

ROZRÓŻNIALNOŚĆ USZKODZEŃ W UKŁADACH LINIOWYCH

Jan Maciej KOŚCIELNY, Bolesław DZIEMBOWSKI

Instytut Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej
 02-525 Warszawa, ul. Św. Andrzeja Boboli 8, fax (22) 849 03 98, {jmk, b.dziembowski}@mchtr.pw.edu.pl

Streszczenie

W referacie przedstawiono różne metody zapisu związku między uszkodzeniami i wartościami sygnałów diagnostycznych dla obiektów diagnozowanych opisywanych modelami liniowymi. Przeprowadzono analizę porównawczą rozróżnialności uszkodzeń uzyskiwanej z zastosowaniem prezentowanych metod. Omówiono nową metodę zwiększania rozróżnialności uszkodzeń bazującą na sekwencji pojawiających się symptomów. Przedyskutowano zalety i ograniczenia poszczególnych metod.

Słowa kluczowe: lokalizacja uszkodzeń, rozróżnialność uszkodzeń, sekwencja symptomów.

FAULT DISTINGUISHABILITY FOR LINEAR SYSTEMS

Summary

Different methods of describing relations between faults and values of diagnostic signals for systems with linear models are presented in this paper. Realize there comparative analysis of faults distinguishability using presented methods. Talk over new method of fault's distinguishability increase based on sequence of emerge symptoms. Discuss advantages and constraint each presented methods.

Keywords: fault isolation, fault distinguishability, sequence of symptoms.

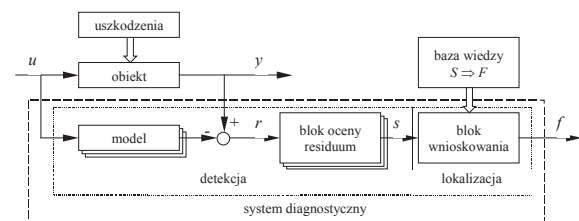
1. WSTĘP

W diagnostyce procesów przemysłowych wyróżniamy dwa podejścia, jedno polegające na analizie sygnałów pomiarowych (*ang. signal based*) oraz drugie wykorzystujące modele procesów (*ang. model based*) [7, 8, 14, 15]. Metody bazujące na modelach zapewniają, w stosunku do metod „sygnałowych”, wcześniejsze wykrywanie oraz rozpoznawanie mniejszych uszkodzeń, dlatego tylko te będą dalej rozważane.

Jednym z głównych wskaźników oceny systemu diagnostycznego jest jego zdolność do rozróżniania uszkodzeń [1, 12]. Dąży się zwykle do uzyskania rozróżnialności wszystkich uszkodzeń. Dokładność uzyskiwanych diagnoz określona jest przez liczbę uszkodzeń wskazywanych w diagnozie [12, 13]. Im liczba ta jest mniejsza tym diagnoza jest bardziej dokładna. Zatem zwiększenie rozróżnialności uszkodzeń umożliwia generowanie diagnoz precyzyjnie wskazujących powstałe uszkodzenia, a w konsekwencji możliwość podjęcia odpowiednich działań zabezpieczających przebieg procesu i dokonania szybkiej wymiany lub naprawy uszkodzonego urządzenia.

Na rys. 1 przedstawiono ogólny schemat diagnozowania na podstawie modeli cząstkowych obiektu. Z wykorzystaniem modeli wyliczane są wartościami sygnałów wyjściowych y . Różnice między wyliczonymi i mierzonymi wartościami

y nazywane są residuami. W stanie bez uszkodzeń i zakłóceń wartości residuów r powinny oscylować w pobliżu zera. Odbiegające od zera wartości residuów są symptomami powstających uszkodzeń f . W celu uproszczenia procesu wnioskowania diagnostycznego w wielu metodach lokalizacji uszkodzeń stosowana jest binarna lub wielowartościowa ocena (kwantyzacja) wartości residuów. W jej wyniku powstają binarne lub wielowartościowe sygnały diagnostyczne s . Na podstawie wartości sygnałów diagnostycznych prowadzona jest lokalizacja uszkodzeń.



Rys. 1. Schemat detekcji i lokalizacji uszkodzeń

2. OPIS UKŁADÓW LINIOWYCH Z UWZGLĘDNIENIEM WPLYWU USZKODZEŃ

Do lokalizacji uszkodzeń niezbędna jest znajomość związku między uszkodzeniami oraz wartościami sygnałów diagnostycznych. Związek

ten może być określony w wyniku modelowania obiektu z uwzględnieniem wpływu uszkodzeń. Uszkodzenia traktowane są jako specyficzne wejścia obiektu. Ogólny opis nieliniowych obiektów dynamicznych przyjmuje postać układu równań stanu i wyjść [7,8]:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \phi[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{f}(t)], \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \psi[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{f}(t)]. \quad (2)$$

gdzie: \mathbf{x} – wektor zmiennych stanu obiektu,
 \mathbf{y} – wektor wyjść,
 \mathbf{u} – wektor wejść,
 \mathbf{f} – uszkodzenia.

Układy rzeczywiste zwykle są nieliniowe, ale dla uproszczenia opisu matematycznego przeprowadza się ich linearyzację, co pozwala na sformułowanie przybliżonego opisu liniowego, ważnego w otoczeniu wybranego punktu pracy na charakterystyce statycznej (punkt ten odpowiada najczęściej nominalnym lub uśrednionym warunkom pracy układu). Liniowy układ równań stanu i wyjść ma postać:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{E}\mathbf{f}(t), \quad (3)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) + \mathbf{F}\mathbf{f}(t). \quad (4)$$

Wpływ uszkodzeń na współrzędne stanu oraz wyjścia obiektu odzwierciedlają macierze \mathbf{E} i \mathbf{F} .

Inną postacią opisu obiektu liniowego jest model transmitancyjny, zawierający układ równań określających zależność poszczególnych wyjść obiektu od wejść i uszkodzeń [2-8, 12]:

$$\mathbf{y}(s) = \mathbf{G}(s)\mathbf{u}(s) + \mathbf{G}_F(s)\mathbf{f}(s). \quad (5)$$

Poszczególne równania mają postać:

$$y_j(s) = \mathbf{G}_j(s)\mathbf{u}(s) + \mathbf{G}_{Fj}(s)\mathbf{f}(s), \quad (6)$$

przy czym $\mathbf{G}_j(s)$, $j=1, \dots, J$; zawiera transmitancje typu wejście-wyjście:

$$G_{jp}(s) = y_j(s)/u_p(s); \quad p=1, \dots, P, \quad (7)$$

a $\mathbf{G}_{Fj}(s)$, $j=1, \dots, J$; transmitancje dla poszczególnych par uszkodzenie-wyjście:

$$G_{jk}(s) = y_j(s)/f_k(s); \quad k=1, \dots, K. \quad (8)$$

Przy braku uszkodzeń spełniona jest zależność: $y_j(s) - \mathbf{G}_j(s)\mathbf{u}(s) = \mathbf{G}_{Fj}(s)\mathbf{f}(s) = 0$. Residua wyliczane są z zależności zwanej postacią obliczeniową:

$$r_j(s) = y_j(s) - \mathbf{G}_j(s)\mathbf{u}(s). \quad (9)$$

Równanie (10) (tzw. postać wewnętrzna) odzwierciedla ogólny związek między danym residuum a uszkodzeniami. Dla wszystkich residuów związek ten możemy przedstawić w postaci tab. 1.

$$r_j(s) = \mathbf{G}_{jF}(s)\mathbf{f}(s) = G_{j1}(s)f_1(s) + \dots + G_{jk}(s)f_k(s) + \dots + G_{jK}(s)f_K(s). \quad (10)$$

Tab. 1. Postać wewnętrzna residuów

	f_1	...	f_k	...
r_1	G_{11}		G_{1k}	
...				
r_j	G_{j1}		G_{jk}	
...				

3. METODY ODWZOROWANIA ZWIĄZKU USZKODZENIA - SYGNAŁY DIAGNOSTYCZNE

Modele stosowane do lokalizacji uszkodzeń powinny odwzorowywać przestrzeń residuów lub przestrzeń wartości sygnałów diagnostycznych w dyskretną przestrzeń uszkodzeń. Residua r są ciągłymi sygnałami diagnostycznymi. Odwzorowanie obszarów odpowiadających poszczególnym uszkodzeniom w przestrzeni residuów jest bardzo trudne. Dlatego stosowane są najczęściej uproszczone związki. Zostały one poniżej omówione.

3.1. Residua strukturalne

Postać wewnętrzna residuum $r_j(s) = \mathbf{G}_{Fj}(s)\mathbf{f}(s)$ [5,7,8,12] zawiera informację o uszkodzeniach, które wpływają na wartość residuum. W najprostszym przypadku wrażliwość residuów na poszczególne uszkodzenia można rozpatrywać jakościowo i zapisać w postaci binarnej macierzy diagnostycznej, która jest określona na iloczynnie kartezjańskim binarnych (residuów) sygnałów diagnostycznych oraz uszkodzeń. Element tej macierzy przyjmuje wartości:

$$\begin{cases} v(s_j, f_k) \equiv v_{jk} = 0, & \text{jeśli } G_{jk}(s) = y_j(s)/f_k(s) = 0 \\ v(s_j, f_k) \equiv v_{jk} = 1, & \text{jeśli } G_{jk}(s) = y_j(s)/f_k(s) \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

Mówimy, że j -te residuum jest wrażliwe na uszkodzenie f_k (wykrywa to uszkodzenie), jeśli $G_{jk}(s) = y_j(s)/f_k(s) \neq 0$. W tab.2 przedstawiono przykład binarnej macierzy diagnostycznej.

Tab. 2. Binarne macierz diagnostyczna

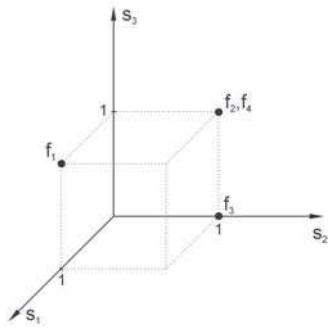
	f_1	f_2	f_3	f_4
s_1	1			
s_2		1	1	1
s_3	1	1		1

Binarne macierz diagnostyczna określa zatem wzorcowe wartości binarnych sygnałów diagnostycznych dla poszczególnych uszkodzeń. Wektor wartości sygnałów diagnostycznych dla k -tego uszkodzenia zapisany w kolumnie macierzy diagnostycznej jest sygnaturą uszkodzenia:

$$V(f_k) = \begin{bmatrix} v_{1k} \\ v_{2k} \\ \dots \\ v_{JK} \end{bmatrix} \quad (12)$$

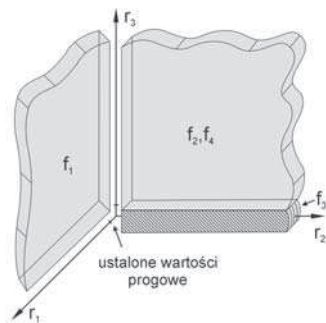
Powyższa postać związku uszkodzenia-sygnały diagnostyczne określana jest także jako residua strukturalne [2, 5, 7, 8, 12] (*ang. structured residuals*).

Graficzna reprezentacja binarnej macierzy diagnostycznej przedstawiona została na rys. 2.



Rys. 2. Graficzna reprezentacja binarnej macierzy diagnostycznej

Opisaną metodę przedstawić można również w przestrzeni residuów (rys. 3).



Rys. 3. Residua strukturalne w przestrzeni residuów zwanej przestrzenią parzystości

Zaletą binarnej macierzy diagnostycznej jest możliwość zaprojektowania nie tylko na podstawie równań obiektu uwzględniających wpływ uszkodzeń, lecz także na podstawie wiedzy eksperckiej.

W przypadku diagnozowania na podstawie residuów strukturalnych przyjmuje się, że wartości poszczególnych residuów oceniane są binarnie (0 – brak symptomu – bliska zera wartość residuum, 1 – symptom – odbiegająca od zera wartość residuum). Binarne sygnały diagnostyczne przyjmują wartość 1, jeśli wystąpi któreś z uszkodzeń, na które jest wrażliwe to residuum.

Diagnoza formułowana jest w wyniku porównania uzyskanych wartości sygnałów diagnostycznych (13) tworzących wektor:

$$C = \begin{bmatrix} c(s_1) \\ c(s_2) \\ \dots \\ c(s_j) \end{bmatrix} \quad (13)$$

z sygnaturą stanu zdatności zawierającą same zera oraz sygnaturami poszczególnych uszkodzeń. Diagnoza wskazuje podzbiór uszkodzeń, których sygnatury są zgodne z aktualnymi wartościami sygnałów diagnostycznych.

$$DGN_B = \{f_k \in F : \forall_j c(s_j) = v_{jk}\} \quad (14)$$

3.2. Residua wielowartościowe

Rozszerzeniem binarnej macierzy informacyjnej jest FIS (Fault Isolation System) wprowadzony w pracach [7-13]. Jest on określony na iloczynie kartezjańskim uszkodzeń i wielowartościowych sygnałów diagnostycznych. Istotne rozszerzenia FIS w stosunku do binarnej macierzy diagnostycznej są następujące:

- Dla każdego sygnału diagnostycznego może istnieć indywidualny zbiór jego wartości, przy czym wartość sygnału diagnostycznego $q_j=0$ odpowiada stanowi bez uszkodzeń, a pozostałe wartości są symptomami uszkodzeń.
- Zbiór Q_j wartości j -tego sygnału diagnostycznego zawiera skończoną liczbę wartości (zwykle kilka).
- Dowolny element $q(s_j, f_k) \equiv q_{jk}$ w FIS zawierać może zarówno jedną wartość sygnału diagnostycznego jak też ich podzbiór; oznacza to, że w stanie z k -tym uszkodzeniem j -ty sygnał diagnostyczny może przyjmować nie jedną, lecz kilka wartości.

FIS jest zatem tablicą określającą wzorcowe wartości sygnałów diagnostycznych dla poszczególnych uszkodzeń.

Poniżej przedstawiono prosty przykład FIS.

Tab. 3. Przykład FIS

S/F	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	V_i
s_1	1	0	1	0	0	1	{0,1}
s_2	0	-1	0	+1	-1	0	{0,+1,-1}
s_3	-1	+1	+1,-1	0	+1	+1	{0,+1,-1}
s_4	+1	0	+1	+1	0	+1,-1	{0,+1,-1}

Sygnatura k -tego uszkodzenia odpowiada kolumnie FIS. Jest ona uogólnieniem sygnatury określonej wzorem (12). Określa ją zależność:

$$Q(f_k) = \begin{bmatrix} q_{1,k} \\ q_{2,k} \\ \dots \\ q_{j,k} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Ponieważ element q_{jk} sygnatury jest w przypadku ogólnym podzbiorem, zatem sygnatura taka jest sygnaturą złożoną, w której wydzielić można sygnatury elementarne jako wektory zawierające różne możliwe kombinacje wartości sygnałów diagnostycznych.

Diagnoza formułowana jest w wyniku porównania uzyskanych wartości sygnałów diagnostycznych tworzących wektor C z sygnaturą stanu zdatności zawierającą same zera oraz sygnaturami poszczególnych uszkodzeń. Diagnoza wskazuje podzbiór uszkodzeń, których sygnatury są zgodne z aktualnymi wartościami sygnałów diagnostycznych.

$$DGN_{FIS} = \{f_k \in F : \forall_{s_j} c(s_j) \in q_{jk}\}. \quad (16)$$

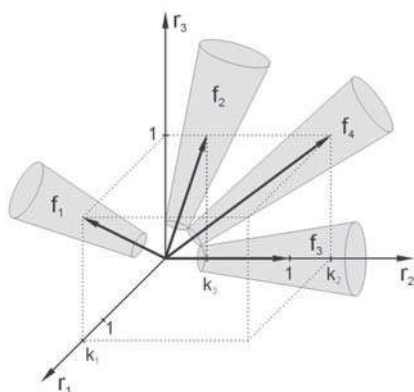
Szczególnym przypadkiem residuów wielowartościowych są residua trójwartościowe, dla których zbiór $Q_j = \{0, -1, +1\}$. W porównaniu z binarną oceną wartości residuów, przy ocenie trójwartościowej brany jest pod uwagę dodatkowo znak residuum. Znak ten ustalany może być na podstawie równań residuów w postaci wewnętrznej (10). Uwzględniany jest znak odpowiedniej transmitancji $G_{jk}(s) = y_j(s)/f_k(s) \neq 0$ oraz znak uszkodzenia f_k . Jeśli uszkodzenie może mieć wartość zarówno dodatnią jak też ujemną, to $q_{j,k} = \{-1, +1\}$. Jeśli natomiast możliwy fizycznie jest tylko jeden znak uszkodzenia (np. wyciek może mieć tylko wartość dodatnią), to $q_{j,k}$ jest jednoelementowy, a znak 1 ustalany jest jako iloczyn znaków transmitancji $G_{jk}(s)$ i uszkodzenia f_k .

3.3. Residua kierunkowe

Mając dany opis wpływu uszkodzeń na wartości residuów w postaci wewnętrznej (10) można określić wrażliwość residuów na poszczególne uszkodzenia nie tylko jakościowo lecz również ilościowo. Wykorzystując tę informację można uzyskać wzmocnienie residuum względem pojawiającego się uszkodzenia:

$$k_{jk} = \lim_{s \rightarrow 0} G_{jk}(s) = \frac{r_j(s)}{f_k(s)}. \quad (17)$$

Wektor wzmocnień residuów odpowiadających danemu uszkodzeniu określa pewien kierunek w przestrzeni residuów (zwanej przestrzenią parzystości), charakterystyczny dla danego uszkodzenia. Każdemu uszkodzeniu odpowiada zatem wektor kierunkowy [2, 5, 7, 8, 12]. Wynika stąd nazwa – residua kierunkowe (*ang. directional residual*).



Rys. 4. Residua kierunkowe w przestrzeni parzystości

W przypadku ogólnym (obiektów nieliniowych) kierunek wektora k -tego uszkodzenia w przestrzeni residuów określony jest przez wektor wartości pochodnych poszczególnych residuów po tym

uszkodzeniu $\partial r_j / \partial f_k$ w stanie ustalonym, tzn. po zaniku przebiegów przejściowych, czyli przy $s \rightarrow 0$. Wpływ uszkodzeń na wartości residuów opisywany jest jak w tabeli 4.

Tab. 4. Wpływ uszkodzeń na wartość residuów

	f_1	f_2	f_3	f_4
r_1	$\partial r_1 / \partial f_1$	$\partial r_1 / \partial f_2$	$\partial r_1 / \partial f_3$	$\partial r_1 / \partial f_4$
r_2	$\partial r_2 / \partial f_1$	$\partial r_2 / \partial f_2$	$\partial r_2 / \partial f_3$	$\partial r_2 / \partial f_4$
r_3	$\partial r_3 / \partial f_1$	$\partial r_3 / \partial f_2$	$\partial r_3 / \partial f_3$	$\partial r_3 / \partial f_4$

Wartości pochodnych w kolumnie odpowiadającej danemu uszkodzeniu określają kierunek tego uszkodzenia w przestrzeni residuów.

Diagnoza sformułowana jest w wyniku porównania kierunku wyznaczonego przez bieżące wartości residuów z kierunkami wzorcowymi dla poszczególnych uszkodzeń. Zmienne procesowe dostępne dla systemu diagnostyki obciążone są błędami pomiarowymi. Ponadto modele diagnozowanej instalacji nie są w pełni precyzyjne. Dlatego konieczne jest uwzględnienie obszarów tolerancji przy porównywaniu wektorów. Niewielkie wartości residuów nie powinny powodować wskazania uszkodzenia.

Warunkiem zastosowania opisywanej metody jest dokładna znajomość modelu opisującego zależności pomiędzy uszkodzeniami a residuum.

3.4. Sekwencja symptomów

Wyżej prezentowane metody residuów strukturalnych i kierunkowych nie uwzględniały dynamiki residuów pod wpływem pojawiającego się uszkodzenia. Proponowana w niniejszej pracy metoda bazuje na analizie sekwencji pojawiających się symptomów, której możliwość wykorzystania była sugerowana w pracach [7, 8, 11, 12]. Metoda wykorzystuje równania zgodności (6) w postaci wewnętrznej (10) uwzględniającej wpływ uszkodzeń na residua. Różnica polega na tym, że do dalszej analizy nie jest brana informacja o statycznej wrażliwości danego residuum (wzmocnieniu) (przykład tab. 5), ale informacja o dynamice residuum, zmieniającego się pod wpływem danego uszkodzenia. Różne reakcje residuów na uszkodzenia wpływają na kolejność symptomów, co pozwala rozróżnić te uszkodzenia.

W przypadku równań liniowych dynamikę j -tego residuum pod wpływem wystąpienia k -tego uszkodzenia opisuje pochodna cząstkowa j -tego residuum po k -tym uszkodzeniu $\partial r_j / \partial f_k$. Wpływ uszkodzeń na wartości residuów określony jest jak w tabeli 3. Wartości pochodnych w kolumnie odpowiadającej danemu uszkodzeniu określają dynamikę residuów wrażliwych na to uszkodzenie. Zakładając, że indywidualnie dla każdego uszkodzenia residua zostaną znormalizowane do zakresu $[0, 1]$ (tab. 5) oraz będą podlegać ocenie progowej, można wyznaczyć kolejność pojawienia

się symptomów (sygnałów będących wynikiem binarnej oceny residuów). Normalizacja polega na podzieleniu równania j -tego residuum przez wartość wzmocnienia odpowiadającą k -temu uszkodzeniu, przy założeniu, że pozostałe uszkodzenia przyjmują wartość 0. Operację tę należy przeprowadzić dla wszystkich residuów i uszkodzeń. Wzmocnienie funkcji wrażliwości residuum $\partial r_j / \partial f_k = G_{jk}(s)$ po znormalizowaniu nie ma znaczenia, co było podstawą metody residuów kierunkowych. Kolejność pojawiających się symptomów zależy zatem od wartości stałych czasowych i ewentualnych opóźnień w wyznaczonych funkcjach wrażliwości. Należy jednak podkreślić, że bieżące wartości residuów wyliczane są dla każdego uszkodzenia indywidualnie wg. zależności:

$$r_j(f_k) = r_j / k_{jk}.$$

Założmy, że macierz wrażliwości residuów na uszkodzenia po normalizacji ma postać pokazaną w tab. 4. Poszczególnym uszkodzeniom odpowiadają reakcje residuów z odpowiednią dynamiką.

Tab. 5. Zastępcze znormalizowane transmitancje residuów do uszkodzeń

	f_1	f_2	f_3	f_4
r_1	$\frac{1}{T_1s+1}$			
r_2		1	1	$\frac{1}{T_5s+1}e^{-T_0s}$
r_3	1	$\frac{1}{T_2s+1}$		1

Zakładając jednakowy próg oceny wartości znormalizowanych residuów, dla których generowane są symptomy danego uszkodzenia, nie ma on wpływu na wyznaczenie kolejności pojawiających się symptomów (tab. 6). Na podstawie znajomości stałych czasowych poszczególnych transmitancji występujących w sygnaturach uszkodzeń można określić kolejność n_{jk} pojawiania się symptomów dla poszczególnych uszkodzeń f_k . Im krótsza stała czasowa znormalizowanej transmitancji $G_{jk}(s)/k_{jk}$, tym szybciej pojawi się symptom.

Kolejność pojawiania się symptomów wynikająca z sygnatur uszkodzeń podanych w tab. 5 została pokazana w tab. 6.

Tab. 6. Macierz sekwencji pojawiających się symptomów uszkodzeń

	f_1	f_2	f_3	f_4
s_1	2			
s_2		1	1	2
s_3	1	2		1

Czasy powstawania symptomów można wyznaczyć analitycznie na podstawie znormalizowanych sygnatur przy założeniu wartości

progowej residuum oraz charakteru zmienności uszkodzenia (np. skokowe). Jednak ze względu na brak znajomości funkcji powstawania uszkodzenia w czasie działanie takie nie jest celowe. Istotne jest to, że niezależnie od charakteru zmienności w czasie uszkodzenia, kolejność powstawania symptomów dla poszczególnych uszkodzeń jest zawsze taka sama.

Diagnozowanie polega na porównywaniu wzorcowych sygnatur sekwencji symptomów będących kolumnami macierzy jak w tab. 6 z kolejnością pojawiających się symptomów w momencie pojawienia się uszkodzenia.

4. ROZRÓŻNIALNOŚĆ USZKODZEŃ

4.1. Rozróżnialność uszkodzeń w binarnej macierzy diagnostycznej

Definicja 1. Dwa uszkodzenia $f_k, f_m \in F$ są nierozróżnialne na podstawie binarnej macierzy diagnostycznej wtedy i tylko wtedy, gdy ich sygnatury (kolumny macierzy) są jednakowe:

$$\forall_{s_j \in S} v_{kj} = v_{mj}. \quad (18)$$

Definicja 2. Rozróżnialność wszystkich uszkodzeń zachodzi wtedy, gdy wszystkie kolumny binarnej macierzy diagnostycznej są różne:

$$\forall_{\substack{f_k, f_m \in F \\ k \neq m}} \exists_{s_j} v_{kj} \neq v_{mj}. \quad (19)$$

Taka rozróżnialność określana jest przez Gertlera [3-5] jako słaba (*weakly isolating*) w odróżnieniu do mocnej rozróżnialności uszkodzeń, która występuje w przypadku sygnatur różniących się wartościami, co najmniej na dwóch pozycjach. Mocna rozróżnialność nie będzie analizowana w niniejszej pracy.

Maksymalna liczba uszkodzeń, które mogą być rozróżnione na podstawie wyników zbioru binarnych sygnałów diagnostycznych $S = \{s_j : j = 1, 2, \dots, J\}$ wynosi $2^J - 1$. Zerowe wartości wszystkich sygnałów diagnostycznych odpowiadają stanowi pełnej zdadności procesu. W praktyce liczbie uszkodzeń rozróżnianych na podstawie takiego zbioru jest zwykle mniejsza.

4.2. Rozróżnialność uszkodzeń w FIS

Zdefiniujmy pojęcia bezwarunkowej i warunkowej nierozróżnialności uszkodzeń w FIS.

Definicja 3. Uszkodzenia $f_k, f_m \in F$ są nierozróżnialne (bezw warunkowo nierozróżnialne) w FIS (dla danego zbioru sygnałów diagnostycznych S) wtedy i tylko wtedy, gdy sygnatury tych uszkodzeń są jednakowe:

$$\forall_{s_j \in S} q_{jk} = q_{jm}. \quad (20)$$

Definicja 4. Uszkodzenia $f_k, f_m \in F$ są warunkowo nierozróżnialne w FIS ze względu na wszystkie sygnały diagnostyczne $s_j \in S$ wtedy i tylko wtedy, gdy dla każdego sygnału podzbiory jego wartości odpowiadające uszkodzeniom f_k i f_m mają część wspólną i uszkodzenia te nie są bezwarunkowo nierozróżnialne:

$$\forall_{s_j \in S} q_{jk} \cap q_{jm} \neq \emptyset \wedge \exists_{s_j \in S} q_{jk} \neq q_{jm}. \quad (21)$$

Warunkowa nierozróżnialność uszkodzeń oznacza, że mogą wystąpić wartości sygnałów diagnostycznych spełniające warunek:

$$\forall_{s_j \in S} v_j \in q_{jk} \cap q_{jm}, \quad (22)$$

przy których dane dwa uszkodzenia są nierozróżnialne. Jednak możliwe są inne wartości sygnałów diagnostycznych, przy których te same uszkodzenia są rozróżnialne. Spełniony wtedy jest warunek następujący:

$$\exists_{s_j \in S} [v_j \in q_{jk} \wedge v_j \notin q_{jm}] \vee [v_j \notin q_{jk} \wedge v_j \in q_{jm}]. \quad (23)$$

Definicja 5. Dwa dowolne uszkodzenia są w FIS bezwarunkowo rozróżnialne, jeśli istnieje sygnał diagnostyczny, dla którego podzbiory wartości odpowiadające tym uszkodzeniom są rozłączne:

$$\exists_{s_j \in S} q_{jk} \cap q_{jm} = \emptyset. \quad (24)$$

W FIS pokazanym w tab. 4 uszkodzenia: f_2 i f_5 są bezwarunkowo nierozróżnialne, f_1 i f_3 oraz f_3 i f_6 są warunkowo nierozróżnialne, podczas gdy uszkodzenia f_1 i f_6 są bezwarunkowo rozróżnialne. Uszkodzenie f_4 jest bezwarunkowo rozróżnialne od pozostałych uszkodzeń.

W przypadku wielowartościowej klasyfikacji sygnałów diagnostycznych nie można zatem określić rozróżnialności w sposób jednoznaczny. Zależy ona od kombinacji wartości tych sygnałów. W przypadku niektórych kombinacji uzyskujemy rozróżnialność większą, a w przypadku innych mniejszą.

Maksymalna liczba uszkodzeń, które mogą być rozróżnione na podstawie wyników zbioru trójwartościowych sygnałów diagnostycznych $S = \{s_j : j = 1, 2, \dots, J\}$ wynosi $3^J - 1$. W przypadku n wartościowej oceny wzrasta do wartości $n^J - 1$. Zatem wielowartościowa ocena wartości residuów może, lecz nie musi prowadzić do zwiększenia rozróżnialności uszkodzeń w stosunku do oceny binarnej. W praktyce liczbie uszkodzeń rozróżnianych jest zwykle znacznie mniejsza niż maksymalna. Wynika ona z fizycznych zależności w procesie. Określenie FIS w przypadku wielowartościowych sygnałów diagnostycznych może być dosyć trudne. Dlatego zwykle stosowana jest tylko trójwartościowa ocena residuów (-1, 0, +1), w której uwzględniany jest znak residuum.

Umożliwia to rozróżnienie uszkodzeń, które powodują odchylenie residuum w przeciwnych kierunkach (wartości dodatnie i ujemne).

4.3. Rozróżnialność uszkodzeń w przypadku residuów kierunkowych

W przypadku residuów kierunkowych rozróżnialność uszkodzeń zależy od kierunków wektora residuów charakterystycznych dla poszczególnych uszkodzeń.

Definicja 5. Dwa uszkodzenia $f_k, f_m \in F$ są nierozróżnialne wtedy i tylko wtedy, gdy ich sygnatury są jednakowe lub wartości w poszczególnych kolumnach są proporcjonalne (co odpowiada jednakowym kierunkom wektora residuów dla uszkodzeń nierozróżnialnych) sygnatury (kolumny macierzy) są jednakowe:

$$\forall_{s_j \in S} (k_{kj} = a k_{mj}), \quad (25)$$

gdzie a jest dowolną, skończoną liczbą rzeczywistą.

Załóżmy, że macierz wrażliwości na uszkodzenia residuów ma postać pokazaną w tab. 7. Poszczególnym uszkodzeniom odpowiadają kierunki w przestrzeni residuów pokazane na rys. 4.

Tab. 7. Macierz wrażliwość residuów na poszczególne uszkodzenia

	f_1	f_2	f_3	f_4
r_1	k_1			
r_2		k_3	1	k_2
r_3	1	1		1

Zastosowanie koncepcji residuów kierunkowych umożliwiło rozróżnienie uszkodzeń f_2 i f_4 , które w przypadku lokalizacji bazującej na residuach strukturalnych byłyby nierozróżnialne.

4.4. Rozróżnialność uszkodzeń w przypadku residuów sekwencyjnych

W przypadku residuów sekwencyjnych rozróżnialność uszkodzeń zależy od kolejności powstawania symptomów dla poszczególnych uszkodzeń.

Definicja 6. Dwa uszkodzenia $f_k, f_m \in F$ są nierozróżnialne wtedy i tylko wtedy, gdy kolejność powstawania symptomów tych uszkodzeń jest taka sama (co odpowiada jednakowym sygnaturom - kolumnom macierzy sekwencji symptomów):

$$\forall_{s_j \in S} (n_{kj} = n_{mj}). \quad (26)$$

Uszkodzenia są rozróżnialne, jeżeli sekwencje symptomów dla poszczególnych uszkodzeń są różne. Jak widać na przykładzie tab. 6 zastosowanie koncepcji sekwencji pojawiających się symptomów pozwoliło uzyskać rozróżnialność uszkodzeń f_2 i f_4 , które dla residuów strukturalnych nie były rozróżnialne.

W wyżej wymienionym przykładzie było prosto wyodrębnić kolejność pojawiających się symptomów, gdyż tylko część residuów posiadała inercję względem występującego uszkodzenia, pozostałe residua dla danego uszkodzenia albo nie były wrażliwe, albo reagowały w sposób proporcjonalny do uszkodzenia. W przypadku, gdy każde residuum posiada pewną inercję, to zakładając, że pojawiające uszkodzenie ma charakter funkcji skoku jednostkowego i dla poziomu generacji symptomów równego 0,63 (zakres zmian residuum jest znormalizowany do zakresu [0,1]) symptomy będą pojawiać się po czasie równym stałej czasowej, tab. 5: $\partial r_1 / \partial f_1 - T_1$, $\partial r_3 / \partial f_2 - T_2$ lub po czasie równym sumie zastępczej stałej czasowej i zastępczego opóźnienia (tab. 5: $\partial r_2 / \partial f_4 - T_5 + T_6$).

Rozważając prosty przykład założmy, że mamy dostępne następujące residua w postaci wewnętrznej z informacją o dynamice w postaci stałej czasowej członu inercyjnego pierwszego rzędu danego residuum względem tego uszkodzenia:

$$r_1 = 20f_1|_{T_{11}} + f_2|_{T_{12}} + f_3|_{T_{13}},$$

$$r_2 = 5f_1|_{T_{21}} + 15f_2|_{T_{22}} + f_3|_{T_{23}}.$$

Jeżeli zachowane są przykładowe relacje pomiędzy stałymi czasowymi: $T_{11} > T_{21}$, $T_{12} < T_{22}$ i $T_{13} > T_{23}$, to czasy pojawiania się symptomów będą wyglądały następująco:

$$t(s_1(r_1))|_{f_1} > t(s_2(r_2))|_{f_1},$$

$$t(s_1(r_1))|_{f_2} < t(s_2(r_2))|_{f_2},$$

$$t(s_1(r_1))|_{f_3} > t(s_2(r_2))|_{f_3}.$$

W związku z tym możemy uzyskać następujące sekwencje pojawiających się symptomów s_1 i s_2 dla uszkodzeń f_1, f_2 i f_3 :

Tab. 8. Sekwencja
pojawiających się symptomów

	f_1	f_2	f_3
s_1	2	1	2
s_2	1	2	1

Na tej podstawie możemy stwierdzić, że uszkodzenia f_1 i f_2 oraz f_2 i f_3 nierozróżnialne dla binarnej macierzy diagnostycznej stają się rozróżnialne w przypadku wykorzystania wiedzy o kolejności występowania ich symptomów. Uszkodzenia f_1 i f_3 nadal są nierozróżnialne.

5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono nową metodę wnioskowania diagnostycznego dla liniowych obiektów diagnozowania, nazwaną metodą residuów sekwencyjnych. Metoda ta została porównana ze znanymi podejściami: tzw. residuami strukturalnymi, trójwartościowymi oraz kierunkowymi w aspekcie uzyskiwanej rozróżnialności uszkodzeń. Pokazano, że residua wielowartościowe, kierunkowe i sekwencyjne

zapewniają większą rozróżnialność uszkodzeń w stosunku do residuów strukturalnych. Zaletą residuów strukturalnych, a także wielowartościowych jest możliwość określenia związku między uszkodzeniami a wartościami sygnałów diagnostycznych zarówno na podstawie równań zgodności w postaci wewnętrznej, jak też na podstawie wiedzy eksperckiej. Ten drugi sposób jest znacznie prostszy i dlatego jest powszechnie stosowany w praktyce. Uzyskanie równań zgodności, uwzględniających wpływ uszkodzeń na wyjścia obiektu, jest trudne i bardzo pracochłonne, szczególnie w przypadku obiektów złożonych. Jest ono jednak niezbędne do zaprojektowania residuów kierunkowych i sekwencyjnych.

Metoda residuów trójwartościowych może być interpretowana jako uogólnienie residuów strukturalnych i szczególnie przypadek residuów kierunkowych. Poszczególne sygnatury elementarne wyznaczają bowiem w przestrzeni residuów kierunki, charakterystyczne dla poszczególnych uszkodzeń. Kierunki te leżą tylko na hiperpłaszczyznach wyznaczonych przez osie przestrzeni residuów. Uwzględnienie znaku residuum pozwala w wielu przypadkach uzyskać większą rozróżnialność uszkodzeń niż przy binarnej ocenie wartości residuów.

Pozostałe podejścia nie mogą być ze sobą porównane w sposób ogólny, wykorzystują bowiem inną wiedzę o diagnozowanym obiekcie. Residua kierunkowe bazują na wartościach wzmocnienia transmitancji dla poszczególnych uszkodzeń, a residua sekwencyjne na wartościach stałych czasowych i ewentualnie opóźnieniach występujących w tych transmitancjach. Wzmocnienia określają kierunek (w stanie ustalonym) charakterystyczny dla danego uszkodzenia w przestrzeni residuów, natomiast stałe czasowe pozwalają wyznaczyć sekwencje powstawania symptomów dla poszczególnych uszkodzeń. Uzyskanie rozróżnialności jedną metodą nie gwarantuje rozróżnialności w przypadku drugiej metody. Zależy ona od własności obiektu diagnozowania. Obie metody uzupełniają się zatem. Zastosowanie obu tych podejść równocześnie podczas wnioskowania diagnostycznego zapewnia uzyskanie największej rozróżnialności uszkodzeń, przy danym zbiorze residuów.

Uzyskiwana rozróżnialność uszkodzeń zależy nie tylko od zastosowanej metody zapisu związków między uszkodzeniami i wartościami sygnałów diagnostycznych, ale także od zbioru sygnałów pomiarowych wykorzystywanych do diagnozowania obiektu i w konsekwencji od zbioru generowanych residuów. Im więcej pomiarów, tym więcej może być wyliczanych residuów, co zwiększa rozróżnialność uszkodzeń [7, 12]. Rozszerzenie zbioru generowanych residuów możliwe jest także bez wprowadzania dodatkowych pomiarów, przez tzw. strukturyzację residuów [5, 7, 8, 12, 15]. Polega

ona na projektowaniu residuów wtórnych, na podstawie zbioru residuów pierwotnych, w taki sposób aby nowe residua były wrażliwe na inne podzbiory uszkodzeń niż residua pierwotne.

LITERATURA

- [1] Basseville M. (2001). *On fault detectability and isolability*, European Journal of Control, Vol 7, No 6., 625-637.
- [2] Chen J., Patton R.J. (1999). *Robust model based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [3] Gertler J., Singer D. (1990). *A new structural framework for parity equation based failure detection and isolation*. Automatica, Vol. 26, no. 2, 381-388.
- [4] Gertler J. (1991). *Analytical redundancy methods in fault detection and isolation*. IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes - SAFEPROCESS'91, Baden-Baden, Vol. 1, 9-21.
- [5] Gertler J. (1998). *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Marcel Dekker, Inc. New York - Basel - Hong Kong.
- [6] Frank P. M. (1990). *Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy*. Automatica 26, 459-474.
- [7] Korbicz, J., J.M. Kościelny, Z. Kowalczyk and W. Cholewa (2004). *Fault Diagnosis: Models, artificial intelligence methods, applications*. Springer.
- [8] Korbicz J., Kościelny J.M., Kowalczyk Z, Cholewa W. (2002). *Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania*. WNT, 2004.
- [9] Kościelny J.M. (1999). *Application of Fuzzy Logic Fault Isolation in a Three-Tank System*. 14th World Congress IFAC, Beijing, Chiny, P-7e-05-1, 73-78.
- [10] Kościelny J.M., Bartyś M. (2000). *Application of Information System Theory for Actuator Diagnosis*. 4th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process – SAFEPROCESS' 2000, Budapest, Hungary, June 14-16, Vol.2, 949-954.
- [11] Kościelny J.M., Zakroczyński K. (2001). *Fault Isolation Algorithm that Takes Dynamics of Symptoms Appearances Into Account*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. Vol.49, No 2, 323-336.
- [12] Kościelny J.M. (2001). *Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych*. Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa.
- [13] Kościelny J.M., Bartyś M., Rzepiejewski P., Sá da Costa J.: *Actuator fault distinguishability study*. Control Engineering Practice (Elsevier) 14, 2006, 645-652.
- [14] Patton R., Frank P., Clark R. (Eds.) (1989). *Fault diagnosis in dynamic systems. Theory and Applications*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York.
- [15] Patton R., Frank P., Clark R. (Eds.) (2000). *Issues of fault diagnosis for dynamic systems*. Springer.



Prof. dr hab. inż. **Jan Maciej KOŚCIELNY** jest zatrudniony w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się problemami diagnostyki procesów przemysłowych, a szczególnie metodami detekcji i lokalizacji uszkodzeń przeznaczonymi dla złożonych instalacji technologicznych oraz systemami diagnostycznymi. Autor ponad 180 publikacji naukowych. Kierował pracami, w wyniku których opracowano i wdrożono w przemyśle systemy monitorowania i diagnostyki procesów. Jest członkiem International Editorial Board czasopisma naukowego *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* oraz redaktorem działowym czasopisma *Pomiary-Automatyka-Kontrola*.



Mgr inż. **Bolesław DZIEMBOWSKI** jest asystentem w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej i jednocześnie uczestnikiem Studium Doktoranckiego „Mechatronika”.