

Wyznaczanie struktur diagnozowania porównawczego z użyciem metody PSO

Łukasz STRZELECKI

Instytut Teleinformatyki i Automatyki, Wydział Cybernetyki, WAT,
ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa
lukasz.strzelecki@wat.edu.pl

STRESZCZENIE: W artykule wykazano, że metoda adaptacyjna – *Particle Swarm Optimization* – może być skutecznie wykorzystana do wyznaczania struktur diagnozowania porównawczego. Zaproponowano odpowiednią funkcję przystosowania, a także przeprowadzono analizę jej użyteczności w oparciu o wyniki badań empirycznych.

SŁOWA KLUCZOWE: diagnostyka systemowa, struktury diagnozowania porównawczego, model MM, metoda PSO, metoda adaptacyjna

1. Wprowadzenie

Rezultaty badań przedstawione w pracy [10] jednoznacznie wskazują, że algorytm genetyczny może zostać wykorzystany podczas wyznaczania najtańszych (w sensie uogólnionego kosztu) *struktur diagnozowania porównawczego* (SDP). W ramach tego opracowania przedstawiono wyniki analogicznych badań, jednakże przeprowadzonych dla metody adaptacyjnej *Particle Swarm Optimization* (PSO), a zatem niniejszy artykuł powinien być traktowany jako kontynuacja artykułu [10]. W pracy zostały przyjęte założenia takie same, jak w artykule [10], tj.:

- strukturę logiczną sieci (np. komputerów) opisuje graf G ($E(G)$ – zbiór węzłów, $U(G)$ – zbiór krawędzi);
- graf G jest grafem pełnym, czyli istnieje łącze komunikacyjne pomiędzy każdą parą węzłów $\{e, e'\} \subset E(G)$, co odpowiada sytuacji hostów pracujących m.in. w sieci Internet;
- diagnozowanie sieci jest wykonywane metodą prób porównawczych MM [7], w której wnioskowanie o stanie niezawodnościowym sieci

odbywa się na podstawie wzajemnego testowania się wybranych jej węzłów;

- wszystkie testy (niezależnie od wyboru uczestniczących w nich węzłów) charakteryzują się jednakowym *uogólnionym kosztem*¹;
- poszukiwane są quasi-najtańsze *struktury diagnozowania porównawczego* dla zadanej struktury logicznej G , tj. takie, które do zidentyfikowania wszystkich niezdatnych elementów tej sieci (pod warunkiem, że jest ich nie więcej, niż t) wymagają wykonania quasi-najmniejszej liczby testów.

Artykuł ze względów praktycznych został zorganizowany w taki sam sposób, jak artykuł [10], tj. podzielony na 4 główne rozdziały poprzedzone wprowadzeniem i zakończone podsumowaniem uzyskanych wyników. W rozdziale drugim przytoczono najważniejsze własności i określenia związane z diagnozowaniem przy wykorzystaniu metody prób porównawczych. W rozdziale trzecim rozpatrzono różne możliwości interpretacji wyników dostarczanych przez metodę PSO, jako konkretnych SDP (w pewnym uproszczeniu). W rozdziale czwartym zaproponowano odpowiednią dla metody PSO funkcję przystosowania (umożliwiającą wyznaczenie quasi-najtańszych SDP), zaś w rozdziale piątym przedstawiono wyniki wykonanych testów empirycznych oraz porównano je z rezultatami omówionymi w rozdziale [10]. Rozdział szósty stanowi podsumowanie wyników przeprowadzonych badań.

2. Podstawowe określenia i własności

Struktura logiczna G jest *t-diagnozowalna* metodą prób porównawczych (MM), jeżeli umożliwia zlokalizowanie wszystkich niezdatnych węzłów pod warunkiem, że jest ich nie więcej niż t .

Niech $\Psi(G)$ oznacza zbiór prób porównawczych dla sieci o strukturze logicznej G , $\psi \in \Psi(G)$, $K(\psi)$ – komparator próby ψ , a $P(\psi)$ – parę porównawczą próby ψ . Zbiór $\Psi' \subseteq \Psi(G)$ jest *pokryciem zbioru węzłów struktury logicznej G* , jeżeli $\bigcup_{\psi \in \Psi'} P(\psi) = E(G)$.

Strukturą diagnozowania porównawczego sieci procesorów G nazywamy taką dwójkę uporządkowaną $\langle G, \Psi' \rangle (\Psi' \subseteq \Psi(G))$, że zbiór prób porównawczych Ψ' jest pokryciem sieci G , czyli $\{P(\psi): \psi \in \Psi'\} = E(G)$.

¹ Na przykład w sensie czasu i/lub energii potrzebnych do ich realizacji.

Grafem porównań struktury diagnozowania porównawczego $\langle G, \Psi' \rangle$ ($\Psi' \subseteq \Psi(G)$) nazywamy taki graf zwykły $\hat{G}(G, \Psi') = \langle E(G), U(G, \Psi') \rangle$ o opisanych krawędziach, że $[(e', e'') \in U(G, \Psi')] \Leftrightarrow [\exists_{\psi \in \Psi'}: P(\psi) = \{e', e''\}]$, w którym etykietą krawędzi $\{e', e''\}$ jest $K(\psi)$.

Sieć o strukturze logicznej G nazywana jest *jednokrokowo t-diagnozowalną* za pomocą zbioru prób porównawczych $\Psi' \subseteq \Psi(G)$, jeżeli każda para takich zbiorów $E' \subseteq E(G)$ i $E'' \subseteq E(G)$ niezdatnych węzłów, że $|E'| \leq t$ i $|E''| \leq t$, jest rozróżnialna za pomocą (choć jednej) próby porównawczej $\psi \in \Psi'$.

Warunkiem koniecznym [6], aby struktura logiczna G była *t-diagnozowalna* metodą prób porównawczych jest, aby

$$\left(|E(G)| \geq 2t + 1\right) \wedge \left(|E(e)| \geq t \ (e \in E)\right), \quad (1)$$

gdzie: $E(e)$ – zbiór węzłów przyległych do węzła e .

Zgodnie z pracą [8] warunkiem wystarczającym, by struktura logiczna G była *t-diagnozowalna* za pomocą zbioru prób porównawczych $\Psi' \subseteq \Psi(G)$ jest, aby

$$\forall_{s \in \{0, \dots, t-1\}} \forall_{E' \subseteq E(G): |E'| = |E(G)| - 2t + s: |T(E')| > s, \quad (2)$$

gdzie:

$$T(E') = \{e \in E(G) \setminus E' : \exists_{\psi \in \Psi'}: |P(\psi) \cap \{e\}| = |K(\psi) \cap E'| = |P(\psi) \cap E'| = 1\}.$$

3. Interpretacja wyników metody PSO

Metoda PSO podczas działania operuje na zbiorze V wektorów liczb wymiernych, z których każdy reprezentuje potencjalne rozwiązanie zadanego problemu². W celu wykorzystania tej metody do wyznaczania najtańszych *t-diagnozowalnych* SDP konieczne jest zatem opracowanie sposobu przekształcania wektora liczb wymiernych $v \in V$ do postaci zbioru prób porównawczych $\Psi' \subseteq \Psi(G)$.

Zwróćmy uwagę, że wektor v o rozmiarze $|E(G)|^3$ może zostać przekształcony do postaci trójwymiarowej macierzy $M_{|E(G)| \times |E(G)| \times |E(G)|}$, zgodnie z zależnością:

$$\forall_{i \in \{1, \dots, |E(G)|\}} \forall_{j \in \{1, \dots, |E(G)|\}} \forall_{k \in \{1, \dots, |E(G)|\}}: m_{ijk} = v_{(k-1) \cdot i + (j-1) \cdot i + i}, \quad (3)$$

² Uzyskiwany wynik końcowy również jest wektorem liczb wymiernych.

gdzie:

- m_{ijk} – element macierzy M ,
- v_x – element wektora v zlokalizowany na pozycji x .

Następnie macierz M może zostać przekształcona do macierzy binarnej M' zgodnie z zależnością:

$$\forall i \in \{1, \dots, |E(G)|\} \forall j \in \{1, \dots, |E(G)|\} \forall k \in \{1, \dots, |E(G)|\}: m'_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{dla } m_{ijk} > 0 \\ 0 & \text{w p.p.} \end{cases} \quad (4)$$

gdzie: m'_{ijk} jest elementem macierzy M' .

Macierz M' może zostać przekształcona do postaci symetrycznej macierzy M'' tak, że:

$$\left(\forall k \in \{1, \dots, |E(G)|\} \forall j \in \{1, \dots, |E(G)|-1\} \forall i \in \{1, \dots, |E(G)|-j\}: m''_{ijk} = m''_{lnk} = m'_{ijk} \right) \wedge \\ \left(\forall i \in \{1, \dots, |E(G)|\} \forall k \in \{1, \dots, |E(G)|\}: m''_{iik} = 0 \right), \quad (5)$$

gdzie:

- m''_{ijk}, m''_{lnk} , – elementy macierzy M'' ,
- $l = |E(G)| - (j - 1)$,
- $n = |E(G)| - (i - 1)$.

Dla porządku warto zaznaczyć, że drugi człon zależności (5) wynika bezpośrednio z tego, że $\forall \psi \in \Psi: |P(\psi)| = 1$.

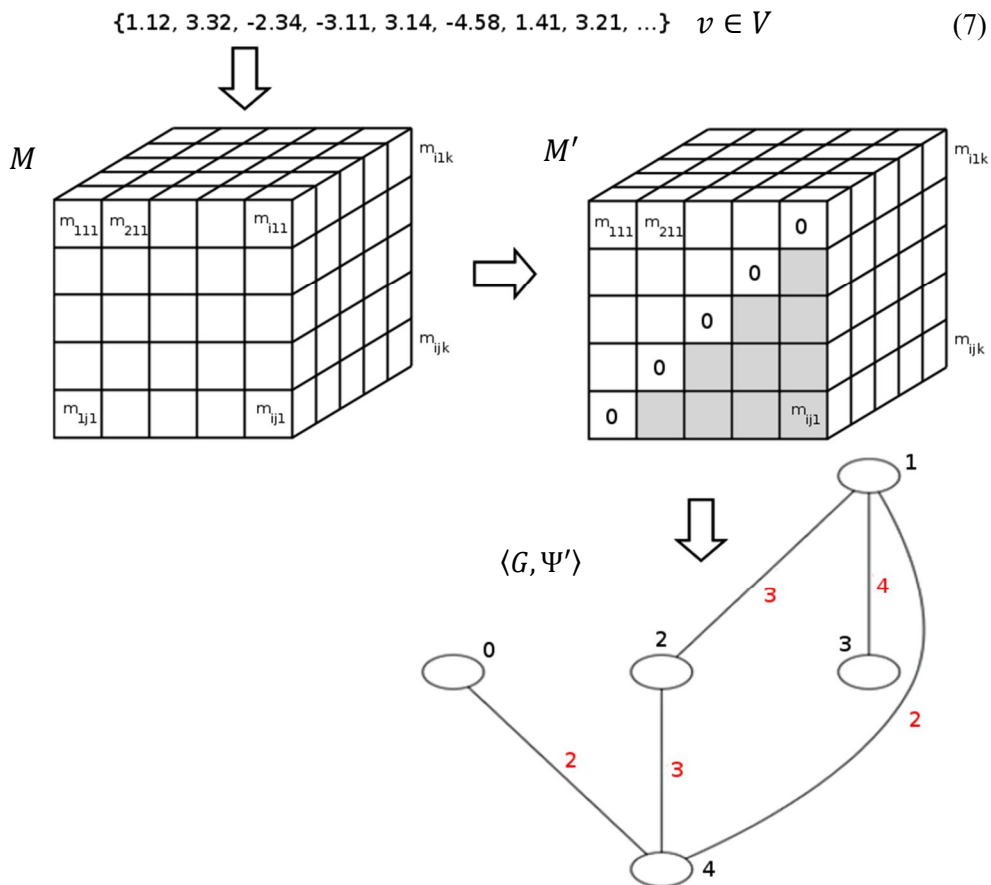
W rozważanym przypadku, jeśli węzłom grafu G zostaną przypisane etykiety od 1 do $|E(G)|$, zbiór prób porównawczych $\Psi' \subseteq \Psi(G)$ może być opisywany przez macierz M'' w taki sposób, że:

$$\left(\forall i \in \{1, \dots, |E(G)|\} \forall j \in \{1, \dots, |E(G)|\} \forall k \in \{1, \dots, |E(G)|\}: m''_{ijk} = 1 \right) \\ \left(\exists \psi \in \Psi': (K(\psi) = \{e_k\} \wedge P(\psi) = \{e_i, e_j\}) \right), \quad (6)$$

gdzie: e_i, e_j, e_k – węzły grafu G o etykietach i, j oraz k .

Przykład kolejnych omówionych powyżej przekształceń został przedstawiony na rysunku numer 1.

Zaproponowany powyżej sposób interpretacji wektorów liczb wymiernych, jako zbiorów prób porównawczych, umożliwia wykorzystanie metody PSO do wyznaczania quasi-najtańszych struktur diagnozowania porównawczego. Należy jednakże pamiętać, że w omawianym przypadku, ze względu na symetryczność macierzy M'' , tracona jest informacja o $\frac{|E(G)|^3 - |E(G)|^2}{2} + |E(G)|^2$ wartościach zapisanych w wektorze $v \in V$ reprezentującym potencjalne rozwiązanie (więc tylko $\frac{|E(G)|^3 - |E(G)|^2}{2}$ wartości wektora v jest wykorzystywanych podczas wyznaczania quasi-najtańszej SDP).



Rys. 1. Transformacja wektora liczb wymiernych do zbioru prób porównawczych (reprezentowanego przez graf porównań)

Uwzględniając powyższe, warto rozważyć także wykorzystanie w metodzie PSO wektorów o rozmiarze $\frac{(|E(G)|^3 - |E(G)|^2)}{2}$, które mogą zostać przekształcone do postaci macierzy M' w następujący sposób:

$$\begin{aligned}
 \forall_{k \in \{1, \dots, |E(G)|\}} \forall_{j \in \{1, \dots, |E(G)|-1\}} \forall_{i \in \{1, \dots, |E(G)|-j\}}: m'_{ijk} &= m'_{lnk} \\
 &= v_{(|E(G)|^2 - |E(G)|) \cdot (k-1) + \frac{2 \cdot (|E(G)|-1) - (j-2)}{2} \cdot (j-1) + i}
 \end{aligned}$$

gdzie: v_x jest elementem wektora v zlokalizowanym na pozycji x^3 .

³ Analogiczne przekształcenie zostało zaproponowane w pracy [10] dla wektorów binarnych.

4. Konstrukcja funkcji przystosowania

Łatwo zauważyć, że ze względu na sposób reprezentacji zbioru prób porównawczych (zaproponowany w punkcie numer 3) w metodzie PSO można wykorzystać funkcję przystosowania zaproponowaną w pracy [10] dla algorytmu genetycznego – została ona przytoczona poniżej.

$$f((G, \Psi')) = \sum_{e \in E(G)} g_1(e, \Psi') + \sum_{e \in \{K(\psi) : \psi \in \Psi'\}} g_2(e, \Psi') + \quad (8)$$

$$+ \sum_{s=0}^{t-1} \sum_{E' \subseteq E(G) : |E'| = |E(G) - 2 \cdot t + s|} g_3(s, E'),$$

gdzie:

- $g_1(e, \Psi') = \begin{cases} t & \text{dla } k(e, \Psi') = t \\ -|t - k(e, \Psi')| & \text{w p.p.} \end{cases}$
gdzie: $k(e, \Psi') = |\{\psi \in \Psi' : e \in P(\psi)\}|$
- $g_2(e, \Psi') = \begin{cases} t & \text{dla } z(e, \Psi') = t \\ -|t - z(e, \Psi')| & \text{w p.p.} \end{cases}$
gdzie: $z(e, \Psi') = |\{\psi \in \Psi' : K(e) = \{e\}\}|$
- $g_3(s, E') = \begin{cases} t & \text{dla } |T(E')| > s \\ -|s - |T(E')|| & \text{w p.p.} \end{cases}$
gdzie: $T(E')$ jest zbiorem zdefiniowanym w zależności (2).

5. Ocena efektywności zaproponowanej metody

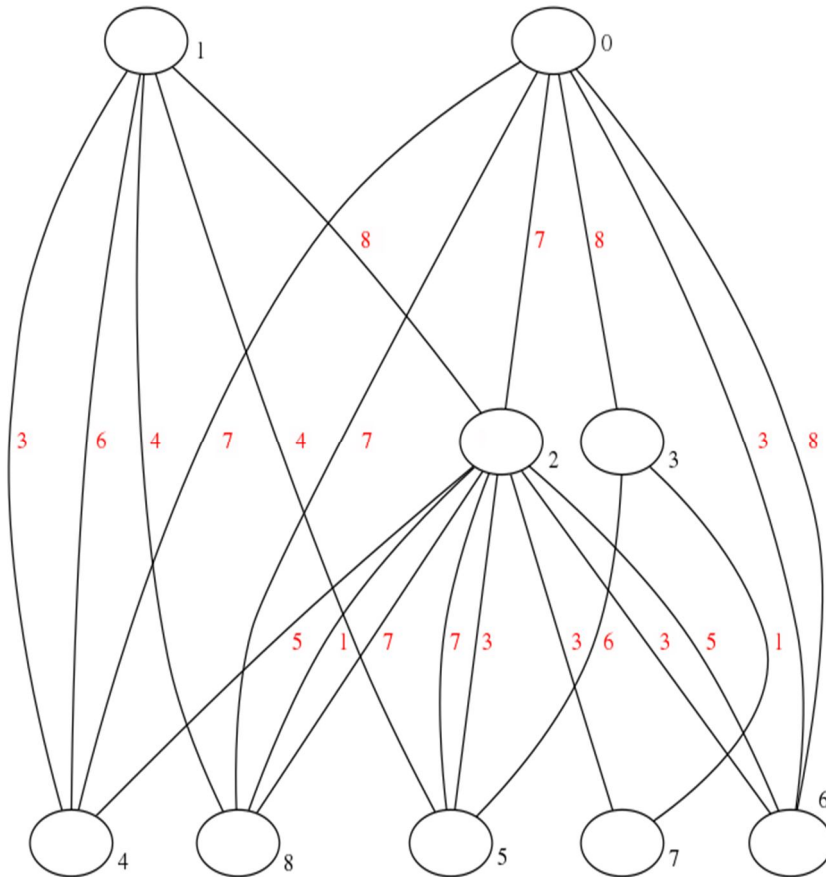
Zaproponowana metoda wyznaczania quasi-najtańszych struktur diagnozowania porównawczego została sprawdzona praktycznie oraz porównana pod względem efektywności z metodą realizującą to samo zadanie przy użyciu algorytmu genetycznego (AG) [10].

Wykonane testy obejmujące 1000 przypadków dla różnych wartości krotności diagnostycznej (parametr t) wykazały skuteczność⁴ opracowanej metody na poziomie około 86%, czyli w zdecydowanej większości przypadków wyznaczone SDP były (quasi-)najtańsze i t -diagnozowalne. Łatwo zauważyć, niższą skuteczność metody wykorzystującej PSO od metody wykorzystującej AG, przy zastosowaniu tej samej funkcji przystosowania. Jednakże obserwacja

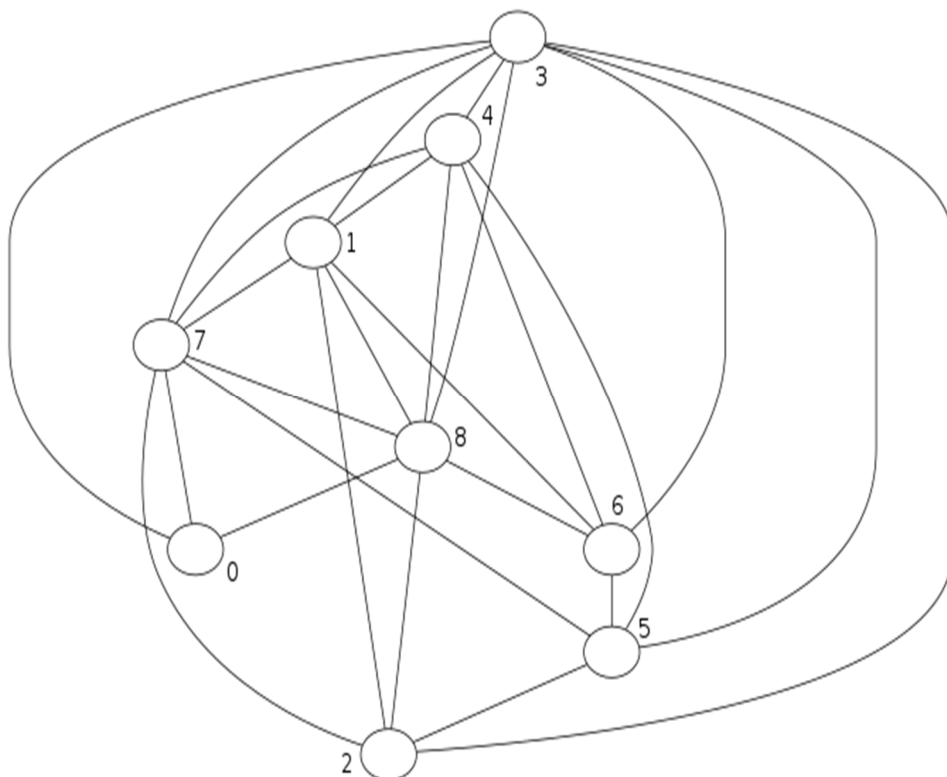
⁴ Skuteczność jest rozumiana jako częstość zdarzenia, że wyznaczona struktura diagnozowania porównawczego będzie quasi-najtańsza i t -diagnozowalna.

ta nie wpływa na zasadniczy cel niniejszego opracowania, tj. wykazanie, że przy wykorzystaniu PSO możliwe jest wyznaczanie (quasi-)najtańszych SDP.

W celach poglądowych na rysunku numer 2 został przedstawiony obraz grafu porównań t -diagnozowalnej SDP, która została wyznaczona przy wykorzystaniu opracowanej metody dla struktury logicznej zobrazonej na rysunku numer 3.



**Rys. 2. Obraz grafu porównań SDP $\langle G, \Psi' \rangle (\Psi' \subseteq \Psi(G))$
(kolorem czerwonym zostały oznaczone etykiety komparatorów)**



Rys. 3. Obraz przykładowej struktury logicznej G

Dla porządku warto dodać, że podobnie, jak w pracy [10], zweryfikowano wpływ poszczególnych członów funkcji przystosowania na odnajdowanie poprawnych rozwiązań przy wykorzystaniu zaproponowanej metody bazującej na *PSO*. Przeprowadzone testy praktyczne również w tym przypadku wykazały, że wykorzystanie jedynie pierwszego i drugiego członu funkcji przystosowania istotnie przyspiesza działanie algorytmu, jednakże obniża jego skuteczność do poziomu około 70%. Natomiast brak choć jednego ze wspomnianych członów obniża skuteczność do nieakceptowalnego poziomu około 30%. Z tego względu w rozwiązaniach uwarunkowanych czasowo warto rozważyć wykorzystanie funkcji przystosowania o postaci:

$$f((G, \Psi')) = \sum_{e \in E(G)} g_1(e, \Psi') + \sum_{e \in \{K(\psi) : \psi \in \Psi'\}} g_2(e, \Psi'). \quad (9)$$

6. Podsumowanie

Celem artykułu było wykazanie, że metoda adaptacyjna *Particle Swarm Optimization* może zostać z powodzeniem wykorzystana do wyznaczania (quasi-)najtańszych, *t-diagnozowalnych* struktur diagnozowania porównawczego, podobnie jak algorytm genetyczny (co zostało wykazane w pracy [10]). Realizacja tego zadania wymagała opracowania sposobu interpretacji wyników (częstkowych) metody PSO (będących wektorami liczb wymiernych), jako zbiorów prób porównawczych – rozwiązanie tego problemu zostało przedstawione w rozdziale trzecim niniejszego opracowania. W rozdziale czwartym została zaproponowana odpowiednia funkcja przystosowania, zaś rozdział piąty został poświęcony praktycznej ocenie użyteczności wyników uzyskiwanych przy użyciu zaproponowanej metody wyznaczania SDP.

Przeprowadzone testy empiryczne (dla dosyć dużej liczby przypadków) wskazują, że skuteczność zaproponowanej metody wynosi około 86%, co pozwala na jej zastosowanie w niektórych rozwiązaniach praktycznych. Jednakże należy również pamiętać o pewnych wadach omawianego rozwiązania – wykonana analiza porównawcza wskazuje, że jest ono nieco mniej skuteczne niż metoda adaptacyjna wykorzystująca algorytm genetyczny zaproponowana w artykule [10]. Z tego względu dalsze badania zostaną poświęcone zwiększeniu skuteczności opracowanej metody, co będzie prawdopodobnie możliwe do osiągnięcia poprzez odpowiednie dopracowanie zastosowanej funkcji przystosowania.

Literatura

- [1] ARCIUCH A., *Techniczne aspekty diagnozowania sieci procesorów o łagodnej degradacji typu sześcián 4-wymiarowy metodą prób porównawczych*. Przegląd Teleinformatyczny, nr 2, 2013, s. 3-11.
- [2] GOLDBERG D.E., *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*, WNT, Warszawa, 2003.
- [3] KULESZA R., ZIELIŃSKI Z., *Wnikliwość diagnozowania sieci procesorów metodą porównawczą*. Systemy czasu rzeczywistego. Postępy badań i zastosowania, WKŁ, Warszawa, 2009, s. 199-210.
- [4] KULESZA R., ZIELIŃSKI Z., *Diagnosis resolution of processors' network using the comparison method*. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), No. 9, 2010, s. 157-162.

- [5] KULESZA R., ZIELIŃSKI Z., *The life period of the hypercube processors' network diagnosed with the use of the comparison method*. Monographs On System Dependability, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2010.
- [6] MALEK M., *A Comparison Connection Assignment for Diagnosis of Multiprocessor Systems*. Proc. Seventh Int'l Symp. Computer Architecture, 1980, pp. 31-35.
- [7] MAENG J., MALEK M., *A Comparison Connection Assignment for Self-Diagnosis of Multiprocessor Systems*. Digest Int'l Symp.FTC, 1981, pp. 173-175.
- [8] SENGUPTA A., DAHBURA A.T., *On Self-Diagnosable Multiprocessor Systems: Diagnosis by the Comparison Approach*. IEEE Trans. Comput., Vol. 41, No. 11, Nov. 1992, pp. 1386-1396.
- [9] STRZELECKI Ł., *Metody projektowania najtańszych t-diagnozowalnych struktur diagnostyki systemowej dla sieci procesorów typu binarnego sześcianu 4-wymiarowego*, Instytut Teleinformatyki i Automatyki, Wydział Cybernetyki, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2012.
- [10] STRZELECKI Ł., *Wyznaczanie struktur diagnozowania porównawczego przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego*, Przegląd Teleinformatyczny, nr 3-4, 2017, s. 19-30.
- [11] ZIELIŃSKI Z., *Podstawy diagnostyki systemowej sieci procesorów o łagodnej degradacji i strukturze hipersześcianu*. Instytut Teleinformatyki i Automatyki, Wydział Cybernetyki, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2012.

Design of comparison structures using PSO method

ABSTRACT: In the article was proven, that adaptive method – *Particle Swarm Optimization* – can be used during designing of comparison structures. There was proposed suitable adaptation function and there were presented results of empirical experiments, that confirm usability of developed solution.

KEYWORDS: system level diagnosis, MM model, PSO method

Praca wpłynęła do redakcji: 24.01.2017 r.