

Diagnostyka wibroakustyczna silników spalinowych 2112 SSF

W artykule przedstawiono wyniki badań diagnostycznych metodą eksperymentu biernego silników spalinowych 2112 SSF lokomotyw serii SP45. Badania te polegały na obserwacji sygnału drganiowego od początku eksploatacji silników aż do jej zakończenia. Równoległe z obserwacją diagnostyczną rejestrowano zdarzenia eksploatacyjne (uszkodzenia) badanych silników. Celem tych badań było znalezienie relacji pomiędzy parametrami sygnału drganiowego a procesem uszkodzania silnika. Przeprowadzone badania korelacyjne oraz analizy regresyjne wykazały, że w przypadku złożonego obiektu jakim jest silnik spalinowy istnieje związek pomiędzy procesem uszkodzania silnika a niektórymi parametrami sygnału drganiowego.

Wprowadzenie

W badaniach diagnostycznych silników spalinowych 2112 SSF lokomotyw spalinowych serii SP45 zastosowano bierny eksperyment diagnostyczny. Eksperyment ten polega na obserwacji parametrów sygnału diagnostycznego bez znajomości i kontroli stanu ale z możliwością kontroli sterowania i zakłóceń. Możliwe są tutaj dwa jego warianty: pierwszy – dotyczy obserwacji sygnałów diagnostycznych obiektu (kilku obiektów) od początku eksploatacji, aż do jej zakończenia lub uszkodzenia uniemożliwiającego dalszą eksploatację, drugi – polega na równoległej obserwacji sygnałów diagnostycznych określonej grupy obiektów będących w różnych stanach eksploatacyjnych (różny stopień zużycia elementów).

W badaniach silników spalinowych typu 2112 SSF pojazdów szynowych zastosowano eksperyment bierny według pierwszego wariantu. Eksperyment ten rozszerzono, wprowadzając równoległe z obserwacją sygnałów diagnostycznych rejestrację zdarzeń eksploatacyjnych w postaci uszkodzeń obserwowanych silników. Rejestrację tę prowadzono na poszczególnych poziomach struktury niezawodnościowej silnika spalinowego. Tak rozszerzony eksperyment diagnostyczny nazwano eksperymentem bierno-niezawodnościowym. Obserwację grupy silników w ramach tego eksperymentu prowadzono od początku eksploatacji każdego silnika, aż do jej zakończenia lub uszkodzenia uniemożliwiającego jego dalszą eksploatację. Badania prowadzono w rzeczywistych warunkach eksploatacji lokomotyw. Na rysunku 1 przedstawiono schemat eksperymentu diagnostycznego bierno-niezawodnościowego.

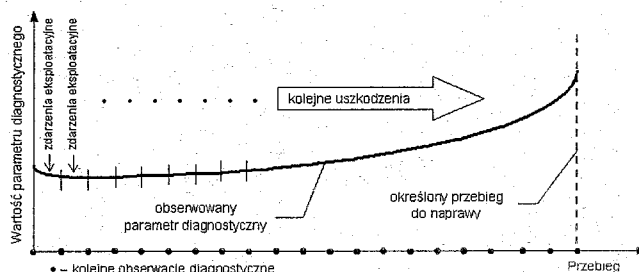
Rejestrowane zdarzenia eksploatacyjne zastosowano w analizie mającej na celu wykazanie, że istnieje odwzorowanie parametrów sygnału drganiowego w zbiorze cech opisujących stan silnika, zdefiniowanego przez parametry stanu niezawodnościowego.

Zbiór cech $X(\Theta_1)$ opisujących stan niezawodnościowy silnika

W realizowanym bierno-niezawodnościowym eksperymencie diagnostycznym, jako zbiór cech opisujący stan niezawodnościowy silnika spalinowego przyjęto wektor $X(\Theta_1) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, zawierający informacje o następujących zdarzeniach eksploatacyjnych:

- nazwa uszkodzonego elementu,
- lokalizacja uszkodzonego elementu,
- przebieg pojazdu, podczas którego wystąpiło zdarzenie.

Zarejestrowane zdarzenia eksploatacyjne silnika i jego układów grupowano w przedziały, gdzie końcem każdego przedziału był przebieg Θ_1 , w którym wykonywano kolejne pomiary diagnostyczne. Tak pogrupowane dane były podstawą do badania wpływu procesu uszkodzania silnika na zmiany parametrów sygnału drganiowego.



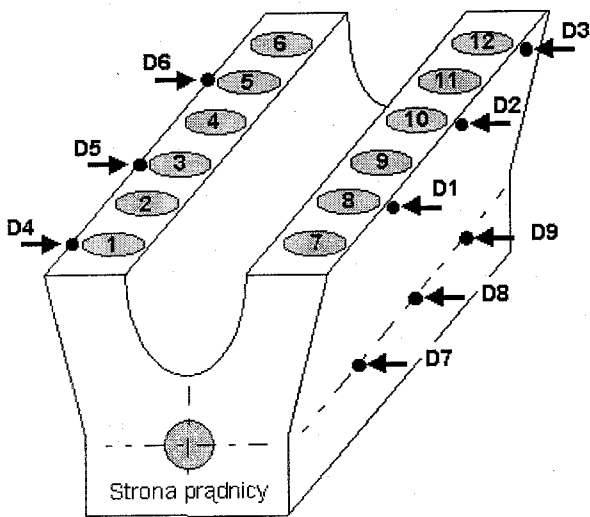
Rys. 1. Schemat eksperymentu bierno-niezawodnościowego

Zbiór parametrów diagnostycznych $S(\Theta_1)$

Zbiór parametrów diagnostycznych silnika $S(\Theta_1) = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ jest wektorem zawierającym wartości parametrów sygnału drganiowego rejestrowanego w 9 punktach na kadłubie silnika. Na rysunku 2 przedstawiono schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych, które wybrano drogą analizy niezawodnościowej. Punkty te zlokalizowano na wysokości zwrotu zewnętrznego tłoków (punkty D1–D6) oraz na wysokości osi wału korbowego (punkty D7–D9).

W każdym punkcie pomiarowym dla kolejnych obserwacji (przebiegu Θ_1) zmierzono oraz wyznaczono następujące parametry sygnału drganiowego:

- średnią, skuteczną i szczytową wartość przyspieszeń drgań,
- średnią, skuteczną i szczytową wartość prędkości drgań,
- średnią, skuteczną i szczytową wartość przemieszczeń drgań,
- współczynnik impulsowości, szczytu i kształtu przyspieszeń drgań,
- współczynnik impulsowości, szczytu i kształtu prędkości drgań,
- współczynnik impulsowości, szczytu i kształtu przemieszczeń drgań,
- częstotliwość Rice'a przemieszczeń i prędkości drgań, współczynnik harmoniczności prędkości drgań.



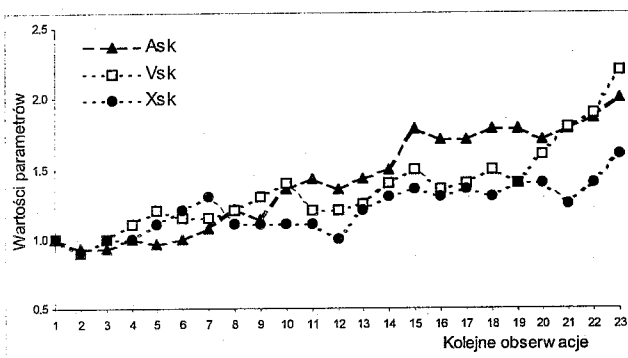
Rys. 2. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na kadłubie silnika 2112SSF

Uzyskano w ten sposób dla jednej obserwacji silnika zbiór zawierający 189 parametrów (21 parametrów sygnału \times 9 punktów pomiarowych).

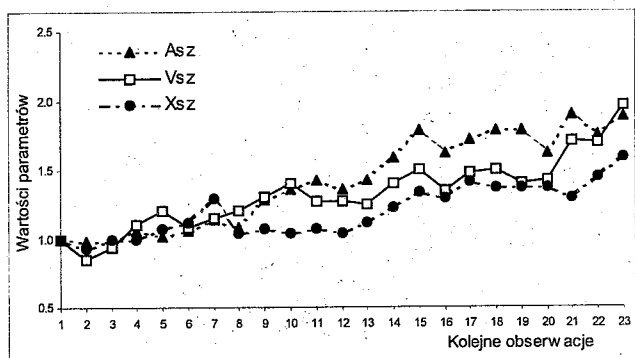
Zmiany sygnału diagnostycznego $S(\Theta_i)$ silnika w funkcji przebiegu lokomotywy

Rejestrując podczas kolejnych obserwacji (przebiegów Θ_i) parametry sygnału diagnostycznego uzyskano krzywe, które nazwano krzywymi stanu technicznego. Przy założeniu determinizmu we wzajemnej relacji stan \rightarrow sygnał diagnostyczny, krzywe te odwzorowują w sposób pośredni, sumaryczny proces uszkodzania silnika, układu lub pojedynczego elementu. Uzyskane w ten sposób krzywe będziemy nazywać krzywymi stanu technicznego.

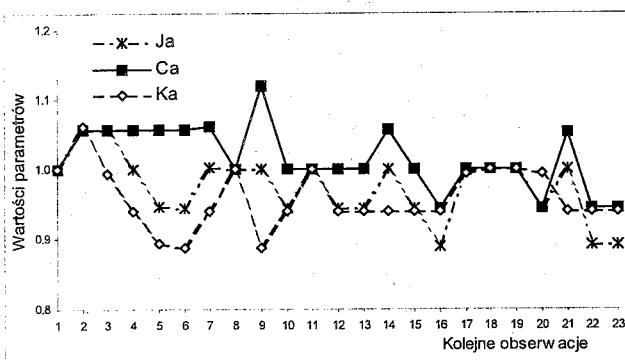
Na rysunkach 3–6 przedstawiono przykładowe zmiany wybranych parametrów sygnału drganiowego dla kolejnych obserwacji jednej z badanych lokomotyw. Przedstawione parametry sygnału drganiowego unormowane zostały względem pierwszej obserwacji. Normowanie parametrów eliminuje różne wielkości fizyczne i zakresy wartości poszczególnych parametrów. Jednocześnie powoduje, że każdy parametr dla pierwszej obserwacji posiada wartość 1. Dla kolejnych obserwacji (wartości przebiegu) zmiany unormowanych parametrów diagnostycznych są bezwymiarowymi wskaźnikami wrażliwości.



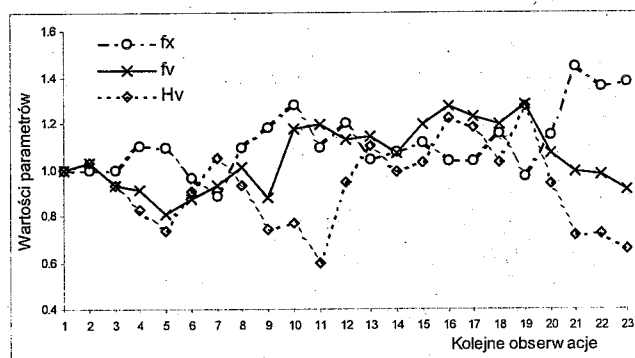
Rys. 3. Zmiany skutecznej wartości przyspieszeń, prędkości oraz przemieszczeń drgań w kolejnych obserwacjach



Rys. 4. Zmiany szczytowej wartości przyspieszeń, prędkości oraz przemieszczeń drgań w kolejnych obserwacjach



Rys. 5. Zmiany bezwymiarowych współczynników impulsowości, szczytu i kształtu przyspieszeń drgań w kolejnych obserwacjach



Rys. 6. Zmiany częstotliwości Rice'a przemieszczeń i prędkości oraz współczynnika harmoniczności drgań w kolejnych obserwacjach

Przedstawione zmiany unormowanych parametrów sygnału drganiowego wykazują różną dynamikę zmian w funkcji przebiegu lokomotywy. Można uznać, że parametry te charakteryzują się różną wrażliwością na zmiany stanu (zuzycia, uszkodzenia) silnika. Stosując zatem bardzo prosty współczynnik wrażliwości w postaci unormowanego parametru, można ocenić stopień wrażliwości danego parametru na zmiany stanu silnika.

Inną miarą stosowaną w diagnostyce (również w innych dziedzinach) do oceny wrażliwości parametrów jest współczynnik wrażliwości zdefiniowany następująco:

$$W = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\min}} \quad (1)$$

gdzie: S_{\max} – maksymalna wartość parametru w zbiorze obserwacji,
 S_{\min} – minimalna wartość parametru w zbiorze obserwacji.

W tabeli 1 przedstawiono przykładowe wartości obliczonych współczynników wrażliwości dla jednego z badanych silników. Przyjmuje się, że jeżeli wartość współczynnika wrażliwości jest ≥ 1 , to dany parametr diagnostyczny jest znacząco wrażliwy. W związku z tym parametrami, które wykazują znaczącą wrażliwość są:

- średnia, skuteczna i szczytowa wartość przyspieszeń drgań,
- średnia, skuteczna i szczytowa wartość prędkości drgań,
- współczynnik harmoniczności prędkości drgań.

Tabela 1

Wartości współczynników wrażliwości drganiowych parametrów diagnostycznych

Podstawowe wielkości drgań								
Aśr	Ask	Asz	Vśr	Vsk	Vsz	Xśr	Xsk	Xsz
1,28	1,15	1,32	1,61	1,44	1,31	0,92	0,78	0,72
Współczynniki bezwymiarowe drgań								
Ja	Ca	Ka	Jv	Cv	Kv	Jx	Cx	Kx
0,19	0,19	0,20	0,34	0,19	0,13	0,22	0,14	0,13
Częstotliwości Rice'a i współczynnik harmoniczności								
fx	fv	Hv						
0,62	0,59	1,12						

Dla parametrów, które wykazały największą wrażliwość (największa dynamika zmian) oszacowano wartość graniczną i dopuszczalną. Wartość graniczną parametru oszacowano w oparciu o metodę Neymana-Pearsona, minimalizującą prawdopodobieństwo niewykrycia uszkodzenia dla założonego poziomu zbędnych napraw wg zależności [1, 2]:

$$s_g \leq \bar{s} + \sigma_s \sqrt{\frac{P(z)}{2A}} \quad (2)$$

gdzie: s_g – szukana wartość graniczna parametru,
 \bar{s} – wartość średnia parametru z liczby N obserwacji silników w różnych stanach,

σ_s – odchylenie standardowe parametru,
 $P(z)$ – współczynnik gotowości,
 A – dopuszczalny poziom zbędnych napraw.

Przyjmuje się dopuszczalny poziom zbędnych napraw A (błędnych decyzji) na poziomie 0,1. Błędna decyzja o naprawie nastąpi, gdy parametr diagnostyczny s silnika będącego w stanie zdadności przekroczy wartość graniczną s_g .

Znając wartość graniczną danego parametru diagnostycznego oraz jego odchylenie standardowe wprowadzono trójklasowy podział stanu silnika [2]:

- gdys: $s < s_g - \sigma_s \rightarrow$ stan zdadny
 gdys: $s_g - \sigma_s \leq s < s_g \rightarrow$ stan dopuszczalny
 gdys: $s \geq s_g \rightarrow$ stan niezadny

Stan dopuszczalny rozumiany jest jako stan zagrożenia uszkodzeniem silnika. Jeżeli parametr w eksploatacji osiągnie tę wartość, wówczas należy zagęścić obserwacje w celu uchwycenia momentu przekroczenia wartości granicznej.

Przykładowe oszacowane wartości granicznej i dopuszczalnej dla skutecznej wartości przyspieszeń drgań (a) oraz szczytowej prędkości drgań (b) są następujące:

a)

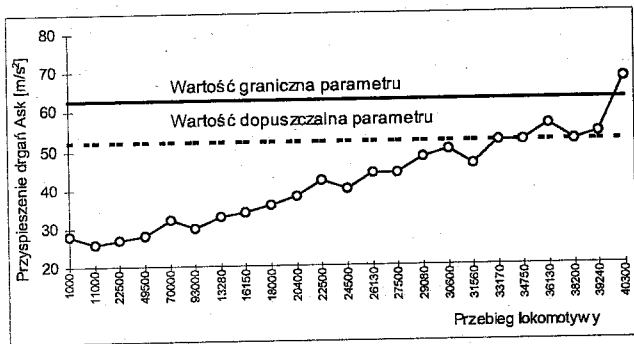
ZDATNY	DOPUSZCZALNY	NIEZDATNY
Ask < 52,11	52,11 ≤ Ask < 67,72	Ask ≥ 67,72

b)

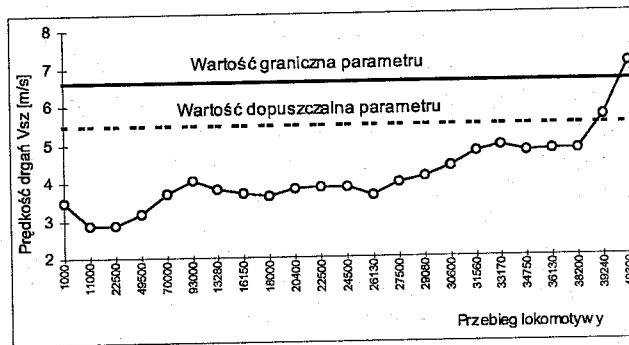
ZDATNY	DOPUSZCZALNY	NIEZDATNY
Vsz < 5,72	5,72 ≤ Vsz < 9,03	Vsz ≥ 9,03

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono przykład zastosowania oszacowanych wartości granicznych i dopuszczalnych dla skutecznej wartości przyspieszeń drgań oraz szczytowej wartości prędkości drgań dla jednego z badanych silników, w którym nastąpiło zatarcie wału korbowego.

Przedstawione przykłady zastosowania wartości granicznej i dopuszczalnej dla parametrów posiadających największą wrażliwość w funkcji kolejnych obserwacji (przebiegu lokomotywy), wykazały, że znając wartość graniczną można by uniknąć uszkodzenia silnika. Przy znanej wartości dopuszczalnej (szczególnie dla skutecznej wartości przyspieszeń drgań), proces uszkodzenia sygnalizowany był już o wiele wcześniej. Znając zatem dla każdego zespołu lokomotywy (wentylatory, sprężarka powietrza, elektryczne silniki trakcyjne itp.) drganiowy parametr diagnostyczny charakteryzujący się dużą wrażliwością na zmiany jego stanu oraz wartość graniczną, można w prosty sposób ocenić jego stan ogólny i zapobiec uszkodzeniu.



Rys. 7. Zmiany skutecznej wartości przyspieszeń drgań silnika w funkcji przebiegu lokomotywy z naniesionymi wartościami graniczną i dopuszczalną



Rys. 8. Zmiany szczytowej wartości prędkości drgań silnika w funkcji przebiegu lokomotywy z naniesionymi wartościami graniczną i dopuszczalną

Proces uszkodzenia silnika

W realizowanym eksperymencie diagnostycznym biernozawadnościowym, zbiorem cech opisujący stan niezawadnościowy silnika jest wektor $X(\Theta_i) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ zawierający informacje o zdarzeniach eksploatacyjnych (uszkodzeniach), jakie wystąpiły w silniku dla kolejnych przebiegów lokomotywy. 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 następujące wskaźniki niezawadnościowe dla silnika:

- częstość uszkodzeń,

$$p_i(\Theta) = \frac{n_k(\Theta_i, \Theta_i + \Delta\Theta)}{N_k} \quad (3)$$

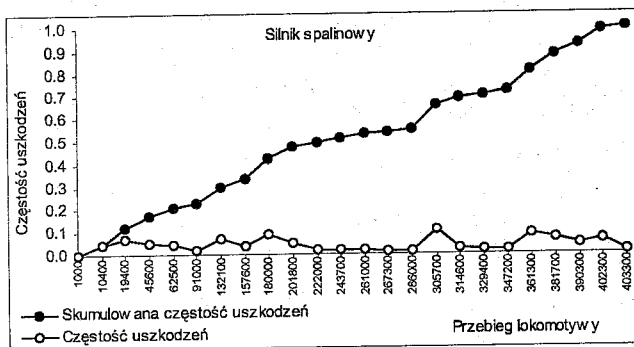
gdzie:

$n_k(\Theta_i, \Theta_i + \Delta\Theta)$ – liczba uszkodzeń w k-tym układzie silnika w przedziale $\Theta_i, \Theta_i + \Delta\Theta$,

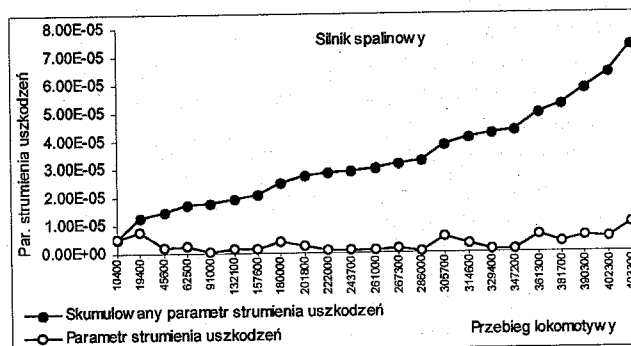
N_k – łączna liczba uszkodzeń w k-tym układzie silnika,

- parametr strumienia uszkodzeń,

$$\omega = \frac{n_k(\Theta_i, \Theta_i + \Delta\Theta)}{N \cdot \Delta\Theta} \quad (4)$$



Rys. 9. Zmiany częstości uszkodzeń oraz skumulowanej częstości uszkodzeń silnika spalinowego



Rys. 10. Zmiany parametru uszkodzeń oraz skumulowanego parametru strumienia uszkodzeń silnika spalinowego

Przedstawione na rysunkach 9 i 10 zmiany częstości uszkodzeń oraz parametrów strumienia uszkodzeń silnika, pokazują, jak zmienia się proces uszkodzania w kolejnych przedziałach przebiegu lokomotywy. Skumulowana częstość uszkodzeń oraz skumulowany parametr strumienia uszkodzeń przedstawiają sumaryczny proces uszkodzania, który ma charakter monotonicznie rosnący.

Dla zbadania czy istnieje odwzorowanie uszkodzeń silnika spalinowego w parametrach diagnostycznego sygnału drganiowego, zastosowana będzie metoda przyrostu parametru diagnostycznego w funkcji przebiegu lokomotywy oraz analiza korelacyjna i regresyjna.

Analiza przyrostu parametru w funkcji przebiegu lokomotywy

Przypadkowość i wielorakość łącznego procesu zużycia w silniku powoduje, że intensywność większości mierzonych parametrów sygnału wibroakustycznego narasta (rys. 3 i 4), a więc ma charakter kumulacyjny. Na rysunku 11 przedstawiono zmianę intensywności parametru diagnostycznego oraz możliwe działania decyzyjne na tle krzywej stanu technicznego.

Jak wynika z rysunku 11, w przebiegu zmian intensywności parametru diagnostycznego można wyróżnić trzy okresy: docierania, właściwej eksploatacji oraz okres przyspieszonego zużycia. Również na rysunkach 7 i 8 zauważalne są te trzy okresy z „życia” silnika. W pierwszym okresie eksploatacji (docierania) intensywność parametru maleje (rys. 11). Jest to wynikiem tego, że w tym okresie następuje ścieranie nierówności i dopasowywanie się współpracujących elementów, co powoduje obniżanie się poziomu sygnału.

W okresie właściwej eksploatacji obejmującej $\sim 0,75\Theta_{aw}$, przyrost intensywności parametru diagnostycznego zachowuje stałą wartość [1], tzn.:

$$\frac{\Delta S}{\Delta \Theta} = \text{const} \quad (5)$$

Z chwilą uzyskania przez silnik okresu przyspieszonego zużycia ($\Theta > 0,75\Theta_{aw}$), prędkość narastania intensywności parametru diagnostycznego jest zmienna i rosnąca, tzn.:

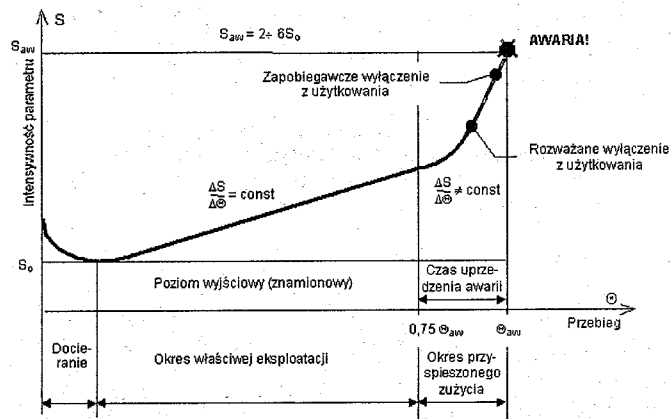
$$\frac{\Delta S}{\Delta \Theta} \neq \text{const} \quad (6)$$

Zaobserwowanie tej granicy podczas kontroli stanu technicznego silnika oraz sygnalizacja, że silnik znajduje się w okresie przyspieszonego zużycia jest jednym z głównych celów diagnostyki.

Przeszkodą w poprawnym uchwyceniu momentu wejścia w obszar przyspieszonego zużycia silnika jest przypadkowy rozrzut intensywności parametru S. Wyjściem z tej

sytuacji może być zastosowanie uśredniania bieżącej wartości parametru S, według np. schematu trzypunktowego; otrzymuje się nową uśrednioną wartość intensywności parametru \bar{S}_n :

$$\bar{S}_n = \frac{S_{n-1} + S_n + S_{n+1}}{3} \quad (7)$$



Rys. 11. Zmiana intensywności parametru diagnostycznego

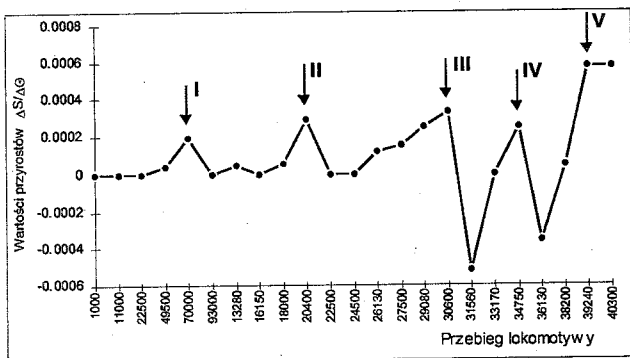
Mając uśrednioną wartość intensywności parametru diagnostycznego, można przeprowadzić porównanie kolejnych wartości szybkości narastania parametru \bar{S} .

Jeśli zastosuje się regułę identyfikacji stanu przyspieszonego zużycia silnika (ze względu na rosnące kolejne wartości $\frac{\Delta \bar{S}}{\Delta \Theta}$) w postaci:

$$\frac{\Delta \bar{S}_n}{\Delta \Theta} < \frac{\Delta \bar{S}_{n+1}}{\Delta \Theta} < \frac{\Delta \bar{S}_{n+2}}{\Delta \Theta} \quad (8)$$

oznacza to, że silnik osiągnął stadium przyspieszonego zużycia lub obserwowane uszkodzenie osiągnęło stadium intensywnego narastania.

Przykładowe obliczenia wykonano dla danych uzyskanych z przeprowadzonych badań silników w warunkach normalnej eksploatacji. Na rysunkach 12–17 przedstawiono przebiegi obliczonych wartości przyrostu parametrów $\frac{\Delta S}{\Delta \Theta}$ z zaznaczonymi momentami reguły decyzyjnej według zależności (8), sygnalizującej wejście silnika w stadium przyspieszonego zużycia lub intensywnego uszkodzania. Momenty decyzyjne (rzymskie liczby) zostały zidentyfikowane z zarejestrowanymi zdarzeniami eksploatacyjnymi, jakie wystąpiły na obserwowanych silnikach.

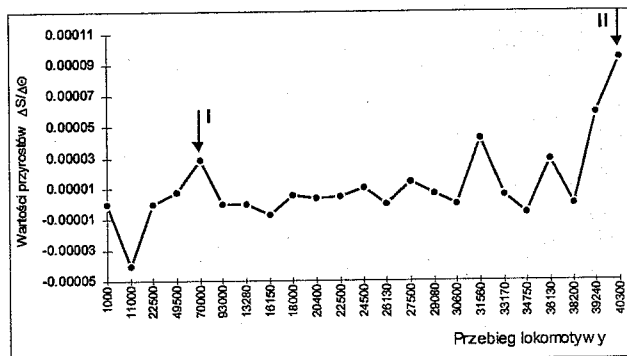


Rys. 12. Przebiegi obliczonych wartości $\frac{\Delta S}{\Delta \theta}$ silnika nr 24 dla skutecznej wartości przyspieszeń drgań

Najważniejsze uszkodzenia, które były przez dany parametr „zauważone” przed kolejnymi maksymalnymi wartościami przyrostów parametrów, są następujące:

- dla silnika nr 24 i skutecznej wartości przyspieszeń drgań (rys. 12):

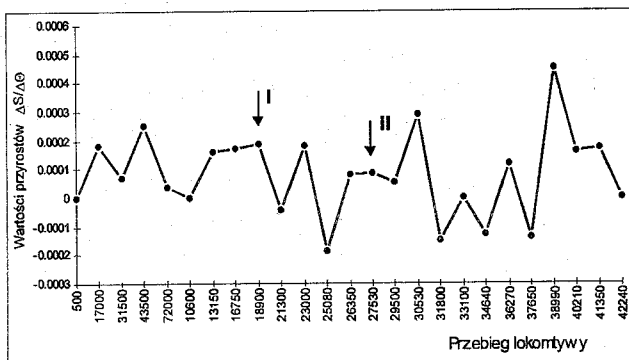
- ↓ I – uszkodzona głowica 2. cylindra – wymiana głowicy,
- ↓ II – pęknięte pierścienie uszczelniające 11. cylindra – wymiana tłoka z kompletem pierścieni,
- ↓ III – pęknięte pierścienie 1., 5., 6., 8., 10. i 11. cylindra – wymiana tłoków tych cylindrów z kompletami pierścieni,



Rys. 13. Przebiegi obliczonych wartości $\frac{\Delta S}{\Delta \theta}$ silnika nr 24 dla skutecznej wartości prędkości drgań

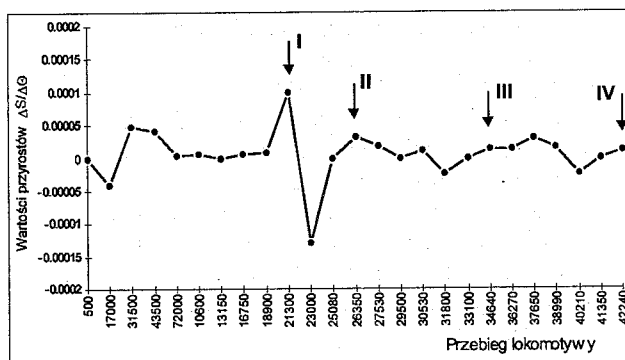
- ↓ IV – uszkodzony pierścień żarowy 2. cylindra oraz uszczelki 7. głowicy cylindra – wymiana uszkodzonych pierścieni,
- ↓ V – zatarcie VI łożyska głównego wału korbowego i w konsekwencji pęknięcie wału korbowego – zakończenie eksploatacji silnika;
- dla silnika nr 24 i skutecznej wartości prędkości drgań (rys. 13):

- ↓ I – uszkodzona głowica 2. cylindra – wymiana głowicy,
- ↓ II – uszkodzony pierścień żarowy 2. cylindra oraz uszczelki 7. głowicy cylindra – wymiana uszkodzonego pierścienia oraz uszczelki;



Rys. 14. Przebiegi obliczonych wartości $\frac{\Delta S}{\Delta \theta}$ silnika nr 54 dla skutecznej wartości przyspieszeń drgań

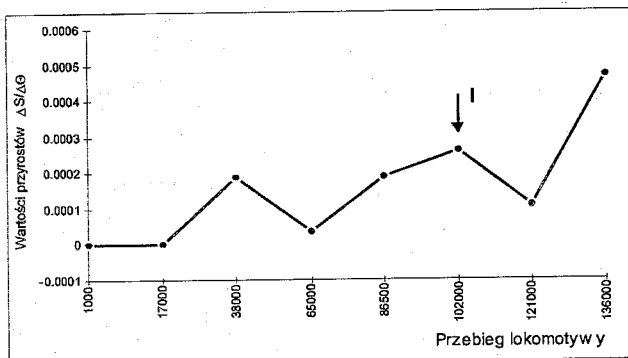
- dla silnika nr 54 i skutecznej wartości przyspieszeń drgań (rys. 14):
- ↓ I – uszkodzone szpilki 9. i 11. cylindra – wymiana szpilek głowicy,
- ↓ II – uszkodzone pierścienie uszczelniające i tłok 4. cylindra oraz pierścienie uszczelniające i tuleja cylindrowa 7. cylindra – wymiana uszkodzonych pierścieni i tłoka 4. cylindra oraz pierścieni i 7. tulei cylindra;



Rys. 15. Przebiegi obliczonych wartości $\frac{\Delta S}{\Delta \theta}$ silnika nr 54 dla skutecznej wartości prędkości drgań

- dla silnika nr 54 i skutecznej wartości przyspieszeń drgań (rys. 15):
- ↓ I – uszkodzone szpilki 9. i 11. cylindra – wymiana szpilek głowicy,
- ↓ II – uszkodzone pierścienie uszczelniające i tłok 4. cylindra oraz pierścienie uszczelniające i tuleja cylindrowa 7. cylindra – wymiana uszkodzonych pierścieni i tłoka 4. cylindra oraz pierścieni i 7. tulei cylindra;

↓ III – uszkodzone końcówki wtryskiwaczy 5., 6., 10. i 11. cylindra oraz pierścień żarowy 10. cylindra – wymiana końcówek wtryskiwaczy i pierścienia żarowego,



Rys. 16. Przebiegi obliczonych wartości $\frac{\Delta S}{\Delta \Theta}$ silnika nr 48 dla skutecznej wartości przyspieszeń drgań

- dla silnika nr 48 i skutecznej wartości przyspieszeń drgań (rys. 16):

↓ I – uszkodzona pompa paliwa 1. cylindra – wymiana pompy,

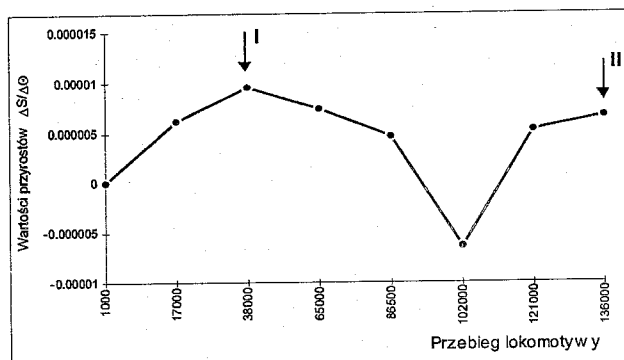
- dla silnika nr 48 i skutecznej wartości prędkości drgań (rys. 17):

↓ I – uszkodzone szpilki głowicy 7., 8. i 10. cylindra – wymiana szpilek,

↓ II – uszkodzone pierścienie uszczelniające i tłok 3., 4. i 7. cylindra oraz zatarcie V łożyska głównego wału korbowego – zakończenie eksploatacji silnika.

Przeprowadzona identyfikacja zmian przyrostu parametru w funkcji przyrostu przebiegu pojazdu $\frac{\Delta S}{\Delta \Theta}$ z zarejestrowanymi uszkodzeniami pozwoliła ocenić skuteczność tej metody. Wyszczególnione uszkodzenia, w momencie maksymalnej wartości przyrostu parametru poprzedzone trzema kolejnymi narastającymi wartościami, dotyczą istotnych uszkodzeń silnika. Uszkodzenia te usunięto bezpośrednio po wykonanym pomiarze diagnostycznym silnika. W wyniku naprawy poziom wartości przyrostów parametrów we wszystkich przypadkach obniżył się.

↓ IV – zatarcie IV łożyska głównego wału korbowego – zakończenie eksploatacji silnika;



Rys. 17. Przebiegi obliczonych wartości $\frac{\Delta S}{\Delta \Theta}$ silnika nr 48 dla skutecznej wartości prędkości drgań

Badanie odwzorowania procesu uszkodzeń silnika $X(\Theta)$ w zbiorze $S(\Theta)$

Badanie odwzorowania procesu uszkodzeń silnika oraz jego układów $X(\Theta)$ opisanego za pomocą przedstawionych wcześniej wskaźników niezawodności i jego układów a parametrami diagnostycznego sygnału drganiowego przeprowadzono w dwóch etapach. Pierwszy etap dotyczył badań korelacyjnych i miał na celu określenie siły związku pomiędzy badanymi cechami (parametrami sygnału i wskaźnikami niezawodności). W drugim etapie badań zastosowano analizę regresji w celu określenia charakteru związku między nimi [3].

Do analizy regresji wybrano te parametry, które posiadają największe wartości współczynnika korelacji z wyznaczonymi wskaźnikami niezawodności. Analiza regresji pozwoliła uzyskać modele diagnostyczno-niezawodnościowe silnika i jego układów opisujące zależność funkcyjną pomiędzy danym parametrem diagnostycznym a procesem uszkodzania.

W tabelach 2 i 3 przedstawiono wyniki badań korelacyjnych pomiędzy parametrami diagnostycznymi a skumulowaną częstością uszkodzeń oraz skumulowanymi parametrami strumienia uszkodzeń silnika i jego układów.

Tabela 2

Wartości współczynników korelacji pomiędzy parametrami diagnostycznymi a skumulowaną częstością uszkodzeń

Układy silnika	Parametry sygnału														
	Ask	Asz	Vsk	Vsz	Xsk	Xsz	Ja	Ca	Jv	Cv	Jx	Cx	fx	fv	Hv
Silnik spalinowy	0,94	0,90	0,95	0,95	0,94	0,91	-0,36	-0,77	-0,64	-0,56	-0,26	-0,32	0,72	-0,17	-0,54
Tłokowo-korbowy	0,93	0,90	0,87	0,86	0,87	0,86	-0,34	-0,74	-0,58	-0,53	-0,16	-0,21	0,64	0,00	-0,40
Paliwowy	0,92	0,88	0,97	0,96	0,93	0,90	-0,32	-0,75	-0,64	-0,57	-0,28	-0,35	0,78	-0,26	-0,62
Smarowania	0,94	0,90	0,95	0,95	0,95	0,91	-0,39	-0,78	-0,62	-0,52	-0,26	-0,35	0,70	-0,15	-0,51
Wymiany ładunku	0,91	0,91	0,91	0,93	0,93	0,91	-0,31	-0,68	-0,58	-0,48	-0,32	-0,33	0,69	-0,18	-0,55
Głowice cylindrów	0,94	0,91	0,91	0,92	0,92	0,91	-0,34	-0,76	-0,61	-0,51	-0,28	-0,27	0,68	-0,11	-0,50
Rozrządu	0,66	0,58	0,83	0,79	0,78	0,73	-0,38	-0,71	-0,74	-0,67	-0,34	-0,38	0,68	-0,49	-0,65
Chłodzenia	0,67	0,67	0,80	0,80	0,72	0,71	-0,26	-0,45	-0,59	-0,56	-0,14	-0,21	0,77	-0,50	-0,77

Wartości współczynników korelacji pomiędzy parametrami diagnostycznymi a skumulowanymi parametrami strumienia uszkodzeń

Układy silnika	Parametry sygnału														
	Ask	Asz	Vsk	Vsz	Xsk	Xsz	Ja	Ca	Jv	Cv	Jx	Cx	fx	fv	Hv
Silnik spalinowy	0,89	0,84	0,94	0,93	0,92	0,88	-0,41	-0,79	-0,65	-0,56	-0,19	-0,31	0,71	-0,20	-0,53
Tłokowo-korbowy	0,89	0,82	0,89	0,88	0,87	0,85	-0,52	-0,78	-0,59	-0,49	-0,01	-0,22	0,64	-0,09	-0,42
Paliwowy	0,85	0,80	0,93	0,90	0,90	0,86	-0,34	-0,75	-0,67	-0,63	-0,23	-0,32	0,72	-0,27	-0,57
Smarowania	0,88	0,81	0,94	0,92	0,91	0,88	-0,41	-0,80	-0,67	-0,57	-0,16	-0,34	0,70	-0,22	-0,51
Wymiany ładunku	0,88	0,87	0,89	0,91	0,90	0,87	-0,30	-0,67	-0,58	-0,49	-0,38	-0,35	0,71	-0,21	-0,58
Głowice cylindrów	0,92	0,89	0,88	0,89	0,87	0,86	-0,31	-0,73	-0,55	-0,46	-0,28	-0,24	0,68	-0,07	-0,47
Rozrzędu	0,60	0,54	0,71	0,68	0,66	0,62	-0,29	-0,61	-0,47	-0,42	-0,33	-0,29	0,57	-0,29	-0,50
Chłodzenia	0,57	0,51	0,72	0,69	0,68	0,61	-0,57	-0,54	-0,49	-0,44	-0,22	-0,41	0,55	-0,40	-0,51

Przedstawione wyniki badań korelacyjnych wykazały, że najlepszy związek ze skumulowanymi częstościami uszkodzeń oraz skumulowanymi parametrami strumienia uszkodzeń wykazują podstawowe wielkości drgań: przyspieszenie, prędkość i przemieszczenie drgań.

Dla parametrów diagnostycznych posiadających największe wartości współczynników korelacji przeprowadzono analizę regresji w celu wyznaczenia modeli diagnostyczno-niezawodnościowych, opisujących związek pomiędzy parametrami diagnostycznymi a procesem uszkodzania silnika i jego układów.

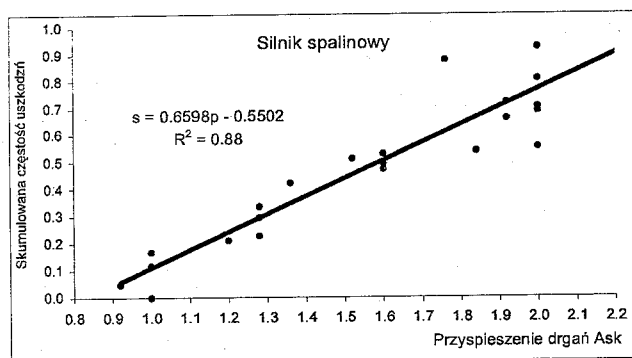
Do wyznaczania związków funkcyjnych pomiędzy wektorem parametrów sygnału a procesem uszkodzania silnika i jego układów zastosowano metody statystyczne oparte o analizę regresji metodą najmniejszych kwadratów. Analizę regresji przeprowadzono dla następujących modeli: liniowego, logarytmicznego, wielomianowego 2. stopnia, potęgowego oraz wykładniczego. Do określenia natężenia związku między parametrami sygnału diagnostycznego a wartościami wskaźników niezawodności, zastosowano współczynnik determinacji $R^2 = R^2(y, \hat{y})$ wyrażający się następującym wzorem [4]:

$$R^2(y, \hat{y}) = \frac{\left[\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})(\hat{y}_k - \bar{\hat{y}}) \right]^2}{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2 \sum_{k=1}^n (\hat{y}_k - \bar{\hat{y}})^2} \quad (9)$$

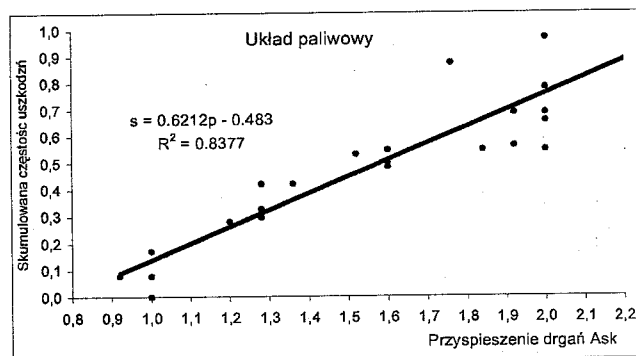
gdzie: y – rzeczywiste wartości obserwowane,
 \hat{y} – wartości estymowane metodą najmniejszych kwadratów.

Współczynnik determinacji, jako unormowana miara siły liniowego związku między badanymi zmiennymi, była podstawą doboru równań modeli.

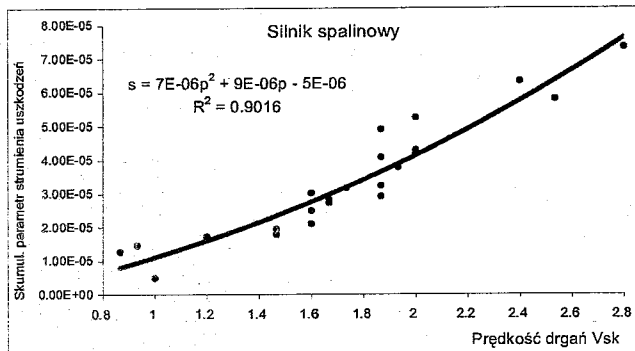
Na rysunkach 18 i 19 przedstawiono przykładowe używane modele diagnostyczno-niezawodnościowe opisujące związek pomiędzy skuteczną wartością przyspieszeń drgań a procesem uszkodzania silnika spalinowego i układu paliwowego opisanego za pomocą skumulowanej częstości uszkodzeń. Rysunki 20 i 21 przedstawiają modele diagnostyczno-niezawodnościowe opisujące związek pomiędzy skuteczną wartością prędkości drgań a procesem uszkodzania silnika spalinowego i układu paliwowego, opisanego za pomocą skumulowanego parametru strumienia uszkodzeń. Na rysunkach tych w postaci punktów zaznaczono wyniki obserwacji, a w postaci linii wyniki aproksymacji. Dodatkowo zamieszczono równania oraz współczynniki determinacji, które były podstawą doboru równań modeli.



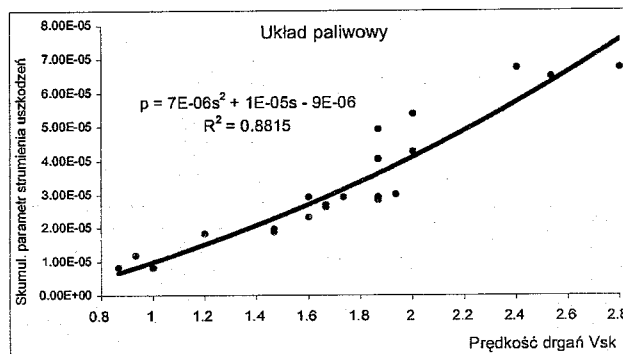
Rys. 18. Model liniowy opisujący związek pomiędzy częstością uszkodzeń silnika spalinowego a skuteczną wartością przyspieszeń drgań



Rys. 19. Model liniowy opisujący związek pomiędzy częstością uszkodzeń układu paliwowego a skuteczną wartością przyspieszeń drgań



Rys. 20. Model liniowy opisujący związek pomiędzy parametrem strumienia uszkodzeń silnika spalinowego a skuteczną wartością prędkości drgań



Rys. 21. Model liniowy opisujący związek pomiędzy parametrem strumienia uszkodzeń układu paliwowego a skuteczną wartością prędkości drgań

W tabelach 4 i 5 zamieszczono modele opisujące związek pomiędzy skuteczną wartością przyspieszeń drgań a skumulowaną częstością uszkodzeń oraz skumulowanym parametrem strumienia uszkodzeń silnika oraz jego głównych układów.

Tabela 4
Modele diagnostyczno-niezawodnościowe opisujące związek pomiędzy skuteczną wartością przyspieszeń drgań a częstością uszkodzeń silnika oraz jego układów

Układy silnika	Modele diagnostyczno-niezawodnościowe	
Silnik spalinowy	$s = 0,6598p - 0,5502$	$R^2 = 0,8800$
Tłokowo-korbowy	$s = 0,7666p - 0,7927$	$R^2 = 0,8602$
Paliwowy	$s = 0,6212p - 0,483$	$R^2 = 0,8377$
Smarowania	$s = 0,6807p - 0,6291$	$R^2 = 0,8770$
Wymiany ładunku	$s = 0,7322p - 0,5306$	$R^2 = 0,8326$
Głowice cylindrów	$s = 0,6556p - 0,4185$	$R^2 = 0,8794$
Rozrządu	$s = 0,4054p - 0,1034$	$R^2 = 0,4306$
Chłodzenia	$s = 0,348p - 0,0929$	$R^2 = 0,4508$

Tabela 5
Modele diagnostyczno-niezawodnościowe opisujące związek pomiędzy skuteczną wartością przyspieszeń drgań a parametrem strumienia uszkodzeń silnika oraz jego układów

Układy silnika	Modele diagnostyczno-niezawodnościowe	
Silnik spalinowy	$s = 7E-06p^2 + 9E-06p - 5E-06$	$R^2 = 0,9016$
Tłokowo-korbowy	$s = 4E-05p^2 - 8E-05p + 4E-05$	$R^2 = 0,8682$
Paliwowy	$s = 7E-06p^2 + 1E-05p - 9E-06$	$R^2 = 0,8815$
Smarowania	$s = 6E-06p^2 + 1E-05p - 1E-05$	$R^2 = 0,9013$
Wymiany ładunku	$s = -3E-05p^2 + 0,0001p - 8E-05$	$R^2 = 0,8664$
Głowice cylindrów	$s = -4E-07p^2 + 4E-05p - 8E-06$	$R^2 = 0,8425$
Rozrządu	$s = 9E-06p^2 - 3E-07p + 3E-05$	$R^2 = 0,3641$
Chłodzenia	$s = 2E-05p^2 - 5E-05p + 4E-05$	$R^2 = 0,3705$

Przedstawione w tabelach 4 i 5 modele diagnostyczno-niezawodnościowe wyznaczone w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych wykazały, że uszkodzenia układów rozrządu i chłodzenia posiadają najslabszy związek ze skuteczną wartością przyspieszeń drgań. Przeprowadzone badania korelacyjne dla innych parametrów sygnału drganiowego (tab. 2 i 3), wykazały również słaby związek z uszkodzeniami tych układów.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki analiz dotyczących poszukiwania związków pomiędzy niezawodnością silnika a parametrami sygnału wibroakustycznego (drganiowego). Podstawą analiz były wyniki uzyskane z diagnostycznych badań eksploatacyjnych przeprowadzonych metodą eksperymentu bierno-niezawodnościowego. Do opisu procesu uszkodzenia (stanu niezawodnościowego) silnika spalinowego i jego układów zastosowano dwa wskaźniki niezawodności-

we: skumulowaną częstość uszkodzeń oraz skumulowany parametr strumienia uszkodzeń.

Metoda przyrostów parametrów pozwala uprzedzić moment wystąpienia uszkodzenia w głównych układach silnika. Na podstawie analizy przebiegu przyrostów parametru diagnostycznego, stwierdzono stabilność przebiegów przyrostów skutecznej wartości prędkości drgań, co świadczy o mniejszej wrażliwości tego parametru na uszkodzenia silnika w porównaniu ze skuteczną wartością przyspieszeń drgań. Z kolei skuteczna wartość prędkości drgań wykazała dużą wrażliwość na uszkodzenia wału korbowego.

Przeprowadzone badania korelacyjne wskazały parametry sygnału drganiowego, które najlepiej odwzorowują proces uszkodzania silnika. Parametrami tymi okazały się: przyspieszenie, prędkość i przemieszczenie drgań. Można stwierdzić, że zmiany tych parametrów sygnału drganiowego w funkcji przebiegu lokomotywy są współzmiennicze z procesem uszkodzania silnika spalinowego i jego układów. Dla tych parametrów wyznaczono wartości graniczne i dopuszczalne pozwalające w eksploatacji uprzedzić uszkodzenie silnika.

Dla parametrów sygnału skorelowanych z procesem uszkodzania silnika wyznaczono modele regresyjne, opisujące związek między niezawodnością silnika a sygnałem diagnostycznym. Związek między skumulowaną częstością uszkodzeń i skuteczną wartością przyspieszeń drgań najlepiej

opisuje model liniowy, a dla skumulowanego parametru strumienia uszkodzeń i skutecznej wartości prędkości drgań model wielomianowy drugiego stopnia. Dla tych modeli uzyskano największe wartości współczynnika determinacji R^2 . Modele te pozwalają szacować poziom niezawodności silnika spalinowego oraz jego głównych układów na podstawie zarejestrowanych w eksploatacji parametrów sygnału drganiowego.

Literatura

- [1] Cempel C.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1985.
- [2] Tomaszewski F., Cempel C.: *Stan graniczny i dopuszczalny w diagnozowaniu silników kolejowych*. VIII Szkoła Diagnostyki Technicznej. Rydzyna, 1987, str. 177-183.
- [3] Tomaszewski F.: *Zastosowanie niezawodności w ocenie diagnostycznej uszkodzeń silnika spalinowego lokomotywy*. XIV Konferencja Naukowa Pojazdy Szynowe nt.: „Pojazdy szynowe na przełomie wieków”. Arłamów, 9-13 października 2000, str. 245-253.
- [4] Greń J., *Statystyka matematyczna*. PWN, Warszawa 1987.