

Metoda wyznaczania m -optymalnych struktur opiniowania diagnostycznego dla sieci komputerowych typu hipersześcianu¹

Jan CHUDZIKIEWICZ

Zakład Systemów Komputerowych, Instytut Teleinformatyki i Automatyki,
Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

STRESZCZENIE: Struktury typu hipersześcianu zapewniają odpowiednią wnikliwość diagnostyczną oraz dużą niezawodność w sensie spójności sieci, jak również możliwość adaptowania (rekonfigurowania) struktury logicznej sieci do zaistniałych awarii lub wymaganych warunków samodiagnozowania się sieci. Sieci komputerowe o strukturze logicznej n -wymiarowego hipersześcianu należą do klasy sieci tolerujących błędy i charakteryzują się dużą złożonością dla n większego niż 3. W referacie przedstawiono metodę oraz bazujący na tej metodzie algorytm wyznaczania m -optymalnych struktur opiniowania diagnostycznego dla modelu PMC dla sieci komputerowych typu hipersześcianu. Algorytm działa w oparciu o zmodyfikowaną macierz przyległości struktury H^n , dając możliwość wyznaczenia wszystkich struktur m -optymalnych istniejących w strukturze H^n .

1. Wprowadzenie

Metoda opiniowania diagnostycznego zalicza się do grupy scentralizowanych metod diagnozowania sieci komputerowych. Cechą charakterystyczną tej metody jest to, że identyfikacji niezdatnych komputerów sieci komputerowej dokonuje się po zgromadzeniu wszystkich wyników testowań komputerów, wykonanych przez każdy komputer sieci. Dla metody opiniowania diagnostycznego wynik testowania określonego komputera zależy: od rodzaju zastosowanego modelu diagnostycznego [1] [11] [6], stanu niezawodnościowego tego komputera i stanu niezawodnościowego komputera testującego.

¹ Referat wygłoszony na V Krajowej Konferencji Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów DIAG'2003, Ustroń 13-17.10.2003. Druk tekstu referatu za zgodą Komitetu Organizacyjnego konferencji.

Strukturę diagnostyczną [6] [3] sieci komputerowej, dla metody opiniowania diagnostycznego, przyjęto nazywać grafem opiniowania diagnostycznego, który jest grafem częściowym grafu struktury logicznej sieci komputerowej [3].

Graf opiniowania diagnostycznego opisujący strukturę testowania się komputerów sieci jest nazywany *m*-diagnozowalnym, jeżeli umożliwia zidentyfikowanie wszystkich niezdatnych komputerów sieci komputerowej pod warunkiem, że jest ich nie więcej niż *m*. Wśród struktur *m*-diagnozowalnych wyróżniamy struktury *m*-optymalne, to jest takie, które mają minimalną liczbę łuków, co odpowiada minimalnej liczbie testowań wykonanych przez komputery sieci komputerowej.

W niniejszym referacie zaprezentowano metodę wyznaczania *m*-optymalnych struktur opiniowania diagnostycznego dla sieci komputerowej typu hipersześcianu. Struktury typu hipersześcianu zapewniają wymaganą wnikliwość diagnostyczną sieci komputerowej oraz maksymalną, możliwą wówczas niezawodność w sensie spójności sieci, jak również możliwość adaptowania (rekonfigurowania) struktury logicznej sieci, do zaistniałych awarii lub wymaganych warunków samodiagnozowania się sieci.

2. Pojęcia podstawowe

Określenie 1. Mówimy, że graf $G (G = \langle E, U \rangle)$ należy do klasy G^n grafów zwykłych, jeżeli $|E| = 2^n$, $\mu(e) = n (e \in E)$ oraz $|C^4(G)| = \binom{n}{2} \cdot 2^{n-2}$, przy czym: $C^k(G)$ oznacza zbiór cykli prostych w grafie G , z których każdy zawiera k krawędzi ($3 \leq k \leq |E|$).

Własność 1. Węzły grafu klasy G^n można poetykietować n -wymiarowymi wektorami binarnymi tak, że odległość Hamminga między wektorami opisującymi węzły przyległe będzie równa 1.

Strukturę logiczną sieci komputerowej opisaną grafem G^n , w którym każdemu węzłowi nadano etykietę (zgodnie z własnością 1), przyjęto nazywać strukturą n -wymiarowego hipersześcianu binarnego.

Określenie 2. n -wymiarowym hipersześcianem binarnym nazywamy graf zwykły $G' (G' = \langle E, U' \rangle, |E| = 2^n, |U'| = n \cdot 2^{n-1})$ o 2^n węzłach, z których każdy opisany jest odpowiednim wektorem binarnym $z (z = (z_1, \dots, z_n), z_i \in \{0, 1\}, 1 \leq i \leq n, z \in Z^n, |Z^n| = 2^n)$ oraz o $n \cdot 2^{n-1}$ krawędziach, łączących te węzły, których opisujące je wektory odległe są o 1 według miary Hamminga.

Strukturę n -wymiarowego hipersześcianu binarnego będziemy dalej oznaczać przez H^n , a graf częściowy tej struktury przez H_t^n . Indeks t oznacza liczbę krawędzi grafu struktury H_t^n .

Dalej węzły grafu H^n będą reprezentować komputery, a jego krawędzie-linie transmisji danych między tymi komputerami, które są incydentne z określoną krawędzią.

Określenie 3. Mówimy, że sieć komputerowa jest typu n -wymiarowego ($n \geq 2$) hipersześcianu binarnego lub, że jest osadzona (zagnieżdżona) w H^n , jeżeli graf G ($G = \langle E, U \rangle$) opisujący jej strukturę logiczną jest spójnym grafem częściowym grafu H^n , takim że: $2^n - 1 \leq |U| \leq n \cdot 2^n - 1$.

Określenie 4. Cyklem prostym G^* ($G^* = \langle E^*, U^* \rangle$) grafu zwykłego G nazywamy jego spójny podgraf częściowy, w którym stopień każdego węzła jest równy dwa.

Jeżeli rząd cyklu prostego G^* jest równy rządowi grafu G , to taki cykl nazywamy cyklem Hamiltona a graf, który zawiera cykl Hamiltona – grafem Hamiltona.

Oznaczmy[6]:

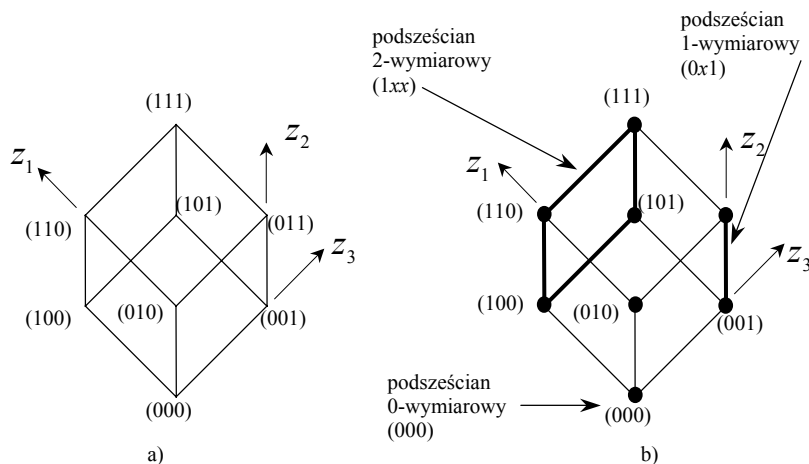
$$(s_1, \dots, s_n) = \{z \in Z^n : ((s_i \neq x) \Rightarrow (z_i = s_i)) \wedge ((s_i = x) \Rightarrow (z_i \in \{0, 1\})) \\ (s_i \in \{0, 1, x\}, \quad 1 \leq i \leq n),$$

gdzie x oznacza wartość nieokreśloną (0 lub 1).

Wektor $s = (s_1, \dots, s_n)$ ($s_i \in \{0, 1, x\}$, $1 \leq i \leq n$, $n \geq 1$) można traktować jako r -wymiarowy ($r = \text{Card}\{i \in I : s_i = x\}$, $I = \{1, \dots, n\}$, $0 \leq r \leq n$) sześcian binarny, który jest określonym podsześcianem n -wymiarowego sześcianu binarnego.

Dlatego też 1-wymiarowy sześcian binarny (s_1, \dots, s_n) etykietuje pojedynczą linię transmisji danych w rozważanej sieci komputerowej. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że zarówno n -wymiarowy sześcian binarny (nazywany również n -wymiarową kostką jednostkową), jak i n -wymiarowy hipersześcian binarny, są tworami topologicznie równoważnymi, z uwagi na relacje między punktami odwzorowującymi poszczególne n -wymiarowe wektory binarne z ($z = (z_1, \dots, z_n)$, $z_i \in \{0, 1\}$, $1 \leq i \leq n$) w zbiorze Z^n ($|Z^n| = 2^n$) wszystkich możliwych takich wektorów. W pierwszym przypadku (rysunek 1a), wektory zbioru Z^3 są odwzorowane przez zbiór wierzchołków (zorientowanego względem zmiennych z_1, \dots, z_3) 3-wymiarowego sześcianu binarnego, a w drugim przypadku (rysunek 1b) przez węzły grafu zwykłego o $n \cdot 2^{n-1}$

krawędziach, incydentnych z tymi węzłami, które odwzorowują wektory o odległości Hamminga równej jeden.



Rys. 1. Przykład 3-wymiarowego sześcianu (a) oraz 3-wymiarowego hipersześcianu (b) z zaznaczonymi przykładowymi podsześcianami oraz kierunki zmian współrzędnych odpowiadających poszczególnym składowym wektora z ($z = (z_1, z_2, z_3)$)

Niech S^n oznacza zbiór wszystkich możliwych podsześcianów n -wymiarowego sześcianu binarnego, S_r^n -zbiór podsześcianów r -wymiarowych n -wymiarowego sześcianu binarnego a $Z(s)$ -zbiór podsześcianów 0-wymiarowych (zbiór wektorów $z = (z_1, \dots, z_n)$, ($z_i \in \{0,1\}$, $1 \leq i \leq n$) podsześcianu s ($s \in S^n$)).

Zbiór $Z(s)$ nazywany jest przedziałem (częściowo uporządkowanego) zbioru Z^n , bowiem: $Z(s) = \{z \in Z : z^0(s) \preceq z \preceq z^1(s)\}$,

gdzie $z^0(s)$ i $z^1(s)$ oznaczają odpowiednio dolny i górny kres tego przedziału, (np. $s = (1xx)$, $z^0(s) = (100)$, $z^1(s) = (111)$ - patrz rysunek 1b), a zapis $z' \preceq z''$ oznacza, że $z'_i \leq z''_i$, ($1 \leq i \leq n$). Dlatego też, jeżeli $s' \in S^n$ i $s'' \in S^n$ to działania na podsześcianach s' i s'' mają sens działań na zbiorach $Z(s')$ i $Z(s'')$, które są określonymi podzbiórmi zbioru Z^n .

Niech zapis $(z' + z'')$ oznacza przekształcenie, którego wynikiem jest sześcian s ($s \in S_1^n$), realizowane w następujący sposób:

z'_i	z''_i	$h(z'_i, z''_i)$
0	0	0
0	1	x
1	0	x
1	1	1

Niech $s(s', z_i)$ oznacza sześcián bliźniaczy sześciánu s' względem zmiennej z_i .

Określenie 5. Sześcián s nazywamy *sześciánem bliźniaczym sześciánu s'* ($s, s' \in S^n$) względem zmiennej z_i ($1 \leq i \leq n$) takiej, że $s'_i \neq x$ jeżeli: $s = (s'_1, \dots, s'_{i-1}, \overline{s'_i}, s'_{i+1}, \dots, s'_n)$.

Z definicji otrzymujemy, że jeżeli i -ta składowa s'_i wektora s' ma wartość x , to nie istnieje sześcián bliźniaczy do sześciánu s' . Dla przykładu (rysunek 1b): $s((0x0), z_3) = (0x1)$. Oczywiście spełniona jest następująca równość: $s(s(s', z_i), z_i) = s'$.

Określenie 6. Rozszerzeniem zerowym $S^0(s')$ i rozszerzeniem jedynkowym $S^1(s')$ sześciánu $s' = (s'_1, \dots, s'_n)$ nazywamy sześciány $s = (s'_1, \dots, s'_n, 0)$ oraz $s = (s'_1, \dots, s'_n, 1)$.

Niech $S^0(S)$ oraz $S^1(S)$ oznaczają odpowiednio – zbiór rozszerzeń zerowych oraz zbiór rozszerzeń jedynkowych sześciánów zbioru S ($S \subset S^n$).

3. Własności diagnostyczne struktury H^n oraz struktury H^n_i dla metody opiniowania diagnostycznego

Bardziej obszerny opis przedstawionych poniżej własności diagnostycznych struktur H^n oraz H^n_i , wraz z dowodami, można znaleźć w pracy [3].

Własność 2. Struktura H^n_i ($n \geq 2$) jest strukturą, co najmniej 1-diagnozowalną metodą opiniowania diagnostycznego dla modelu PMC i modelu BGM.

Własność 3. Struktura H^2 nie jest strukturą 2-diagnozowalną metodą opiniowania diagnostycznego ani dla modelu PMC ani też dla modelu BGM.

Własność 4. Struktura H^n ($n \geq 3$) jest n -optymalną strukturą diagnozowania metodą opiniowania diagnostycznego dla modelu PMC i modelu BGM.

Własność 5. Struktura H_t^n ($n \geq 3$), która jest cyklem Hamiltona (patrz określenie 4) jest strukturą 2- optymalną metodą opiniowania diagnostycznego zarówno dla modelu PMC jak i dla modelu BGM.

Własność 6. Każda struktura H_t^n ($n \geq 3$), która jest grafem Hamiltona jest strukturą 2-diagnozowalną metodą opiniowania diagnostycznego dla modelu PMC i modelu BGM.

Własność 7. Struktura H_t^n ($n \geq 3$) nie będąca grafem Hamiltona, nie jest strukturą 2-diagnozowalną metodą opiniowania diagnostycznego dla modelu PMC i modelu BGM.

Własność 8. Struktura H_t^n ($n \geq 4$) taka, że $\mu(e) = m$ ($e \in E$, $2 < m < n$) jest m -optymalną strukturą opiniowania diagnostycznego dla modelu PMC i modelu BGM.

4. Metoda wyznaczania m -optymalnej struktury logicznej sieci komputerowej H_t^n

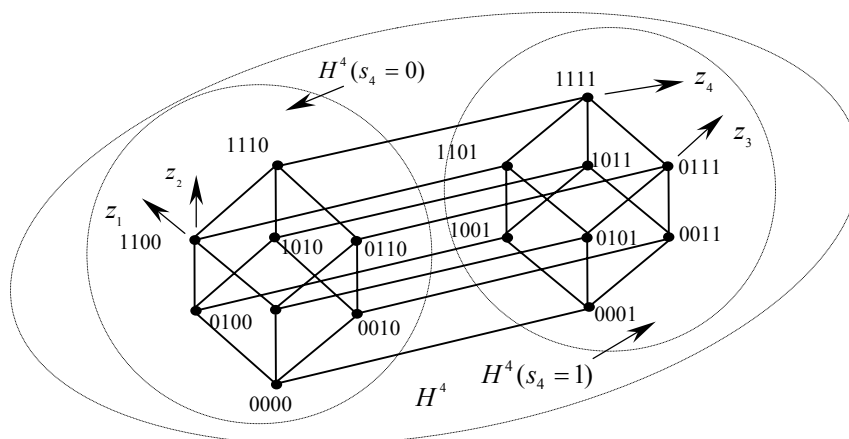
Praktyczne znaczenie mają metody wyznaczania struktury logicznej sieci komputerowej H_t^n ($n \geq 4$), która jest strukturą m -optymalną ($2 < m < n$) dla określonej strategii i metody diagnozowania sieci oraz ma maksymalną liczbę cykli Hamiltona. Rozważania ograniczymy do 1-krokowej strategii diagnozowania metodą opiniowania diagnostycznego dla modelu PMC. Zauważmy, że metoda polegająca na takim redukowaniu (eliminowaniu jedynek) macierzy przyległości M' ($M' = [m_{ij}]_{2^n \times 2^n}$) struktury H^n , aby suma jedynek w każdym wierszu i w każdej kolumnie zredukowanej macierzy była równa m , daje wprawdzie gwarancję, że tak uzyskana struktura jest strukturą m -optymalną, lecz nie daje gwarancji, że otrzymana struktura jest grafem spójnym. Na przykład z własności 4 wynika bezpośrednio, że bliźniacze (w grafie H^{n+1}) struktury H^n ($n \geq 3$) są n -optymalną strukturą H_t^{n+1} . Znaczne ułatwienie przy wyznaczaniu struktury H_t^n ($n \geq 4$), która jest m -optymalną strukturą i jednocześnie grafem spójnym, można uzyskać wykorzystując zmodyfikowaną macierz przyległości. Przykład zmodyfikowanej macierzy przyległości, dla struktury H^4 przedstawionej na rysunku 2, znajduje się w tabeli 1.

Modyfikacja macierzy M' polega na zmianie sposobu numeracji kolumn i wierszy macierzy przyległości, tak aby:

- wiersze i kolumny zmodyfikowanej macierzy M o numerach 0 do

$2^{n-1} - 1$ odpowiadały węzłom struktury H^n ($n \geq 4$), których etykiety są parzyste;

- wiersze i kolumny zmodyfikowanej macierzy M o numerach 2^{n-1} do $2^n - 1$ odpowiadały węzłom struktury H^n ($n \geq 4$), których etykiety są nieparzyste.



Rys. 2. Przykład struktury H_t^4 z zaznaczonymi podhipersześcianami $H^4(s_4=0)$ i $H^4(s_4=1)$ stanowiącymi odpowiednio rozszerzenie zerowe $S^0(H^3)$ i jedynekowe $S^1(H^3)$ struktury H^3

Zauważmy, że w zmodyfikowanej macierzy przyległości M struktury H^n możemy wyróżnić dwie podmacierze opisujące podhipersześciany [6] [3]. $H^n(s_n=0)$ i $H^n(s_n=1)$ oraz dwie podmacierze opisujące zbiór S' , krawędzi łączących te podhipersześciany:

$$S' = \{s \in S_1^n : s = z' + z'', z' \in H^n(s_n=0), z'' = z(z', z_n)\}.$$

Jeżeli w zmodyfikowanej macierzy M zamienimy wartości elementów, należących do zbioru S' , z 1 na wartość 0 oraz dokonamy przekształcenia, polegającego na zastąpieniu dwóch bliźniaczych, względem zmiennej s_n , krawędzi $s' \in S^0(H^n)$ i $s'' = s(s', s_n)$ krawędziami $s''', s'' \in S'$

$(S' \subset \{S_1^n \setminus S(H^n(s_n = 0)) \setminus S(H^n(s_n = 1))\})$, takimi że: $(s''' = z' + z'' :$
 $: (z' \in Z(s')) \wedge (z'' \in Z(s'')) \wedge (z''' = z(z', z_n)))$ oraz $(s^{IV} = z^* + z^{**} :$
 $: (z^* \in Z(s') \setminus z') \wedge (z^{**} \in Z(s'') \setminus z'') \wedge (z^{IV} = z(z^*, z_n)))$, to otrzymamy
 m -optymalną ($2 < m < n$) strukturę H_t^n .

Tab. 1. Zmodyfikowana macierz przyległości M^4 węzłów struktury H^4 przedstawionej na rysunku 2

	0000	0010	0100	0110	1000	1010	1100	1110	0001	0011	0101	0111	1001	1011	1101	1111								
0000		1	1		1				1															
0010	1			1		1				1														
0100	1			1			1				1													
0110		1	1					1				1												
1000	1				1	1							1											
1010		1						1						1										
1100			1		1			1							1									
1110				1		1	1									1								
0001	1									1	1		1											
0011		1							1			1		1										
0101			1						1		1				1									
0111				1						1	1					1								
1001					1				1				1	1										
1011						1				1				1		1								
1101							1				1		1			1								
1111								1				1	1	1										
	$H^4(s_4 = 0)$								S'								$H^4(s_4 = 1)$							

Przykład struktury 3-optymalnej uzyskanej w wyniku dokonania opisanego powyżej przekształcenia, przedstawiono na rysunku 3, a jej zmodyfikowaną macierz przyległości w tabeli 2.

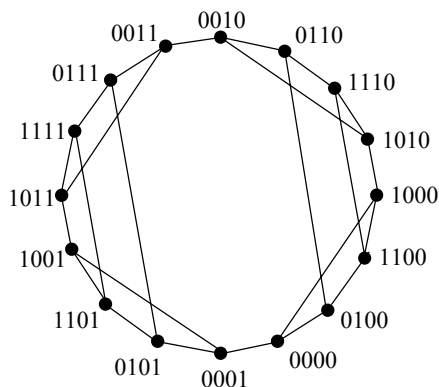
Niech S^* ($S^* \subset S(H^n(s_n = 0))$) oznacza zbiór krawędzi, które będą podlegać przekształceniu, takiemu że:

$$(|S^*| \leq 2^{n-1}) \wedge (\forall s', s'' \in S^* : Z(s') \neq Z(s'')) \wedge$$

$$\wedge ((|S^*| = 2^{n-1}) \Rightarrow (\exists s' \in S^* : s \neq s(s'', z_i),$$

$$s \in S^* \setminus s', i \in \{1, \dots, 2^{n-1} - 1\}))$$

Na bazie zmodyfikowanej macierzy przyległości oraz warunków nałożonych na zbiór S^* opracowano przedstawiony poniżej algorytm wyznaczania m -optymalnych ($2 < m < n$) struktur H_i^n ($n \geq 4$), istniejących w strukturze H^n . Należy w tym miejscu nadmienić, że istotna dla algorytmu jest kolejność, w jakiej dodawane są nowe krawędzie do zbioru S^* .



Rys. 3. Przykład 3-optymalnej struktury H_{24}^4 uzyskanej w wyniku przedstawionego powyżej przekształcenia, która jest grafem spójnym

Tab. 2. Zmodyfikowana macierz przyległości M^4 struktury H_{24}^4 z rysunku 3

	0	2	4	6	8	A	C	E	1	3	5	7	9	B	D	F
0			1		1				1							
2				1		1				1						
4	1			1			1				1					
6		1	1					1								
8	1					1	1									
A		1			1			1								
C			1		1			1								
E				1		1	1									
1	1										1		1			
3		1										1		1		
5									1			1			1	
7										1	1					1
9									1					1	1	
B										1			1			1
D											1	1				1
F												1		1	1	

Zauważmy, że każdy element $m_{i,j}$ macierzy przyległości M' struktury H^n lub H_i^n odpowiada 1-wymiarowemu podsześcianowi s ($s \in S_1^n$) (krawędzi) takiemu, że: $s = z(i) + z(j)$, gdzie: $z(i)$ – jest to wektor binarny $z = (z_1, \dots, z_n)$ ($z_k \in \{0,1\}$, $1 \leq k \leq n$) pisujący (etykietujący) i -ty węzeł grafu opisującego strukturę H^n lub H_i^n .

5. Algorytm wyznaczania m -optymalnej struktury logicznej sieci komputerowej H_i^n

Krok 1.

Dokonaj modyfikacji macierzy przyległości M' do macierzy M . Usuń z macierzy zmodyfikowanej M elementy zbioru S' .

Krok 2.

Wyznacz krawędź początkową $s' \in S^*$ tak, aby:

$$[Z(s') \subset Z(H^n(s_n = 0))] \wedge [z' \prec z'' : z', z'' \in Z(s')].$$

Krok 3.

Wyznacz strukturę m -optymalną dokonując przekształcenia ($\forall s' \in S^*$), takiego że:

$$\begin{aligned} S(H^n) &= S(H^n) \setminus \{s', s''\}, \\ S(H^n) &= S(H^n) + \{s^*, s^{**}\}; \end{aligned}$$

gdzie:

$$\begin{aligned} s'' &= s(s', s_n), \\ s^* &= z' + z'' : z' \in Z(s'), z'' = z(z', z_n), \\ s^{**} &= z^* + z^{**} : z^* \in Z(s') \setminus \{z'\}, z^{**} = z(z^*, z_n). \end{aligned}$$

Krok 4.

Jeżeli ($|S^*| < 2^{n-1} - 1$) to wyznacz nową krawędź s ($s \in S(H^n(s_n = 0))$) i przejdź do kroku 3. Jeżeli ($|S^*| = 2^{n-1} - 1$) to zastąp ostatnio wprowadzoną krawędź nową krawędzią i przejdź do kroku 3. Jeżeli ($|S^*| = 2^{n-1}$) to usuń dwie lub trzy ostatnio wprowadzone do S^* krawędzie. Następnie wyznacz nową krawędź s i dodaj ją do zbioru S^* , przejdź do kroku 3. W przypadku, gdy dla wszystkich krawędzi $s \in S(H^n(s_n = 0))$, przy danej krawędzi początkowej,

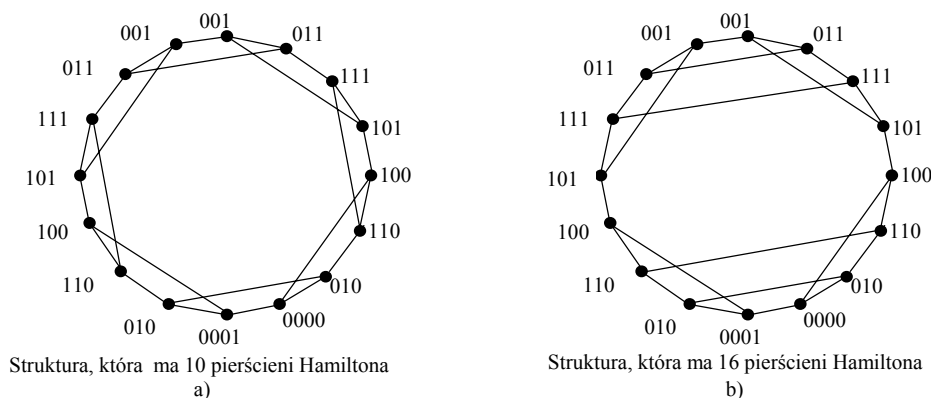
wyznaczono struktury m -optymalne, usuń wszystkie elementy ze zbioru S^* i przejdź do kroku 2. Jeżeli jako krawędzie początkowe zostały użyte wszystkie krawędzie s ($s \in S(H^n(s_n = 0))$), to przejdź do kroku 5.

Krok 5.

Koniec działania algorytmu.

6. Podsumowanie

Przedstawiony w referacie algorytm, który bazuje na macierzy przyległości struktury H^n i polega na jej odpowiedniej redukcji, umożliwia wyznaczenie wszystkich m -optymalnych ($2 < m < n$) struktur H_t^n istniejących w strukturze H^n , dla metody opiniowania diagnostycznego i modelu PMC. Struktury te dają możliwość identyfikacji przy minimalnej liczbie testów m niezdatnych komputerów w sieci.



Rys. 4. 3-optymalne struktury H_{24}^4 uzyskane po drugiej (a) oraz po trzeciej (b) iteracji algorytmu

W czasie realizacji badań stwierdzono, że istnieją w strukturze H^n struktury m -optymalne, o takiej samej liczbie krawędzi, mające różną liczbę pierścieni Hamiltona [2] [3] (patrz rysunek 4). Ma to istotne znaczenie praktyczne z punktu widzenia projektanta sieci komputerowej, który zakłada, że projektowana przez niego sieć komputerowa będzie charakteryzowała się maksymalną niezawodnością w sensie spójności sieci. Dlatego też wyznaczenie klasy struktur m -optymalnych umożliwia projektantowi wybranie spośród nich struktury

o największej liczbie cykli Hamiltona, czyli największej niezawodności.

Sieci komputerowe o strukturze logicznej H_n^n oraz H^n charakteryzują się wysokim kosztem budowy i mogą znaleźć zastosowanie w środowisku, gdzie występują silne oddziaływania czynników zakłócających lub destrukcyjnych (np. sieć komputerowa łącząca stanowiska dowodzenia na współczesnym polu walki), jak również w sytuacjach gdzie panujące warunki techniczne uniemożliwiają renowację sieci powodując, że podlega ona procesowi „łagodnej degradacji” (np. sieci komputerów pokładowych).

Literatura

- [1] Barsi F., Grandoni F., Maestrini P.: *A Theory of Diagnosability of Digital Systems*, IEEE Transactions on Computers, vol. 6, 1976, pp. 585-593.
- [2] Chudzikiewicz J.: Metoda rekonfiguracji pierścienia w sieci komputerowej o strukturze logicznej n-wymiarowego hipersześcianu, VIII Konferencja Systemy Czasu Rzeczywistego, Krynica wrzesień 2001.
- [3] Chudzikiewicz J.: *Sieci komputerowe o strukturze logicznej typu hipersześcianu*; Instytut Automatyki i Robotyki, Wydział Cybernetyki WAT, Warszawa 2002.
- [4] Korzan B.: *Elementy teorii grafów i sieci. Metody i zastosowania*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1978.
- [5] Kulesza R.: *Niektóre własności grafów opiniowania diagnostycznego*, Materiały z Krajowego Kongresu Metrologii KKM'98, Gdańsk, t. 5, s. 81-88, 15-18 września 1998.
- [6] Kulesza R.: *Podstawy diagnostyki sieci logicznych i komputerowych*, Instytut Automatyki i Robotyki, Wydział Cybernetyki WAT, Wydanie II, Warszawa 2000.
- [7] Kulesza R.: *Metoda przeliczania 1-optimalnych struktur opiniowania diagnostycznego*, Biuletyn Instytutu Automatyki i Robotyki nr 16, Wydział Cybernetyki WAT, 2001, s. 19-34.
- [8] Kulesza R.: *Metoda wyznaczania najtańszych 1-diagnozowalnych struktur opiniowania diagnostycznego*, Biuletyn Instytutu Automatyki i Robotyki nr 17, Wydział Cybernetyki WAT, 2002, s. 3-24.
- [9] Krawczyk H.: *Analiza i synteza samodiagnozowalnych systemów komputerowych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Elektronika nr 64, Gdańsk 1987.
- [10] Polska Norma PN-92/T-01016/18: Przetwarzanie informacji i komputery.

- [11] Preparata F. P., Metze G., Chien R. T.: *On the Connection Assignment Problem of Diagnosable Systems*, IEEE Transactions on Computers, 1967, pp. 848-854.

Referat wygłoszony na V Krajowej Konferencji Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów
DIAG'2003, Ustroń 13 – 17.10.2003r

Praca wpłynęła do redakcji: 20.10.2003r.