

PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA ANALIZY WRAŻLIWOŚCI W DIAGNOSTYCE MASZYN

Damian SŁAWIK

Politechnika Śląska w Gliwicach, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn
ul. Konarskiego 18a, 44 - 100 Gliwice
e-mail: dslawik@polsl.pl

Streszczenie

Obecnie w systemach nadzoru maszyn często monitorowanych jest wiele cech sygnałów diagnostycznych. Wybierane są one na podstawie wiedzy i intuicji projektanta, a nie w wyniku sformalizowanego procesu optymalizacji. Wiąże się to z tym, iż wybór cech sygnałów jest jednym z najtrudniejszych zadań diagnostyki. Mając na celu automatyzację tego zadania opracowano metodę badania wrażliwości cech sygnałów diagnostycznych. Przedstawiona w referacie metoda pozwala na wybór z dostępnego zbioru cech sygnałów pewnego podzbioru cech, istotnego z punktu widzenia diagnostyki maszyn. Otrzymany podzbiór cech ma zapewnić wysoką jakość rozpoznawania stanu technicznego diagnozowanego obiektu.

Słowa kluczowe: wrażliwość diagnostyczna, analiza wariancji, test HSD, miara wrażliwości

EXAMPLE OF APPLICATION OF SENSITIVITY ANALYSIS IN THE TECHNICAL DIAGNOSTICS

Summary

Nowadays, features of diagnostic signals are very often determined in maintenance systems. They are not usually chosen as a result of formalized optimization process, but they are based on knowledge and intuition of a designer. It is an effect of a fact that selection of signal features is one of the most difficult tasks of technical diagnostics. A method of sensitivity examination of diagnostic signal features was developed for the needs of automation of this task. The method described in the paper makes it possible to select a certain subset of signal features, which are meaningful from the diagnostic point of view. They are selected from a set of signal features. An obtained subset should assure height quality of technical state classification of an examined object.

Keywords: diagnostic sensitivity, variance analysis, the HSD test, sensitivity measure

1. WSTĘP

Problemem, jaki często pojawia się w diagnostyce technicznej jest określenie zbioru rozpatrywanych sygnałów diagnostycznych lub cech sygnałów. Narzędziem ułatwiającym i w pewnym stopniu automatyzującym to zadanie może być analiza wrażliwości. Zastosowanie tej analizy oraz skorzystanie z wiedzy i intuicji ekspertów może być pomocne w tworzeniu sprawniejszych i wydajniejszych systemów diagnostycznych. Analiza wrażliwości, w takim przypadku, pozwoli wskazać cechy sygnałów lub same sygnały niosące najwięcej informacji diagnostycznych, natomiast eksperci pomogą zweryfikować wyniki analizy wrażliwości uwzględniając dodatkowo aspekty techniczne i ekonomiczne.

W referacie przedstawiono i omówiono na przykładzie metodę badania wrażliwości. Metoda ta bazuje na analizie statystycznej i może znaleźć zastosowanie zarówno w diagnostyce maszyn, jak i w diagnostyce medycznej, meteorologii, ekonomii oraz innych dziedzinach nauki.

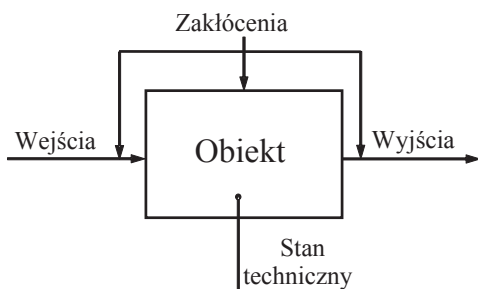
Zadaniem analizy wrażliwości diagnostycznej jest wybór pewnego, szczególnego podzbioru, z dostępnego zbioru cech sygnałów diagnostycznych. Cechy sygnałów diagnostycznych opisują sygnały diagnostyczne, które mogą być wynikiem obserwacji wejść i wyjść obiektu diagnostycznego [1]. W przypadku, gdy cechy te dotyczą obiektu o określonym stanie technicznym, są one mierzalnymi symptomami stanu. Mierzalne symptomy stanu [2] zawierają w sobie trzy grupy możliwych do obserwacji diagnostycznej parametrów lub charakterystyk:

- parametry funkcjonalne (robocze) maszyny, możliwe do wyznaczenia w trakcie działania maszyny (prędkość obrotowa wału) lub po wyłączeniu maszyny z ruchu i poddaniu jej specjalistycznym badaniom (moc na wale maszyny);
- parametry i charakterystyki, które są bezpośrednimi objawami zużycia i wymagającymi najczęściej demontażu maszyny (odchyłki kształtu);
- procesy resztkowe, które towarzyszą funkcjonowaniu maszyny. Do procesów resztkowych zaliczamy przede wszystkim procesy wibroaku-

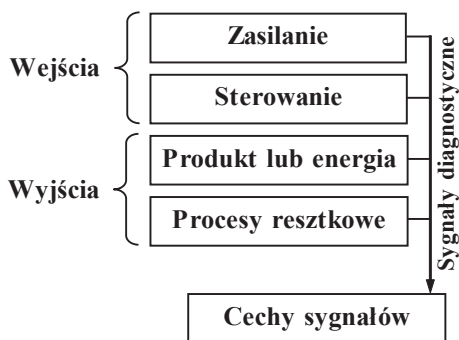
styczne (drżania, hałas, pulsacje medium roboczego), termiczne, tarcie oraz elektryczne. Mogą być one badane bez konieczności demontażu maszyny, w trakcie jej działania.

2. DIAGNOZOWANY OBIEKT

Badanie wrażliwości diagnostycznej rozpoczynamy od rozpatrzenia badanego obiektu jako systemu. W systemie takim można wyróżnić wejścia i wyjścia. Można także wyszczególnić szereg różnych stanów działania tego obiektu (rys. 1).



Rys. 1. Diagnozowany obiekt



Rys.2. Cechy sygnałów

Na wejścia diagnozowanego obiektu (rys. 2) podaje się zasilanie oraz sterowanie. Na wyjściu znajdują się produkt lub przetworzona energia oraz towarzyszące działaniu obiektu procesy resztkowe. Istotne jest, że własności otrzymanego produktu lub energii mogą także być źródłem sygnałów diagnostycznych, z których wyznaczamy cechy.

3. DEFINICJA WRAŻLIWOŚCI DIAGNOSTYCZNEJ

Wielokrotnie podejmowana była próba zdefiniowania pojęcia wrażliwości diagnostycznej [3],[6]. Najbardziej odpowiednią wydaje się jednak następująca definicja:

„Wrażliwością S cechy sygnału W , na stan techniczny b_i obiektu A , nazywamy względną zmianę wartości cechy W wynikającą z pojawienia się tego stanu.”

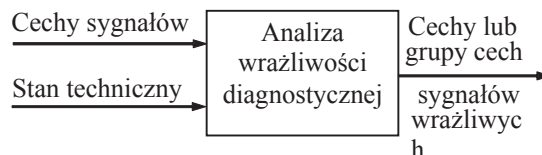
Definicję tą można przedstawić także jako następującą zależność:

$$S(W(A)|b_i) = \frac{V(W(A)|b_i)}{V(W(A)|B)}; \quad B = \{b_1, b_2, \dots, b_N\},$$

gdzie: A – badany obiekt; B – zbiór stanów technicznych; b_i – rozpatrywany stan techniczny; $W(A)$ – zmiany wartości badanej cechy sygnału; $V(W(A)|B)$ – maksymalna wartość miary zmienności V cechy sygnału W uwzględniająca cały zbiór stanów; $V(W(A)|b_i)$ – wartość miary zmienności V cechy sygnału W określona dla rozpatrywanego stanu technicznego b_i .

4. BADANIE WRAŻLIWOŚCI DIAGNOSTYCZNEJ

Badanie wrażliwości diagnostycznej polega na określeniu wpływu wystąpienia wybranego stanu technicznego na zmiany wartości cech sygnałów.



Rys. 3. Analiza wrażliwości diagnostycznej

Stan techniczny w normalnie działającym obiekcie technicznym jest wynikiem jego wcześniejszej eksploatacji. Możemy to zmienić ingerując w strukturę badanego obiektu technicznego np. poprzez celowe symulowanie zużycia lub wprowadzenie uszkodzenia. Postępowanie takie jest dopuszczalne, jeżeli cena badanego obiektu nie jest wysoka. W przypadku kosztownych obiektów technicznych można stosować ich modele lub prowadzić eksperyment bierny. Badanie wrażliwości diagnostycznej może znaleźć zastosowanie w początkowym etapie projektowania układów diagnostycznych przy wyborze cech sygnałów najlepiej opisujących stan obiektu. Celem analizy wrażliwości diagnostycznej w takim przypadku jest:

- wskazanie i odrzucenie cech sygnałów, których wyznaczenie jest nieopłacalne ze względu na brak relacji tych cech z rozpatrywanym stanem technicznym;
- określenie wartości od 0 do 1, będącej miarą wrażliwości i niosącej informację o tym, w jakim stopniu korzystne może być użycie danej cechy sygnału w identyfikacji określonego stanu technicznego;
- eliminowanie redundantnych cech sygnałów, nie wnoszących nowych informacji, a jedynie pogorszających jakość diagnozy, w przypadku, gdy wrażliwość tych cech jest mała;

4.1. Obiekt badań

Do badań wrażliwości diagnostycznej zostały użyte sygnały zarejestrowane na stanowisku badawczym RotorKit firmy Bently Nevada. Stanowisko to jest modelem maszyny wirnikowej, składającym się z łożyskowanego wałka oraz osadzonych na tym wałku tarcz. W trakcie badań rejestrowane były sygnały dla różnych wartości i faz niewyważenia dwóch tarcz przy różnych wartościach prędkości obrotowej wałka.

4.2. Rozpatrywane stany techniczne

Pierwszym krokiem w badaniu wrażliwości diagnostycznej jest określenie zbioru rozpatrywanych stanów technicznych. Dla badanego obiektu mogą to być stany opisane wartością niewyważenia:

- wartość niewyważenia tarczy nr 1 w gramach:

$$NT1 = \{0, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4, 1.6\};$$

W badaniach ograniczamy liczbę stanów technicznych do trzech:

- opisowa wartość niewyważenia tarczy nr 1:

$$NT1 = \{a_1, a_2, a_3\};$$

gdzie: a_1 – mała $\{0, 0.6\}$; a_2 – średnia $\{0.8, 1, 1.2\}$; a_3 – duża $\{1.4, 1.6\}$ wartość niewyważenia tarczy nr 1.

4.3. Cechy sygnałów

Jak już wspomniano wcześniej, w ramach badań rejestrowano sygnały diagnostyczne. Były to cztery sygnały przemieszczeń wałka rejestrowane w dwóch punktach pomiarowych, w prostopadłych do siebie płaszczyznach. Na podstawie sygnałów wyznaczono takie cechy punktowe sygnałów jak: wartość średnia, średnia bezwzględna, średniokwadratowa i skuteczna; wartość szczytowa bezwzględna, dodatnia i ujemna, wartość międzyszczytowa; współczynnik kształtu, szczytu, impulsowości, luzu, asymetrii (dewiacji), kurtozy oraz wariancja i odchylenie standardowe.

4.4. Eliminacja cech niewrażliwych

Mając wyznaczone cechy sygnałów przechodzimy do etapu badania wrażliwości diagnostycznej. Wrażliwość każdej cechy sygnału określana jest niezależnie. Rozpoczynamy od wyboru zbioru wartości interesującej nas cechy wyznaczonego dla jednej rozpatrywanej przez nas prędkości obrotowej. Następnie dokonujemy podziału tego zbioru na podzbiory odpowiadające poszczególnym stanom technicznym. Z otrzymanych tym sposobem danych wyznaczamy średnie kwadraty odchylenia dla podzbiorów (obiektów) V_{ob} i dla poszczególnych wartości (błędów) V_c .

W celu zweryfikowania hipotezy o braku różnic między utworzonymi podzbiorymi korzystamy z funkcji testowej F^0 oraz α -procentowej wartości granicznej F_α odczytanej z tablic F-Senecora.

Jeżeli $F^0 > F_\alpha$ to hipotezę zerową o braku różnic między grupami odrzucamy z ryzykiem błędu α i przystępujemy do dalszego etapu analizy wrażliwości. W przypadku, gdy $F^0 \leq F_\alpha$ badaną cechę sygnału uznajemy za niewrażliwą na zmiany stanu i ją odrzucamy.

4.5. Wyznaczanie wrażliwości

Założono, iż wartość wrażliwości cech sygnałów diagnostycznych może zmieniać się w zakresie od 0 do 1. Dodatkowo przyjęto, iż w przypadku uporządkowanego zbioru stanów do wartości wrażliwości dodawany jest znak „+” lub „-”.

Wyznaczanie wrażliwości dzielimy na dwa etapy. W pierwszym etapie określamy, w jakim stopniu poszczególne grupy wartości wybranej cechy sygnału różnią się między sobą. Służy do tego test HSD (Honestly Significant Difference) Tukey'a, stosowany w przypadku równej liczby obiektów w grupach lub bardziej ogólny test HSD Tukey'a-Kramera, stosowany w przypadku różnej (lub równej) liczby obiektów w grupach.

Najprostszym sposobem przeprowadzenia testu HSD jest wyznaczenie granicznych wartości HSD dla żądanego poziomu istotności. W naszym przypadku wyznaczamy HSD_α przy poziomie istotności α .

Znając wartość średnią dla przyjętych podzbiorów oraz wartość graniczną HSD_α można określić 1- α procentowe przedziały ufności dla różnicy wartości średnich.

$$\{y_{i,j}^{\min}, y_{i,j}^{\text{mean}}, y_{i,j}^{\max}\}; \quad i, j = \{a_1, a_2, a_3\}; \quad i \neq j$$

Otrzymane tym sposobem przedziały wartości pozwalają ocenić istotność różnic między przyjętymi podzbiorymi. Różnice te są istotne, gdy pary wartości $\{y_{i,j}^{\min}, y_{i,j}^{\max}\}$ są tylko dodatnie lub tylko ujemne.

W przypadku, gdy są one dodatnie to średnia dla podzbioru $j = \{a_1, a_2, a_3\}$ jest znacząco większa od średniej dla podzbioru $i = \{a_1, a_2, a_3\}$, co zapisujemy jako $w_{i,j} = +1$. Można jeszcze wyróżnić przypadek, gdy $w_{i,j} = -1$ oraz $|w_{i,j}| < 1$.

Drugim etapem wyznaczania wrażliwości jest oszacowanie jakości odwzorowania przedziałów wartości cech sygnałów w zbiorze stanów technicznych. Jeżeli przedziały wartości cech sygnałów, wyznaczonych w poprzednim etapie, zawsze znajdują jednoznaczne odwzorowanie w zbiorze rozpatrywanych stanów to jakość odwzorowania (miara wrażliwości) jest największa, równa 1. W innym przypadku, gdy któryś z przedziałów wartości cech sygnałów, nie ma jednoznacznego odwzorowania w zbiorze stanów, jakość odwzorowania jest odpowiednio mniejsza.

W celu oszacowania jakości odwzorowania, a tym samym wyznaczenia wartości wrażliwości, zaproponowano następującą zależność:

$$W = \frac{\sum_{i,j} |w_{i,j}|}{n(n-1)}; \quad i, j = \{a_1, a_2, a_3\}; \quad i \neq j.$$

Stosujemy ją, gdy między poszczególnymi stanami technicznymi nie występuje relacja uporządkowania. Jeżeli relacja uporządkowania występuje, powyższą zależność modyfikujemy, uwzględniając kolejność poprzez przypisanie $w_{i,j} = 0$, gdy jest ona nieprawidłowa.

Oprócz wrażliwości (głównej) dotyczącej cech sygnałów zaproponowano miarę wrażliwości cząstkowej dla przedziałów wartości cech sygnałów:

$$W_i = \frac{\sum_j |w_{i,j}|}{n-1}; \quad i, j = \{a_1, a_2, a_3\}; \quad i \neq j.$$

4.6. Wyniki badań

Przydatność analizy wrażliwości postanowiono zbadać korzystając reguł wnioskowania tworzonych na podstawie otrzymanych wartości wrażliwości głównej i cząstkowej.

Tabela.1. Wyniki dla 163 przykładów testowych

	Niewyważa		Wyznaczone wartości niewyważenia			Trafność diagnozy
	-	[g]	małe	średnie	duże	
Oczekiwane wartości niewyważenia	małe	0	12	2	0	86%
		0,6	36	10	5	71%
	średnie	0,8	4	1	1	17%
		1	29	13	10	25%
		1,2	0	2	1	67%
	duże	1,4	0	1	1	50%
1,6		3	7	25	71%	

Testy przeprowadzono metodą *leave one out* powtarzając każdorazowo następujące kroki:

1. Sygnały diagnostyczne zarejestrowane dla jednej, interesującej nas prędkości obrotowej podzielono na podzbiory, odpowiadające poszczególnym wartościom niewyważenia.
2. Jeden z sygnałów przyjęto jako testowy i usunięto z podzbioru, do którego go przydzielono.
3. Wyznaczono wartości cech sygnałów.
4. Dla każdej cechy sygnału wyznaczono wartość wrażliwości.
5. Na podstawie wartości wrażliwości utworzono reguły wnioskowania.
6. Na podstawie utworzonych reguł oraz cech wyznaczonych dla sygnału testowego określono wartość niewyważenia.
7. Wartość wpisaną w komórkę (tab.1), która odpowiada wyznaczonemu i oczekiwanemu niewyważeniu dla sygnału testowego, powiększono o 1.
8. Punkty od 2 do 7 powtórzono 163 razy.

5. WNIOSKI

Opracowany algorytm badania wrażliwości pozwolił wskazać cechy najbardziej wrażliwe na

zmianę niewyważenia tarczy nr 1. Pozwoliło to na automatyczne tworzenie reguł wnioskowania. Reguły te dają możliwość określenia wartości niewyważenia. Dotyczy to zwłaszcza skrajnych, najbardziej nas interesujących przypadków. Należy podkreślić fakt, iż badane sygnały były zakłócane niewyważą tarczy nr 2 oraz były rejestrowane dla różnych faz niewyważenia.

W przypadku średnich wartości niewyważenia wyniki nie są zadowalające. Przyczyną tego może być mała liczba reguł, którą ograniczono do dwóch dla każdej z trzech wartości niewyważenia. Ponadto wartości wrażliwości Wa_2 oscylowały w granicach 0.6, w czasie, gdy wartości Wa_1 oraz Wa_3 osiągały wartość wrażliwości bliską 1.

LITERATURA

- [1] Cholewa W., Moczulski W.: *Diagnostyka Techniczna Maszyn. Pomiary i Analiza Sygnałów*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1993.
- [2] Cempel Cz.: *Diagnostyka Wibroakustyczna Maszyn*. PWN, Warszawa, 1989.
- [3] *Diagnostyka Techniczna. Metody Odwracania Nieliniowych Modeli Obiektów*. Cholewa W., Kiciński J. (red.), Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Śląska, Z. 120, Gliwice, 2001.
- [4] Klimek A.: *Metody doskonalenia odwrotnych modeli diagnostycznych*. Mechanika Z. 134, Gliwice, 1999.
- [5] Klimek A., Wysogład B.: *Sprawozdanie z badań stanowiska RotorKit*. Materiały wew. Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn, Gliwice, 1999.
- [6] Sławik D.: *Application of statistical methods in the diagnostic sensitivity research*. Mat. Konf. Methods of Artificial Intelligence, AI-METH 2003, Gliwice, 2003.



Magister inżynier Damian Sławik jest absolwentem Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach. W roku 2000 rozpoczął studia doktoranckie w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn tejże uczelni.

Swoje zainteresowania skupia głównie na metodach komputerowego wspomaganie projektowania i eksploatacji maszyn, modelowania obiektów diagnostycznych, metodach sztucznej inteligencji oraz metodach diagnostyki technicznej. Jest on laureatem Stypendium Promocyjnego koncernu Fiat dla najlepszych prac dyplomowych magisterskich i doktorskich (nagroda zbiorowa wspólnie z Jackiem Wojtusikiem i Dominikiem Wachlą).