EVALUATION OF DIAGNOSTIC THRESHOLDS DEPENDABILITY FOR TRIBOLOGIC SIGNALS RECEIVED IN THE ENVIRONMENT DISTURBED BY VIBROACOUSTIC AND FUNCTIONAL SIGNALS

OCENA WIARYGODNOŚCI PROGÓW DIAGNOSTYCZNYCH Z SYGNAŁÓW TRIBOLOGICZNYCH W OTOCZENIU SYGNAŁÓW WIBROAKUSTYCZNYCH I FUNKCJONALNYCH

Paweł Lindstedt, Marek Zboiński, Maciej Deliś, Jerzy Manerowski

e-mail: marek.zboinski@itwl.pl; maciej.delis@itwl.pl; jerzy.manerowski@itwl.pl

Abstract: Determination of dependable diagnostic thresholds for tribologic signals received e.g. from antifriction bearings (in particular for insufficient number of measurements, only 4÷5) is a really difficult task due to complexity of working environment where such bearings are operated. Typical working environment for such objects must take account for operation time under various working conditions and accompanying (and disturbing) signals, e.g. vibroacoustic ones. The sought assessment of the relationship between diagnostic signals and environmental noise can be determined from convolution of both diagnostic and environments signals that make up the complete set of received information. The convolution of these two series of signals can be obtained from an algorithm based on the Cauchy product. Then one has to find the coherence factor and the square of amplitude gain for the set of diagnostic signals with reference to various sets of signals received from environment, which makes it possible to evaluate cohesion of the investigated series of signals, thus their suitability to determine diagnostic threshold for tribologic signals intended for the analysis.

Keywords: diagnostic thresholds, tribologic signals

Streszczenie: Wyznaczenie wiarygodnych progów diagnostycznych dla sygnałów tribologicznych np. łożysk tocznych (szczególnie gdy dysponuje się małą liczbą pomiarów 4÷5) jest przedsięwzięciem trudnym ze względu na złożoność otoczenia, w którym łożyska te pracują. Typowym otoczeniem tego typu obiektów są: czas pracy w różnych warunkach użytkowania i sygnały towarzyszące np. wibroakustyczne. Poszukiwana ocena relacji między sygnałami diagnostycznymi i otoczeniem może być wyznaczona na podstawie splotu zbioru pomiarów sygnałów diagnostycznych i otoczenia. Splot sygnałów może być zrealizowany wg algorytmu iloczynu Cauchy'ego. Następnie wyznacza się współczynnik koherencji i kwadrat wzmocnienia amplitudowego zbioru sygnałów diagnostycznych względem zbiorów różnych sygnałów otoczenia, które pozwalają ocenić spójność badanych zbiorów, a zatem i ich przydatność do wyznaczenia progów diagnostycznych dla analizowanych sygnałów tribologicznych [3, 5, 7, 9].

Słowa kluczowe: progi diagnostyczne, sygnały tribologiczne

1. Wstęp

W diagnostyce tribologicznej zużyciowej dysponuje się dużymi rozproszonymi zbiorami pomiarów, które realizowane są w różnym czasie i które dotyczą różnych obiektów tego samego typu (np. układów łożyskowania). [4, 14, 15] Przykładowo jednym z takich zbiorów może być zbiór pomiarów koncentracji żelaza (Fe) próbek oleju wyznaczonych metodą optycznej spektrometrii emisyjnej (MOA) dla układów łożyskowania 2 silników lotniczych (silnik nr 1 i silnik nr 2) – rys 1.

Rys. 1 Koncentracja żelaza w funkcji nalotu,
metoda optycznej spektrometrii emisyjnej.

Wyznaczenie progu diagnostycznego przy zastosowaniu tzw. metody 3 σ wspólnego dla silnika 1 i 2 z wykorzystaniem dużej liczby (37 – w okresie 1600-2800 godzin ‘zmieszanych’ pomiarów jest problematyczne (budzi pewne wątpliwości). Dostrzeżono, że:

- próg diagnostyczny zawsze wyznaczany jest na podstawie dużego zbioru pomiarów wielu obiektów. Stworzenie potrzebnego dużego zbioru pomiarów jest czasochłonne (w danym przypadku to 1200 godz.)
- wspólny próg diagnostyczny dla wielu obiektów spowoduje, że dla indywidualnie ocenianych obiektów jest on nieściśły
- jeden wspólny próg diagnostyczny nie uwzględnia wieku obiektu w chwili pomiaru, a także jego otoczenia (np. nalot, trudność nalotu, drgania, temperatura itp.).

Rozwiązania zasygnalizowanych tu problemów jakie spotykamy podczas wyznaczania tribologicznych progów diagnostycznych poszukuje się w następujących przedsięwzięciach:

- tribologiczny próg diagnostyczny należy wyznaczać indywidualnie (dla każdego obiektu osobno). Może to nastąpić, gdy dysponuje się już 4-6 pomiarami z danego obiektu. Takie podejście jest zgodne z podstawową zasadą diagnostyki, która nakazuje ażeby wszystkie obiekty danego zbioru były traktowane indywidualnie.

- podczas wyznaczania progu diagnostycznego należy w sposób kompleksowy uwzględnić otoczenie. Mogą to być sygnały funkcjonalne, wibroakustyczne i inne towarzyszące wynikające z trudności wykonywanego lotu.

Należy jednak podkreślić, że próg diagnostyczny wyznaczony z 4-6 pomiarów z uwzględnieniem pomiarów otoczenia (np. nalot) będzie wiarygodny wtedy, gdy „spójność” pomiarów sygnałów tribologicznych i otoczenia będzie odpowiednia (koherencja powinna przekroczyć wartość 0,7)

2. Baza danych z kompleksowych badań diagnostycznych

Rezultaty badań funkcjonalnych (nalot) wibroakustycznych (przyspieszenie amplitudy drgań $\frac{A}{s^2}$) i tribologicznych (koncentracja Fe wyznaczona metodą optycznej spektrometrii emisyjnej MOA) dla 2 silników (silnika nr 1 i silnika nr 2) przedstawiono w tabelach nr 1 i 2. [9, 14, 15]

Tabela 1. Wyniki kompleksowych badań diagnostycznych silnika nr 1.

Nr pomiaru	Nalot sygnał funk.	Sygn. Trib. MOA Fe	Sygnał wibroakustyczny			uwagi
			Spręż.	Turb.	Maks.	
1.	1666	0,03	9	10	10	
2.	1693	0,04	10	7	10	
3.	1745	0,3	12	5	12	
4.	1755	1,5	9	7	9	
5.	1805	2,3	8	6	8	
6.	1862	2,7	7	10	10	
7.	1900	4,2	10	10	10	
8.	1920	1,1	10	7	10	
9.	1980	1,0	13	4	13	
10.	2000	5,0	10	1	10	
11.	2043	6,3	13	9	13	
12.	2096	9,5	11	10	11	

Tabela 2. Wyniki kompleksowych badań diagnostycznych silnika nr 2.

Nr pomiaru	Nalot sygnał funk.	Sygn. Trib. MOA Fe	Sygnał wibroakustyczny			uwagi
			Spręż.	Turb.	Maks.	
1.	1666	0,4	22	22	22	
2.	1693	0,9	24	23	14	
3.	1745	0,0	32	12	32	
4.	1755	0,4	31	18	31	
5.	1805	1,4	17	16	17	
6.	1862	1,5	5	9	9	
7.	1900	1,4	9	16	16	
8.	1920	2,3	9	14	14	
9.	1980	5,8	10	15	15	
10.	2000	1,1	11	17	17	
11.	2043	1,8	10	14	14	
12.	2096	2,9	10	16	16	

Analizując dane z tabel 1 i 2 można zauważyć, że podstawowym zagadnieniem do rozwiązania jest wyznaczenie w krótkim czasie aktualnego progu diagnostycznego kolejno dla silnika 1 i 2, czyli z małej liczby pomiarów (4-6). Z tabel widać bowiem, że 4 pomiary uzyskuje się już po 89 godz. nalotu, a np. 12 pomiarów dopiero po 430 godz. nalotu. Okazuje się, że taka możliwość realnie istnieje pod warunkiem, że posiadane zbiory (4-6) pomiarów są wystarczająco „spójne” (ich koherencja jest odpowiednia – bliska „1”).

3. Splot – iloczyn Cauchy’ego - koherencja

Pojęcie splotu dwu funkcji jest szeroko znane i powszechnie stosowane w praktyce. Splot (całka superpozycji, całka Duhamela, ważona średnia bieżąca, wygładzenie, rozmywanie czy też wybieranie) jest specyficzną funkcją o specjalnych właściwościach. Splot funkcji $x(t)$ i $y(t)$ wynosi [1, 3, 5, 7, 9, 13]:

$$h_{xy}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) y(t - \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t - \tau) y(t) d\tau \quad (1)$$

Splot funkcji krótko zapisuje się:

$$h_{xy}(t) = x(t) * y(t) = y(t) * x(t) \quad (2)$$

* - symbol splotu

Można także realizować sploty tych samych funkcji np. $x(t)$ z $x(t)$ i $y(t)$ z $y(t)$. Wtedy otrzymuje się:

$$h_{xx}(t) = x(t) * x(t) \quad (3)$$

$$h_{yy}(t) = y(t) * y(t) \quad (4)$$

Gdy względem splotu $h_{xy}(t)$ lub $h_{xx}(t)$ i $h_{yy}(t)$ zastosuje się przekształcenie Fouriera, to otrzymuje się:

$$\mathcal{F}h_{xy}(t) = [\mathcal{F}y(t) * x(t)] \quad (5)$$

i dalej jego widmową postać:

$$H_{xy}(j\omega) = Y(j\omega) \cdot X(j\omega) \quad (6)$$

Oznacza to, że w zespolonym przekształceniu Fouriera mnożenie transformat $Y(j\omega)$ i $X(j\omega)$ odpowiada splataniu oryginałów $x(t)$ i $y(t)$ (twierdzenie Borela). Ta własność ma szczególne znaczenie w procesie identyfikacji układów (zjawisk). Gdy $y(t)$ jest sygnałem wyjściowym, $x(t)$ sygnałem wejściowym a $h_{xy}(t)$ jest ich splotem wzajemnym oraz $h_{xx}(t)$ splotem własnym sygnału wejściowego, a $h_{yy}(t)$ splotem własnym sygnału wyjściowego to wtedy po zastosowaniu przekształcenia Fouriera względem wszystkich tych funkcji otrzymujemy:

$$\frac{H_{xy}(j\omega)}{H_{xx}(j\omega)} = \frac{Y(j\omega)X(j\omega)}{X(j\omega)X(j\omega)} = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = G(j\omega) \quad (7)$$

$$\frac{H_{yy}(j\omega)}{X_{xx}(j\omega)} = \frac{Y(j\omega)Y(j\omega)}{X(j\omega)X(j\omega)} = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = A(j\omega)^2 \quad (8)$$

Gdzie $G(j\omega)$ jest transmitancją widmową identyfikowanego obiektu, zjawiska, układu najogólniej rzecz biorąc dowolnego „bytu”, którego sygnałem wejściowym jest $x(t)$, a sygnałem wyjściowym $y(t)$ (transformaty tych sygnałów $X(j\omega)$ i $Y(j\omega)$), a $A(j\omega)^2$ jest kwadratem wzmocnienia amplitudowego sygnału wyjściowego $y(t)$ względem sygnału wejściowego $x(t)$.

Transmitancja $G(j\omega)$ i wzmocnienie $A(j\omega)^2$ mogą być wyznaczone bezpośrednio z eksperymentu (mierzy się $x(t)$ i $y(t)$) dzięki uprzednio wykonanej operacji splatania sygnałów. Splot dyskretny (iloczyn Cauchy’ego) sygnałów $x(t)$ i $y(t)$ podanych w postaci ciągu liczb $\{x(t)\}$ i $\{y(t)\}$ z numerycznego punktu widzenia jest równoważny dyskretniej postaci transformaty Fouriera [3]. Iloczyn Cauchy’ego dla ciągów liczb $\{x\}$ i $\{y\}$ wynosi:

$$\{x_0, x_1, \dots, x_m\} * \{x_0, x_1, \dots, x_m\} = \{x_0x_0, x_0x_1 + x_1x_0, \dots, x_mx_m\} \quad (9)$$

$$\{y_0, y_1, \dots, y_m\} * \{y_0, y_1, \dots, y_m\} = \{y_0y_0, y_0y_1 + y_1y_0, \dots, y_my_m\} \quad (10)$$

$$\{x_0, x_1, \dots, x_m\} * \{y_0, y_1, \dots, y_m\} = \{x_0y_0, x_0y_1 + x_1y_0, \dots\} \quad (11)$$

gdzie: $*$ – splot sygnałów (iloczyn Cauchy’ego).

Ciąg liczb $\{x\}$ może być otoczeniem (np. nalołem lub sygnałem wibroakustycznym), a ciąg liczb $\{y\}$ sygnałem diagnostycznym (dowolnym pomiarem tribologicznym).

Obliczenie splotu ciągu liczb jest proste, co ilustruje rysunek 2.

	2	
	1	
2	1	2
2		4
3		9
3		10
4		13
		10
		8
14	4	56

Rys. 2 Schemat obliczenia splotu ciągu liczb sygnałów z badań diagnostycznych (zbiorów $\{2,2,3,3,4\}$ i $\{1,1,2\}$).

Na rysunku 2 przedstawiono splot ciągu liczb $\{2,2,3,3,4\} * \{1,1,2\}$. Ciąg $\{1, 1, 2\}$ w danym przypadku zapisany jest od dołu do góry i przesuwany jest w dół, aż do pojawienia się kolejnych par ciągu pierwszego i drugiego. Tu, wzorując się na standardowej analizie sygnałów, można ustalić miarę relacji między sygnałami: koherencję i wzmocnienie amplitudowe między sygnałami otoczenia $\{x\}$ i diagnostycznymi $\{y\}$. Sploty własne (iloczyny Cauchy'ego) sygnałów $\{x\}$ i $\{y\}$ i wzajemne (równoważne transformacie Fouriera) mogą być traktowane jako gęstości mocy sygnałów: własne S_{xx} i S_{yy} i wzajemne S_{xy} . Interpretacja relacji między sygnałami też jest prosta – zbiór jest skupiony, gdy koherencja $\gamma_{xy}^2(\omega) \approx 1$. Zużycie jest prawidłowe, gdy wzmocnienie amplitudowe $|A|^2(\omega) \ll 1$. Koherencję i wzmocnienie amplitudowe oblicza się z zależności [3, 5, 12]:

$$\gamma_{xy}^2(\omega) = \frac{|S_{xy}|^2}{S_{xx}S_{yy}} \leq 1 \quad (12)$$

$$|A|^2(\omega) = \frac{S_{yy}}{S_{xx}} \ll 1 \quad (13)$$

Należy podkreślić, że stosując splot sygnałów, a następnie ich porównywanie w dziedzinie częstotliwości (co wynika z jego równoważności z dyskretnym przekształceniem Fouriera), otrzymuje się dwa precyzyjne warunki do porównywania ich spójności: γ_{xy}^2 , $\gamma_{xy}(\omega)$ i $A^2(\omega)$ ($\gamma_{xy}(\omega) > 0,7$; $A^2(\omega) < 0,1$) [5, 6].

Splot pozwala też badać kompleksowe relacje między dowolną liczbą sygnałów. I tak:

$$\{S_{xx}\} = \{x\} * \{x\} \quad (14)$$

$$\{S_{xy}\} = \{x\} * \{y\} = \{y\} * \{x\} \quad (15)$$

$$\{S_{xyw}\} = \{x\} * \{y\} * \{w\} \quad (16)$$

$$\{S_{xyw}\} = [\{x\} * \{y\}] * \{w\} = \{x\} * [\{y\} * \{w\}] \quad (17)$$

Ta własność jest szczególnie ważna, gdyż „otoczenie” i sygnały z badań diagnostycznych bardzo często są reprezentatywne przez kilka sygnałów (zbiorów pomiarów tych sygnałów). Można zatem dowolnie splatać splecione sygnały wejściowe ze splecionymi sygnałami wyjściowymi.

4. Badanie statystycznych progów diagnostycznych koncentracji MOA Fe

Bardzo ważnym elementem procesu diagnozowania jest wyznaczenie progów diagnostycznych. [2, 8, 14] W dotychczasowej praktyce diagnozowania progi wyznacza się na podstawie średniej pomiarów $AV(\mu)$ i odchylenia standardowego $STD(\sigma)$ dla wszystkich eksploatowanych silników (w rozpatrywanym przypadku są to silniki 1 i 2 – pomiary zmieszane rys. 1). Ustalono następujące progi diagnostyczne [8, 9, 14, 15]:

- $\mu + \sigma$ – dla zużycia normalnego;
- $\mu + 2\sigma$ – dla zużycia podwyższonego;
- $\mu + 3\sigma$ – dla zużycia wzmożonego;
- $\mu + \text{ponad } 3\sigma$ – dla zużycia awaryjnego.

Następnie w celu zrealizowania wymaganego procesu diagnozowania wyznaczono indywidualne progi diagnostyczne dla silnika 1 i silnika 2. Wyniki obliczeń progów dla 1÷12 z 37 pomiarów pomiarów indywidualnych dla silnika 1 i silnika 2 przedstawiono w tabelach 3 i 4.

Tabela 3. MOA Fe – dla silnika 1

Próg diag. Liczba pomiarów	Średnia AV μ	Odchylenie standardowe STD σ	AV+STD $\mu+\sigma$	AV+2STD $\mu+2\sigma$	AV+3STD $\mu+3\sigma$	R^2
dla 3 pomiarów	0,10	0,03	0,13	0,16	0,19	0,89
dla 4 pomiarów	0,45	0,51	0,96	1,47	1,98	0,59
dla 5 pomiarów	0,82	1,06	1,88	2,94	4,00	0,81
dla 6 pomiarów	1,14	1,46	2,60	4,05	5,51	0,89
dla 7 pomiarów	1,58	2,60	4,18	6,77	9,37	0,93
dla 8 pomiarów	1,52	2,25	3,77	6,02	8,27	0,56
dla 9 pomiarów	1,47	2,00	3,47	5,47	7,46	0,28
dla 10 pomiarów	1,82	3,03	4,85	7,89	10,92	0,46
dla 11 pomiarów	2,23	4,55	6,78	11,34	15,89	0,59
dla 12 pomiarów	2,83	8,53	11,37	19,90	28,43	0,67

Tabela 4. MOA Fe – dla silnika 2

Próg diag. Liczba pomiarów	Średnia AV μ	Odchylenie standardowe STD σ	AV+STD $\mu+\sigma$	AV+2STD $\mu+2\sigma$	AV+3STD $\mu+3\sigma$	R^2
dla 3 pomiarów	0,43	0,20	0,64	0,84	1,04	0,36
dla 4 pomiarów	0,43	0,14	0,56	0,70	0,83	0,24
dla 5 pomiarów	0,62	0,30	0,92	1,22	1,52	0,17
dla 6 pomiarów	0,77	0,37	1,13	1,50	1,87	0,43
dla 7 pomiarów	0,86	0,36	1,23	1,59	1,95	0,52
dla 8 pomiarów	1,04	0,56	1,60	2,16	2,72	0,66
dla 9 pomiarów	1,57	3,01	4,58	7,59	10,60	0,63
dla 10 pomiarów	1,52	2,70	4,22	6,92	9,62	0,41
dla 11 pomiarów	1,54	2,44	3,98	6,42	8,86	0,34
dla 12 pomiarów	1,66	2,37	4,03	6,41	8,78	0,38

Analizując wyniki obróbki statystycznej pomiarów MOA Fe dla silnika 1 i 2 przedstawione w tabelach 3 i 4 stwierdza się, że obiekty te są zdecydowanie różne. Powinny być stąd traktowane indywidualnie. W procesie eksploatacji powstają trudności w interpretacji posiadanych wyników pomiarów. I tak np. w tabeli 1 dla 3. pomiaru mamy MOA Fe=0,3, a wyliczony próg $\mu+3\sigma$ przedstawiony w tabeli 3 wynosi 0,19 (źle), ale już dla 4. pomiaru w tabeli 1 mamy MOA Fe=1,5, a wyliczony próg (tabela 3) wynosi 1,98 (dobrze). Tu należy zauważyć, że statystyki AV i SDT są estymatorami obciążonymi. Stąd wyniki mogą być niejednoznaczne (obarczone błędem).

Dodatkowe trudności interpretacyjne wynikają z tego, że 3. pomiar został zrealizowany po 1745 godz. nalogu i przy odpowiednio 12 i 5 wartości sygnału wibroakustycznego (tabela 1), a 4. pomiar po 1755 godz. nalogu i przy odpowiednio 9 i 7 wartości sygnału wibroakustycznego (tabela 1). Wiedza i intuicja ekspercka w takim trudnym przypadku analizy zbioru pomiarów sygnałów powinna być wspomagana specjalnymi badaniami relacji między wszystkimi sygnałami. Statystyki AV i SDT staną się parametrami μ i σ (zatem estymatorami nieobciążonymi) gdy zbiory pomiarów będą „spójne”.

Dlatego badanie spójności zbiorów pomiarów, z których wyliczany jest próg diagnostyczny w powiązaniu z otoczeniem jest potrzebne (nawet konieczne).

5. Badanie spójności zbiorów pomiarów na podstawie współczynnika koherencji

Bazując na wzorze (17) można zapisać wzór na koherencję 3 sygnałów x, y i w.

$$\gamma_{xwy}^{(3)}(\omega) = \frac{|S_{xyw}|^3}{S_{xxx}S_{yyy}S_{www}} \quad (18)$$

gdzie:

S_{xyw} – splot wzajemny (iloczyn Cauchy’ego) sygnału otoczenia x (nalotu), sygnału otoczenia w (wibroakustycznego) i sygnału diagnostycznego y (koncentracji MOAFe);

S_{xxx} – splot własny sygnału x;

S_{www} – splot własny sygnału w;

S_{yyy} – splot własny sygnału y.

Zestawienie obliczeń dla silnika 1 (rys. 2, tabela 1)

otoczenie x	Sygnał wibr. w	S_{xwi}	Sygnał trib. y	S_{xwyi}
	12		0,30	
	10		0,04	
1,666	10	16,7	0,03	0,5
1,693		33,6		1,7
1,745		54,4		8,0
		37,8		13,4
		20,9		18,5
	SUMA	163,3		12,2
			SUMA	60,4

x	x	S_{xxi}	x	S_{xxxi}
	1,745		1,745	
	1,693		1,693	
1,666	1,666	2,8	1,666	4,6
1,693		5,6		14,1
1,745		8,7		28,9
		5,9		34,4
		3,0		30,2
	SUMA	26,1		15,5
			SUMA	133,0

Evaluation of diagnostic thresholds dependability for tribologic signals...
Ocena wiarygodności progów diagnostycznych z sygnałów tribologicznych...

w	w	S _{wwi}	w	S _{wwwi}
	12		12	
	10		10	
10,00	10	100	10	1000
10,00		200		3000
12,00		340		6600
		240		8200
		144		7920
	SUMA	1024		4320
				1728
				32768

y	y	S _{yyi}	y	S _{yyyy}
	0,30		0,30	
	0,04		0,04	
0,03	0,03	0,001	0,03	0,00003
0,04		0,002		0,00011
0,30		0,020		0,00095
		0,024		0,00222
		0,090		0,00954
	SUMA	0,137		0,01080
				0,02700
				0,05065

S _{xwyi}	S _{xxxi}	S _{wwwi}	S _{yyyy}	$\gamma_{xwy}^{(3)}(\omega)$	$A^2 = \frac{S_{yyyy}}{S_{xxx}S_{www}}$
0,5	4,6	1000	0,00003	0,00002	5,84E-18
1,7	14,1	3000	0,00011	0,00062	2,55E-18
8,0	28,9	6600	0,00095	0,06657	5,01E-18
13,4	34,4	8200	0,00222	0,31500	7,89E-18
18,5	30,2	7920	0,00954	0,82507	3,99E-17
12,2	15,5	4320	0,01080	0,23663	1,62E-16
6,3	5,3	1728	0,02700	0,03257	2,94E-15

Rys. 3 Przebiegi $\gamma_{xwy}^{(3)}(\omega) = \frac{|S_{xwy}|^3}{S_{xxxmax}S_{yyymax}S_{wwwmax}} i A^2$
dla 3 pomiarów (silnik 1)

Rys. 4 Zestawienie przebiegów $\gamma_{xwy}^{(3)}(\omega)$ dla 3÷7 pomiarów dla silnika 1
(przekroczenie warunku $\gamma_{xwy}^{(3)}(\omega) = 0,7$ świadczy o dostatecznej
spójności części zbiorów pomiarów)

Zestawienia obliczeń dla silnika 2 (rys 2, tabela 2)

otoczenie x	Sygnal wibr. w	S_{xwi}	Sygnal trib. y	S_{xwyi}
	32		0,0	
	14		0,9	
1,666	22	36,7	0,4	14,7
1,693		60,6		57,2
1,745		115,4		101,0
		78,6		135,9
		55,8		94,2
	SUMA	347,1		51,0
			SUMA	0,6
				454,7
x	x	S_{xxi}	x	$S_{xxx i}$
	1,745		1,745	
	1,693		1,693	
1,666	1,666	2,8	1,666	4,6
1,693		5,6		14,1
1,745		8,7		28,9
		5,9		34,4
		3,0		30,2
	SUMA	26,1		15,5
			SUMA	5,3
				133,0
w	w	S_{wwi}	w	$S_{www i}$
	32		32	
	14		14	
22	22	484	22	10648
14		616		20328
32		1604		59400
		896		61880
		1024		86400
	SUMA	4624		43008
			SUMA	32768
				314432

y	y	S _{yyi}	y	S _{yyyi}
	0,01		0,01	
	0,9		0,9	
0,40	0,4	0,160	0,4	0,06400
0,90		0,720		0,43200
0,01		0,818		0,97680
		0,018		0,75060
		0,000		0,02442
	SUMA	1,716		0,00027
			SUMA	2,24809

S _{xwyi}	S _{xxxi}	S _{wwwi}	S _{yyyi}	$\gamma_{xwy}^{(3)}(\omega)$	$A^2 = \frac{S_{yyyi}}{S_{xxxi}S_{wwwi}}$
14,7	4,6	10648	0,06400	0,00002	5,84E-18
57,2	14,1	20328	0,43200	0,00062	2,55E-18
101,0	28,9	59400	0,97680	0,06657	5,01E-18
135,9	34,4	61880	0,75060	0,31500	7,89E-18
94,2	30,2	86400	0,02442	0,82507	3,99E-17
51,0	15,5	43008	0,00027	0,23663	1,62E-16
0,6	5,3	32768	0,00000	0,03257	2,94E-15

Rys. 5 Przebiegi $\gamma_{xwy}^{(3)}(\omega) = \frac{|S_{xwy}|^3}{S_{xxxi}S_{yyyi}S_{wwwi}}$ i A^2 dla 3 pomiarów (silnik 2)

Rys. 6 Zestawienie przebiegów $\gamma_{xwy}^{(3)}(\omega)$ dla 3÷7 pomiarów dla silnika 2
(przekroczenie warunku $\gamma_{xwy}^{(3)}(\omega) = 0,7$ świadczy o dostatecznej spójności
wszystkich zbiorów pomiarów)

Z porównania przebiegów współczynników koherencji liniowej obliczonej z iloczynu Cauchy'ego widać, że zbiory pomiarów MOA Fe (analizowane wg warunku spójności $\gamma_{xwy}^{(3)}(\omega) > 0,7$) dla silnika 1 są mniej spójne od pomiarów zbiorów pomiarów silnika 2. Stąd wniosek, że progi diagnostyczne wyznaczone dla silnika 2 są bardziej wiarygodne. Jest to też zgodne z intuicją eksperta. W procesie diagnozowania obiektów technicznych szczególną rolę odgrywa ekspert. Jego zadaniem jest ustalenie wagi zmian jakie występują w zbiorach pomiarów (stosuje się tu typowe sposoby kodowania danych) [10].

6. Podsumowanie

Wyznaczenie progu diagnostycznego jest podstawowym warunkiem dokładności i wiarygodności diagnozowania. Bez prawidłowo wyznaczonego progu diagnostycznego nie można prawidłowo przeprowadzić procesu diagnozowania. Wyznaczenie progu diagnostycznego jest niestety trudne szczególnie wtedy, gdy dysponuje się małym zbiorem pomiarów (3, 4 itp.), a problem ten zawsze występuje, gdy rozpoczynamy proces użytkowania diagnozowanych obiektów. Środkiem pomocniczym w ustaleniu wiarygodności wyznaczonego (z małej liczby

pomiarów) progu diagnostycznego mogą być wskaźniki spójności zbiorów pomiarów sygnałów bazujących na kowariancji (korelacji) lub koherencji (splocie) dyskretnych sygnałów.

Gdy współczynniki kowariancji lub koherencji są większe od 0,7 to należy uznać, że zbiory pomiarów są dostatecznie spójne [1, 3, 6, 11, 12], a wyznaczone na ich podstawie progi diagnostyczne wiarygodne, a stąd wypracowana diagnoza prawidłowa.

7. Literatura

- [1] Bendat J. S., Piersol A. G.: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych, PWN, Warszawa 1968.
- [2] Borowczyk H.: Model kompleksowego systemu diagnostycznego płatowca i zespołu napędowego statku powietrznego, V Międzynarodowa Konferencja AIRDIAG'97, Wyd. ITWL, Warszawa 1997.
- [3] Bracewell R.: Przekształcenie Fouriera i jego zastosowania, WNT, Warszawa 1968.
- [4] Deliś M., Diagnosis of aircraft engines tribological systems with the ferrography method, Journal of KONBiN, 2011, Nr 1, s. 67-74.
- [5] Franks L.E., Teoria sygnałów, WNT, Warszawa 1975.
- [6] de Larminat P., Thomas Y.: Automatyka: układy liniowe; Sygnały i układy. Warszawa : Wydaw. Nauk.-Techn., 1983.
- [7] Lindstedt P.: Statistical Diagnostic Thresholds of Rolling Bearings with Correlation of the Bearings Signal and its Environment Based on Cauchy Product; Solid State Phenomena, 2013, Trans-Tech Publications, Durnten-Zurich, pp. 111-116.
- [8] Lindstedt, P., Sudakowski, T., The Method of Assessment of Suitability of the Bearing System Based on Parameters of Technical and Adjustment State, Solid State Phenomena, 2013, Trans-Tech Publications, Durnten-Zurich, pp. 73-78.
- [9] Lindstedt P., Zboiński M., Deliś M., Spychała J., Kowalski M.: Korelacyjno-widmowa metoda diagnozowania układów łożyskowania z wykorzystaniem sygnałów zużyciowych w procesie eksploatacji napędów turbinowych. Prace naukowe ITWL, No 34 Warszawa, 2014.
- [10] Łomnicki A.: Wprowadzenie do statystyki, PWN, Warszawa 2003.
- [11] Osiowski J.: Zarys rachunku operatorowego, WNT, Warszawa 1981.
- [12] Sołodnikow W.W., Dynamika statyczna liniowanych układów sterownia automatycznego, WNT, Warszawa 1964.

- [13] Szabatin J.: Podstawy teorii sygnałów, WKŁ, Warszawa 2000 .
- [14] Zboiński M., Lindstedt P., Kotlarz I.: Stałe i aktualizowane statystyczne tribologiczne progi diagnostyczne i ich znaczenie w procesie bieżącej oceny stanu technicznego układu łożyskowania silnika lotniczego, Journal of KONBIN 1(17) 2011, Warszawa 2011.
- [15] Zboiński, M., Lindstedt, P., Deliś, M., Opportunities of evaluation diagnostic test results of roller bearings from signals correlation of bearing and its environment, Journal of KONBIN Vol. 2 (22), pp. 109-118, Warszawa 2012.

prof. Jerzy Manerowski – Profesor zwyczajny, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu; Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych; dyscyplina – mechanika, budowa i eksploatacja maszyn, transport; członek Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów; członek Wydziału IV Nauk Technicznych – Komitet Transportu Polskiej Akademii Nauk. Obszary badawcze: identyfikacja i modelowanie dynamiki lotów statków powietrznych z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych.

prof. dr hab. inż. Paweł Lindstedt – profesor Politechniki Białostockiej, profesor zwyczajny Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych. Tematyka badawcza: budowa i eksploatacja maszyn, automatyka stosowana, diagnostyka i niezawodność maszyn. Prace dotyczą diagnozowania silników lotniczych, układów łożyskowania metodami funkcjonalnymi, wibroakustycznymi i zużyciowymi.

dr inż. Marek Zboiński – adiunkt, kierownik Akredytowanego Laboratorium Diagnostyki Systemów Tribologicznych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych. Prace dotyczą diagnozowania silników lotniczych, układów łożyskowania metodami zużyciowymi.

dr inż. Maciej Deliś – starszy inżynier w Pracowni Diagnostyki Systemów Tribologicznych Zakładu Silników Lotniczych Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych.