

## ALGORYTM MINIMALIZACJI SYGNATUR USZKODZEŃ

Dariusz CHALECKI

Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Automatyki i Robotyki,  
 02-525 Warszawa, ul. św. Andrzeja Boboli 8

### Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę minimalizacji sygnatur uszkodzeń jako jedno z rozwiązań problemów związanych z dużą liczbą sygnałów pomiarowych, wykorzystywanych testów i potencjalnych uszkodzeń w złożonych instalacjach technologicznych. Jego opracowanie ma na celu skrócenie czasu lokalizacji uszkodzeń w takich instalacjach. W referacie opisano różnicę pomiędzy pełnymi sygnaturami uszkodzeń a sygnaturami zredukowanymi oraz przedstawiono poszczególne kroki realizacji algorytmu, na podstawie którego można uzyskać sygnatury zredukowane.

Słowa kluczowe: diagnostyka, uszkodzenie, lokalizacja uszkodzeń, sygnatura uszkodzenia.

### THE ALGORITHM OF FAULT SIGNATURES MINIMIZATION

#### Summary

The paper presents a method of minimization of fault signatures as a solution of a problem concerning large number of measuring signals and potential faults in compound technological systems. The aim of elaboration of the algorithm is to shorten the time of fault isolation in such systems. The paper describes the difference between full and reduced fault signatures as well as presents individual steps of realization of the algorithm enabling to obtain the reduced signatures.

Keywords: diagnostic testing, fault isolation, fault signature, fault.

### 1. WPROWADZENIE

Procesy technologiczne w nowoczesnych obiektach przemysłowych wymagają stałej kontroli. Złożoność tych obiektów wymusza stosowanie coraz bardziej wydajnych systemów diagnostycznych z uwagi na bardzo dużą liczbę sygnałów pomiarowych wykorzystywanych w algorytmach detekcji uszkodzeń (testach), a także dużą liczbę testów. Taka liczba sygnałów pomiarowych i testów jest jednak przyczyną problemów, które wiążą się z niezbędnymi nakładami obliczeniowymi i czasem przetwarzania informacji. Liczba potencjalnych uszkodzeń w dużych instalacjach przemysłowych jest ogromna, przez co ich lokalizacja może okazać się czasochłonna.

Istnieje kilka praktycznych rozwiązań tego problemu, jak na przykład dynamiczna dekompozycja obiektu czy diagnozowanie zdecentralizowane [3]. Inną metodą, proponowaną w tym artykule, jest minimalizacja sygnatur uszkodzeń obiektów.

Lokalizacja uszkodzeń odbywa się na podstawie oceny poprawności przebiegu procesu, którą uzyskujemy w oparciu o znajomość relacji pomiędzy sygnałami diagnostycznymi  $s$ , będącymi wyjściami algorytmów detekcyjnych (testów), a uszkodzeniami  $f$ . Można ją przedstawić za pomocą zależności:

$$r: F \times S \rightarrow \Phi(V_s) \quad (1)$$

(gdzie  $V_s$  jest zbiorem wartości wszystkich sygnałów diagnostycznych), co oznacza przyporządkowanie każdej parze uszkodzenie-sygnał diagnostyczny ( $f, s$ ) pewnych wartości sygnałów diagnostycznych odpowiadających danemu uszkodzeniu.

Postać ogólna relacji (1) może być przedstawiona za pomocą tabeli (macierzy) odwzorowującej zależność uszkodzenia – sygnały diagnostyczne, która zawiera wartości sygnałów odpowiadające poszczególnym uszkodzeniom (rys. 1).

S/F	$f_1$	$f_2$	...	$f_i$	...	$f_l$
$s_1$				$v_{i1}$		
$s_2$				$v_{i2}$		
...						
$s_j$				$v_{ij}$		
...						
$s_J$				$v_{iJ}$		

Rys. 1. Zapis relacji uszkodzenia - symptomy

Kolumny tabeli, które można zapisać w postaci wektorowej (2), określają sygnatury poszczególnych uszkodzeń. Sygnaturą uszkodzenia jest zbiór wartości sygnałów diagnostycznych, które powstają podczas wystąpienia tego uszkodzenia.

$$V(f_i) = \begin{bmatrix} v_1(f_i) \\ v_2(f_i) \\ \dots \\ v_J(f_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{i1} \\ v_{i2} \\ \dots \\ v_{iJ} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Podczas lokalizacji uszkodzeń bieżące wartości sygnałów diagnostycznych z przebiegu procesu porównywane są z wartościami sygatur uszkodzeń i po wystąpieniu wszystkich symptomów  $i$ -tego uszkodzenia system wnioskuje o pojawieniu się tego uszkodzenia [1]. Uszkodzenia są nierozróżnialne, jeśli ich sygatury są jednakowe.

Zdefiniowane powyżej sygatury są sygaturami pełnymi, czyli takimi, do których budowy wykorzystuje się wartości wszystkich sygnałów diagnostycznych. Okazuje się jednak, że do lokalizacji uszkodzeń można wykorzystać sygatury zredukowane, oparte tylko na podzbiórach tych sygnałów, bez utraty rozróżnialności uszkodzeń.

## 2. KONCEPCJA ALGORYTMU

Algorytm minimalizacji sygatur uszkodzeń opracowano dla dwustanowych sygnałów diagnostycznych ( $v_{ij} \in \{0, 1\}$ ), a jego realizację pokazano na przykładzie binarnej macierzy diagnostycznej. Zostanie pokazane, jak za pomocą algorytmu zminimalizować sygatury uszkodzeń tak, aby były one równorzędne sygaturom pełnym.

Przykładowe binarne macierze diagnostyczne przedstawiono na rys. 2.

S/F	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>	f <sub>5</sub>	f <sub>6</sub>	f <sub>7</sub>	f <sub>8</sub>
a) s <sub>1</sub>	1	1						1
s <sub>2</sub>	1	1		1		1	1	1
s <sub>3</sub>		1	1	1	1	1		1
s <sub>4</sub>			1			1	1	1
s <sub>5</sub>				1	1		1	

  

S/F	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>	f <sub>5</sub>	f <sub>6</sub>	f <sub>7</sub>	f <sub>8</sub>
b) s <sub>1</sub>	1	1	0			0		1
s <sub>2</sub>	1	1	0	1	0	1	1	1
s <sub>3</sub>	0	1	1	1	1	1		1
s <sub>4</sub>	0	0	1			1	1	1
s <sub>5</sub>				1	1		1	

Rys. 2. Przykład binarnej macierzy diagnostycznej: a) z pełnymi sygaturami uszkodzeń, b) z sygaturami zredukowanymi

Wartość sygnału 1 oznacza negatywny wynik testu diagnostycznego, czyli wystąpienie symptomu; w dalszej części pracy będzie krótko nazywana „jedyneką”. Wartości 0 będą nazywane „zerami”. Na rys. 2a) - dla uproszczenia - „zera” w macierzy binarnej zastąpiono pustymi komórkami. Rysunek ten odpowiada sytuacji, gdy podczas wnioskowania o uszkodzeniach brane są pod uwagę wszystkie sygnały diagnostyczne dla wszystkich uszkodzeń. Posłużono się tu pełnymi sygaturami uszkodzeń.

Rys. 2b) przedstawia przypadek, gdy posłużono się sygaturami zredukowanymi. Pominięto tu te „zera”, które nie mają wpływu na rozróżnialność uszkodzeń; pod uwagę wzięto zatem te, których zastąpienie „jedynekami” spowodowałoby, że dwie lub więcej sygatur przybrałoby jednakową postać.

Metoda wydaje się bardzo prosta w odniesieniu do macierzy diagnostycznych o rozmiarach podobnych do tej na rys. 2. Jednak kiedy ma się do czynienia z macierzami dotyczącymi rzeczywistych obiektów przemysłowych, w których występują tysiące sygnałów diagnostycznych i tyle samo możliwych uszkodzeń, „ręczne” analizowanie takich macierzy jest niewykonalne. W takich wypadkach zastosowanie może znaleźć algorytm minimalizacji sygatur uszkodzeń.

## 3. KONSTRUKCJA ALGORYTMU

### 3a. Krok pierwszy

Wyjściową tabelę, taką jak na rys. 2a), ale dla przypadku ogólnego, przedstawić można w postaci macierzy  $M$ :

$$M = \begin{bmatrix} v_{11} & \cdots & v_{i1} & \cdots & v_{I1} \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ v_{1j} & & v_{ij} & & v_{Ij} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ v_{1J} & \cdots & v_{iJ} & \cdots & v_{IJ} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Pierwszym krokiem w realizacji algorytmu minimalizacji sygatur jest utworzenie dla każdego z uszkodzeń  $f_i$  pomocniczych macierzy  $N_i$  o wymiarach  $I \times J$  i postaci takiej jak przedstawia zależność (4). Zostaną do nich przepisane te „jedyнки” z sygatur innych uszkodzeń, których pozycje pokrywają się z pozycjami „jedynek” sygatury uszkodzenia  $f_i$ . Kolumna  $i$ -ta zostanie z macierzy  $M$  przepisana. Pozostałe komórki mogą zostać wypełnione na przykład zerami.

$$N_i = \begin{bmatrix} n_{11} & \cdots & n_{i1} & \cdots & n_{I1} \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ n_{1j} & & n_{ij} & & n_{Ij} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ n_{1J} & \cdots & n_{iJ} & \cdots & n_{IJ} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Dla  $i$ -tego uszkodzenia zachodzą wówczas zależności:

– dla kolumny  $i$ -tej:

$$n_{ij} = v_{ij} \quad (5a)$$

– dla pozostałych kolumn:

$$n_{kj} = 1, \text{ gdy } v_{ij} = v_{kj} = 1 \quad (5b)$$

$$n_{kj} = 0, \text{ gdy } v_{ij} = 0 \vee v_{kj} = 0 \quad (5c)$$

### 3b. Krok drugi

Pozycje „jedynek” macierzach  $N_i$  należy zapamiętać, by na ich podstawie w dalszych krokach algorytmu odszukać w sygaturach „zera”, których

nie można pominąć. Rolę „pamięci” spełniać będą wektory  $W_i$ , których elementami będą kombinacje pozycji, na jakich znajdują się „jedyne” w poszczególnych kolumnach. Najprostszym sposobem na zapamiętanie tych pozycji jest np. potraktowanie ich jako cyfr pewnych liczb, choć mogą to być dowolnie utworzone wyrazy, które będą jednoznacznie identyfikatorami każdej z sygatur. Wyrazy  $w_{ii}$  wektorów

$$W_i = [w_{1i} \ \dots \ w_{ii} \ \dots \ w_{li}] \quad (6)$$

można w tym wypadku przedstawić w następujący sposób:

$$w_{ii} = \sum_k j \cdot 10^k, j: n_{ij} = 1 \quad (7)$$

gdzie indeks  $k$  zmienia się od 1 do wartości określającej liczbę „jedynek” w kolumnie.

Bardziej czytelne jest przedstawienie tych wektorów w postaci macierzy kwadratowej  $\Omega$ , w której  $i$ -ty wiersz odpowiada wektorowi  $W_i$ .

$$\Omega = \begin{bmatrix} w_{11} & \dots & w_{1l} & \dots & w_{1I} \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ w_{li} & & w_{ii} & & w_{li} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ w_{lI} & \dots & w_{lI} & \dots & w_{lI} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Oba indeksy wyrazów macierzy  $\Omega$  oznaczono jako  $i$ , ponieważ jest ona kwadratowa, a także symetryczna. Zarówno jej rzędy, jak i kolumny odnoszą się do kolejnych uszkodzeń  $f_i$ , a na jej głównej przekątnej znajdują się wyrazy wskazujące, na których pozycjach  $i$ -tego uszkodzenia znajdują się „jedyne”.

### 3c. Krok trzeci

Ostatnim krokiem realizacji algorytmu jest stworzenie nowych sygatur uszkodzeń, a ściślej mówiąc – stworzenie wektorów, których wyrazy będą wskazywać, jakie elementy starych sygatur należy brać pod uwagę podczas lokalizacji uszkodzeń. W tym celu trzeba porównać wartości elementów wektorów  $W_i$  (czyli poszczególnych rzędów macierzy  $\Omega$ ). Utworzone na tej podstawie wektory wskaźników do nowych sygatur nazwano  $\Theta_i$ . Wygodnie jest się nimi posługiwać jako wektorami kolumnowymi (9) z uwagi na to, że wektory sygatur  $V_i$  są również wektorami kolumnowymi. Wyrazy wektorów  $\Theta_i$  obliczane są wg następującego rozumowania:

Jeżeli  $k$ -ty element  $i$ -tego rzędu ( $w_{ki}$ ) macierzy  $\Omega$ <sup>1)</sup> jest taki sam jak element  $i$ -ty ( $w_{ii}$ ), dla którego

przeprowadzamy porównanie (czyli dla elementu z głównej przekątnej macierzy  $\Omega$ ), to oznacza to, że należy prześledzić sygaturę  $k$ -tego uszkodzenia ( $V_k$ ) i uznać za istotne te „zera” sygatury uszkodzenia  $i$ -tego ( $v_{ij} = 0$ ), których pozycja pokrywa się z pozycjami „jedynek” sygatury uszkodzenia  $k$ -tego ( $v_{kj} = 1$ ).

Przekładając te czynności na trzeci krok algorytmu, można napisać, że jeśli

$$\Theta_i = \begin{bmatrix} \theta_{i1} \\ \vdots \\ \theta_{il} \\ \vdots \\ \theta_{iL} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

to wartości wskaźników  $\theta_{il}$  oblicza się dla „jedynek” z zależności:

$$\theta_{il} = j, \text{ gdzie } j: v_{ij} = 1 \quad (10a)$$

oraz dla „zer”:

$$\theta_{il} = j, \text{ gdzie } j: v_{kj} = 1 \text{ przy } k: w_{ki} = w_{ii} \quad (10b)$$

( $V_i$  to bieżąca sygatura, z którą porównywane są sygatury  $V_k$ ; indeks  $l$  zmienia się od 1 do liczby elementów wektora  $\Theta_i$ ).

## 4. PRZYKŁAD

W celu lepszego zobrazowania działania algorytmu zastosowano go do zminimalizowania sygatur uszkodzeń dla obiektu, dla którego zależność między uszkodzeniami i symptomami przedstawia tabela z rys. 2a). Zostanie dowiedzione, że z pomocą tego algorytmu możliwe jest uzyskanie takich sygatur uszkodzeń jak w tabeli na rys. 2b).

Tabelę z rys. 2a), przedstawić można jako macierz  $M$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

która odpowiada ogólnej postaci (3).

Krok pierwszy: utworzenie na podstawie tego, co napisano w rozdziale 3a., macierzy  $N_i$  tak jak poniżej (aby zaoszczędzić miejsce, wybrano dwie przykładowe macierze).

<sup>1)</sup> Ze względu na symetrię macierzy  $\Omega$  operacje przeprowadzane na rzędach (kolumnach) można zastąpić operacjami na kolumnach (rzędach).

$$N_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$N_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Krok drugi: spisując kombinacje pozycji „jedynek” z macierzy  $N_i$ , otrzymujemy wektory  $W_i$  w postaci

$$W_1 = [21 \ 21 \ 0 \ 2 \ 0 \ 2 \ 2 \ 21]$$

$$W_4 = [2 \ 32 \ 3 \ 532 \ 53 \ 32 \ 52 \ 32]$$

po czym budujemy z nich macierz  $\Omega$  (poniżej pokazano całą macierz, zbudowaną na podstawie macierzy  $N_1 - N_8$ ):

$$\Omega = \begin{bmatrix} 21 & 21 & 0 & 2 & 0 & 2 & 2 & 21 \\ 21 & 321 & 3 & 32 & 3 & 32 & 2 & 321 \\ 0 & 3 & 43 & 3 & 3 & 43 & 4 & 43 \\ 2 & 32 & 3 & 532 & 53 & 32 & 52 & 32 \\ 0 & 3 & 3 & 53 & 53 & 3 & 5 & 3 \\ 2 & 32 & 43 & 32 & 3 & 432 & 42 & 432 \\ 2 & 2 & 4 & 52 & 5 & 42 & 542 & 42 \\ 21 & 321 & 43 & 32 & 3 & 432 & 42 & 4321 \end{bmatrix}$$

Krok trzeci: przez porównanie elementów w wierszach macierzy  $\Omega$  wypełniamy wektory  $\Theta_i$  wskaźnikami do „zer”, których nie można pominąć, oraz do „jedynek”:

$$\Theta_1 = [1 \ 2 \ 3 \ 4]^T$$

$$\Theta_2 = [1 \ 2 \ 3 \ 4]^T$$

$$\Theta_3 = [1 \ 2 \ 3 \ 4]^T$$

$$\Theta_4 = [2 \ 3 \ 5]^T$$

$$\Theta_5 = [2 \ 3 \ 5]^T$$

$$\Theta_6 = [1 \ 2 \ 3 \ 4]^T$$

$$\Theta_7 = [2 \ 4 \ 5]^T$$

$$\Theta_8 = [1 \ 2 \ 3 \ 4]^T$$

Przykładowo, dla uszkodzenia  $f_1$  wektor  $\Theta_1$  utworzono następująco: elementy na pozycji pierwszej i drugiej są oczywiste, ponieważ wskazują na „jedynek” sygnatury  $V_1$ . Na podstawie rozdziału 3c. dopisano wskaźniki do odpowiednich „zer”. Jak widać w macierzy  $\Omega$ , w pierwszym rzędzie (czyli tym, który odpowiada uszkodzeniu  $f_1$ ) element drugi

(odpowiadający  $f_2$ ) i ósmy ( $f_8$ ) mają taką samą postać jak element pierwszy ( $f_1$ ), dla którego przeprowadzamy porównanie. Dlatego należy prześledzić sygnatury  $V_2$  i  $V_8$ . Widać, że oprócz pozycji pierwszej i drugiej sygnatura uszkodzenia  $f_2$  zawiera „jedynek” również na pozycji trzeciej, a uszkodzenia  $f_8$  – na pozycji trzeciej i czwartej. Stąd wynika, że trzeba uzupełnić wektor  $\Theta_1$  właśnie o elementy wskazujące na pozycję trzecią i czwartą.

## 5. PODSUMOWANIE

Algorytm minimalizacji sygatur, obok innych rozwiązań problemu przetwarzania dużej liczby sygnałów diagnostycznych, może stać się bardzo pomocnym narzędziem przyspieszającym diagnozowanie systemów przemysłowych. Przytoczony przykład pokazuje, że użycie skonstruowanych na podstawie algorytmu nowych, zminimalizowanych sygatur uszkodzeń nie prowadzi do utraty rozróżnialności uszkodzeń obiektu, a znacząco redukuje nakłady obliczeniowe przy diagnozowaniu prowadzonym w czasie rzeczywistym. Powyższy algorytm został zaimplementowany i przetestowany.

## LITERATURA

- [1] KOŚCIELNY J. M.: *Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych* – Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
- [2] KORBICZ J.: *Diagnostyka procesów* – WNT, Warszawa 2002.
- [3] KOŚCIELNY J. M., SYFERT M.: *Wybrane problemy diagnostyki procesów przemysłowych*, V Krajowa Konferencja „Diag 2003” – Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, str. 65 – 79.