 = p_7 = 0{,}8 \cdot 10^{-2}$, $p_2 = p_3 = 0{,}05 \cdot 10^{-2}$ i $p_4 = 0{,}3 \cdot 10^{-2}$. Po pominięciu czynnika 10^{-2} otrzyma się tabelę b) pokazaną na rys. 5.2.

Zgodnie z najprostszą strategią należy usunąć "najsłabsze więzy" w poszczególnych blokach, tzn. pominąć uszkodzenia o prawdopodobieństwie $p_2 = p_3 = 0{,}05 \cdot 10^{-2}$ (por. rys. 5.2c).

a/

	B_1	B_3	B_4	B_5
F_1	p_1		p_3	
F_2	p_2			p_6
F_3		p_4	p_5	
F_5				p_7

b/

	B_1	B_3	B_4	B_5
F_1	0,8		0,05	
F_2	0,05			0,8
F_3		0,3	0,8	
F_5				0,8

c/

	B_1	B_3	B_4	B_5
F_1	1			
F_2				1
F_3		1	1	
F_5				1

Rys. 5.2. Tabela przynależności elementów funkcjonalnych B_i^s do bloków F_i z uwzględnieniem prawdopodobieństw wystąpienia uszkodzeń

Otrzymuje się teraz sumy bloków:

$$(\Sigma F)'_1 = \{F_2, F_5\}; \quad C_1^{\Sigma F'} = \{(1,1)\}$$

$$(\Sigma F)'_2 = \{F_1\}; \quad C_2^{\Sigma F'} = \{(1,1\}$$

$$(\Sigma F)'_3 = \{F_3\}; \quad C_3^{\Sigma F'} = \{(1,2)\}$$

$$(\Sigma F)^*_4 = \{F_4\}; \quad C_4^{\Sigma F^*} = \{(1,2)\}$$

Λ -operacja w tym przypadku jest możliwa i np. można otrzymać następujące przyporządkowanie elementów B_i^s modułom $M_u \in M$:

$M_1 = \{1, 3, 4\}$ w oparciu o sumę bloków:

$(\Sigma F)_1 = (\Sigma F)'_1 + (\Sigma F)'_3 = \{F_2, F_3, F_5\}$ o cenie

$C_1^{\Sigma F} = \{(1,3)\}$

oraz

$M_2 = \{2, 5, 6\}$ w oparciu o sumę bloków:

$(\Sigma F)_2 = (\Sigma F)'_2 + (\Sigma F)^*_4 = \{F_1, F_4\}$ o cesze

$c^{\Sigma F}_2 = \{(1,3)\}$

Łatwo oszacować, że prawdopodobieństwo wskazania niewłaściwego modułu w procesie diagnozy będzie nie większe niż $2 \cdot 0{,}05 \cdot 10^{-2}$, czyli 10^{-3} w okresie 10000 h pracy układu N.

Oznaczmy przez ST strategię usuwania uszkodzeń z bloków F_i o najmniejszych prawdopodobieństwach występowania.

Tw. 5.3

Jeżeli w wyniku π -procedury w kolejnych krokach nie uzyskuje się $\Delta n_k = n_{k-1} - n_k > 0$ i Λ-operacja w oparciu o $(\Sigma F)_i$ jest niewykonalna, to Λ-operacja dokonana w oparciu o $(\Sigma F)'_i$ utworzone w drodze Ω -operacji wg strategii ST, eliminującej pewną liczbę uszkodzeń o najmniejszych prawdopodobieństwach występowania, zapewnia uzyskanie struktury modułowej S_r o maksymalnej wartości prawdopodobieństwa wskazania w procesie diagnozy uszkodzonego modułu.

Dowód

W rozważanym przedziale czasu (0;t), zgodnie z wcześniejszymi założeniami, proces diagnozy dokonywany jest w przypadku wykrycia uszkodzenia w układzie N, z założonej klasy uszkodzeń m.in. pojedynczych uszkodzeń.

Załóżmy, bez utraty ogólności dowodu, że uszkodzenia uporządkowano wg wartości prawdopodobieństw p_i ich występowania, tzn. $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, \ldots f_u \ldots f_n$, przy czym

$$p_1 \geq p_2 \geq p_3 \geq p_4 \geq \ldots \geq p_u > \ldots \geq p_n$$

Jeżeli w kolejnym kroku π -procedury uzyskuje się $\Delta n_k = n_{k-1} - n_k = 0$ i nie można dokonać Λ -operacji oraz przyjęto strategię ST usuwania z bloków F_i uszkodzeń o najmniejszych prawdopodobieństwach i dokonywania Λ -operacji w oparciu o $(\Sigma F)'_v$; $v = 1,2,\ldots$, to uzyskana struktura modułowa S_r nie musi uwzględniać możliwości wystąpienia pewnej liczby uszkodzeń np. $f_{u+1}, \ldots, f_{n-1}, f_n$.

Zdarzenie E odpowiadające sukcesowi w procesie diagnozy, tzn. możliwości wskazania uszkodzonego modułu, jest dane zależnością: $E = E_1 \cup E_2 \cup \ldots \ldots \cup E_u$, gdzie E_u to zdarzenie polegające na wystąpieniu u-tego uszkodzenia. Prawdopodobieństwo $P^*(E)$ tego zdarzenia można obliczyć z podstawowego wzoru z zakresu probabilistyki dla małych wartości prawdopodobieństw p^*_i, a mianowicie:

$$P^*(E) = \sum_{i}^{u} P^*(E_i) - \sum_{i \neq j}^{u} \sum_{j}^{u} P^*(E_i \cap E_j) +$$

$$+ \sum_{i \neq j \neq m}^{u\,u\,u} P^*(E_i \cap E_j \cap E_m) + \ldots - 1^{(u-1)}\, P^*(E_1 \cap E_2 \cap \ldots \cap E_u)$$

Zgodnie z założeniem o jednokrotności uszkodzeń można przyjąć, że

$$P^*(E) = \sum_{i=1}^{u} P^*(E_i)$$

Ponieważ dotyczy to uszkodzeń od f_1 do f_u, których prawdopodobieństwa

$$p_i^* = P^*(E_i) \geqslant p_j^* = P^*(E_j)$$

dla $1 \leqslant i \leqslant u \qquad u < j \leqslant n$

i ponieważ strategia ST eliminuje z procesu decyzyjnego $\mathcal{A}$-procedury pewną liczbę $n-u$ uszkodzeń o najmniejszych prawdopodobieństwach wystąpowania, to

$$P^*(E) \geqslant P^*(E^*),$$

gdzie

$$E^* = \bigcup_{l} E_l,$$

przy czym $\forall l;\ u < l \leqslant n$ i liczba zdarzeń E_l jest równa u.

cbdo

5.2. Procedura przydziału z wykorzystaniem sztucznej redundancji modułowej (SRM)

Ze sztuczną redundancją modułową mamy do czynienia wówczas, gdy dla poprawy właściwości diagnostycznych układu cyfrowego N, projektant przeznaczył pewną liczbę dodatkowych modułów o cechach równych C_u^m; $M_u \in M$. Właściwe wykorzystanie tej redundancji modułowej, tzn. właściwy przydział elementów funkcjonalnych do modułów prowadzi zwykle do uzyskania struktury modułowej o podwyższonych właściwościach diagnostycznych.

Wprowadzenie tego typu nadmiaru nie obniża niezawodności całego układu N, a poprzez ułatwienie procesu diagnozy uszkodzeń i skrócenie MTR (średniego czasu naprawy) podwyższa wartość gotowości układu. Bowiem struktura funkcjonalna układu N - ilość i rodzaj elementów funkcjonalnych, liczba połączeń i warunki pracy pozostają bez zmian.

Jak wspomniano powyżej, wprowadzenie sztucznej redundancji modułowej może prowadzić do struktury modułowej S_i o niższym niż w przypadku jej braku całkowitym koszcie diagnozy K_i. W niektórych modułach $M_u \in M$ będzie wykorzystana tylko część elementów funkcjonalnych jakie one zawierają. Wzrost liczby nadmiarowych modułów, czyli wzrost R_D (por. def. 23) powyżej pewnej wartości prowadzi do obniżenie właściwości diagnostycznych struktury modułowej S_i układu N, czyli do wzrostu kosztu diagnozy K_i. Bowiem, w przypadku gdy każdy element funkcjonalny B_i^s należał będzie do oddzielnego modułu, który zawiera więcej niż jeden element funkcjonalny, diagnoza układu będzie przeprowadzana z dokładnością do pojedynczego elementu, a nie całego modułu. Spowoduje to konieczność wzrostu rozróżniania uszkodzeń i co za tym idzie wzrost liczności zbiorów testów i dodatkowych punktów kontrolnych, czyli całkowitego kosztu diagnozy.

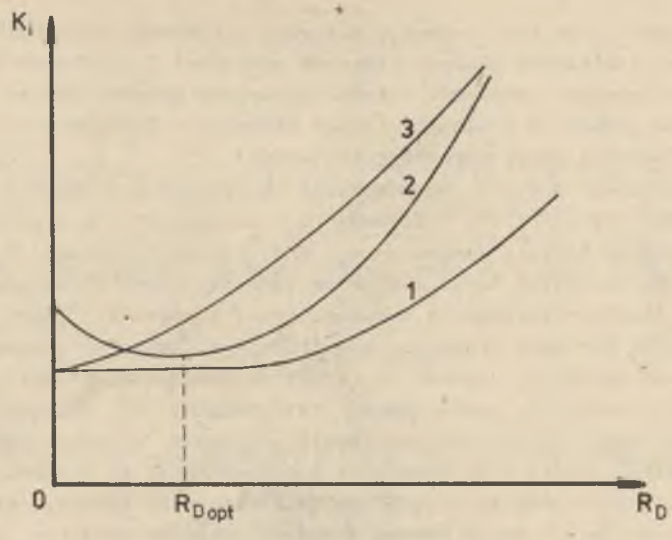
Przyjmijmy bez utraty ogólności, że dana jest struktura modułowa S_k, w której każdy moduł $M_u \in M$ ma wykorzystane wszystkie elementy funkcjonalne B_i^s. Strukturze S_k można przyporządkować koszt diagnozy K_k.

Wprowadzenie redundancji modułowej z $R_D = 1$, przy właściwym jej wykorzystaniu, może prowadzić do struktury S_p o koszcie $K_p \leqslant K_k$, ponieważ wydzielone przez zbiór testów diagnostycznych przy obserwacji wyjść i dodatkowych punktów kontrolnych bloki uszkodzeń F_i, a właściwie sumy bloków $(\Sigma F)_p$ mają wówczas nie mniejsze możliwości przydziału, przy czym ważnym jest, aby elementy funkcjonalne nie należące do tych samych sum bloków $(\Sigma F)_p$, w oparciu o które dokonuje się Λ-operacji, nie były we wspólnych modułach.

Wzrost redundancji modułowej do takich wartości, że $|M| = |B|$ spowoduje wydłużenie procesu diagnozy z powodu konieczności lokalizacji uszkodzenia praktycznie nie z dokładnością do modułu M_u, lecz elementu funkcjonalnego B_i^s. Ponieważ zbiory uszkodzeń związanych z modułami są bardziej liczne niż uszkodzeń związanych z elementami funkcjonalnymi, zatem złożoność procesu diagnozy spowoduje wzrost K_p, czyli $K_p > K_k$ (por. rys. 5.2.1).

Wniosek 5.1

Dla zadanego układu N, zadanego zbioru modułów M i zadanej klasy uszkodzeń istnieje optymalna liczba nadmiarowych modułów $R_D = R_{Dopt}$, dla której struktura $S_i = S_{opt}$. W szczególnym przypadku R_{Dopt} może być równe zero.



Rys. 5.2.1. Zależność kosztu diagnozy $K_i = f(R_D)$
1) przypadek, gdy istnieje $R_{Dopt} > 0$, 2) przypadek, gdy $R_{Dopt} \geq 0$,
3) przypadek, gdy $R_{Dopt} = 0$

Z rozważań przytoczonych powyżej wysnuć można jeszcze jeden wniosek (Wn. 5.2) bezpośrednio przydatny w procedurze określania łatwo diagnozowalnych struktur modułowych z wykorzystaniem sztucznej redundancji modułowej (SRM).

Wniosek 5.2

Jeżeli dysponuje się metodą określania optymalnych z punktu widzenia diagnostyki struktur modułowych, to wprowadzanie rekurencyjne nadmiaru modułowego $R_D = 1,2,3,\ldots$ ze sprawdzeniem dla każdej wartości R_D kosztu diagnozy i zakończeniem procedury w przypadku podwyższenia K_i dla $R_D = k$ jako najniższej wartości w przyjętym ciągu liczb naturalnych prowadzi do uzyskania S_{opt} z $^*R_{Dopt} = k - 1$.

Procedura określania S_{opt} z wykorzystaniem SRM

Podstawowa π -procedura obejmuje przypadek równości liczności elementów funkcjonalnych $B_i^s \in B$ tworzących zadany układ N oraz liczebności elementów zawartych w modułach $M_u \in M$ (por. 5.1).

W przypadku wykorzystania modułowej redundancji zachodzi konieczność dopuszczenia możliwości Λ -operacji, w przypadku gdy wszystkie sumy bloków, w oparciu o które dokonuje się próby kojarzenia elementów funkcjonalnych spełniają zależność: $C_u^m \geq C_v^{\sum F}$. Zatem Λ -operacja w przypadku wy-

korzystania SRM czy w ogóle RM (redundancji modułowej) będzie możliwe wówczas, gdy:

$$\bigwedge_{u\in U}\ \bigwedge_{v\in V}\ \bigvee_{\{u,v\}} C_u^m > C_v^{\sum F}$$

Przedstawiona poniżej procedura obejmuje podział układu N na moduły jednego typu z jednoczesnym wyznaczeniem optymalnej SRM, czyli R_{Dopt}. Oznacza to, że miarą jakości struktury będzie koszt diagnozy K_i wg wyrażenia 5.8, lecz dla $w_4 = 0$, czyli:

$$K_i = \sum_{i=1}^{3} w_j r_{ji},$$

co ujmuje liczebność testów, dodatkowych punktów kontrolnych i par nierozróżnialnych uszkodzeń związanych z różnymi modułami.

Szczególne przypadki $\mathfrak{A}$ -procedury w tym również z wykorzystaniem SRM przedstawiono w rozdziale 5.4.

Procedura

Dane wejściowe: - Tablica uszkodzeń dla wyjść Z i punktów kontrolnych P, dla elementów $B_i^s \in B$
- Zbiór modułów M; C_u^m, $M_u \in M$
- w_1, w_2, w_3

0^o $R_D = 0$;

1^o $k = 1$; $P_k = \phi$; $T_k = \phi$;

2^o Wybór pary $\{t_1, p_r\}$ o maksymalnej wartości

$$\max_{(1,r)} J_k = \max_{(1,r)} \frac{\Delta n_k(t_1,p_r)}{w_1(t_1)_k + w_2(p_r)_k}$$

$$T_k := T_k + \{t_1\}$$

$$P_k := P_k + \{p_r\}$$

3^o $\Gamma(F)\Big|_{P_k}^{T_k} \Longrightarrow (F_i: \quad i = 1,2,\ldots,ii)$

4^o $\Omega \Longrightarrow \left[(\Sigma F)_v^*; \quad v = 1,2,\ldots,vv\right]$

5^{o} $\left(\bigwedge_{u\in U}\bigwedge_{v\in V}\bigvee_{\{u,v\}} C_u^m \geqslant C_v^{\Sigma F^*}\right) \Longrightarrow (\wedge \cap$ GO TO $7^{o})$

ELSE

$$(\Sigma F)_c = \bigcup_{i=1}^{ii} (\Sigma F)_i^* \delta_i$$

$$\delta_i = \begin{cases} c=1; & 000 \ldots 01 \\ c=2; & 000 \ldots 10 \\ \vdots & \vdots \\ c=cc; & 111 \ldots 11 \end{cases}$$

AND GO TO 6^{o}

6^{o} $\left(\bigwedge_{u\in U}\bigwedge_{v\in V}\bigvee_{\{u,v\}} C_u^m \geqslant C_c^{\Sigma F}\right) \Longrightarrow (\wedge \cap$ GO TO $7^{o})$

ELSE $k=k+1$, GO TO 2^{o}

7^{o} $K_1(R_D) = \sum_{j=1}^{3} w_j r_{js}$

IF $(R_D=0)$ THEN $(R_D=R_D+1) \cap$ (GO TO 1^{o})

ELSE GO TO 8^{o}

8^{o} IF $\left[K_1(R_D) < K_1(R_D-1)\right]$ THEN $(R_D=R_D+1) \cap (M=M+M_u) \cap$ (GO TO 1^{o})

ELSE

$$R_{Dopt} = R_D - 1$$

GO TO 9^{o}

9^{o} Wyprowadzenie wyników:

- przyporządkowanie elementów funkcjonalnych modułom $M_u \in M$
- końcowe zbiory T_k i P_k
- koszt diagnozy K_1
- R_{Dopt}

10^{o} STOP

5.3. Procedura przydziału z wykorzystaniem naturalnej redundancji modułowej (NRM)

Z naturalną redundancją modułową (NRM) mamy do czynienia wówczas, gdy liczba l elementów funkcjonalnych B_i^e tworzących układ N jest mniejsza od liczby m elementów funkcjonalnych B_u^e zawartych w minimalnej liczbie modułów $M_u \in M$ niezbędnych do technicznej realizacji tego układu, tzn. gdy $l < m$.

Jeżeli układ N jest realizowany z modułów różnego typu, tzn.

$$(\bigvee_{M_u}\bigvee_{M_k} M_u, M_k \in M;\ C_u^m \neq C_k^m) \Longleftrightarrow \left[\bigvee_i (S_{ui} = S_{ki});\ (w_{ui} \neq w_{ki})\right],$$

to wystarcza, aby liczba elementów funkcjonalnych jednego typu w układzie N była mniejsza od liczby tych samych elementów w zbiorze modułów M.

Miarą naturalnej redundancji modułowej jest R_D, czyli liczba nadmiarowych elementów funkcjonalnych danego typu (def. 23).

Właściwe wykorzystanie NRM [13] prowadzić może do obniżenia kosztu diagnozy dla pewnych struktur S_i.

Procedura przydziału elementów funkcjonalnych tworzących układ N do modułów $M_u \in M$ z wykorzystaniem NRM bazuje prawie w zupełności na podstawowej metodzie przydziału, tj. $\mathfrak{T}$-procedurze. Jedyną różnicą jest kryterium wykonalności Λ-operacji - punkty 5^o i 6^o. Z wykorzystaniem NRM możliwe jest dokonanie Λ-operacji, jeżeli:

ad. pkt 5^o

$$(\bigwedge_{u\in U}\bigwedge_{v\in V}\bigvee_{\{u,v\}} C_u^m > C_v^{\sum F^*}) \Longrightarrow \Lambda$$

ad. pkt 6^o

$$(\bigwedge_{u\in U}\bigwedge_{v\in V}\bigvee_{\{u,v\}} C_u^m > C_v^{\sum F}) \Longrightarrow \Lambda$$

Procedura ta dotyczy przypadku realizacji układu N z dowolnego rodzaju elementów funkcjonalnych i modułów.

5.4. Szczególne przypadki procedury przydziału

Poniżej przedstawione zostaną możliwości wykorzystania metody w przypadku pewnych ograniczeń technicznych wynikających np. z ograniczenia liczby dodatkowych punktów kontrolnych związanych z liczbą wolnych pozycji na złączu karty urządzenia cyfrowego, ze wstępnego przydzielenie niektórych

elementów funkcjonalnych do wspólnych modułów wynikających z zagadnień rozmieszczenia lub trasowania obwodów drukowanych itp.

Rozważane w punktach 5.4.1 - 5.4.4 przypadki stanowią jedynie część możliwych modyfikacji metody przydziału π .Są one dowodem elastyczności i możliwości szerokiego zastosowania tej metody.

5.4.1. Procedura przydziału z ograniczeniami liczności zbioru testów diagnostycznych lub dodatkowych punktów kontrolnych

Przypadki ograniczenia liczności zbiorów testów diagnostycznych lub dodatkowych punktów kontrolnych są dosyć częste i wynikają głównie z pewnych uwarunkowań technicznych. Obok wspomnianego przypadku ograniczonej liczby niewykorzystanych do innych celów pozycji złącza karty, ograniczenie liczebności punktów kontrolnych może wynikać np. z formatu słowa testera wykorzystywanego do diagnozy uszkodzeń lub liczby możliwych do zamontowania poza złączem kołków diagnostycznych.

Liczność zbioru testów diagnostycznych może być ograniczona, obok szeregu innych powodów, ze względu na dopuszczalny czas wyłączenia danego układu z systemu, przy testowaniu "on line" np. periodycznym czy pseudoprzypadkowym.

Modyfikacja procedury

Jeżeli przyjmiemy, że ograniczona jest maksymalna liczba testów w zbiorze testów diagnostycznych i wynosi ona G, to rozważać należy wskaźnik J_k w następującej postaci:

$$J_k = \frac{\Delta n_k(t_1, p_r)}{w_1(t_1)_k + w_2(p_r)_k},$$

gdzie:

$$w_1(t_1)_k = \begin{cases} w_1; & t_1 \notin T_{k-1} \\ 0; & t_1 \in T_{k-1} \\ \infty; & |T_{k-1}| = G \end{cases}$$

$$w_2(p_r)_k = \begin{cases} w_2; & p_r \notin P_{k-1} \\ 0; & p_r \in P_{k-1} \end{cases}$$

Pozostałe etapy procedury π są niezmienione również w przypadkach wykorzystania różnych prawdopodobieństw uszkodzeń oraz SRM i NRM.

Jeżeli przyjmiemy, że ograniczona jest maksymalna liczność zbioru dodatkowych punktów kontrolnych i wynosi ona W, wówczas należy rozpatrywać wskaźnik J_k w postaci jak powyżej, przy czym wartości $w_1(t_1)_k$ oraz $w_2(p_r)_k$ określone są następująco:

$$w_1(t_1)_k = \begin{cases} w_1; & t_1 \notin T_{k-1} \\ 0; & t_1 \in T_{k-1} \end{cases}$$

$$w_2(p_r)_k = \begin{cases} w_2; & p_r \notin P_{k-1} \\ 0; & p_r \in P_{k-1} \\ \infty; & |P_{k-1}| = W \end{cases}$$

Podobnie jak w poprzednim przypadku i tutaj modyfikacja dotyczy wykorzystania różnych prawdopodobieństw uszkodzeń, SRM i NRM.

Jeżeli ograniczone będą liczności jednego i drugiego zbioru i wynosić będą odpowiednio G i W, wówczas wartości $w_1(t_1)_k$ i $w_2(p_r)_k$ są określone następująco:

$$w_1(t_1)_k = \begin{cases} w_1; & t_1 \notin T_{k-1} \\ 0; & t_1 \in T_{k-1} \\ \infty; & |T_{k-1}| = G \end{cases}$$

$$w_2(p_r)_k = \begin{cases} w_2; & p_r \notin P_{k-1} \\ 0; & p_r \in P_{k-1} \\ \infty; & |P_{k-1}| = W \end{cases}$$

Jeżeli wówczas w k-tym kroku π-procedury $\Delta n_k = 0$ i nie można dokonać Λ-operacji, to należy wykorzystać przypadek z różnymi prawdopodobieństwami występowania uszkodzeń.

Wersje z wykorzystaniem SRM i NRM pozostają niezmienione.

5.4.2. Procedura przydziału z zadanym zbiorem testów diagnostycznych albo dodatkowych punktów kontrolnych

Zadanie zbioru testów T_z dla celów diagnozy może mieć miejsce wówczas, gdy np. do testowania danego układu dopuszczalne jest użycie jedynie ograniczonego zbioru testów, przykładowo zbioru testów detekcyjnych. Rozróżnialność uszkodzeń żądaną dla diagnozy uzyskać można wówczas przez

wprowadzenie dodatkowych punktów kontrolnych. Zatem modyfikacja procedury przydziału sprowadzi się do:

- zmiany 1^o kroku $\mathfrak{A}$ procedury na

  1^o $k = 1$; $P_k = \phi$; $T_k = T_z$

- zmiany wskaźnika J_k na J_k^*

  $J_k^* = \Delta n_k(p_r) = n_{k-1}(p_m) - n_k(p_r)$.

Przypadek ten obejmuje również wykorzystanie różnych prawdopodobieństw występowania uszkodzeń oraz wykorzystanie SRM i NRM.

Zadanie z kolei zbioru dodatkowych punktów kontrolnych P_z jest równoznaczne z poszerzeniem liczby pierwotnych wyjść.

Modyfikacje metody przydziału obejmą zatem:

- zmianę 1^o kroku procedury na

  1^o $k = 1$; $P_k = P_z$; $T_k = \phi$

- zmianę wskaźnika J_k na J_k^*

5.4.3. Procedura przydziału z częściowo zadanym podziałem układu N

Jak wspomniano na wstępie rozdz. 5.4 częściowo zadany "a priori" podział układu N może mieć miejsce wówczas, gdy wynika to z pewnych uwarunkowań technicznych, lecz niekoniecznie mających związek z podziałem uwzględniającym aspekty diagnostyki.

Modyfikacja procedury będzie polegała na utworzeniu makroelementów funkcjonalnych $MB_i = B_1^e$ zawierających odpowiednio grupami elementy funkcjonalne, które muszą znaleźć się w jednym module.

Ilościowo i jakościowo makroelement funkcjonalny MB_i jest charakteryzowany przez cechę makroelementu C_i^{MB} zdefiniowaną analogicznie jak cecha modułu.

Rozwiązalność problemu przydziału wymaga, aby:

$$\bigwedge_i \bigvee_u C_i^{MB} \leqslant C_u^m \qquad (5.4.3.1)$$

Zatem modyfikacja $\mathfrak{A}$ -procedury będzie obejmowała:

- usunięcie ze zbioru B wszystkich elementów funkcjonalnych $B_i^e \in MB_1$,
- dopisanie do zbioru B z odrzuconymi powyżej elementami B_i^e makroelementów MB_1.

Przypadki objęte tą modyfikacją, to również wykorzystanie różnych prawdopodobieństw wystąpowania uszkodzeń oraz SRM i NRM.

5.4.4. Procedura przydziału z ograniczeniem liczebności nadmiarowych modułów SRM

Ograniczenie liczebności modułów SRM wynikać może np. z możliwości umieszczenia na danej karcie urządzenia, poza podstawowymi modułami, pewnej ściśle określonej liczby dodatkowych modułów.

W rozważanym tutaj przypadku wykorzystywana jest modyfikacja $\mathfrak{A}$ -procedury dla SRM (rozdz. 5.2).

Uwzględnienie ograniczenia na liczbę l dodatkowych modułów SRM spowoduje następujące modyfikacje procedury:

1^{o} $k = 1$; $P_k = \phi$; $T_k = \phi$

IF($R_D > l$) THEN $R_{Dopt} = l$, ELSE GO TO 2^{o}

Może zdarzyć się, że mimo dopuszczenia liczby dodatkowych modułów l optymalna SRM mierzona poprzez R_D będzie mniejsza od l.

6. OSZACOWANIE ZŁOŻONOŚCI OBLICZENIOWEJ π -PROCEDURY

Oszacowanie złożoności obliczeniowej π-procedury zostanie przeprowadzone w dwóch płaszczyznach, a mianowicie, po pierwsze dla porównania z procedurą wyboru optymalnej struktury poprzez przeglądanie wszystkich struktur modułowych i po drugie dla znalezienia zależności stopnia złożoności samej π-procedury od pewnych, charakterystycznych parametrów ujmujących ilościowo "rozmiary" układu N, zbioru uszkodzeń F, zbioru modułów itp.

Ad. 1

W rozdziale 4 niniejszego opracowania obliczono liczbę różnych struktur modułowych R -

$$R = \prod_{i=1}^{r} \frac{n_i!}{k_i!(m_i!)^{k_i}}$$

Załóżmy, że układ N jest zrealizowany z jednego rodzaju elementów funkcjonalnych. Wówczas wyrażenie powyższe przyjmie postać:

$$R = \frac{n!}{k!(m!)^k},$$

gdzie:

- n - liczba elementów funkcjonalnych tworzących układ N,
- m - liczba elementów funkcjonalnych w module,
- $k = \frac{n}{m}$ - liczba modułów.

Wybór optymalnej z punktu widzenia diagnostyki struktury modułowej, zgodnie z rozważaniami w rozdz. 4, polegałby na wygenerowaniu dla każdej możliwej struktury zbioru testów diagnostycznych i wyborze struktury o najmniej licznym zbiorze. Zatem pewną elementarną operację wyboru testów diagnostycznych przeprowadzoną np. metodą Changa, Powella lub Budki (rozdział 5.1.4) należałoby powtórzyć R razy.

Spróbujmy odnieść złożoność obliczeniową π -procedury do tej elementarnej operacji.

W sensie obliczeniowym w π -procedurze można wyróżnić dwa etapy, a mianowicie:

- wybór testów T_j o maksymalnych wartościach wskaźnika J_k, aż do wydzielenia odpowiednio małych grup uszkodzeń,
- Ω-operacje i tworzenie sum bloków $(\Sigma F)_c$.

Wybór testów T_j odbywa się metodą równoznaczną elementarnej operacji wyboru testów diagnostycznych, lecz nieco wydłużoną, ponieważ zwykle żąda się rozdzielenia zbioru uszkodzeń F na bloki F_i mniejsze niż podzbiory uszkodzeń przypisane poszczególnym modułom. Przyjmijmy najgorszy przypadek, tzn. że żąda się wydzielenia podzbiorów uszkodzeń przyporządkowanych elementom funkcjonalnym B_i^s. Oznacza to, przy przyjęciu równości liczby uszkodzeń należących do poszczególnych elementów B_i^s, wydłużenie elementarnej operacji o liczbę kroków rzędu $\lg_2 m$, co stanowi pewien procent elementarnej operacji. Załóżmy, że 100%.

Z kolei Ω -operacja i tworzenie sum bloków $(\Sigma F)_c$ polega na próbach łączenia bloków F_i w sumy dogodne do Λ-operacji. Przyjęliśmy poprzednio, że bloków jest średnio tyle, ile elementów funkcjonalnych, tzn. n. Zatem liczba operacji składania bloków, mniej więcej odpowiadających złożonością kolejnym etapom podstawowej operacji wyboru testów diagnostycznych, będzie nie większa niż 2^n. Odpowiada to mniej więcej elementarnej operacji wyboru zbioru testów diagnostycznych. Zatem złożoność obliczeniowa Z $\mathfrak{T}$ -procedury odniesiona do elementarnej operacji wyniesie:

$$Z \approx 1 + (1 + \frac{\lg_2 m}{\lg_2 n}) \leqslant 3$$

Można wykazać, że dla każdego $n \geqslant 6$ i $m \geqslant 2$

$$\frac{n!}{k!(m!)^k} > 3$$

Poniżej zamieszczono tablicę 6.1 przykładowych porównań złożoności obliczeniowej obydwóch metod.

Tablica 6.1

Złożoność $\mathfrak{T}$-procedury w odniesieniu do procedury wyboru zbioru testów diagnostycznych

	n = 12			n = 20			n = 50		
	m = 2	m = 3	m = 4	m = 2	m = 4	m = 10	m = 5	m = 10	m = 25
$\frac{n!}{k!(m!)^k}$	10395	15400	5775	65.10^8	25.10^9	92.10^4	13.10^{27}	4.10^{29}	63.10^{-13}
$\frac{\lg_2 m}{\lg_2 n} + 2$	$\leqslant 3$	$\leqslant 3$	$\leqslant 3$	$\leqslant 3$	$\leqslant 3$	$\leqslant 3$	$\leqslant 3$	$\leqslant 3$	$\leqslant 3$

Ad. 2

Analizując metodę przydziału elementów funkcjonalnych do modułów zauważyć można, że parametrami charakteryzującymi "rozmiar" problemu przydziału są:

- s - liczba prawdopodobnych uszkodzeń, czyli $|F|$,
- p - liczba testów, czyli $|T|$,
- l - liczba dodatkowych punktów kontrolnych $|P|$,
- u - ilość modułów $|M|$,
- n - liczba elementów funkcjonalnych,
- s_i, p_i - odpowiednio liczba uszkodzeń oraz testów dla i-tego punktu kontrolnego.

Złożoność obliczeniowa $\mathfrak{T}$ -procedury jest wprost zależna od nakładów na przeglądanie tablic uszkodzeń dla właściwych wyjść i dodatkowych punktów kontrolnych w celu obliczenia wskaźnika J_k dla poszczególnych par test-punkt kontrolny, Γ -operacji itp.

Dla uproszczenia przyjmijmy, że $s_i = s$ oraz $p_1 = p$. W rzeczywistości $s_i \leqslant s$ oraz $p_i \leqslant p$.

Przyjmijmy również, że dla dokonania Λ -operacji należy wydzielić r bloków F_i ze zbioru F. Wówczas:

$$r \leqslant 2^{2k};$$

gdzie k - liczba kroków $\mathfrak{T}$ -procedury, jeżeli w każdym kroku wybrano odpowiednie pary test-punkt kontrolny i gdy mamy do czynienia z O-1 tablicą uszkodzeń. Przyjmijmy, że

$$r = 2^{2k}, \quad \text{tzn.} \quad k = \tfrac{1}{2} \lg_2 r$$

Złożoność obliczeniowa Z może być zatem oszacowana następująco:

$$Z \approx s.p.(l+1) + s(p-1)l + s(p-2)(l-1) + \ldots + (p-k+1)(l-k+2)$$

Poszczególne iloczyny odpowiadają liczbie wyrazów przeglądanych tablic w kolejnych krokach $\mathfrak{T}$ -procedury od 1 do k-tego z wykorzystaniem tablic dla dodatkowych punktów kontrolnych, przy założeniu, że $s_i = s$, $p_i = p$ oraz że w każdym kroku procedury wybierana jest para test-punkt kontrolny.

$$Z \approx s.p(l+1) + s(p-1)l + \ldots + s(p-k+1)(l-k+2) \leqslant s.p(l+1)k$$

Z kolei

$$k = \tfrac{1}{2} \lg_2 r$$

Złożoność obliczeniowa π-procedury w funkcji "rozmiarów" układu N

n	l \ p \ s	64			128			256			1024			
		4	8	12	8	12	16	12	16	20	16	20	24	
12	24	13,7	24,8	35,8	49,6	71,6	93,6	143	187	231	748	925	1101	$\times 10^3$
	48	27,5	49,6	71,6	99,1	143	187	186	374	462	1498	1850	2202	
	96	55,0	99,1	143	198	286	374	572	748	925	2995	3700	4405	
24	48	35,2	63,4	91,5	126	183	239	366	478	591	1915	2366	2817	$\frac{\times 10^3}{\times 10^6 *}$
	96	70,4	126	183	253	366	478	732	957	1183	3831	4732	5634	
	192	140	253	366	507	732	958	1464	1915	2366	7662	9465	11,2*	
48	96	85,8	154	223	308	446	583	892	1167	1441	466	576	6,86*	$\frac{\times 10^3}{\times 10^6 *}$
	192	171	308	446	617	892	1167	1784	2333	2882	933	11,5	13,7	
	384	343	617	892	1285	1784	2333	3568	4666	5764	18,7	23,1	27,4	
96	192	202	364	526	728	1051	1375	2104	2751	3398	11,0	13,6	16,2*	$\frac{\times 10^3}{\times 10^6 *}$
	384	404	728	1051	1456	2103	2751	4207	5502	6797	22,0	27,2	32,4	
	768	809	1456	2103	2912	4207	5502	8415	11,0*	13,6*	44,0	54,4	64,7	
	384	0,47	0,84	1,21	1,68	2,42	3,17	4,85	6,34	7,83	25,3	31,3	37,3	$\times 10^6$
	768	0,93	1,68	2,42	3,35	4,85	6,34	9,69	12,7	15,6	50,7	62,6	74,6	
	1536	1,86	3,35	4,85	6,71	9,69	12,6	19,4	25,3	31,3	101	125	149	

Czyli

$$Z < \frac{1}{2} s.p(l+1)\lg_2 r.$$

a ponieważ zwykle $r \leqslant n$, więc $Z \leqslant \frac{1}{2} s.p(l+1)\lg_2 n$.

Jest to oczywiście bardzo zgrubne oszacowanie. Może jednak ono z powodzeniem być wykorzystane dla porównania nakładów obliczeniowych przy stosowaniu $\mathfrak{T}$ -procedury, dla układów o różnym stopniu złożoności.

Przykładowe porównania zawiera tablica 6.2.

Dane w tej tablicy dobrano w ten sposób, aby uwidocznić wzrost złożoności obliczeniowej wraz z powiększaniem rozmiarów układu N, czyli ze wzrostem n-liczby elementów funkcjonalnych. Rzecz jasna, że liczba prawdopodobnych uszkodzeń s oraz liczba testów są zwykle dość ściśle związane z n, choć w sposób trudny do ujęcia jakościowego i ilościowego. Pewne oczywiste relacje pomiędzy tymi parametrami zachowano w tablicy 6.2.

Przyjęta w punkcie 2 elementarna operacja oszacowania jest wielokrotnie prostsza, w sensie złożoności obliczeniowej, niż podstawowa operacja wyboru testów diagnostycznych wykorzystana w punkcie 1 oszacowania.

7. PRZYKŁADY

Celem niniejszego rozdziału jest zilustrowanie, przedstawionej w rozdziałach 3, 4 i 5 metodyki syntezy łatwo diagnozowalnych modułowych struktur układów cyfrowych, prostymi przykładami dotyczącymi rzeczywistych układów i rzeczywistych problemów związanych z podziałem zbioru elementów funkcjonalnych na moduły. Zilustrowanie to, w intencji autora, powinno wyjaśnić Czytelnikowi szereg szczegółów procedur przydziału i w związku z tym dotyczy ono prostych układów, dla których informacja diagnostyczna - tablice uszkodzeń, mogę być śledzone w sposób "ręczny", aczkolwiek z dość dużym nakładem pracy.

Przykład 7.1

Dla układu cyfrowego z rys. 7.1.1 złożonego z sześciu elementów funkcjonalnych - bramek NAND B_1 - B_6, dla założonej klasy uszkodzeń najbardziej prawdopodobnych, pojedynczych, typu s-z-0 i s-z-1 wyjść poszczególnych elementów funkcjonalnych, znaleźć optymalny z punktu widzenia diagnostyki z dokładnością do modułu, podział układu na moduły:

a) M_1; $C_1^m = \{(1,2)\}$;

M_2; $C_2^m = \{(1,2)\}$;

M_3; $C_3^m = \{(1,2)\}$;

b) M_1; $C_1^m = \{(1,3)\}$;

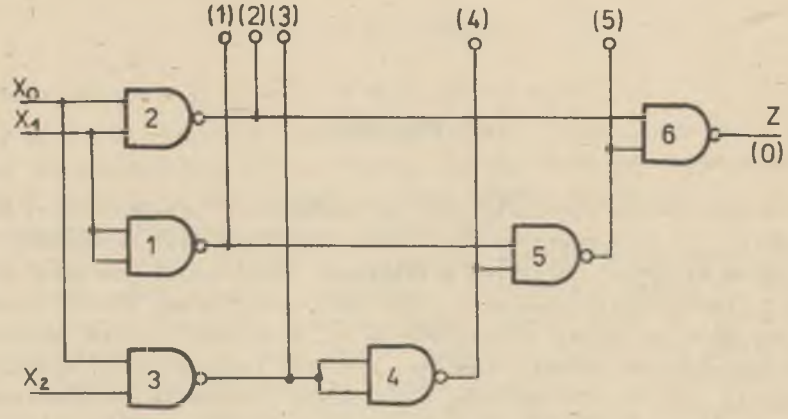
M_2; $C_2^m = \{(1,3)\}$;

Koszt wprowadzania do zbioru testów diagnostycznych testu wynosi $w_1 = 1$, zaś koszt wprowadzenia dodatkowego punktu kontrolnego $w_2 = 2$.

Jako dodatkowe punkty kontrolne wykorzystać można wyjścia wszystkich elementów funkcjonalnych.

Założyć jednakowe prawdopodobieństwa występowania uszkodzeń z założonej klasy.

Nie ma ograniczeń odnośnie do dopuszczalnego zbioru testów.



Rys. 7.1.1. Układ cyfrowy N z przykładu 7.1

Rozwiązanie

Zgodnie z powyżej sformułowanym zadaniem zbiory dopuszczalnych testów T i dodatkowych punktów kontrolnych P są określone następująco:

$$T = \{t_0, t_1, t_2, \ldots, t_7\},$$

gdzie indeks testu odpowiada wartości numerycznej dziesiętnej kombinacji wejściowej $x_2\, x_1\, x_0$;

$$P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\} \text{ - por. rys. 7.1.}$$

Tablica uszkodzeń dla pierwotnego wyjścia Z oraz dodatkowych punktów kontrolnych $p_k \in P$ została przedstawiona na rys. 7.1.2.

W tablicy uszkodzeń w kolumnie f_i umieszczono kolejne numery uszkodzeń $i = 1,2,\ldots,12$. Elementy tablicy 0, 1, 2, 3, 4, 5 określają punkt kontrolny - 0 - właściwe wyjście oraz dodatkowe punkty kontrolne 1, 2, 3, 4 i 5, na których dane uszkodzenie f_i jest wykrywane przez test, tj.

Ze względu na jednakowe prawdopodobieństwa występowania uszkodzeń f_i oraz brak ograniczeń liczności zbiorów T i P jak również brak NRM jak i wstępnego przydziału, rozwiązanie zadania sprowadza się do zastosowania ogólnej $\mathfrak{T}$ -procedury. Poszczególne etapy procedury przedstawiono poniżej.

k = 1

W pierwszym kroku obliczyć należy wskaźnik

$$J_1 = \frac{\Delta n_1(t_1, p_r)}{w_1(t_1)_1 + w_2(p_r)_1},$$

B_i	s-z	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	f_i
B_1	0	1	1			1	015			1
	1			015	15			1	1	2
B_2	0	02	02	02		02	2	02		3
	1				02				02	4
B_3	0	0345	0345	0345	0345	0345		0345		5
	1						0345		34	6
B_4	0						045		4	7
	1	045	045	045	45	045		045		8
B_5	0	05	05	05	5	05		05	5	9
	1						05			10
B_6	0				0		0		0	11
	1	0	0	0		0		0		12

Rys. 7.1.2. Tablica uszkodzeń dla układu N z przykładu 7.1

gdzie

$$\Delta n_1(t_1,p_r) = n_0 - n_1(t_1,p_r)$$

dla

$$1 \in \{0,1,2,\ldots,7\}$$
$$r \in \{1,2,3,4,5\}$$

Z kolei n_0 - oznacza początkową liczbę par uszkodzeń jakie należałoby zgodnie ze strategią $\mathfrak{A}$ -procedury rozróżnić. Jest ona wyznaczona z zależności:

$$n_0 = \binom{12}{2} - 6 \cdot \binom{2}{2} = 60,$$

ponieważ liczba wszystkich uszkodzeń wynosi 12, natomiast par uszkodzeń $\{f_1, f_2\}$; $\{f_3, f_4\}$; $\{f_5, f_6\}$; $\{f_7, f_8\}$; $\{f_9, f_{10}\}$ i $\{f_{11}, f_{12}\}$ nie trzeba rozróżniać. Rozpatrując pary $\{t_1; p_r\}$ dla $1 \in \{0,1,2,\ldots,7\}$ i $r \in \{1,2,\ldots,5\}$ oraz $\{t_1; Z\}$ znajduje się test o największej wartości wskaźnika J_1. Jest to test t_0, t_1, t_2, t_5 lub t_6.

Wartość wskaźnika $J_1(t_0) = \frac{60 - 30}{1} = 30.$

Wybrać można dowolny z testów t_0, t_1, t_2, t_5 lub t_6.

Wybierzmy test t_0.

Zbiór uszkodzeń F zostanie rozdzielony w wyniku Γ -operacji na dwa bloki uszkodzeń, a mianowicie:

$$f_1 = \{f_1, f_2, f_4, f_6, f_7, f_{10}, f_{11}\}$$

$$F_2 = \{f_3, f_5, f_8, f_9, f_{12}\}$$

Tablica przyporządkowań elementów funkcjonalnych $B_s \in B$ ujmujące przynależność uszkodzeń poszczególnych elementów do bloków F_1 i F_2 (rys. 7.1.3) wykazuje, że jedyna prosta suma bloków otrzymana w drodze Ω -operacji $(\Sigma F)_1^* = F_1 + F_2$, uniemożliwia dokonanie Λ -operacji, ponieważ

$$C_1^{\Sigma F *} = \{(1,6)\}$$

podczas, gdy $C_1^m = \{(1,2)\}$ lub $C_1^m = \{(1,3)\}$

	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
F_1	1	1	1	1	1	1
F_2		1	1	1	1	1

Rys. 7.1.3. Tablica przyporządkowań bloków uszkodzeń do elementów funkcjonalnych w pierwszym kroku $\mathfrak{T}$ -procedury

k = 2

W drugim kroku $\mathfrak{T}$ -procedury pozostało do rozróżnienia zgodnie ze strategią metody, $n_1(t_0) = 30$ par uszkodzeń.

Rozpatrzyć obecnie należy wskaźnik J_2 dla:

- testów t_l; $l \in \{1,2,3,4,5,6,7\}$
- punktów kontrolnych p_r; $r \in \{1,2,3,4,5\}$
- par $\{t_l; p_r\}$; $l \in \{1,2,3,4,5,6,7\}$; $r \in \{1,2,3,4,5\}$

Maksymalne wartości wskaźników J_2 uzyskuje się dla testów t_3 lub t_7, ponieważ

$$J_2(t_3) = \frac{n_1(t_0) - n_2(t_3)}{m_1} = \frac{30 - \left[\binom{5}{2} + \binom{2}{2} - 1 + \binom{5}{2}\right]}{} =$$

$$= 20 = J_2(t_7)$$

$$n_2(t_3) = \binom{5}{2} + \binom{2}{2} - 1 + \binom{5}{2} + 0,$$

przy czym poszczególne składniki tego wyrażenia przedstawiają kolejno:

$\binom{5}{2}$ - liczbę par uszkodzeń z bloku F_1,
których nie wykrywa test t_3

$\binom{2}{2}$ - liczbę par uszkodzeń z bloku F_1,
które wykrywa test t_3

1 - liczbę par uszkodzeń z bloku F_1, nie wykrywanych przez test t_3, których nie trzeba rozróżniać; są to uszkodzenia f_1 i f_2 przypisane elementowi funkcjonalnemu B_1

$\binom{5}{2}$ - liczbę par uszkodzeń z bloku F_2, które są wykrywalne przez test t_3

0 - liczbę par uszkodzeń z bloku F_2, które nie są wykrywane przez test t_2.

Po wyborze testu t_3 otrzymuje się trzy bloki uszkodzeń, a mianowicie

$$\Gamma(F)\Big|_{P_2}^{T_2} \Longrightarrow F_1 = \{f_1, f_2, f_6, f_7, f_{10}\}$$
$$F_2 = \{f_4, f_{11}\}$$
$$F_3 = \{f_3, f_5, f_8, f_9, f_{12}\}$$

gdzie:

$$T_2 = \{t_0, t_3\}$$

oraz

$$P_2 = \phi$$

Tablica przyporządkowań elementów funkcjonalnych do bloków uszkodzeń w drugim kroku $\mathfrak{T}$-procedury przedstawiona jest na rys. 7.1.4.

W wyniku Ω-operacji utworzyć można jedną prostą sumę bloków:

$$(\Sigma F)_1^* = F_1 + F_2 + F_3$$

o cesze $C_1^{\Sigma F^*} = \{(1,6)\}$

	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
F_1	1		1	1	1	
F_2		1				1
F_3		1	1	1	1	1

Rys. 7.1.4. Tablica przyporządkowań bloków uszkodzeń do elementów funkcjonalnych w drugim kroku π-procedury

Zatem w drugim kroku π -procedury Λ -operacja jest niewykonalna ze względu na to, że

$$C_1^{\Sigma F} > C_u^{\blacksquare}; \quad u = 1,2,3 \quad \text{przypadek a}$$

$$u = 1,2 \quad \text{przypadek B}$$

k = 3

W trzecim kroku π -procedury wybrany zostaje test t_4 o wartości wskaźnika $J_3(t_4) = 6$. Λ-operacja również w tym kroku jest niewykonalna.

k = 4

W czwartym kroku π -procedury zostaje wybrany test t_5 o wartości wskaźnika $J_4(t_5) = 4$.

Tablica przyporządkowań elementów funkcjonalnych do bloków uszkodzeń przedstawiona jest na rysunku 7.1.5.

	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
F_1	1		1	1	1	
F_2	1					
F_3		1				
F_4						1
F_5		1	1	1		
F_6					1	1

Rys. 7.1.5. Tablica przyporządkowań w czwartym kroku π-procedury

Λ-operacja również w tym kroku jest niewykonalna.

k = 5

W piątym kroku $\mathfrak{A}$ -procedury wybrany zostaje dodatkowy dodatkowy punkt kontrolny p_5 o wartości wskaźnika:

$$J_5(p_5) = \frac{10 - 3}{2} = 3,5$$

W wyniku Γ -operacji względem zbiorów $T_5 = \{t_0, t_3, t_4, t_5\}$ oraz $P_5 = \{p_5\}$ otrzymuje się dziewięć bloków uszkodzeń:

$$F_1 = \{f_2\}$$
$$F_2 = \{f_6, f_7\}$$
$$F_3 = \{f_1, f_{10}\}$$
$$F_4 = \{f_4\}$$
$$F_5 = \{f_{11}\}$$
$$F_6 = \{f_3\}$$
$$F_7 = \{f_5, f_8\}$$
$$F_8 = \{f_9\}$$
$$F_9 = \{f_{12}\}$$

oraz tablicę przyporządkowań bloków uszkodzeń elementom funkcjonalnym przedstawioną na rys. 7.1.6.

W wyniku Ω -operacji otrzymuje się 4 proste sumy bloków:

$$(\Sigma F)^*_1 = F_1 + F_3 + F_8: \quad C^{\Sigma F^*}_1 = \{(1,2)\}$$
$$(\Sigma F)^*_2 = F_2 + F_7: \quad C^{\Sigma F^*}_2 = \{(1,2)\}$$
$$(\Sigma F)^*_3 = F_4 + F_6: \quad C^{\Sigma F^*}_3 = \{(1,1)\}$$
$$(\Sigma F)^*_4 = F_5 + F_9: \quad C^{\Sigma F^*}_4 = \{(1,1)\}$$

	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
F_1	1					
F_2			1	1		
F_3	1				1	
F_4		1				
F_5						1
F_6		1				
F_7			1	1		
F_8					1	
F_9						1

Rys. 7.1.6. Tablica przyporządkowań bloków uszkodzeń elementom funkcjonalnym w piątym kroku π -procedury

Przypadek a

Λ-operacja dla zbioru modułów $M = \{M_1, M_2, M_3\}$ o cechach $C_U^m = \{(1,2)\}$ prowadzi do następującej struktury modułowej:

$$M_1 = \{B_1, B_5\}$$

$$M_2 = \{B_3, B_4\}$$

$$M_3 = \{B_2, B_6\}$$

Przypadek b

Λ -operacja dla zbioru modułów $M = \{M_1, M_2\}$ o cechach $C_U^m = \{(1,3)\}$ prowadzi do jednej z następujących struktur:

$$S_1: \quad M_1 = \{B_1, B_5, B_2\}$$

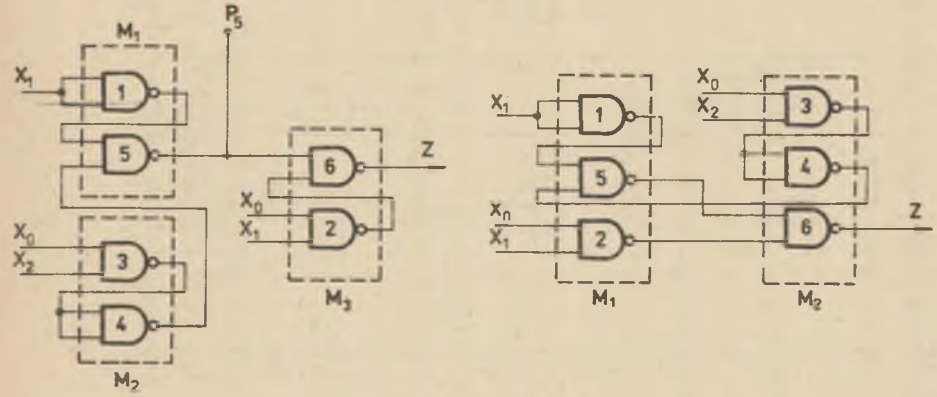
$$M_2 = \{B_3, B_4, B_6\}$$

lub

$$S_2: \quad M_1 = \{B_1, B_5, B_6\}$$

$$M_2 = \{B_3, B_4, B_2\}$$

Zarówno w przypadku a, jak i w przypadku b są to optymalne w sensie diagnostyki, przy sformułowanych powyżej założeniach, modułowe struktury układu cyfrowego N z rys. 7.1.1.



Rys. 7.1.7. Modułowe struktury układu N z rys. 7.1.1

Przykład 7.2

Dla układu cyfrowego z rys. 7.2.1 dokonać przydziału elementów funkcjonalnych (bramek) B_1, B_2, B_3 i B_4 do modułów M_1 i M_2 o cechach $C_1^m = C_2^m = \{(1,2)\}$. Jako zbiór prawdopodobnych uszkodzeń przyjąć sklejenia z zerem, sklejenia z jedynkę i zwarcia wejść poszczególnych elementów funkcjonalnych. Częstotliwości występowania uszkodzeń odniesione do wspólnej podstawy są następujące:

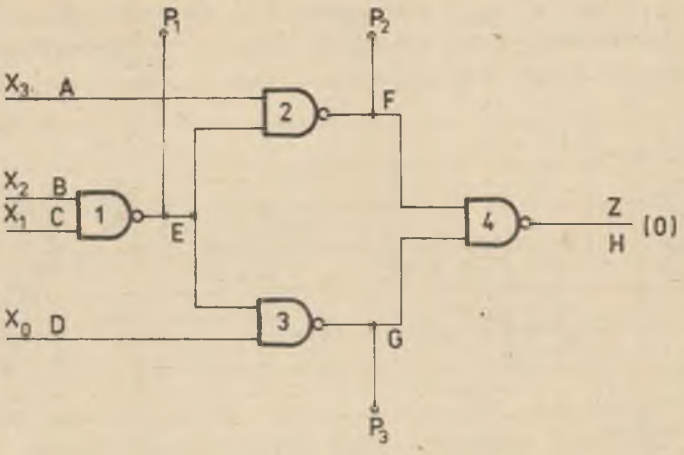
- sklejenie wejścia bramki z zerem; $p_1 = 0,01$
- sklejenie wejścia bramki z jedynkę; $p_2 = 0,1$
- sklejenie wyjścia bramki z zerem; $p_3 = 0,1$
- sklejenie wyjścia bramki z jedynkę; $p_4 = 0,9$
- zwarcie wejść bramki; $p_5 = 0,4$

Dopuszczalny zbiór testów $T = \{t_0, t_1, t_2, \ldots, t_{15}\}$.

Dopuszczalny zbiór punktów kontrolnych $P = \{p_1, p_2, p_3\}$.

Nie wprowadza się ograniczeń na liczność zbiorów P_k i T_k, natomiast ogranicza się koszt diagnozy. Maksymalna dopuszczalna wartość kosztu diagnozy dla podanych poniżej kosztów testu i dodatkowego punktu kontrolnego wynosi 8. Koszt testu $w_1 = 2$, zaś koszt dodatkowego punktu kontrolnego $w_2 = 3$.

Tablica uszkodzeń dla przyjętej powyżej klasy prawdopodobnych uszkodzeń, przy obserwacji pierwotnego wyjścia Z (oznaczenie w tablicy - "0") i dodatkowych punktów kontrolnych $p_1 \in P$ (l = 1,2,3 - oznaczenia w tablicy), przedstawiono na rys. 7.2.2. Puste kratki w tablicy wskazują,



Rys. 7.2.1. Układ cyfrowy N z przykładu 7.2

że dane uszkodzenie f_i nie jest wykrywane przez test t_j przy obserwacji właściwego wyjścia i dodatkowych punktów kontrolnych $p_l \in P$.

W tablicy uszkodzeń z rys. 7.2.2. A0 oznacza uszkodzenie typu s-z-0 przewodu A (por. rys. 7.2.1), A1 - s-z-1 przewodu A itd., 1z - zwarcie wejść bramki nr 1, 2z - bramki nr 2 itd.

Rozwiązanie

k = 1

W pierwszym kroku $\mathfrak{N}$ -procedury wybierany jest test $t_5 \in T$ o wartości wskaźnika:

$$J_1(t_5) = \frac{\binom{19}{2} - \binom{6}{2} + \binom{13}{2}}{2} = \frac{171 - 93}{2} = 43{,}5$$

Maksymalną wartość wskaźnika $J_1(t_1, p_r)$ uzyskuje się dla pary $\{t_6, p_3\}$ lecz wynosi ona zaledwie

$$J_1(t_6, p_3) = \frac{171 - 58}{2 + 3} = 22{,}6$$

W wyniku Γ -operacji - $\Gamma(F)\Big|_{P_1}^{T_1}$, gdzie:

$T_1 = \{t_5\}$ a $P_1 = \phi$ otrzymuje się dwa bloki uszkodzeń:
$F_1 = \{A0, B1, E0, F1, H0, 3z\}$
$F_2 = \{A1, B0, C0, C1, D0, D1, E1, F0, G0, G1, H1, 2z, 4z\}$

f_i \ t_j	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}	t_{13}	t_{14}	t_{15}
A0					02	02	02									
A1	02	02	02						2	2	2					
B0				1				012				013				0123
B1		1				012				013				0123		
C0				1				012				013				0123
C1			1				012				012				0123	
D0									03	03	03			3	3	
D1	03	03	03		3	3	3									
E0	1	1	1		012	012	012		013	013	013		013	0123	0123	
E1				1				120				130				0123
F0	02	02	02	02				02	2	2	2	02				02
F1					02	02	02						2	2	2	
G0	03	03	03	03	3	3	3	03				03				0
G1									03	03	03		3	3	3	
H0					0	0	0		0	0	0		0	0	0	
H1	0	0	0	0				0				0				0
2z	1	1	1						013	013	013					
3z	1	1	1		013	013	013									
4z					3	3	3		2	2	2					

Rys. 7.2.2. Tablica uszkodzeń dla układu z rys. 7.2.1; prawdopodobne uszkodzenia - s-z-0 i s-z-1 dowolnego punktu w układzie oraz zwarcia wejść bramek NAND

Uszkodzenie "1z" nie jest wykrywane przez żaden test, tzn. może być pominięte w dalszych rozważaniach.

W wyniku Ω -operacji otrzymuje się sumę bloków, w oparciu o którą nie można w tym kroku wykonać Λ -operacji.

k = 2

W drugim kroku π -procedury wybierany jest test t_0 o wskaźniku:

$$J_2(t_0) = \frac{93 - 48}{2} = 22,5$$

$J_2(t_1,p_r)$ przyjmuje maksymalną wartość dla pary $\{t_8,p_2\}$, lecz wynosi:

$$J_2(t_8,p_2) = \frac{93 - 34}{2 + 3} = 1,8$$

Λ -operacja również w tym kroku nie może być wykonana.

k = 3

W trzecim kroku π -procedury wybieramy jest test t_{10} o wartości wskaźnika:

$$J_3(t_{10}) = \frac{48 - 26}{2} = 11$$

$$\Gamma(F)\Big|_{P_3}^{T_3}$$

$F_1 = \{A0, B1, F1, 3z\}$

$F_2 = \{A1, D1, F0, G0, H1\}$

$F_3 = \{B0, C0, E1, 4z\}$

$F_4 = \{C1, D0, G1, 2z\}$

$F_5 = \{E0, H0\}$

Tablica przyporządkowań bloków uszkodzeń do elementów funkcjonalnych przedstawiona jest na rys. 7.2.3.

Λ -operacja również w tym kroku nie może być wykonana.

k = 4

W czwartym kroku π -procedury wybierany jest test t_{15} o maksymalnej wartości wskaźnika $J_4(t_1)$, a mianowicie:

F_r \ B_s	B_1	B_2	B_3	B_4
F_1	1	1	1	1
F_2	0	1	1	1
F_3	1	1	1	1
F_4	1	1	1	1
F_5	1	1	1	1

Rys. 7.2.3. Tablica przyporządkowań bloków uszkodzeń elementom funkcjonalnym w trzecim kroku π -procedury

$$J_4(t_{15}) = \frac{26 - 10}{2} = 8$$

$$\Gamma(F)\Big|_{P_k}^{T_4} \Longrightarrow F_1 = \{A0, B1, F1, 3z\}$$

$$F_2 = \{A1, D1\}$$

$$F_3 = \{B0, C0, E1\}$$

$$F_4 = \{C1, D0, G1, 2z\}$$

$$F_5 = \{E0, H0\}$$

$$F_6 = \{4z\}$$

$$F_7 = \{F0, G0, H1\}$$

Tablicę przyporządkowań bloków uszkodzeń elementom funkcjonalnym przedstawia rys. 7.2.4.

F_r \ B_1	B_1	B_2	B_3	B_4
F_1	1	1	1	1
F_2		1	1	
F_3	1	1	1	
F_4	1	1	1	1
F_5	1	1	1	1
F_6				1
F_7		1	1	1

Rys. 7.2.4. Tablica przyporządkowań bloków uszkodzeń elementom funkcjonalnym w czwartym kroku π -procedury

Jak łatwo zauważyć jedyna prosta suma bloków $(\Sigma F)_1^*$ ma cechę $c_1^{\Sigma F^*} = \{(1,4)\}$, co uniemożliwia wykonanie Λ-operacji w tym kroku π-procedury. Ponieważ jednak $T_4 = \{t_5, t_0, t_{10}, t_{15}\}$, zatem $|T_4| = 4$ i domniemany koszt diagnozy $K_1 = |T_4| w_1 = 8$. Oznacza to, że skojarzenie elementów funkcjonalnych musi odbyć się w czwartym kroku π-procedury.

W tym celu należy wykorzystać modyfikację π-procedury uwzględniającą prawdopodobieństwa (częstotliwości) występowania poszczególnych uszkodzeń (por. rozdz. 5.5.5).

Tablica przynależności bloków uszkodzeń do elementów funkcjonalnych z uwzględnieniem częstotliwości występowania poszczególnych uszkodzeń elementów funkcjonalnych jest przedstawiona na rys. 7.2.5.

F_r \ B_1	B_1	B_2	B_3	B_4
F_1	0,1	0,91	0,4	0,1
F_2		0,1	0,1	
F_3	0,92	0,1	0,1	
F_4	0,1	0,4	0,91	0,1
F_5	0,1	0,01	0,01	0,1
F_6				0,4
F_7		0,1	0,1	0,92

Rys. 7.2.5. Tablica przynależności bloków uszkodzeń do elementów funkcjonalnych w czwartym kroku π-procedury z uwzględnieniem częstotliwości występowania poszczególnych uszkodzeń

Przyjmując najprostszą strategię usuwania "więzów" w tablicy przynależności, polegającą na usuwaniu przynależności bloków uszkodzeń do elementów funkcjonalnych, których częstotliwości występowania są najmniejsze, otrzymuje się zmodyfikowaną tablicę przynależności (rys. 7.2.6), w oparciu o którą można wykonać Λ-operację.

W wyniku Ω-operacji otrzymuje się następujące proste sumy bloków:

$$(\Sigma F)_1^* = F_1 + F_4; \quad c_1^{\Sigma F^*} = \{(1,2)\}$$

$$(\Sigma F)_2^* = F_3; \quad c_2^{\Sigma F^*} = \{(1,1)\}$$

$$(\Sigma F)_3^* = F_6 + F_7; \quad c_3^{\Sigma F^*} = \{(1,1)\}$$

F_r \ B_1	B_1	B_2	B_3	B_4
F_1		1		
F_2				
F_3	1			
F_4		1	1	
F_5				
F_6				1
F_7				1

Rys. 7.2.6. Zmodyfikowana tablica przynależności bloków uszkodzeń do elementów funkcjonalnych w czwartym kroku Π-procedury, po odrzuceniu uszkodzeń, których częstotliwości wynosza 0,01 i 0,1

W oparciu o sumy blokow:

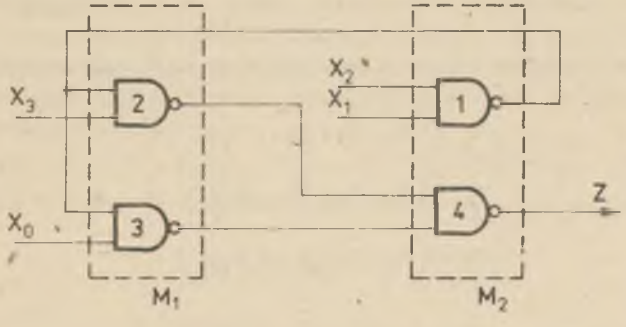
$$(\Sigma F)_1 = (\Sigma F)_1^* = F_1 + F_4; \quad C_1^{\Sigma F} = \{(1,2)\}$$

$$(\Sigma F)_2 = (\Sigma F)_2^* + (\Sigma F)_3^* = F_3 + F_6 + F_7; \quad C_2^{\Sigma F} = \{(1,2)\}$$

można wykonać Λ-operację, w wyniku której otrzymuje się następującą strukturę modułową:

$$M_1 = \{B_2, B_3\}$$

$$M_2 = \{B_1, B_4\}$$



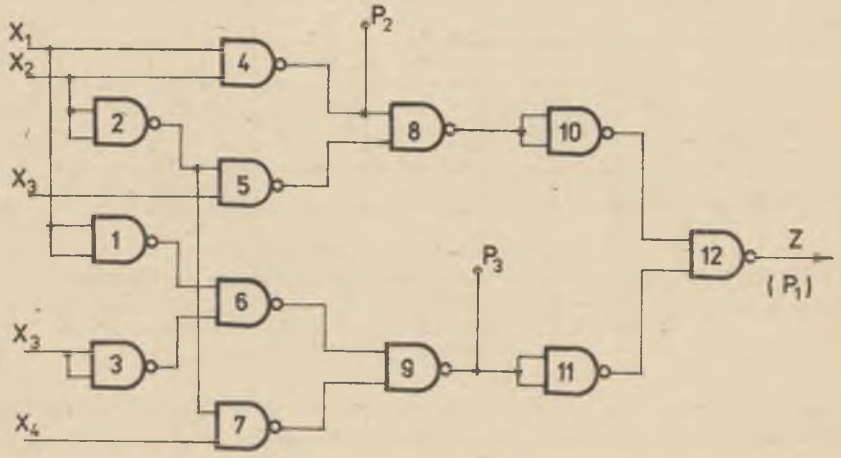
Rys. 7.2.7. Struktura modułowa układu N z rys. 7.2.1 uzyskana w wyniku Π-procedury po uwzględnieniu częstotliwości występowania uszkodzeń

Otrzymana powyżej struktura modułowa jest optymalną strukturą z punktu widzenia diagnostyki przy ograniczeniu hipotetycznego kosztu diagnozy i uwzględnieniu częstotliwości występowania uszkodzeń.

W przedstawionych poniżej przykładach 7.3 i 7.4, obok końcowej struktury modułowej, pokazano również wzrost kosztu diagnozy w przypadkach niewłaściwego podziału rozważanych układów na moduły.

Przykład 7.3

Dla układu N z rys. 7.3.1 określić łatwo diagnozowalną strukturę modułową. Rozważyć należy możliwość wystąpienia uszkodzeń typu wyjście elementu funkcjonalnego s-z-0 i s-z-1. Prawdopodobieństwa występowania wszystkich uszkodzeń są jednakowe. Koszty jednostkowe przyjąć jako $w_1 = 1$ i $w_2 = 5$. Zbiór dopuszczalnych punktów kontrolnych $P = \{p_1, p_2, p_3\}$, przy czym $p_1 = Z$. Zbiór modułów M zawiera trzy moduły M_1, M_2 i M_3 o cechach $C_1^m = C_2^m = C_3^m = \{(1,2)\}$.



Rys. 7.3.1. Schemat funkcjonalny układu N z przykładu 7.3

Uzyskana drogę $\mathfrak{T}$-procedury struktura modułowa S_1 jest następująca:

$$M_1 = \{B_4, B_5, B_8, B_{10}\}$$

$$M_2 = \{B_1, B_2, B_3, B_6\}$$

$$M_3 = \{B_7, B_9, B_{11}, B_{12}\}$$

Zbiory robocze testów $T_k = \{t_1, t_2, t_7, t_{10}\}$, punktów kontrolnych $P_k = \{p_3\}$, zatem koszt diagnozy $K_i = 4 \cdot 1 + 1 \cdot 5 = 9$ jednostek.
Dla sformułowanych w przykładzie warunków jest to struktura optymalna, tzn. taka, dla której $\Delta K_i = 0$.

Inna struktura modułowe S_j, w której w porównaniu z przedstawioną powyżej S_i zamieniono po jednym elemencie funkcjonalnym, tzn.

$$M_1 = \{B_1, B_2, B_3, B_4\}$$

$$M_2 = \{B_5, B_8, B_9, B_{10}\}$$

$$M_3 = \{B_6, B_7, B_{11}, B_{12}\}$$

ma koszt diagnozy $K_j = 5 \cdot 1 + 2 \cdot 5 = 15$, ponieważ:

$$T_k = \{t_1, t_2, t_4, t_7, t_{10}\}$$

$$P_k = \{p_2, p_3\}$$

Istnieje szereg innych struktur modułowych S_k, $k \neq i$, $k \neq j$, dla których po podaniu wszystkich testów ze zbioru T oraz obserwowaniu wszystkich punktów kontrolnych ze zbioru P, nie można zlokalizować uszkodzonego modułu, np.

$$M_1 = \{B_1, B_2, B_4, B_5\}$$

$$M_2 = \{B_3, B_6, B_8, B_{11}\}$$

$$M_3 = \{B_7, B_9, B_{10}, B_{12}\}$$

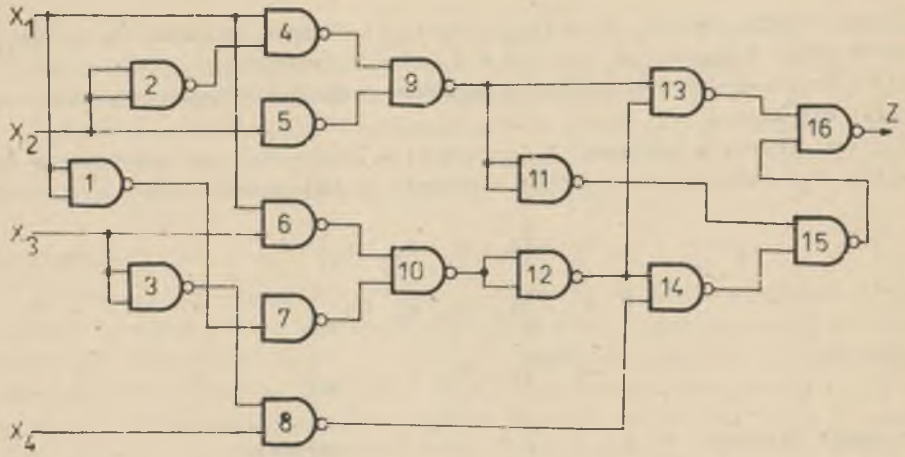
Przykład 7.4

Dla układu cyfrowego N z rys. 7.4.1 określić modułową strukturę S_i o minimalnym lub prawie minimalnym koszcie diagnozy. Rozważyć należy możliwość wystąpienia uszkodzeń typu wyjście elementów funkcjonalnych s-z-1 o jednakowych prawdopodobieństwach. Dopuszczalne jest obserwowanie wyłącznie pierwotnego wyjścia.
Zbiór modułów $M = \{M_1, M_2, M_3, M_4\}$; $C_1^m = C_2^m = C_3^m = C_4^m = \{(1,4)\}$.

Otrzymana w wyniku $\mathcal{T}$-procedury struktura S_i jest następująca:

$$M_1 = \{B_3, B_5, B_8, B_{13}\}$$

$$M_2 = \{B_4, B_6, B_7, B_{15}\}$$



Rys. 7.4.1. Schemat funkcjonalny układu cyfrowego N z przykładu 7.4

$$M_3 = \{B_1, B_2, B_{10}, B_{16}\}$$

$$M_4 = \{B_9, B_{11}, B_{12}, B_{16}\}$$

Zbiór roboczy testów $T_k = \{t_4, t_6, t_3, t_{12}\}$.
Otrzymana struktura modułowa jest optymalna tzn. $\Delta K_1 = 0$.
Dla innej przykładowej struktury modułowej S_j:

$$M_1 = \{B_1, B_2, B_3, B_4\}$$

$$M_2 = \{B_5, B_6, B_7, B_8\}$$

$$M_3 = \{B_9, B_{10}, B_{11}, B_{12}\}$$

$$M_4 = \{B_{13}, B_{14}, B_{15}, B_{16}\}$$

zbiór testów $T_k = \{t_2, t_3, t_4, t_6, t_7, t_{13}\}$.

Istnieją inne struktury modułowe S_k, $k \neq i$, $k \neq j$, dla których po podaniu wszystkich testów ze zbioru T_k w tym przypadku wszystkich kombinacji wejściowych, nie jest możliwe wskazanie uszkodzonego modułu, np.

$$M_1 = \{B_1, B_3, B_4, B_6\}$$

$$M_2 = \{B_2, B_6, B_7, B_8\}$$

$$M_3 = \{B_9, B_{10}, B_{11}, B_{12}\}$$

$$M_4 = \{B_{13}, B_{14}, B_{15}, B_{16}\}$$

Uwagi

Szereg dalszych przykładów ilustrujących poszczególne modyfikacje Σ-procedury zostało przedstawionych w pracach autora oraz pracach dyplomowych-magisterskich wykonanych na Politechnice Śląskiej pod kierunkiem autora. Potwierdzają one również celowość stosowania powyższych metod wstępnego przydziału elementów funkcjonalnych do modułów ze względu na fakt, że inne często przypadkowe przydziały związane są z dużymi kosztami diagnozy uzyskanych struktur modułowych lub znacznym obniżeniem ich diagnozowalności.

8. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Przedstawione w niniejszej monografii metody syntezy modułowych struktur układów cyfrowych o optymalnych lub żądanych właściwościach diagnostycznych wychodzą naprzeciw oczekiwaniom projektantów urządzeń i systemów cyfrowych, umożliwiając im w prosty sposób zapewnienie podwyższonych parametrów diagnostycznych projektowanych układów.

Sama istota poprawy właściwości diagnostycznych sprowadza się do określenia właściwej z punktu widzenia diagnostyki modułowej struktury układu cyfrowego, czyli przydziału elementów funkcjonalnych do modułów i deklaracji dodatkowych, obserwowalnych punktów kontrolnych. Nie przewiduje ona wprowadzania rzeczywistego nadmiaru funkcjonalnego dla poprawy tych parametrów. Zatem dla dowolnej struktury funkcjonalnej np. zawierającej minimalną liczbę elementów funkcjonalnych różnych typów lub minimalną liczbę elementów jednego rodzaju tworzących rozpatrywany układ, metoda prezentowana powyżej pozwala znaleźć łatwo diagnozowalną modułową strukturę.

Sama metoda wykorzystuje funkcjonalno-strukturalne właściwości układów cyfrowych, zatem może być stosowana dla dowolnego typu układów zrealizowanych z elementów dowolnego rodzaju, technologii i skali scalenia. Jest to podstawowa przewaga tej metody nad próbami podziału struktur funkcjonalnych na moduły sygnalizowanymi jedynie w literaturze i posiadającymi bardzo poważne ograniczenia np. możliwość zastosowania jedynie dla jednorodnych struktur lub struktur zrealizowanych z elementów NAND itp.

Organizacja proponowanych procedur syntezy struktur modułowych umożliwia ich stosowanie jako samodzielnych procedur podziału struktur funkcjonalnych na moduły lub jako procedur stanowiących etap w bardziej złożonych systemach projektowania urządzeń cyfrowych np. w powiązaniu z procedurami rozmieszczania i trasowania w systemie automatycznego projektowania pakietów urządzeń cyfrowych.

Elastyczność procedur podziału przejawia się w możliwościach wstępnej deklaracji niektórych przydziałów (makromoduły), deklaracji zbioru testów diagnostycznych lub dodatkowych punktów kontrolnych oraz ich liczności, jak również możliwości wykorzystania naturalnej lub sztucznej redundancji modułowej.

Procedury te są łatwe do zaprogramowania m.in. ze względu na ich rekurencyjny charakter.

Mogą one być stosowane na dowolnym poziomie systemowym, tzn. przy określeniu przyporządkowania elementów funkcjonalnych typu bramki czy przerzutniki do układów scalonych, przy określeniu podziału urządzenia na pa-

kiety, tzn. przyporządkowaniu układów scalonych do pakietów, przy określaniu podziału systemu na szafy itd.

W zasadzie w niniejszej monografii przedstawione metody dotyczą kombinacyjnych układów cyfrowych. Należy to rozumieć w ten sposób, że mogą one być wykorzystane dla innych układów, których schemat funkcjonalno-diagnostyczny może być sprowadzony do układu kombinacyjnego. Zatem mogą one z powodzeniem być wykorzystane dla cyfrowych układów sekwencyjnych dla przyjmowanego zwykle sposobu testowania, polegającego na rozcięciu pętli logicznych sprzężeń zwrotnych [9] [29] lub wprowadzeniu makrotestów - (sekwencje testów odpowiadające testom t_j dla testowania bloków przerzutników).

Z powodzeniem metody powyższe mogą być stosowane dla układów elektronicznych w ogóle, zawierających elementy o działaniu ciągłym jak i elementy cyfrowe. Dane wejściowe do procedury w tym przypadku obejmowały będą głównie zastępczy schemat funkcjonalno-diagnostyczny z wyszczególnieniem wejść, wyjść i dodatkowych, obserwowalnych punktów kontrolnych. Schemat ten musi być przedstawiony w formie blokowej bez pętli.

Obok dodatkowych wyjść przyjmowanych w diagnostyce dla ułatwienia testowania można również wykorzystywać dodatkowe wejścia, tzn. te zaciski wejściowe układu, na których mogą być wymuszone odpowiednie sygnały logiczne. Procedury przydziału proponowane w tej pracy dopuszczają taką możliwość; zbiór testów T zostaje w takim przypadku powiększony o dopuszczalne kombinacje na dodatkowych wejściach. Całość procedury pozostaje bez zmian.

Problem uszkodzeń wielokrotnych nie był rozważany w pracy z tego powodu, że jeżeli rozważany układ cyfrowy jest odpowiednio często testowany [30] lub np. zawiera wbudowane układy stałej kontroli [91], to prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzeń wielokrotnych jest znacznie mniejsze niż uszkodzeń jednokrotnych między innymi z powodu stosowanych współcześnie elementów chronionych poprzez swoją wewnętrzną strukturę przed lawinowymi uszkodzeniami (np. dopuszczenie wymuszenia zwarcia do masy wyjścia bramek TTL przez określony przedział czasu). Oczywiście abstrahuje się tutaj od grubych omyłek np. związanych z zasilaniem, które układami wbudowanej kontroli mogą być wykrywane niezależnie.

Jednakże sama procedura dopuszcza możliwość uwzględnienia uszkodzeń wielokrotnych przy podziale na moduły. Polega to na wprowadzeniu do zbioru uszkodzeń F obok pojedynczych uszkodzeń, par, trójek itd. uszkodzeń jakie mogą wystąpić w układzie z uwzględnieniem prawdopodobieństwa ich występowania. Następnie przy obliczaniu liczby par uszkodzeń rozróżnianych w danym etapie przez parę test - punkt kontrolny należy odpowiednio interpretować uszkodzenia pojedyncze i zbiory uszkodzeń wielokrotnych (pary, trójki...) zawierających te pojedyncze uszkodzenia, pary itp. Uwzględnianie jednak uszkodzeń wielokrotnych znacznie powiększyłoby złożoność obliczeniową procedury.

Szereg dalszych problemów naukowych dotyczących projektowania struktur modułowych o optymalnych lub zadanych parametrach diagnostycznych, wynika z modeli i metodyki zaprezentowanej w niniejszej pracy.

Problemy te stanowią tematykę prac naukowych grupy osób współpracujących z autorem. Są to m.in. problemy przydziału elementów funkcjonalnych do modułów dla uzyskania optymalnych struktur modułowych z punktu widzenia diagnozowalności lub testowalności na etapie uruchamiania układów cyfrowych, gdy dominującą klasą uszkodzeń są zwarcia ścieżek obwodów drukowanych po lutowaniu "na fali", lub inne określone uszkodzenia, powiązania procedur przydziału z uwzględnieniem aspektów diagnostyki z procedurami rozmieszczania i trasowania dla optymalnego zorganizowania systemu automatycznego projektowania konstrukcyjnego pakietów urządzeń cyfrowych, optymalizacji struktur modułowych z punktu widzenia minimalnego kosztu uruchamiania układów cyfrowych przy wykorzystaniu danego typu testera pakietów np. firmy Membrain, doboru optymalnego zbioru modułów dla łatwo diagnozowalnej realizacji zadanego układu cyfrowego, organizacji programów głównie firmware'u, umożliwiającej szybkie wykrycie, lokalizację uszkodzeń i odnowę (np. poprzez wykorzystanie rezerwy) w mikroprocesorowych systemach czasu rzeczywistego z fault-tolerant computing, wykorzystania procedur dla dowolnych układów elektronicznych w tym analogowych, implementacji metod przydziału do projektowania struktur układów scalonych, zapewniających żądane parametry diagnostyczne w kolejnych etapach testowania w cyklu ich wytwarzania itp.

Autor niniejszej rozprawy pragnąłby wyrazić swoje podziękowanie Panom Profesorom - Prof. zw. dr inż. Jerzemu SIWIŃSKIEMU oraz Prof. dr hab. inż. Antoniemu WOŹNIAKOWI za cenne uwagi i wskazówki, które zostały wykorzystane przy wykonywaniu i redagowaniu tej pracy.

9. LITERATURA

[1] Akers S.B. - Partitioning for Testability, Proc. of Fault Tolerant Comp. Conf. FTC 76, 1976.

[2] Akers S.B. - Binary Decision Diagrams, IEEE Trans. on Comp., vol. C-27, No 6, June 1978.

[3] Amar V., Condulmari N. - Diagnosis of Large Combinational Networks, IEEE Trans. on El. Comp., Oct., 1967.

[4] Barsi F., Grandoni F., Maestrini P. - Diagnosability of Systems Partitioned into Complex Units, Proc. of Fault Tolerant Comp. Conf., FTC 75, 1975.

[5] Barsi F., Grandoni F., Maestrini P. - A Theory of Diagnosability of Digital Systems, IEEE Trans. on Comp., vol. C-25, No 6, June, 1976.

[6] Batni R.P., Kime Ch.R. - A Module - Level Testing Approach for Combinational Networks, IEEE Trans. on Comp. vol. C-25, No 6, June, 1976.

[7] Bertrand J.C. - On the Partially On-line Diagnosis of Digital Systems. International Conference on Technical Diagnostics, Praha 1977.

[8] Breuer M.A., Chang S., Su S.Y.H. - Identification of Multiple Stuck - Type Faults in Combinational Networks, IEEE Trans. on Comp., vol. C-25, No 1, Jan., 1976.

[9] Breuer M.A., Friedman A.D.- Diagnosis and Reliable Design of Digitsl Systems, Comp. Science Press, 1976.

[10] Budka M. - Metoda doboru modułowej struktury układów cyfrowych zapewniająca największą rozróżnialność uszkodzonych modułów. Konf. naukowa nt. "Bezpieczne układy sterowania". Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Transport, T-3, Kielce 1975.

[11] Budka M. - Algorytm generowania łatwodiagnozowalnych modułowych struktur układów cyfrowych, Sympozjum "Organizacja maszyn cyfrowych i mikroprogramowanie", Polska Akademia Nauk, CO, Warszawa 1975, wydawnictwo książkowe PWN, tom II, 1977.

[12] Budka M. - Pewne problemy syntezy łatwodiagnozowalnych modułowych struktur układów cyfrowych, Międzynarodowe Sympozjum "Diagnostyka i niezawodność systemów cyfrowych", Katowice 1976.

[13] Budka M. - Synteza łatwodiagnozowalnych modułowych struktur układów cyfrowych, rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1976.

[14] Budka M. - Test Points Selection to Locate Failure Packages of Digital Circuits, International Conference on Technical Diagnostics, Praha 1977.

[15] Budka M., Langhamer D. - Procedures for the Design of Easy Diagnosable Module Structures of Logic Circuits, International Conference on Technical Diagnostics, Praha 1977.

[16] Budka M. - Wybrane zagadnienia syntezy łatwodiagnozowalnych modułowych struktur układów cyfrowych, Instytut Systemów Sterowania Katowice, komunikat nr 14, 1977.

[17] Budka M. - Optymalizacja modułowych struktur układów cyfrowych dla potrzeb diagnostyki, Konf. nt. "Bezpieczne układy sterowania - II, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Transport, T-6, 1977.

[18] Budka M. - The Method of Test-set and Test-points Selection for Diagnosis of Digital Circuits, International Conference "Fault Tolerant Systems and Diagnostics", FTSD-78, Gdańsk 1978.

[19] Budka M. - Podział sieci logicznej na moduły z uwzględnieniem aspektów diagnostyki, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka, nr 49, 1979.

[20] Budka M. - Optimization of Artificial Modulus Redundancy in the Synthesis of Easily Diagnosable Module Structures of Digital Circuits, International Seminar of Bulgarian Academy of Sciences on "Applied Aspects of the Automata Theory", Varna 1979.

[21] Budka M. - The Method of Digital Circuits Partitioning with Minimal of Near Minimal Cost of Diagnosis with Module Level, International Symposium Informatica 79, Bled 1979.

[22] Budka M. - O pewnej metodzie przydziału elementów funkcjonalnych, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka, nr 50, 1980.

[23] Budka M. - Rozdział: Testowanie układów cyfrowych w pracy zbiorowej pt. "Układy przełączające w automatyce przemysłowej w zadaniach". WNT, Warszawa 1981.

[24] Cerny E. - Controlability and Fault Observability in Modular Combinational Circuits, IEEE Trans. on Comp., vol. C-27, No 10, oct., 1978.

[25] Chang H.Y. - An Algorithm for Selecting an Optimum Set of Diagnostic Tests, IEEE Trans. on El. Comp., EC-14, No 5, 1965.

[26] Chang H.Y., Thomis W. - Methods of Interpreting Diagnostic Data for Locating Faults of Digital Machines, Bell System Technical Journal, 46 (2), 1967.

[27] Chang H.Y. - A Distinguishability Criterion for Selecting Efficient Diagnostic Tests, AFIPS Proc. of Spring Joint Computer Conf., 1968.

[28] Chang H.Y. - Figures of Merit for Diagnostics of Digital Systems, IEEE Trans. on Reliability, No 3, 1970.

[29] Chang H.Y., Manning E., Metze G. - Fault Diagnosis in Digital Systems, J.W., N.Y., 1970.

[30] Friedman A.D., Mennon P.R. - Wykrywanie uszkodzeń w układach cyfrowych, WNT, Warszawa 1974.

[31] Friedman A.D. - A New Measure of Digital System Diagnosis, Proc. of Fault Tolerant Comp. Conf., FTC 75, 1975.

[32] Fujiwara H., Kinoshita K. - Design of Diagnosable Machines Utilizing Extra Outputs, IEEE Trans. on Comp., No 2, 1974.

[33] Fujiwara H., Kinoshita K. - Connection Assignment for Probabilistically Diagnosable Systems, IEEE Trans, on Comp., C-27, April, 1978.

[34] Garey M.R. - Simple Binary Identification Problems, IEEE Trans. on Comp. June, 1972.

[35] Goundan A., Hayes J.P. - Identification of Equivalent Faults in Logic Networks, IEEE Trans. on Comp. C-27, No 11, 1980.

[36] Gray F.G., Meyer J.F. - Locability of Faults in Abstract Networks, Proc. of Fault Tolerant Comp. FTC 71 1971.

[37] Gray F.G., Meyer J.F. - Locatability of Faults in Combinational Networks, IEEE Trans. on Comp., No 11, 1971.

[38] Gray F.G., Meyer J.F. - Locability of Faults in Combinational Networks, IEEE Trans. on Comp. No 12, 1973.

[39] Hadlock F. - On Finging a Minimal Set of Diagnostic Tests, IEEE Trans. on El. Comp., oct., 1967.

[40] Hakimi S.L., Amin A.T. - Characterization of Connection Assignment of Diagnosable Systems, IEEE Trans. on Comp., C-23, Jan., 1974.

[41] Hayes J.P. - On Modifying Logic Networks to Improve their Diagnosability, IEEE Trans. on Comp., No 1, 1974.

[42] Hayes J.P. - Test Point Placement to Simplify Fault Detection, IEEE Trans. on Comp., No 7, 1974.

[43] Hlavička J. - Testability: Facts and Fictions. Komunikat Instytutu Systemów Sterowania, Katowice 1980.

[44] Hudyma E. - The Functional Partitioning of Digital Systems. International Seminar of Bulgarian Academy of Sciences on "Applied Aspects of the Automata Theory", Varna 1979.

[45] Joseph J. - On Easily Diagnosable Sequential Machines, IEEE Trans., on Comp. No 2, 1978.

[46] Karunanithi S., Friedman A.P. - System diagnosis with Diagnosability, Fault Tolerant Comp. Conf. FTC 77, 1977.

[47] Kautz W.H. - Fault Testing and Diagnosis in Combinational Digital Circuits, IEEE Trans. on Comp., Apr., 1968.

[48] Koren J., Kohavi Z. - Sequential Fault Diagnosis in Comb. Networks, IEEE Trans. on Comp., No 4, 1977.

[49] Krawczyk H. - Wybrane zagadnienia optymalizacji procedury diagnozy struktury logicznej systemów liczących, Konf. "Współczesne problemy automatyki i informatyki", Gliwice 1973.

[50] Krawczyk H. - Diagnozowalność układów logicznych, Pomiary, Automatyka, Kontrola, 11, 1974.

[51] Krawczyk H. - Ocena diagnozowalności a pewne kryteria projektowania sieci logicznej, praca doktorska, Politechnika Gdańska, 1976.

[52] Laskowska M. - Wykorzystanie sztucznej redundancji modułowej w syntezie łatworozróżnialnych modułowych struktur układów cyfrowych. Praca dyplomowa, Politechnika Śląska, Gliwice 1978.

[53] Małek M. - Próba oceny efektywności w diagnostyce technicznej, VI KKA, Poznań 1974.

[54] Małek M. - Kryteria klasyfikacji metod diagnostyki sieci cyfrowych, Konf. "Diagnostyka techniczna", Międzygórze, 1974; K-22/4, Wrocław 1975.

[55] Małek M. - Stopień diagnozowalności systemów, Konf. "Diagnostyka i niezawodność systemów", Międzygórze, 1975; K-27/5, Wrocław 1975.

[56] Mallela S., Masson G.M. - Diagnosable Systems for Intermittent Faults, IEEE Trans., on Comp., No 6, 1978.

[57] Margielewicz H. - Określanie łatwodiagnozowalnych struktur modułowych układów kombinacyjnych dla zbioru punktów kontrolnych zapewniających pełną rozróżnialność uszkodzonych modułów - Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Gliwice 1978.

[58] Mc Cluskey E.J., Clegg F.W. - Fault Equivalence in Combinational Logic Networks, IEEE Trans., on Comp., No 11, 1971.

[59] Min-Wan Du, Weiss C.D. - Circuit Structure and Switching Function Verification, IEEE Trans. on Comp., No 6, 1973.

[60] Moroń S. - Wstępny przydział elementów funkcjonalnych do modułów z uwzględnieniem właściwości diagnostycznych, dla systemu komputerowego wspomagania projektowania konstrukcyjnego pakietów cyfrowych. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Gliwice 1981.

[61] Mozes J. - Wybór punktów kontrolnych dla diagnostyki układów cyfrowych z dokładnością do modułu, Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Gliwice 1978.

[62] Payne H.Y. - An Algorithm for Constructing Optimal Binary Decision Trees, IEEE Trans. on Comp., No 9, 1977.

[63] Poisel R.A., Kime C.R. - A System Interconnection Model for Diagnosability Analysis, Fault Tolerant Conf. FTC 77, 1977.

[64] Powell T.J. - A Procedure for Selecting Diagnostic Tests, IEEE Trans. on Comp., Feb., 1969.

[65] Preparata F.P., Metze G., Chien R.T. - On the Connection Assignment Problem of Diagnosable Systems, IEEE Trans., on El. Comp., Dec., 1967.

[66] Preparata F.P. - An Estimate of the Length of Diagnostic Tests, IEEE Trans., on Reliab. No 3, 1969.

[67] Ramamoorthy C.V. - A Structural Theory of Machine Diagnostics, AFIPS Spring Joint Comp. Conf. 1967.

[68] Ramamoorthy C.V., Chang L.C. - System Modelling and Testing Procedures for Microdiagnostics, IEEE Trans. on Comp., No 3, 1971.

[69] Ramamoorthy C.V., Mayeda W. - Computer Diagnosis Using the Blocking Gate Approach, IEEE Trans. on Comp., No 11, 1971.

[70] Ramos S., Smith III A.R. - Fault Detection in Uniform Modular Realization of Sequential Machines, Fault Tolerant Comp. FTC 71, 1972.

[71] Reddy S.M. - Easily Testable Realization for Logic Functions, IEEE Trans. on Comp., No 11, 1972.

[72] Roy S.K. - Diagnosis and Fault Equivalence in Combinational Circuits, IEEE Trans. on Comp., No 9, 1974.

[73] Russel J.D., Kime C.R. - Structural Factors in the Fault Diagnosis of Combinational Networks, Fault Tolerant Comp. FTC 71, 1971.

[74] Russo R.L., Oden P.H., Wolff P.K. - A Heuristic Procedure for the Partitioning and Mapping of Computer Logic Graphs, IEEE Trans. on Comp., No 12, 1971.

[75] Saluja K.K., Reddy S.M. - On Minimally Testable Logic Networks, IEEE Trans., on Comp., May, 1974.

[76] Su S.Y.H., Cho Y.C. - A New Approach to the Fault Location of Combinational Logic Networks, IEEE Trans. on Comp., Jan., 1972.

[77] Tabakow I.G. - Diagnostyka techniczna sieci informacyjnych. Monografia nr 2, Politechnika Wrocławska, 1974.

[78] Tabakow I.G. - Teoria systemów diagnozowalnych. Monografia nr 5, Politechnika Wrocławska, 1975.

[79] Yamamoto M., Kinoshita K. - Modular Structures and their Fault. Diagnosis System, Computers, Controls, No 6, 1971.

[80] Аксенова Г.П. - Метод синтеза схем встроенного контроля для автоматов с памятью, Автом. и Телем., н. 2, 1973.

[81] Вецешенков В.А. - Об одном подходе к организации тестовой диагностики неисправностей дискретных устройств с тогностью до блока, Автом. и Телем., н. 8, 1975.

[82] Горяшко А.П. - О синтезе схем с минимальной трудоемкостью тестирования. Автом. и Телем., н. I, 1981.

[83] Гремальский А.А. - Структурно - аналитический алгоритм построения полных проверяющих тестов комбинационных схем, Автом. и Телем., н. 5, 1980.

[84] Брунский И.С., Рубанович Ю.А. - Об одном алгоритме построения выходных контрольных точек. Автом. и Телем., н. II, 1971.

[85] Малько А.В. - Минимализация числа контролируемых узлов, обеспечивающих отыскание неисправностей при диагностике дискретных устройств. Автом. и Телем., н. 4, 1970.

[86] Малышенко Ю.В. - Определение мест заданного числа дополнительных контрольных точек с учетом возможной неопределенности значений сигналов. Автом. и Телем. н. 7, 1978.

[87] Маршуков С.Б. - Особенности диагноза технического состояния многовыходных объектов с использованием таблиц тестов. Автом. и Телем., н. 12, 1973.

[88] Пархоменко П.П. - Основы технической диагностики. Энергия, Москва 1976.

[89] Правильщиков П.А. - Определение минимального множества дополнительных контрольных точек для проверки исправности и поиска неисправности в комбинационных устройствах. Автом. и Телем., н. 2, 1972.

[90] Сапожников В.В. - Об отношениях между неисправностями в комбинационных логических схемах. Автом. и Телем., н. I, 1978.

[91] Согомонян Е.С. - Построение самопроверяемых схем встроенного контроля для комбинационных схем. Автом. и Телем., н. 2, 1974.

[92] Сперанский Д.В. - Об улучшении диагностических возможностей автомата путем выводения контрольных точек. Автом. и Телем. н. 8, 1977.

[93] Халчев В.Ф. - Один подход к построении встроенного диагноза технического состояния комбинационных устройств. Автом. и Телем., н. 3, 1974.

[94] Чипулис В.П. - Методы построения полных контроли рующих и диагностических тестов комбинационных устройств. Автом. и Телем., н. 9, 1973.

[95] Чипулис В.П. - Методы минимализации разрешающей способности диагноза и диагностической информации. Автом. и Телем., н. 6, 1975.

PROJEKTOWANIE MODUŁOWYCH STRUKTUR UKŁADÓW CYFROWYCH
O ZADANYCH WŁAŚCIWOŚCIACH DIAGNOSTYCZNYCH

S t r e s z c z e n i e

Niniejsze monografia prezentuje metodykę określania modułowych struktur układów cyfrowych o podwyższonych parametrach diagnostycznych.

Miarą jakości struktury modułowej, w rozumieniu niniejszej pracy, jest koszt diagnozy związany z licznością zbioru testów diagnostycznych, umożliwiających lokalizację uszkodzenia z dokładnością do modułu (wymienialnego podzespołu lub bloku), licznością wymaganego zbioru dodatkowych punktów kontrolnych, modułów sztucznej redundancji modułowej i wreszcie liczbą par uszkodzeń nierozróżnialnych należących do różnych modułów tej struktury.

Rozważania dotyczą przede wszystkim kombinacyjnych układów cyfrowych. Mogą jednak z pełnym powodzeniem być wykorzystane do układów cyfrowych z pamięcią, jak również dowolnych układów, dla których można utworzyć kombinacyjny model diagnostyczny oraz dla których istnieje szeroko pojęty problem przydziału elementów funkcjonalnych do konstrukcyjnych bloków - modułów.

Wprowadzeniem do problemu jest rozdział drugi monografii, w którym przedstawiono pokrótce aktualne problemy diagnostyki układów cyfrowych na tle światowego stanu wiedzy w tej dziedzinie, umiejscawiając jednocześnie w wachlarzu aktualnych zagadnień projektowanie modułowych struktur o podwyższonych parametrach diagnostycznych. Ścisłe sformułowanie tego problemu zawiera rozdział czwarty.

Rozdział trzeci zawiera główne definicje niezbędne dla ścisłego zaprezentowania wywodów teoretycznych w podstawowym - piątym rozdziale pracy.

Rozdział ten stanowi zasadniczą część pracy i obejmuje podstawy teoretyczne i same procedury projektowania modułowych struktur układów cyfrowych, bazujące na przedstawionej tam podstawowej procedurze π. Po rozpatrzeniu dokładności rozwiązania, rozumianej jako odległość, uzyskanej w wyniku π-procedury struktury modułowej od struktury optymalnej z punktu widzenia diagnostyki oraz możliwości wykorzystania zbiorów roboczych π-procedury, tzn. zbioru testów i zbioru dodatkowych punktów kontrolnych, przedstawione zostały możliwości wykorzystania sztucznej i naturalnej redundancji modułowej w procesie określania struktur modułowych. Dalsze część rozdziału piątego obejmuje szereg szczególnych przypadków problemu przydziału uwzględniających typowe, rzeczywiste ograniczenia techniczne.

Oszacowanie złożoności obliczeniowej π -procedury jest treścią rozdziału szóstego.

W rozdziale siódmym przedstawione zostały przykłady określania łatwo diagnozowalnych modułowych struktur układów cyfrowych, ilustrujące główne procedury prezentowane w poprzednich rozdziałach.

Całość pracy zakończona jest wnioskami i uwagami końcowymi (rozdział 8), dotyczącymi możliwości wykorzystania metod projektowania przedstawionych w monografii, dalszych kierunków prac i ograniczeń na jakie napotyka się w procesie projektowania modułowych struktur układów cyfrowych o podwyższonych parametrach diagnostycznych.

Rozdział dziewiąty - bibliografia, obejmuje te pozycje literatury światowej z zakresu diagnostyki układów cyfrowej, które bądź dotyczą wprost problemu rozpatrywanego w monografii, bądź też niektórych jego aspektów.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДУЛЯРНЫХ СТРУКТУР ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ
С ЗАДАННЫМИ ДИАГНОСТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Р е з ю м е

Настоящая монография приводит методику определения модулярных структур дискретных систем с повышенными диагностическими параметрами.

В настоящей работе критерием качества модулярной структуры являются затраты диагноза связанные с обьемом множества диагностических тестов предостовляющих возможность локализовать неисправности с точносью до модуля (заменяемого подузла или блока), с объемом требуемого множества дополнительных контрольных точек, модулей искусственной избыточности и наконец с числом неразличимых пар неисправностей принадлежащих к разным модулям этой структуры.

Монография относится прежде всего к комбинационным дискретным системам. Однако она может быть с успехом исползована для дискретных систем с памятью, для любых систем, для которых можно построить комбинационную диагностическую модель и для которых существует проблема отнесения функциональных элементов в отношении к конструкционным блокам-модулям.

Введением в работу является вторая глава монографии, в которой коротко представлена актуальная проблема диагностики дискретных систем с точки зрения мирогого уровня знаний в данной области, определяя одновременно место проектирования модулярных структур с повышенными диагностическими параметрами. Четвертая глава содержит точную формулировку этой проблемы.

Третья глава содержит основные определения необходимые для точного представления теоретических выводов помещенных в основной пятой главе работы.

Настоящая глава (глава пятая) является основной частью работы и содержит теоретические основы и процессы проектирования модулярных структур дискретных систем базирующие на представленном здесь основном процессе. После рассмотрения точности решения, принимаемой как расстояние полученной в результате π-процесса модулярной структуры от оптимальной, с диагностической точки зрения, структуры, и возможности использования рабочих множеств π-процесса, то есть множества тестов и множества дополнительных контрольных точек, представлены возможности использования искусственной и естественной избыточности в процессе определения модулярных структур. Дальнейшая часть пятой главы содержит ряд конкретных примеров относящихся к проблемам распределения, с особым учетом типичных реальных технических ограничений.

В шестой главе представлена оценка расчетной сложности π-процесса.

Седьмая глава содержит примеры определения модулярных структур дискретных систем, иллюстрирующие основные процессы представленные в предыдущих главах.

В завершении работы даются выводы и окончательные заметки (глава восьмая), относящиеся к возможности использования представленных в работе методов проектирования, к дальнейшим направлениям работ и ограничений, которые можно встретить в процессе пректирования модулярных структур дискретных систем с повышенными диагностическими параметрами.

Список литературы (глава девятая) содержит те позиции мировой литературы из области диагностики дискретных систем, которые в целом в некоторых аспектах относятся к рассматриваемым в монографии вопросам.

DESIGNING OF MODULE STRUCTURES
OF DIGITAL CIRCUITS WITH PRESCRIBED DIAGNOSTIC PROPERTIES

S u m m a r y

This monography presents a methodology of defining the module structures with widened diagnostic parameters.

A cost of a diagnosis, connected with the number of diagnostic tests in a set which enable finding a damage with the accuracy of one module (one replaceable sub-assembly or block), and connected with the number of requested set of additional test points, as well as of the modules ed artificial module redundancy, and with the number of pairs of undistinguishable failures, belonging to different modules of the same structure, consists a measure of quality of a module structure in the understanding of this work.

The discussion mainly pertains to the combination al digital systems. It may, montheless, be successfully utilized in memory digital systems, as well as in any other systems, for which a diagnostic combination al model can be defined and for which there exists a well conceived of problem of subordination of functional elements to the construction module-blocks.

The second chapter of this monography is an introduction to the problem. It presents briefly the contemporary problems of diagnostics of digital systems on the background of the knowledge od this branch of science in the world, simultaneously locating the designing of module structures with widened diagnostic parameters in the framework of contemporary problems. The fourth chapter contains a more precise formulation of this problem.

The third chapter contains the main definitions which are indispensable for exact presentation of theoretical consideration carried out in the fifth chapter which is basic for this work.

This chapter consists the basic part of the work and embraces theoretical background and the procedures of designing the module structures of digital systems, which are based on the presented primordial π-procedure. Having considered the accuracy of solution, understood as the distance of the module structure from the structure with optimum properties, if regarded from the point of view of diagnostics and the possibility of utilization of operational sets of π-procedure, ie. set of tests and set of additional test points, obtained ad the result of π-procedure, the author presents the possibilities of utilization of artificial

and natural module redundancy in the process of defining module structures. The further part of fifth chapter contains a series of specific cases of the problem of subordination which take into account the typical, real technological limitations.

The estimation of calculation complexity of π procedure is the content of chapter six.

Chapter seven presents the examples of defining easily diagnosable digital systems module structures, illustrating the major procedures presented in previous chapters.

The entire work is finished with conclusions and final remarks (chapter eight), pertinent to the possibilities of utilization of designing methods presented in this monography, further directions of works, and limitations coms across in the process of designing of digital systems module structures with widened diagnostic parameters.

Chapter nine - the bibliography - contains these positions and items from the range of digital systems diagnostics in the world literature, which are either directly concerned with the problem discussed in the monography, or with some of its aspects.

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej
P 3341/82/62

WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ MOŻNA NABYĆ W NASTĘPUJĄCYCH PLACÓWKACH:

44-100 Gliwice — Księgarnia nr 096, ul. Konstytucji 14 b
44-100 Gliwice — Spółdzielnia Studencka, ul. Wrocławska 4 a
40-950 Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Żwirki i Wigury 33
40-096 Katowice — Księgarnia nr 005, ul. 3 Maja 12
41-900 Bytom — Księgarnia nr 048, Pl. Kościuszki 10
41-500 Chorzów — Księgarnia nr 063, ul. Wolności 22
41-300 Dąbrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZBoWiD-u 2
47-400 Racibórz — Księgarnia nr 148, ul. Odrzańska 1
44-200 Rybnik — Księgarnia nr 162, Rynek 1
41-200 Sosnowiec — Księgarnia nr 181, ul. Zwycięstwa 7
41-800 Zabrze — Księgarnia nr 230, ul. Wolności 288
00-901 Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnictw Naukowych PAN — Pałac Kultury i Nauki

Wszystkie wydawnictwa naukowe i dydaktyczne zamawiać można poprzez Składnicę Księgarską w Warszawie, ul. Mazowiecka 9.