

IDENTYFIKACJA USZKODZEŃ W UKŁADACH LINIOWYCH

Jan Maciej KOŚCIELNY, Dariusz CHALECKI

Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Automatyki i Robotyki
 ul. św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa, tel.: (22) 234 83 80
jmk@mchtr.pw.edu.pl, dchalecki@mchtr.pw.edu.pl

Streszczenie

Przedstawiono metodę identyfikacji uszkodzeń z wykorzystaniem residuów w postaci wewnętrznej. Założono występowanie uszkodzeń pojedynczych. Identyfikacja bazuje na wykorzystaniu unormowanych sygnatur kierunkowych poszczególnych uszkodzeń. Zamieszczono przykład obliczeniowy.

Słowa kluczowe: identyfikacja uszkodzeń, residuum, sygnatura unormowana, model liniowy.

FAULT IDENTIFICATION IN LINEAR SYSTEMS

Summary

A method of identification of faults based on residuals in the inner form has been presented. Assumption about occurrence of single faults has been undertaken. Fault identification makes use from the normalized directional signatures of particular faults. An appropriate calculation example has been given.

Keywords: fault identification, residual, normalized signature, linear system.

1. WPROWADZENIE

Celem diagnostyki jest rozpoznanie aktualnego stanu technicznego obiektu diagnozowania. Proces diagnozowania można podzielić na trzy etapy:

- detekcję uszkodzeń – wykrywanie wystąpienia uszkodzeń w diagnozowanym obiekcie;
- lokalizację uszkodzeń – określanie rodzaju, miejsca i czasu wystąpienia uszkodzeń
- identyfikację uszkodzeń – określanie rozmiaru i charakteru zmienności uszkodzeń w czasie

Znanych jest wiele metod detekcji i lokalizacji uszkodzeń [1-5], natomiast identyfikacja uszkodzeń, była dotychczas tematem nielicznych prac badawczych [3]. W niniejszym artykule opisano problem identyfikacji uszkodzeń pojedynczych w obiektach opisanych dokładnym zlinearyzowanym modelem matematycznym.

2. OPIS OBIEKTU DIAGNOZOWANIA Z UWZGLĘDNIENIEM WPLYWU USZKODZEŃ

Do identyfikacji 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 f traktowane są jako specyficzne wejścia obiektu. Układy rzeczywiste zwykle są nieliniowe, ale dla uproszczenia opisu matematycznego przeprowadza się jego 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). Powszechnie stosowaną postacią opisu obiektu liniowego (obok równań stanu) jest model transmitancyjny, zwieryający układ równań określających zależność poszczególnych wyjść obiektu od wejść i uszkodzeń [1-5]:

$$\mathbf{y}(s) = \mathbf{G}(s)\mathbf{u}(s) + \mathbf{H}(s)\mathbf{f}(s) \quad (1)$$

gdzie: \mathbf{y} – wektor wyjść,
 \mathbf{u} – wektor wejść,
 \mathbf{f} – wektor uszkodzeń,
 $\mathbf{G}(s)$ – macierz transmitancji wyj. – wej.,
 $\mathbf{H}(s)$ – macierz transmit. wyj. – uszkodzenia.

Poszczególne równania mają postać:

$$y_j(s) = \mathbf{G}_j(s)\mathbf{u}(s) + \mathbf{H}_j(s)\mathbf{f}(s), \quad (2)$$

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

$$G_{jp}(s) = y_j(s) / u_p(s); \quad p = 1, \dots, P, \quad (3)$$

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

$$H_{jk}(s) = y_j(s) / f_k(s); \quad k = 1, \dots, K. \quad (4)$$

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

$$r_j(s) = y_j(s) - \mathbf{G}_j(s)\mathbf{u}(s). \quad (5)$$

Równanie (6) odzwierciedla ogólny związek między danym residuum a uszkodzeniami. Jest to tzw. postać wewnętrzna residuum [1-4].

$$r_j(s) = \mathbf{H}_j(s)\mathbf{f}(s) = H_{j1}(s)f_1(s) + \dots + H_{jk}(s)f_k(s) + \dots + H_{jK}(s)f_K(s). \quad (6)$$

Transmitancja $H_{jk}(s)$ określa wrażliwość residuum na dane uszkodzenie:

$$H_{jk}(s) = \frac{r_j(s)}{f_k(s)} = \frac{\delta(r_j)}{\delta(f_k)} \quad (7)$$

Dla wszystkich residuów związek ten możemy przedstawić w postaci tab. 1.

Tab. 1. Postać wewnętrzna residuów

| | f_1 | ... | f_k | ... | f_K |
|-------|----------|-----|----------|-----|----------|
| r_1 | H_{11} | | H_{1k} | | H_{1K} |
| ... | | | | | |
| r_j | H_{j1} | | H_{jk} | | H_{jK} |
| ... | | | | | |
| r_J | H_{J1} | | H_{Jk} | | H_{JK} |

Opis wpływu uszkodzeń na wartości residuów w postaci wewnętrznej (6) lub tab. 1 określa wrażliwość residuów na poszczególne uszkodzenia nie tylko jakościowo lecz również ilościowo. Sygnatura uszkodzenia jest określona przez kolumnę tab.1, odpowiadającą danemu uszkodzeniu.

Na podstawie transmitancji $H_{jk}(s)$ można wyznaczyć wzmocnienie residuum uszkodzeń na dane uszkodzenie:

$$c_{jk} = \lim_{s \rightarrow 0} H_{jk}(s). \quad (8)$$

Zwykle transmitancje $H_{jk}(s)$ mają charakter statyczny (nie zawierają członów całkujących), co oznacza, że granica (8) ma wartość skończoną. W przypadku transmitancji zawierających człony całkujące (astatycznych), granica (8) jest równa nieskończoności z odpowiednim znakiem.

Wektor wzmocnień residuów odpowiadających danemu uszkodzeniu (tab. 2) określa pewien kierunek w przestrzeni residuów (zwanej przestrzenią parzystości), charakterystyczny dla danego uszkodzenia. Jest to podstawą metody residuów kierunkowych (*ang. directional residual*) [1-5].

Tab. 2. Sygnatury kierunkowe

| | f_1 | ... | f_k | ... | f_K |
|-------|----------|-----|----------|-----|----------|
| r_1 | c_{11} | | c_{1k} | | c_{1K} |
| ... | | | | | |
| r_j | c_{j1} | | c_{jk} | | c_{jK} |
| ... | | | | | |
| r_J | c_{J1} | | c_{Jk} | | c_{JK} |

3. UNORMOWANE SYGNATURY USZKODZEŃ

Wartości residuów można unormować indywidualnie dla każdego z uszkodzeń, dzieląc je przez wartość wzmocnienia residuum na dane uszkodzenie:

$$r_{jk}^*(t) = \frac{r_j(t)}{c_{jk}}. \quad (9)$$

Celem normalizacji jest uzyskanie niezależności residuum od wzmocnienia uszkodzenia c_{jk} . Po normalizacji dla k -tego uszkodzenia uzyskujemy równanie j -tego residuum w postaci:

$$r_j(s) = \frac{H_{j1}(s)}{c_{jk}} f_1(s) + \dots + \frac{H_{jk}(s)}{c_{jk}} f_k(s) + \dots + \frac{H_{jK}(s)}{c_{jk}} f_K(s)$$

gdzie:

$$\frac{H_{jk}(s)}{c_{jk}} = H_{jk}^*, \quad (10)$$

przy czym H_{jk}^* jest transmitancją unormowaną o wzmocnieniu równym 1.

Macierz transmitancji unormowanych (tab. 3) wyznacza unormowane sygnatury poszczególnych uszkodzeń, którym odpowiadają poszczególne kolumny w tab. 3.

Tab. 3. Sygnatury dynamiczne

| | f_1 | ... | f_k | ... | f_K |
|-------|------------|-----|------------|-----|------------|
| r_1 | H_{11}^* | | H_{1k}^* | | H_{1K}^* |
| ... | | | | | |
| r_j | H_{j1}^* | | H_{jk}^* | | H_{jK}^* |
| ... | | | | | |
| r_J | H_{J1}^* | | H_{Jk}^* | | H_{JK}^* |

4. IDENTYFIKACJA USZKODZEŃ

Założmy występowanie uszkodzeń pojedynczych. W przypadku wystąpienia k -tego uszkodzenia wzór (6) upraszcza się do postaci:

$$r_j(s) \Big|_{f_k} = H_{jk}(s)f_k(s), \quad (11)$$

$$f_m = 0, m = 1, 2, \dots, K, m \neq k$$

Przebieg czasowy residuum nieznormalizowanego można wyznaczyć, przy znajomości funkcji $f_k(t)$, na podstawie odwrotnego przekształcenia Laplace'a:

$$r_j(t) = L^{-1}r_j(s) = L^{-1}[H_{jk}(s)f_k(s)]. \quad (12)$$

Dla obiektów statycznych i uszkodzeń o wartości skończonej, residuum przy $t \rightarrow \infty$ będzie dążyło do wartości ustalonej. W stanie ustalonym

residuum przyjmuje wartość zależną od wzmocnienia oraz wartości uszkodzenia:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} r_{jk}^*(t) \Big|_{f_k} &= \lim_{s \rightarrow 0} s r_{jk}(s) \Big|_{f_k} = \lim_{s \rightarrow 0} s H_{jk}(s) f_k(s) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} s c_{jk} H_{jk}^* \frac{1}{s} f_{kU} = c_{jk} f_{kU} \end{aligned} \quad (13)$$

gdzie: f_{kU} – wartość uszkodzenia w stanie ustalonym.

Po normalizacji, w stanie ustalonym, wartość residuum dla obiektów statycznych jest równa wartości uszkodzenia:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} r_{jk}^*(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s H_{jk}^* \frac{1}{s} f_{kU} = f_{kU}. \quad (14)$$

Zatem dla obiektów statycznych i dowolnego k -tego uszkodzenia wartości wszystkich residuów unormowanych, wrażliwych na to uszkodzenie powinny być w stanie ustalonym jednakowe i równe wartości uszkodzenia. Stwierdzenie to jest słuszne tylko w przypadku idealnych modeli obiektu oraz braku szumów pomiarowych i zakłóceń. W praktyce należy zakładać, że wartości residuów powinny mieć zbliżone wartości. Z zależności (14) wynikają następujące reguły wnioskowania:

$$\begin{aligned} IF [r_{ik}^*(t \rightarrow \infty) \neq 0] &\cong \\ &\cong [r_{jk}^*(t \rightarrow \infty)] \cong \dots \cong THEN f_k \end{aligned} \quad (15)$$

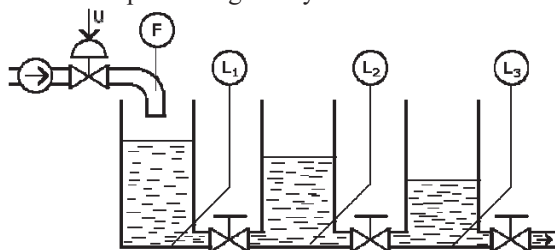
Wyrażenia $[r_{ik}^*(t \rightarrow \infty) \neq 0]$ w regule (15) występują dla wszystkich residuów unormowanych, wrażliwych na uszkodzenie wskazywane w konkluzji reguły.

Diagnoza wskazuje nie tylko uszkodzenie, ale także jego rozmiar:

$$f_{kU} = r_{ik}^*(t \rightarrow \infty) = r_{jk}^*(t \rightarrow \infty). \quad (16)$$

5. PRZYKŁAD

Przeprowadzono badania symulacyjne identyfikacji uszkodzeń dla zespołu trzech zbiorników pokazanego na rys. 1.



Rys. 1. Zespół trzech zbiorników

Zespół trzech zbiorników opisany jest równaniami:

$$F = F_{\max} \cdot X(U) \quad (17a)$$

$$F = A \frac{dL_1}{dt} + \alpha_{12} S_{12} \sqrt{2g(L_1 - L_2)} \quad (17b)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{12} S_{12} \sqrt{2g(L_1 - L_2)} &= \\ &= A \frac{dL_2}{dt} + \alpha_{23} S_{23} \sqrt{2g(L_2 - L_3)} \end{aligned} \quad (17c)$$

$$\alpha_{23} S_{23} \sqrt{2g(L_2 - L_3)} = A \frac{dL_3}{dt} + \alpha_3 S_3 \sqrt{2gL_3}, \quad (17d)$$

gdzie:

F, F_{\max} – przepływ bieżący i wydatek pompy;
 $X(U)$ – charakterystyka statyczna zaworu (X – pozycja otwarcia zaworu, U – sygnał sterujący);
 A, L – pole powierzchni lustra cieczy i poziom cieczy w zbiorniku;
 α, S – współczynnik przepływu cieczy przez kanał i pole przekroju kanału;
 g – stała grawitacji.

Rozważone zostaną dwa uszkodzenia, nierozróżnialne na podstawie binarnej macierzy diagnostycznej [4]. Są to uszkodzenie toru pomiarowego poziomu L_3 w zbiorniku 3 (f_L) i przytkanie kanału S_{23} pomiędzy zbiornikami 2 i 3 (f_S). Na oba te uszkodzenia są wrażliwe residua utworzone na podstawie równań (17c i d) z uwzględnieniem wpływu uszkodzeń:

$$\begin{aligned} \alpha_{12} S_{12} \sqrt{2g(L_1 - L_2)} &= \\ &= A \frac{dL_2}{dt} + (\alpha_{23} S_{23} - f_S) \sqrt{2g[L_2 - (L_3 + f_L)]} \end{aligned} \quad (18a)$$

$$\begin{aligned} (\alpha_{23} S_{23} - f_S) \sqrt{2g[L_2 - (L_3 + f_L)]} &= \\ &= A \frac{dL_3}{dt} + \alpha_3 S_3 \sqrt{2g(L_3 + f_L)} \end{aligned} \quad (18b)$$

Po linearyzacji modelu w punkcie pracy i przejściu do dziedzinie zmiennej zespolonej s uzyskujemy równania residuów w postaci obliczeniowej (19) i wewnętrznej (20).

$$r_{1o} = L_2(s) - \frac{k_1}{T_2 s + 1} L_1(s) - \frac{k_3}{T_2 s + 1} L_3(s) \quad (19a)$$

$$r_{2o} = L_3(s) - \frac{k_2}{T_3 s + 1} L_2(s) \quad (19b)$$

$$r_{1w} = \frac{k_L}{T_2 s + 1} f_L(s) + \frac{k_{S1}}{T_2 s + 1} f_S(s) \quad (20a)$$

$$r_{2w} = -f_L(s) - \frac{k_{S2}}{T_3 s + 1} f_S(s) \quad (20b)$$

Residua unormowane uzyskamy dzieląc poszczególne residua przez wartości wzmocnień. W stanie ustalonym residua w postaci wewnętrznej są następujące:

$$r_{1wL} = f_L(s) + \frac{k_{S1}}{k_L} f_S(s) \quad (21a)$$

$$r_{2wL} = f_L(s) + k_{fS2} f_S(s) \quad (21b)$$

$$r_{1wS} = \frac{k_L}{k_{S1}} f_L(s) + f_S(s) \quad (21c)$$

$$r_{2wS} = \frac{1}{k_{S2}} f_L(s) + f_S(s). \quad (21d)$$

Dla celów symulacji założono wartość poziomu $L_3 = 0,5$ m. Określono punkt pracy zespołu trzech zbiorników w stanie zdadności, wykorzystując w tym celu model w postaci (17):

$$L_{10} = 0,722 \text{ [m]}, L_{20} = 0,611 \text{ [m]}, L_{30} = 0,5 \text{ [m]}, \\ F_0 = 0,00207 \text{ [m}^3/\text{s]}.$$

Iloczyny współczynników αS wynoszą:

$$\alpha_{12}S_{12} = 0,0014 \text{ [m}^2\text{]}, \alpha_{23}S_{23} = 0,0014 \text{ [m}^2\text{]}, \\ \alpha_3S_3 = 0,00066 \text{ [m}^2\text{]},$$

Uszkodzenie f_L objawiło się błędnym wskazaniem przetwornika L_3 – mniejszym o 0,05 m od rzeczywistego, czyli $L_3 = 0,45$ m. Stałe wzmacnienia wynoszą:

$$k_1 = 0,5, k_2 = 0,818, k_3 = 0,5, k_L = 0,5, \\ k_{S1} = 79,286 \text{ [m}^{-1}\text{]}, k_{S2} = 129,95 \text{ [m}^{-1}\text{]}.$$

Wartości residuów r_{1o} i r_{2o} w stanie ustalonym przy braku uszkodzeń są równe lub zbliżone do zera:

$$r_{1o} = L_{20}(s) - k_1L_{10}(s) - k_3L_{30}(s) = 0 \\ r_{2o} = L_{30}(s) - k_2L_{20}(s) = 2 \cdot 10^{-4},$$

Wystąpienie uszkodzenia f_L objawia się następująco:

$$r_{1o} = L_2(s) - k_1L_1(s) - k_3L_3(s) = 0,025 \\ r_{2o} = L_3(s) - k_2L_2(s) = -0,0498.$$

Po skorzystaniu z wzorów (22):

$$f_L(r_{1o}) = \frac{r_{1o}}{k_L} = \frac{r_{1w}}{k_L} = 0,05 \text{ [m]}$$

$$f_L(r_{2o}) = \frac{r_{2o}}{-1} = \frac{r_{2w}}{-1} = 0,0498 \text{ [m]}$$

$$f_S(r_{1o}) = \frac{r_{1o}}{k_{S1}} = \frac{r_{1w}}{k_{S1}} = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$f_S(r_{2o}) = \frac{r_{2o}}{-k_{S2}} = \frac{r_{2w}}{-k_{S2}} = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$$

Jak widać dla uszkodzenia f_L wartości są prawie identyczne i dalekie od zera (w skali od 0 do 1 m), natomiast dla uszkodzenia f_S różnią się od siebie o ok. 0,7 cm², czyli aż o ok. 22%. Stąd wniosek, że wystąpiło uszkodzenie f_L , a jego wartość wynosi:

$$f_L = \frac{f_L(r_{1o}) + f_L(r_{2o})}{2} = 0,0499 \text{ [m]}.$$

6. PODSUMOWANIE

Przedstawiona metoda umożliwia identyfikację, czyli określenie rozmiaru uszkodzeń pojedynczych. Pokazano, że możliwe jest określenie rozmiaru uszkodzenia w jednostkach fizycznych, nawet dla uszkodzeń nierozróżnialnych na podstawie binarnej macierzy diagnostycznej. Praktyczne zastosowanie proponowanego algorytmu wymaga jednak znajomości modelu uwzględniającego wpływ uszkodzeń na wyjścia obiektu. Modele takie mogą

zostać opracowane jedynie dla stosunkowo prostych urządzeń lub aparatów technologicznych. Innym ograniczeniem jest wymóg stałości punktu pracy obiektu. Wynika to ze stosowania linearyzacji równań w punkcie pracy obiektu. Możliwe jest jednak uogólnienie metody, polegające na wnioskowaniu z wykorzystaniem residuów w postaci nieliniowej.

LITERATURA

- [1] Chen J., Patton R. J. (1999): *Robust model based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [2] Gertler J.: (1998). *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Marcel Dekker, Inc. New York - Basel - Hong Kong.
- [3] Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczyk Z., Cholewa W.: (2002). *Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji*. Zastosowania. WNT, 2004.
- [4] Kościelny J. M.: (2001). *Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych*. Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa.
- [5] 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. Prowadzi badania w zakresie diagnostyki procesów przemysłowych i układów mechatronicznych oraz systemów automatyki tolerujących uszkodzenia. Kierował pracami badawczymi, w wyniku których opracowano i wdrożono w przemyśle systemy monitorowania i diagnostyki procesów. Jest członkiem Komitetu Automatyki i Robotyki PAN, International Editorial Board czasopisma naukowego International Journal of Applied Mathematics and Computer Science oraz redaktorem działowym czasopisma Pomiar-Automatyka-Kontrola.



Mgr inż. **Dariusz CHALECKI** – doktorant w Instytucie Automatyki i Robotyki na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Absolwent tego wydziału. Zajmuje się diagnostyką, a w szczególności identyfikacją uszkodzeń.