**OPPORTUNITIES OF EVALUATION
DIAGNOSTIC TEST RESULTS OF ROLLER BEARINGS
FROM SIGNALS CORRELATION OF BEARING
AND ITS ENVIRONMENT**

**MOŻLIWOŚCI OCENY WYNIKÓW BADAŃ
DIAGNOSTYCZNYCH ŁOŻYSK TOCZNYCH
Z KORELACJI SYGNAŁÓW ŁOŻYSKA
I JEGO OTOCZENIA**

Marek Zboiński, Paweł Lindstedt, Maciej Deliś

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
e-mail: marek.zboinski@itwl.pl

Abstract: *The article discusses the opportunities of evaluation results of ball bearings diagnostic tests including signals from bearing and its environment. Diagnostic signals are obtained tribological methods, signals from environment functional methods. Relations between the two signals are described autocorrelation functions and cross. It has been shown that for a small number of measurements (3, 4) diagnostic thresholds $\mu+\sigma$, $\mu+2\sigma$, $\mu+3\sigma$ are reliable if covariance γ_{xy}^2 will be close to 1, and the strengthening of amplitude $|A|^2$ is close to 0.*

Keywords: *ball bearing, the diagnostic signals, the environment, signals correlation: self-and mutual*

Streszczenie: *Artykuł omawia możliwości oceny wyników badań diagnostycznych łożysk tocznych z uwzględnieniem sygnałów od łożyska oraz od jego otoczenia. Sygnały diagnostyczne uzyskane są metodami tribologicznymi, a otoczenie funkcjonalnymi. Relacje między tymi sygnałami opisane są funkcjami korelacji własnej i wzajemnej. Wykazano, że dla małej liczby pomiarów (3, 4) progi diagnostyczne $\mu+\sigma$, $\mu+2\sigma$, $\mu+3\sigma$ będą wiarygodne gdy kowariancja γ_{xy}^2 będzie bliska 1, a wzmocnienie amplitudowe $|A|^2$ będzie bliskie 0.*

Słowa kluczowe: *łożysko toczne, sygnały diagnostyczne, otoczenie, korelacja sygnałów: własna i wzajemna*

1. Wstęp

Postęp techniczny w obecnie istniejących systemach eksploatacji złożonych obiektów technicznych powoduje wzrost zapotrzebowania na sprawne i skuteczne metody diagnozowania zwiększające możliwości kontroli aktualnego i prognozowanego przyszłego stanu technicznego obiektu. Dotyczy to przede wszystkim maszyn wirnikowych, które znalazły szerokie zastosowanie w różnych działach techniki: lotnictwie, energetyce, transporcie i produkcji. Praktyka wykazała, że newralgicznym elementem każdej, przeważnie skomplikowanej maszyny wirnikowej są łożyska, szczególnie toczne (kulkowe, igiełkowe, baryłkowe, wałeczkowe) [2, 5, 9]. Często wymagane i stosowane duże prędkości obrotowe elementów łożysk maszyn wirnikowych powodują, że każda niedokładność: obróbki technologicznej, montażowa, obsługi i użytkowania prowadzi do ich uszkodzenia, a w efekcie do awarii całej, często kosztownej maszyny. Stąd w procesie monitorowania stanu technicznego układu łożyskowania ważną czynnością jest identyfikacja uszkodzenia, którym zgodnie z definicją (PN) jest fakt charakteryzujący się tym, że istotna cecha (parametr, sygnał) układu łożyskowania przekroczy wartość progową (dopuszczalną). Dlatego też prawidłowe wyznaczenie progów diagnostycznych dla wszystkich prawidłowo zmierzonych parametrów, sygnałów charakteryzujących rozwiązanie konstrukcyjne i możliwości wytrzymałościowo-trwałościowe łożyska pracującego w konkretnym otoczeniu jest warunkiem decydującym o efektywności diagnozowania, o dokładności diagnozy, prognozy i genezy stanu technicznego układu łożyskowania. Stąd pojawił się problem oceny wyników badań diagnostycznych i wyznaczania progów diagnostycznych.

2. Tribologiczna metoda diagnozowania

W procesie eksploatacji układy łożyskowania przeważnie diagnozowane są jednocześnie trzema metodami diagnozowania [6, 10]:

- funkcjonalna metoda diagnozowania (sygnałem diagnostycznym jest czas wybiegu ułożyskowanego wirnika)
- wibroakustyczna metoda diagnozowania (sygnałami diagnostycznymi są: amplituda drgań - A , prędkość drgań - $\dot{A}$ i przyspieszenie - $\ddot{A}$)
- tribologiczna metoda diagnozowania (sygnałami diagnostycznymi są: KPZ – przyrost koncentracji produktów zużycia między kolejnymi pomiarami, IZ – intensywność zużycia)

Szczególne znaczenie ze względu na dużą dokładność oceny stanu technicznego układów łożyskowania nabiera tribologiczna metoda diagnozowania. Wykorzystywane sygnały KPZ i IZ (wyznaczone są w znanych okresach czasu $\Delta\theta$ między kolejnymi pomiarami) obliczane są z następujących zależności [4,10]:

$$KPZ = (D_L - D_S) \quad (1)$$

$$IZ = (D_L^2 - D_S^2) \quad (2)$$

gdzie:

D_L - liczba cząstek większych od $5\ \mu\text{m}$;

D_S - liczba cząstek małych o wymiarach $0,1\div 2\ \mu\text{m}$.

Przykładowe wyniki diagnozowania 2 silników Allison 250 przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Wybrane wyniki z diagnozowania układów łożyskowania 2 silników Allison 250.

Lp.	Nalot	Okres diagnos- tyczny $\Delta\theta$	KPZ_1	KPZ_2	IZ_1	IZ_2	KPZ'_1	KPZ'_2	IZ'_1	IZ'_2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	191	100	1,5	3,9	0,15	0,39	0,015	0,039	0,001	0,003
2	297	106	7,0	5,5	4,20	1,65	0,066	0,052	0,039	0,015
3	395	98	2,5	3,7	0,25	1,85	0,025	0,037	0,002	0,018
4	500	105	7,1	5,9	3,55	0,59	0,067	0,056	0,033	0,005
5	600	100	4,2	4,1	3,36	0,41	0,042	0,041	0,033	0,004
6	698	98	5,3	5,2	0,53	1,04	0,054	0,053	0,005	0,010
7	798	100	19,8	8,4	23,8	1,68	0,198	0,084	0,237	0,016
8	879	81	10,5	12,7	7,35	11,40	0,129	0,156	0,090	0,141
9	891	12	3,0	6,4	0,60	2,56	0,250	0,533	0,050	0,213
10	912	21	7,4	6,1	10,40	1,83	0,352	0,290	0,493	0,087
Wartość średnia:		81,8	6,83	6,19	4,26	2,34	0,120	0,134	0,098	0,051

Chwilowa wartość sygnału KPZ_i i IZ_i zależy od zmiany stanu technicznego (zużycie łożyska), lecz także od długości okresu użytkowania $\Delta\theta_i$. Dlatego chwilowe wartości KPZ_i i IZ_i należy odnieść do okresu użytkowania $\Delta\theta_i$. W ten sposób otrzymuje się nowe postacie sygnałów KPZ_i i IZ_i :

$$KPZ'_i = \frac{KPZ_i}{\Delta\theta_i} \quad (3)$$

$$IZ'_i = \frac{IZ_i}{\Delta\theta_i} \quad (4)$$

które korelują sygnały diagnostyczne KPZ_i i IZ_i z otoczeniem $\Delta\theta_i$.

Sygnały KPZ'_i i IZ'_i przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Rezultaty przetwarzania wyników diagnozowania i otoczenia dla układów łożyskowania 2 silników Allison 250.

Lp	Nalot	Okres diagnoz- tyczny $\Delta\theta$	$\overline{KPZ}_1$	$\overline{KPZ}_2$	$\overline{IZ}_1$	$\overline{IZ}_2$	$\overline{KPZ}'_1$	$\overline{KPZ}'_2$	$\overline{IZ}'_1$	$\overline{IZ}'_2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	7
1	191	100	0,129	0,630	0,027	0,166	0,125	0,290	0,015	0,075
2	297	106	1,024	0,888	0,776	0,704	0,550	0,386	0,401	0,301
3	395	98	0,366	0,597	0,046	0,789	0,212	0,281	0,025	0,365
4	500	105	1,039	0,953	0,656	0,251	0,563	0,418	0,342	0,108
5	600	100	0,614	0,662	0,621	0,175	0,349	0,305	0,340	0,079
6	698	98	0,776	0,840	0,097	0,443	0,450	0,394	0,054	0,205
7	798	100	2,899	1,357	4,391	0,717	1,649	0,625	2,404	0,324
8	879	81	1,537	2,051	1,358	4,878	1,080	1,167	0,918	2,729
9	891	12	0,439	1,033	0,110	1,092	2,082	3,969	0,506	4,125
10	912	21	1,083	0,985	1,914	0,781	2,935	2,162	4,992	1,685
	d_{sr}	82,100	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	σ^2	1245,655	0,603	0,187	1,803	1,950	0,872	1,435	2,466	1,967
	σ	35,293	0,776	0,433	1,343	1,396	0,934	1,198	1,570	1,402
	d_{pr1}	117,393	1,776	1,433	2,343	2,396	1,934	2,198	2,570	2,402
	d_{pr2}	152,687	2,553	1,866	3,686	3,793	2,868	3,396	4,141	3,805
	d_{dop}	187,981	3,329	2,299	5,029	5,189	3,802	4,594	5,711	5,207

Po wyznaczeniu KPZ'_{sr} i IZ'_{sr} można wyznaczyć wartości względne:

$$\overline{KPZ}' = \frac{KPZ'_i}{KPZ'_{sr}} \quad (5)$$

$$\overline{IZ}' = \frac{IZ'_i}{IZ'_{sr}} \quad (6)$$

a następnie statystyczne umowne progi diagnostyczne:

$$d_{prK1} = \overline{KPZ}'_{sr} + \sigma_1 \quad (7)$$

$$d_{prK2} = \overline{KPZ}'_{sr} + 2\sigma_1 \quad (8)$$

$$d_{Kdop} = \overline{KPZ}'_{sr} + 3\sigma_1 \quad (9)$$

$$d_{prI1} = \overline{IZ}'_{sr} + \sigma_2 \quad (10)$$

$$d_{prI2} = \overline{IZ}'_{sr} + 2\sigma_2 \quad (11)$$

$$d_{Idop} = \overline{IZ'_{sr}} + 3\sigma_3 \quad (12)$$

gdzie:

$\overline{KPZ'_{sr}}$ - średnia względnej wartości sygnału $\overline{KPZ'}$

$\overline{IZ'_{sr}}$ - średnia względnej wartości sygnału $\overline{IZ'}$

σ_1 - odchylenie standardowe sygnału $\overline{KPZ'}$

σ_2 - odchylenie standardowe sygnału $\overline{IZ'}$

Dla potrzeb eksploatacyjnych dodatkowo ustala się, że:

d_{prK1}, d_{prI1} - zużywanie normalne

d_{prK2}, d_{prI2} - zużywanie wzmożone

d_{Kdop}, d_{Idop} - zużywanie awaryjne

Tak wyznaczone progi są miarodajne, gdy liczba pomiarów jest duża, wielokrotnie większa od 10. [9]

Ekspert z zakresu eksploatacji staje jednak (co często się zdarza) przed trudnym zadaniem oceny i prognozowania stanu maszyny, gdy liczba wyników z badania próbek jest znacznie mniejsza od 10 np. 3, 4. Wartości progów sygnałów KPZ i IZ dla 2 silników Allison 250 obliczone z 3, 4 i 10 pomiarów przedstawiono w Tabeli 3.

Tabela 3. Progi d_{pr} i wartości dopuszczalne d_{dop} sygnału KPZ' silników Allison 250 nr 1 i nr 2.

S_{ik}	1				2			
L_p	KPZ'_{sr1}	$\overline{KPZ}_1$	$\pm\sigma_1$	d_{prK1} d_{prK2} d_{dopK}	KPZ'_{sr2}	$\overline{KPZ}_2$	$\pm\sigma_2$	d_{prK1} d_{prK2} d_{dopK}
1	0,035	0,422	0,758	÷1,76	0,198	0,196	1,39	÷2,39
2		1,859		÷2,517		2,613		÷3,79
3		0,718		÷3,276		0,190		÷5,19
1	0,043	0,344	0,625	÷1,625	0,163	0,239	1,45	÷2,45
2		1,516		÷2,251		3,184		÷3,91
3		0,585		÷2,876		0,231		÷5,37
4		1,553				0,344		
1	0,120	0,12	0,934		0,181	0,215	1,09	
2		0,55				2,866		
3		0,212				0,208		
4		0,563		÷1,934		0,310		÷2,09
5		0,349		÷2,848		0,226		÷3,18
6		0,451		÷3,802		0,293		÷4,27
7		1,649				0,464		
8		1,080				0,866		
9		2,083				2,945		
10		2,935				1,604		

Analizując rezultaty przedstawione w Tabeli 3 wynikające z przetwarzania danych stwierdza się, że progi diagnostyczne i wartości dopuszczalne sygnałów diagnostycznych *KPZ* silnika nr 1 i nr 2 są różne. Wynika stąd, że w procesie diagnozowania wszystkie obiekty powinny być traktowane indywidualnie i że odchylenie standardowe σ_1 oraz σ_2 i np. minimalna wartość progu diagnostycznego d_{prK1} i d_{prK2} dobrze odzwierciedlają rzeczywiste procesy zużyciowe, które zachodzą w różnych obiektach technicznych tego samego typu w tym także w ustalonych obiektach wzorcowych. Dodatkowo można założyć, że gdy pomiary 1, 2, 3 przekroczą chwilowe progi σ , 2σ , 3σ to otrzymuje się uszkodzenia: chwilowe, parametryczne, katastroficzne. Zwraca się tu uwagę, że sam proces opracowania diagnozy w różnych sytuacjach może być bardzo prosty w innych zaś niejednoznaczny. Np.: dla silnika nr 1 podczas jego diagnozowania na podstawie 3 pomiarów ustalono $d_{prK1} = 1,76$ i że 2 pomiar przekroczył d_{prK1} , a dla 4 pomiarów 1,625 i że żaden z tych pomiarów nie przekroczył d_{prK1} , co oznacza, że zachodzi tu zużycie normalne z kolei dla silnika 2 otrzyma się odpowiednio próg 2,39 i 2,45 co odpowiada sytuacji, w której dla 3 pomiarów mamy 1 przekroczenie progu d_{prK1} , a dla 4 pomiarów także 1 przekroczenie d_{prK1} . Mamy zatem oceny 1 i 0 dla silnika 1 oraz 1 i 1 dla silnika 2. Jednakże posługując się zwykłą ekspercką intuicją dla silnika 1 otrzyma się: dla 3 pomiarów 1 przekroczenie, a dla 4 pomiarów blisko 2 przekroczenia, a dla silnika 2: dla 3 pomiarów 1 przekroczenie, a dla 4 pomiarów 1 przekroczenie. Dochodzi zatem do niejednoznaczności oceny. Stąd zaistniała potrzeba poszukiwania dodatkowych informacji, które pozwolą dokładniej identyfikować stan techniczny układu łożyskowania.

3. Iloczyn korelacji sygnałów w procesie oceny statystycznych progów diagnostycznych

Podstawy teoretyczne iloczynu korelacji sygnałów [1, 3]

W przypadku badania progów diagnostycznych rozpatruje (analizuje) się ciągi liczb wynikające z odpowiednich pomiarów. Są to ciągi charakteryzujące otoczenie (np. liczba przepracowanych godzin, ciąg x oraz ciąg liczb wynikający z pomiaru sygnału *KPZ* – ciąg q). Mamy zatem dwa ciągi liczb: $\{x_0, x_1, x_2, x_3, \dots\}$ oraz $\{y_0, y_1, y_2, y_3, \dots\}$. Związek między tymi ciągami może być określany za pomocą iloczynu Cauchy'ego (ich splotem):

$$\{x_0, x_1, \dots, x_m\} \otimes \{x_0, x_1, \dots, x_m\} = \{x_0x_0, x_0x_1 + x_1x_0, \dots, x_mx_m\} \quad (13)$$

$$\{y_0, y_1, \dots, y_m\} \otimes \{y_0, y_1, \dots, y_m\} = \{y_0y_0, y_0y_1 + y_1y_0, \dots, y_my_m\} \quad (14)$$

$$\{x_0, x_1, \dots, x_m\} \otimes \{y_0, y_1, \dots, y_m\} = \{x_0y_0, x_0y_1 + x_1y_0, \dots\} \quad (15)$$

gdzie:

$\otimes$ - korelacja sygnałów.

Obliczenie korelacji iloczynu jest w praktyce prostym do wykonania działaniem, co ilustruje rys. 1.

	1	
	1	
2	2	4
2		6
3		10
3		11
4		14
	↓	7
	↓	4
14	4	56

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

Na Rys. 1 przedstawiono iloczyn korelacji ciągu $\{2,2,3,3,4\} \otimes \{1,1,2\} = \{4,6,10,11,14,7,4\}$. Ciąg $\{1,1,2\}$ został zapisany od góry do dołu i jest przesuwany w dół, aż do pojawienia się kolejnej pary wartości ciągu pierwszego i drugiego. Liczba wyrazów ciągu iloczynu jest równa sumie liczby wyrazów mnożonych ciągów mniejsza o jeden wyraz $(5+3)-1=7$ wyrazów. Większa liczba wyrazów wynikających z liczby pomiarów otoczenia i sygnałów diagnostycznych oraz możliwość tworzenia własnych iloczynów korelacji dla sygnałów otoczenia i sygnałów diagnostycznych, a także tworzenia wzajemnych iloczynów korelacji tychże sygnałów daje duże możliwości w interpretacji wyników badań diagnostycznych. Można wzorując się na standardowej analizie sygnałów ustalić miary relacji między sygnałami: kowariancję między sygnałami otoczenia x i diagnostycznych y .

$$\gamma_{xy}^2 = \frac{|C_{xy}|^2}{C_x C_y} \rightarrow 0 < \gamma_{xy}^2 < 1 \quad (16)$$

Współczynnik wzmocnienia sygnału y względem sygnału x

$$|A|^2 = \frac{C_y}{C_x} \quad A \leq 1 \quad (17)$$

Stwierdza się dalej, że: jeżeli funkcja kowariancji jest większa od zera, ale mniejsza od jedności to wtedy występuje jeden z trzech możliwych przypadków:

- wyniki pomiarów są obarczone błędem wynikających z obecności szumów zewnętrznych;
- układy wiążący sygnały x i y są nieliniowe;
- sygnał wyjściowy y jest wynikiem nie tylko działania sygnału x , lecz również innych sygnałów wyjściowych.

Można też ustalić, że współczynnik wzmocnienia sygnału powinien być $|A| < 1$.

Ocena stanu skupienia sygnałów z badań diagnostycznych

Dla silnika 1 ustala się wartości sygnału otoczenia x , którym są okresy diagnostyczne $\Delta\theta$ oraz wartości sygnałów diagnostycznych $KPZI$. Dla 3 pomiarów są to ciągi liczb: $\{100, 106, 98\}$ i $\{1.5, 7, 2.5\}$. Następnie wyznacza się iloczyny C_{xy} , C_x , i C_y .

		1,5			100			1,5			
		7			106			7			
C_{xy}	100	2,5	250	C_x	100	98	9800	C_y	1,5	2,5	3,75
	106		965		106		20988		7		28
	98		1137		98		30840		2,5		57,5
			845				20988				28
			147				9800				3,75
			3344				92416				121

Ostatecznie otrzymuje się wartości γ_{xy}^2 i $|A|^2$ silnika 1:

$$\gamma_{xy}^2 = \frac{3344^2}{92416 \times 121} = \frac{11182336}{11182336} = 1,000 \quad (18)$$

$$|A|^2 = \frac{121}{92416} = 0,0013 \quad (19)$$

W podobny sposób dla silnika 2 ustala się sygnały otoczenia x i diagnostyczne y . Dla 3 pomiarów są to ciągi liczb: $\{100, 106, 98\}$ i $\{3.9, 5.5, 3.7\}$. Następnie wyznacza się C_{xy} , C_x , i C_y .

		3,9			100			3,9			
		5,5			106			5,5			
C_{xy}	100	3,7	370	C_x	100	98	9800	C_y	3,9	3,7	14,43
	106		942		106		20988		5,5		41,80
	98		1336		98		30840		3,7		59,14
			952				20988				41,80
			382				9800				14,43
			3982				92416				171,6

i następnie poszukiwane γ_{xy}^2 i $|A|^2$ silnika 2:

$$\gamma_{xy}^2 = \frac{3982^2}{92416 \times 171,6} = \frac{15856324}{15858585} = 0,999 \quad (20)$$

$$|A|^2 = \frac{171,6}{92416} = 0,0018 \quad (21)$$

Stąd wniosek, że diagnoza silnika 1 jest obarczona mniejszym błędem niż diagnoza silnika 2. Oznacza to także, że stan techniczny silnika 1 (oceniany na podstawie 3 pomiarów) jest na pewno lepszy od oceny stanu technicznego silnika 2, co też jest zgodne z intuicją eksperta. Wniosek ten pokrywa się z bezpośrednią analizą progów diagnostycznych (silnik 1 progi lepsze od progów silnika 2) i potwierdza prawidłowość weryfikacji wyznaczonych progów diagnostycznych i że progi układu łożyskowania silnika 1 i 2 są prawidłowe.

4. Podsumowanie

Wyznaczenie progu diagnostycznego jest podstawowym warunkiem dokładności diagnozowania. Bez prawidłowo wyznaczonego progu diagnostycznego nie można diagnozować. Jest to jednakże warunek konieczny ale niewystarczający szczególnie wtedy gdy dysponuje się małym zbiorem pomiarów (3, 4, itp.). Środkiem pomocniczym w weryfikacji diagnozy na podstawie wyznaczonych progów diagnostycznych mogą być wskaźniki korelacji między sygnałami:

- kowariancji czasowej;
- współczynnika wzmocnienia.

One pozwalają doprecyzować diagnozę wstępnie wypracowaną na podstawie analizy małej liczby pomiarów chwilowych progów diagnostycznych.

Łatwo też wyznaczyć iloczyny korelacji dla stanów wzorcowych (średnich) dla silnika 1 i silnika 2 oraz porównać ich zgodność ze stanami aktualnymi. Dla silnika 1 otrzymuje się ciągi $\{101,101,101\} \otimes \{3,67;3,67;3,67\}$, a dla silnika 2 inne wynikające z danych pomiarów (tablica 1) ciągi $\{101,101,101\} \otimes \{4,37;4,37;4,37\}$. Po wykonaniu obliczeń otrzymuje się dla silnika 1 $\gamma_{xy}^2 = 1$; $|A|^2 = 0,0132$, a dla silnika 2 $\gamma_{xy}^2 = 1$; $|A|^2 = 0,00185$. Takie sprawdzenie (także inne) daje podstawy do stwierdzenia, że wykonane pomiary są poprawne i że przyjęte progi też są poprawne.

Opublikowane wyniki uzyskano podczas realizacji projektu badawczego własnego Nr 5186/B/T02/2011/40. Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki.

5. Literatura

- [1] Bendat J. S., Piersol A. G.: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych, PWN, Warszawa 1968
- [2] Borowczyk H.: Model kompleksowego systemu diagnostycznego pługowca 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] Magier J., Lindstedt P.: Koncepcja kompleksowej metody diagnozowania układu łożyskowania silnika Allison 250-C20B, VII Międzynarodowa Konferencja AIRDIAG'2001, Wyd. ITWL, Warszawa 2001.
- [6] Magier J.: Diagnozowanie układów łożyskowania turbinowego silnika śmigłowego na podstawie przekroczeń progów diagnostycznych sygnałów funkcjonalnych, tribologicznych i wibroakustycznych, Rozprawa doktorska, Wyd. ITWL, Warszawa 2004.
- [7] Osiowski J.: Zarys rachunku operatorowego, WNT, Warszawa 1981
- [8] Szabatin J.: Podstawy teorii sygnałów, WKŁ, Warszawa 2000
- [9] 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.
- [10] Zboiński M.: Badania diagnostyczne układów tribologicznych w statkach powietrznych, w: Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej, red. Lewitowicz J., Lorocho L., Manerowski J., t. VI, Wyd. ITWL, Warszawa 2007.

Prof. dr hab. inż. Paweł Lindstedt – profesor Politechniki Białostockiej, profesor nadzwyczajny 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.

mgr inż. Maciej Deliś – starszy inżynier w Pracowni Diagnostyki Systemów Tribologicznych Zakładu Silników Lotniczych ITWL.