

## BADANIE ZWIĄZKÓW POMIĘDZY USZKODZENIAMI SILNIKA SPALINOWEGO A SYGNAŁEM DIAGNOSTYCZNYM

Franciszek TOMASZEWSKI, Jerzy KWAŚNIKOWSKI

Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Podstaw Konstrukcji Maszyn  
60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3, tel. 6652-570

### 1. WSTĘP

Zadaniem diagnostyki technicznej jest określenie stanu technicznego obiektu (bez jego demontażu) na podstawie pomierzonych parametrów sygnału diagnostycznego. Jako parametry sygnału diagnostycznego mogą być stosowane parametry procesów roboczych, takie jak: moc, moment obrotowy, prędkość obrotową, oraz parametry procesów towarzyszących generowanych podczas pracy obiektu, np.: drgania, hałas, produkty zużycia, temperatura itp.

Stan techniczny obiektu można opisać za pomocą zbioru parametrów charakteryzujących stan poszczególnych jego elementów lub par kinematycznych (parametrów struktury) w postaci: luzu, zużycia (zmiana wymiaru), położenia itp. Aby stan poszczególnych elementów obiektu został wyznaczony na podstawie pomierzonych parametrów sygnału diagnostycznego, niezbędna jest znajomość związków pomiędzy zbiorem parametrów stanu obiektu  $X(\Theta) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  a zbiorem parametrów sygnału diagnostycznego  $S(\Theta) = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ , czyli relacja  $R[X(\Theta), S(\Theta)]$ . Relacja ta może być przyporządkowaniem określonej wartości parametru sygnału diagnostycznego  $s_i$ , wartości  $x_i$  parametru stanu (struktury) w postaci  $s_i \leftrightarrow x_i$ , co oznacza przyczynowość a nawet determinizm we wzajemnej relacji stan – sygnał.

W przypadku złożonych obiektów mechanicznych, a do takich zalicza się silnik spalinowy, znalezienie bezpośredniej relacji pomiędzy stanem poszczególnych elementów silnika a wibroakustycznym sygnałem diagnostycznym nie zawsze jest możliwe [1]. Należy wówczas szukać odwzorowania pomiędzy procesem uszkodzania obiektu lub stanem niezawodnościowym jego elementów określanych jako zdatny, niezdatny a parametrami sygnału diagnostycznego. Zbiór parametrów stanu obiektu  $X(\Theta) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , w tym przypadku opisuje stan każdego elementu  $x_i$ , który przyjmuje wartości binarne 0,1. Zakwalifikowanie elementu do stanu niezdatności odbywa się na podstawie następujących kryteriów:

- kiedy luz lub wymiar danego elementu przekroczy wartość graniczną zużycia tzn.  $k_i \geq k_g$ ,
- wystąpi trwale uszkodzenie elementu (naruszenie jego struktury) np. pęknięcie, złamanie itp.,

- stan regulacji zespołu, układu kiedy przekroczył dopuszczalną wartość regulacyjną, tzn.  $r_i \geq r_d$ .

Dokonując oceny stanu binarnego obiektu, musimy zdawać sobie sprawę, że taka ocena pozwala tylko na określenie stanu zdatności obiektu lub jego zespołów (zdatny, niezdatny) i ma sens w obiekcie złożonym. Nie pozwala ona na ocenę stanu elementów obiektu w sensie wartości parametrów struktury np.: luzu, zużycie elementu, itp.

W pracy przedstawiono wyniki badań poszukiwania związków pomiędzy parametrami sygnału wibroakustycznego a procesem uszkodzania silnika. Proces uszkodzania silnika opisano za pomocą skumulowanej względnej bieżącej intensywności uszkodzeń SBIUw.

### 2. BADANIA DIAGNOSTYCZNO-NIEZAWODNOŚCIOWE

Badania związków pomiędzy parametrami sygnału a stanem niezawodnościowym silnika spalinowego przeprowadzono w oparciu o wyniki uzyskane ze zrealizowanego eksperymentu diagnostycznego bierno-niezawodnościowego. Eksperyment ten realizowano w normalnych warunkach eksploatacji pojazdów szynowych. Polegał on na pomiarze parametrów sygnału wibroakustycznego z równoległą rejestracją zdarzeń eksploatacyjnych w postaci uszkodzeń silników. Rejestrację uszkodzeń prowadzono na poszczególnych poziomach dekompozycji struktury niezawodnościowej silnika spalinowego [2].

W realizowanym eksperymencie diagnostycznym, jako zbiór cech opisujący stan niezawodnościowy silnika, przyjęto wektor  $X(\Theta) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  zawierający informacje o kolejnych zdarzeniach eksploatacyjnych w postaci nazwy uszkodzonego elementu oraz przebieg pojazdu, podczas którego wystąpiło zdarzenie.

Zarejestrowane dane o uszkodzeniach silnika grupowano w przedziały, gdzie końcem każdego przedziału był moment, w którym wykonywano pomiary parametrów diagnostycznych. Na podstawie tak pogrupowanych danych o uszkodzeniach silnika wyznaczono względną bieżącą intensywność uszkodzeń oraz skumulowaną względną bieżącą intensywność uszkodzeń według zależności 1 i 2 [3]:

$$BIU_w(\Theta) = \frac{n_i(\Theta + \Delta\Theta)}{N_i(\Theta) \cdot \Delta\Theta_i} \quad (1)$$

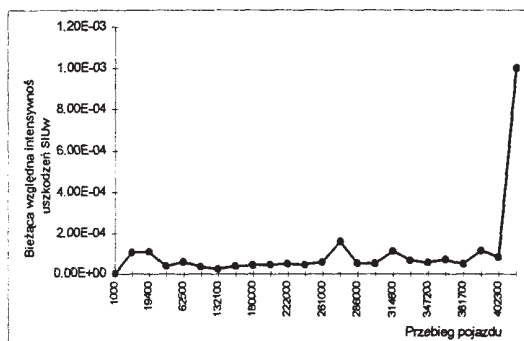
$$SBIU_w(\Theta) = \sum_{i=1}^n \frac{n_i(\Theta + \Delta\Theta)}{N_i(\Theta) \cdot \Delta\Theta_i} \quad (2)$$

gdzie:  $n_i(\Theta + \Delta\Theta)$  – liczba uszkodzeń w przedziale  $\Theta + \Delta\Theta$ ,

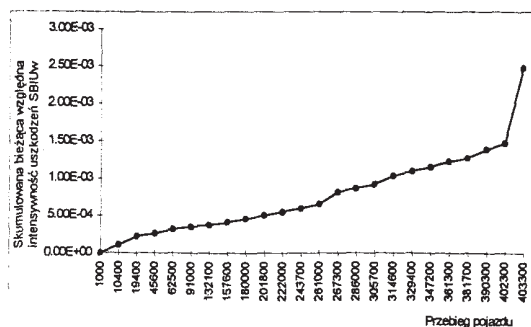
$N_i(\Theta)$  – łączna liczba uszkodzeń do i-tego przedziału (pomiaru),

$\Delta\Theta_i$  – długość przedziału (odstęp pomiędzy kolejnymi obserwacjami),

Na rysunku 1 przedstawiono przebieg bieżącej względnej intensywności uszkodzeń (BIUw), a na rysunku 2 przebieg skumulowanej bieżącej względnej intensywności uszkodzeń (SBIUw) silnika spalinowego w funkcji przebiegu pojazdu szynowego.



Rys. 1. Zmiany bieżącej względnej intensywności uszkodzeń BIUw silnika w funkcji przebiegu pojazdu



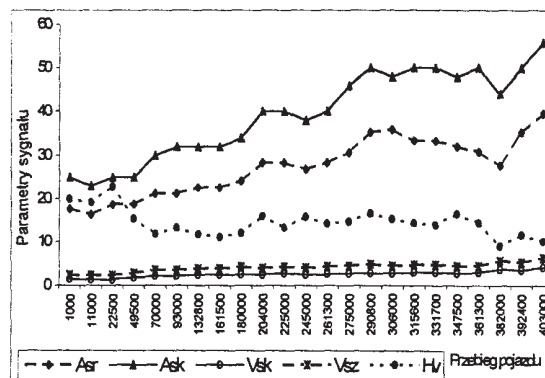
Rys. 2. Zmiany skumulowanej bieżącej względnej intensywności uszkodzeń SBIUw silnika w funkcji przebiegu pojazdu

Zbiór parametrów wyjściowych (sygnałów diagnostycznych) silnika  $S(\Theta_i) = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  jest wektorem zawierającym wartości parametrów sygnału wibroakustycznego rejestrowanego w 9 punktach (D1–D9) na kadłubie silnika spalinowego dla kolejnych wartości przebiegu pojazdu szynowego  $\Theta_i$ . Punkty te rozmieszczono na wysokości ZZ tłoków

(D1–D6) oraz na wysokości osi wału korbowego (D7–D9).

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe przebiegi wybranych parametrów diagnostycznego sygnału drganiowego silnika w funkcji przebiegu pojazdu.

Zarejestrowane dla kolejnych wartości przebiegów  $\Theta_i$  parametry sygnału diagnostycznego odwzorowują w sposób pośredni sumaryczny proces uszkodzania (zużywania) się silnika spalinowego. Uzyskane w ten sposób krzywe dla każdego parametru (rys. 3) będziemy nazywać krzywymi stanu technicznego. Krzywe stanu technicznego posiadają różny charakter zmian, co świadczy o różnej wrażliwości parametrów na zmiany stanu technicznego silnika (uszkodzania). Celem badań będzie wyznaczenie związków pomiędzy parametrami sygnału drganiowego a intensywnością uszkodzeń silnika, czyli wybór parametrów sygnału współzmiennych (skorelowanych) z procesem uszkodzania



silnika.

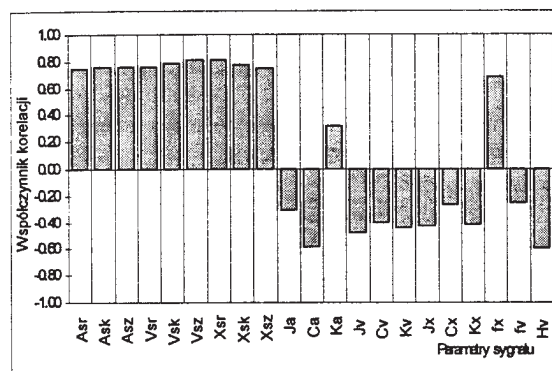
Rys. 3. Przebieg wybranych parametrów diagnostycznego sygnału drganiowego w funkcji przebiegu pojazdu

### 3. BADANIE ZWIĄZKÓW POMIĘDZY PARAMETRAMI DIAGNOSTYCZNYMI A INTENSYWNOŚCIĄ USZKODZEŃ

Badanie związków pomiędzy parametrami diagnostycznego sygnału drganiowego a intensywnością uszkodzeń polegały na wyznaczeniu pomiędzy nimi współczynników korelacji. Wyliczone wartości współczynników korelacji pozwalają dokonać wyboru tych parametrów diagnostycznych, które najlepiej odwzorowują proces uszkodzania silnika. W tabeli 1 zamieszczono przykładowe wyznaczone wartości współczynników korelacji pomiędzy parametrami diagnostycznymi a skumulowaną bieżącą względną intensywnością uzyskane dla jednego z badanych silników.

Na rysunku 4 przedstawiono uzyskane wartości współczynników korelacji pomiędzy skumulowaną bieżącą względną intensywnością a parametrami diagnostycznymi, zmierzonymi w punkcie pomia-

rowym D1 znajdującym się na wysokości zwrotów zewnętrznych tłoków.



Rys. 4. Wartości współczynników korelacji pomiędzy skumulowaną bieżącą względną intensywnością uszkodzeń a parametrami diagnostycznymi zmierzonymi w punkcie pomiarowym D1

Tabela 1

Wartości współczynników korelacji pomiędzy skumulowaną bieżącą względną intensywnością uszkodzeń a parametrami diagnostycznymi w poszczególnych punktach pomiarowych

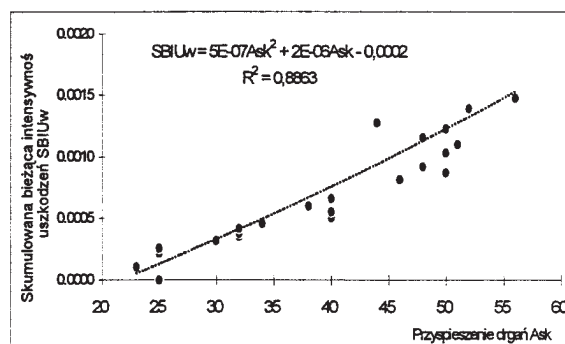
Parametry	Punkty pomiarowe								
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Aśr	0.75	0.74	0.75	0.74	0.77	0.76	0.79	0.70	0.75
Ask	0.77	0.73	0.74	0.71	0.77	0.76	0.77	0.71	0.75
Asz	0.76	0.72	0.74	0.72	0.78	0.73	0.80	0.73	0.80
Vśr	0.76	0.63	0.66	0.65	0.78	0.58	0.75	0.75	0.59
Vsk	0.79	0.62	0.70	0.69	0.80	0.58	0.75	0.78	0.57
Vsz	0.81	0.60	0.71	0.74	0.84	0.61	0.73	0.82	0.57
Xśr	0.81	0.60	0.66	0.67	0.79	0.74	0.82	0.67	0.83
Xsk	0.77	0.64	0.67	0.68	0.76	0.76	0.79	0.65	0.80
Xsz	0.75	0.65	0.68	0.65	0.72	0.76	0.78	0.65	0.80
Ja	-0.30	-0.30	-0.02	-0.46	-0.39	-0.18	-0.18	-0.03	0.05
Ca	-0.58	-0.47	-0.46	-0.30	-0.52	-0.38	-0.37	-0.34	-0.20
Ka	0.31	0.08	0.48	-0.32	0.09	0.34	0.25	0.26	0.27
Jv	-0.48	-0.42	-0.37	-0.14	-0.09	-0.34	-0.32	-0.20	-0.44
Cv	-0.41	-0.33	-0.47	-0.03	0.03	-0.31	-0.11	-0.32	-0.26
Kv	-0.45	-0.30	-0.09	-0.23	-0.24	-0.26	-0.40	0.01	-0.55
Jx	-0.42	0.38	-0.08	-0.14	-0.59	0.25	-0.12	-0.47	-0.25
Cx	-0.26	0.26	-0.06	0.01	-0.22	0.26	-0.11	0.00	0.20
Kx	-0.41	0.36	-0.05	-0.25	-0.70	0.10	-0.04	-0.63	-0.57
fx	0.68	0.59	0.57	0.46	0.47	-0.10	-0.12	0.28	-0.50
fv	-0.26	0.27	0.25	0.26	0.42	0.41	0.36	-0.05	0.39
Hv	-0.59	-0.32	-0.20	-0.11	0.17	0.33	0.29	-0.25	0.46

Aśr, Ask, Asz – średnia, skuteczna i szczytowa wartość przyspieszeń drgań,  
Vśr, Vsk, Vsz – średnia, skuteczna i szczytowa wartość prędkości drgań,  
Xśr, Xsk, Xsz – średnia, skuteczna i szczytowa wartość przemieszczeń drgań,

Ja, Ca, Ka – współczynnik impulsowości, szczytu i kształtu dla przyspieszeń drgań,  
Jv, Cv, Kv – współczynnik impulsowości, szczytu i kształtu dla prędkości drgań,  
Jx, Cx, Kx – współczynnik impulsowości, szczytu i kształtu dla przemieszczeń drgań,  
fx, fv – częstotliwość Rice'a dla przemieszczeń i prędkości drgań,  
Hv – współczynnik harmonicznosci prędkości drgań.

Przedstawione na rysunku 4 przykładowe wartości współczynników korelacji pomiędzy parametrami sygnału drganiowego w punkcie pomiarowym D1 sygnału drganiowego a skumulowaną bieżącą względną intensywnością wykazały, że najlepiej proces uszkodzania silnika spalinowego odwzorowują podstawowe wielkości drgań. Wielkościami tymi są: średnia, skuteczna i szczytowa wartość przyspieszeń, prędkości oraz przemieszczeń drgań. Również dobre odwzorowanie wykazuje częstotliwość Rice'a dla przemieszczeń drgań. Dla tych parametrów sygnału drganiowego w badaniach korelacyjnych uzyskano największe wartości współczynników korelacji. Podobne wyniki uzyskano w pozostałych punktach pomiarowych diagnostycznego sygnału drganiowego na kadłubie silnika spalinowego.

Dla parametrów diagnostycznych skorelowanych z procesem uszkodzeń przeprowadzono analizę regresji. Przykładowe wyniki analizy regresji, z równaniami opisującymi współzależność pomiędzy intensywnością uszkodzeń silnika a parametrem sygnału oraz współczynnikami determinacji, przedstawiono na rysunkach 5–6.



Rys. 5. Zależność skumulowanej bieżącej względnej intensywności uszkodzeń w funkcji skutecznej wartości przyspieszeń drgań

Uzyskane w obliczeniach współczynniki determinacji  $R^2$  mają wysokie wartości i wynoszą odpowiednio dla: Ask-SBIUw  $R^2 = 0,8863$ , Vsz-SBIUw  $R^2 = 0,8399$ .

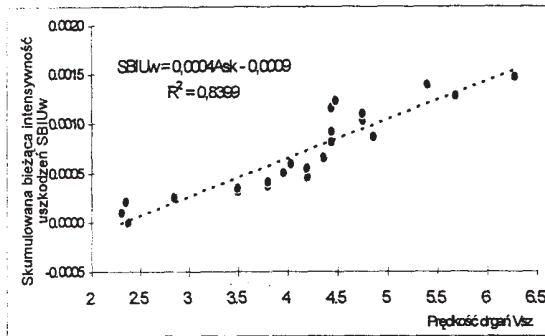
Modele opisujące związek pomiędzy:

– skumulowaną bieżącą względną intensywnością uszkodzeń a skuteczną wartością przyspieszeń drgań jest następujący:

$$SBIU_w = 0,0000005Ask^2 + 0,000002Ask - 0,0002 \quad (3)$$

– skumulowaną bieżącą względną intensywnością uszkodzeń a skuteczną wartością przyspieszeń drgań jest następujący:

$$SBIU_w = 0,0004Ask - 0,0009 \quad (4)$$



Rys. 6. Zależność skumulowanej bieżącej względnej intensywności uszkodzeń w funkcji szczytowej wartości prędkości drgań

Znając modele opisujące związek pomiędzy danym parametrem sygnału diagnostycznego a intensywnością uszkodzeń, można na podstawie zmierzonej jego wartości oszacować poziom niezawodności silnika w eksploatacji.

#### 4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących związków pomiędzy procesem uszkodzania silników spalinowych pojazdów szynowych, opisanych za pomocą skumulowanej bieżącej intensywności uszkodzeń, a parametrami diagnostycznego

sygnału drganiowego. W efekcie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że istnieje związek pomiędzy uszkodzeniami silnika a parametrami sygnału wibroakustycznego. Parametrami, które najlepiej odwzorowują proces uszkodzania się silnika spalinowego w eksploatacji są: przyspieszenie, prędkość oraz przemieszczenie drgań. Można uznać, że te parametry drgań wykazują największą wrażliwość na uszkodzenie silnika.

Przeprowadzona analiza regresji pomiędzy intensywnością uszkodzeń silnika a parametrami sygnału pozwoliła dokonać wyboru modelu (największe  $R^2$ ) opisującego wzajemny związek. Mając dany model oraz obserwowany parametr diagnostyczny, można na dowolnym etapie eksploatacji silnika szacować poziom jego niezawodności.

#### 5 LITERATURA

1. Tomaszewski F., *Badanie związków pomiędzy luzami elementów silnika a wybranymi estymatami sygnału WA*. Konferencja Naukowa nt.: Diagnostyka Maszyn Roboczych i Pojazdów '94. Bydgoszcz 5–8 września 1994, str. 337–343.
2. Tomaszewski F., *Zagadnienia wyznaczania stanu technicznego złożonego obiektu mechanicznego za pomocą sygnału wibroakustycznego. Na przykładzie silnika spalinowego pojazdu szynowego*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, seria Rozprawy Nr 337, 1998, (obj. 174 strony).
3. Tomaszewski F., *Możliwości redukcji wektora sygnału z wykorzystaniem wskaźników niezawodności*. X Szkoła Diagnostyki – DIAGNOSTICS'92, Poznań-Zajęczkowo 14–18 września 1992, str. 257–262.