

Grzegorz WOJNAR, Piotr CZECH, Zbigniew STANIK

## WYKORZYSTANIE ESTYMAT AMPLITUDOWYCH I DYSKRYMINANT BEZWYMIAROWYCH SYGNAŁU WA DO WYKRYWANIA ZUŻYCIA EKSPLOATACYJNEGO ŁOŻYSK TOCZNYCH

**Streszczenie.** W niniejszym artykule przedstawiono analizę wyników badań doświadczalnych. Zorientowane były one na określenie zmian wartości wybranych estymat amplitudowych i dyskryminant bezwymiarowych sygnałów wibroakustycznych (WA) w przypadku zastosowania w alternatorze samochodowym nowych i zużytych eksploatacyjnie łożysk tocznych. Na podstawie przeprowadzonych, analiz prowadzonych dla różnych prędkości obrotowych wirnika alternatora, można stwierdzić, że jedynie w przypadku sygnału rejestrowanego na obudowie łożyska bliższego przekładni pasowej współczynniki szczytu, luzu i impulsowości wykazywały istotną zmianę wartości spowodowaną zużyciem eksploatacyjnym łożysk alternatora.

## USE OF AMPLITUDE ESTIMATES AND NONDIMENSIONAL DISCRIMINANTS OF VIBROACOUSTIC SIGNAL FOR DETECTION OF OPERATIONAL WEAR OF ROLLING BEARINGS

**Summary.** Current paper presents analysis of experimental investigation results. Car alternator was equipped either with new or used (aged) rolling bearings. Investigation was aimed at finding change of values of selected amplitude estimates and nondimensional discriminates of vibroacoustic signals for each bearing type. On the basis of analyses run for different rotational speeds of alternator rotor it may be stated that a significant change is observed in crest factor, clearance factor and impulse factor only in case of signal recorded at housing of the bearing, which was closer to belt transmission. This change is due to operational wear of alternator bearings.

### 1. WSTĘP

Łożyska toczne są powszechnie stosowane w węzłach łożyskowych maszyn i urządzeń. Na ich długotrwałą i bezawaryjną pracę, oprócz odpowiedniego doboru rodzaju łożyska, jego wymiarów, sposobu zabudowy itp., mają wpływ także inne czynniki. W [1] stwierdzono, że na przedwczesne zużycie łożysk tocznych mają wpływ: niewłaściwy montaż (około 16%),

niewłaściwe smarowanie (około 36%), zanieczyszczenie łożyska (około 14%), przeciążanie maszyny i niewłaściwa obsługa (około 34%).

Na istotną rolę czynników eksploatacyjnych i przeciążeń zwrócono uwagę również w pracy [2]. Stwierdzono tam, że analiza obciążeń występujących w linii wałów okrętowych wskazuje na występowanie silnych oddziaływań dynamicznych, wpływających z kolei na niezawodność układu napędowego, a powstające drgania powodują zmiany w zakresie dynamiki oraz powstanie prędkości krytycznych drugiego rodzaju, które w efekcie są w stanie szybko zniszczyć układy łożyskowe. W przypadku niektórych maszyn, urządzeń i elementów pojazdów, przez odpowiednią kontrolę wyważenia elementów wirujących oraz zastosowanie odpowiednich sprzęgieł [3 - 6] możliwe jest obniżenie obciążeń elementów układu napędowego, a w tym także łożyskowania [6 - 8]. Z powodów wymienionych powyżej w maszynach i urządzeniach mających wpływ na bezpieczeństwo oraz kluczowych ze względu na realizowane procesy, celowe jest stosowanie różnego rodzaju systemów diagnostycznych. Ze względu na wiele zalet, w diagnostyce łożysk tocznych są wykorzystywane sygnały drganiowe [9 - 11]. Często oprócz metody analizy sygnału drganiowego istotne jest zarejestrowanie takiego sygnału, który będzie zawierał możliwie najwięcej informacji o ewentualnym uszkodzeniu. Z tego powodu w pracach [12, 13] do wykrywania lokalnych uszkodzeń łożysk tocznych przekładni zębatej wykorzystano sygnały przyspieszeń drgań obudowy łożysk i mierzone bezkontaktowo sygnały prędkości drgań wirujących wałów. W przypadku pomiaru prędkości drgań wału przekładni droga sygnału generowanego przez uszkodzenie, np. łożyska lub koła zębatego, ulega skróceniu i zostaje wyeliminowany wpływ złożonej oraz zmiennej w czasie transmitancji układu łożysko-korpus przekładni. W wielu przypadkach pozwala to na bardziej efektywne wykrywanie uszkodzeń. Z kolei na podstawie przeprowadzonych badań i wykonanych analiz węzłów łożyskowych kół jezdnych samochodu [14, 15] stwierdzono, że zaproponowana w [15] bezwymiarowa miara uszkodzenia bieżni zewnętrznej jest mało wrażliwa na zmiany prędkości obrotowej koła, natomiast jest ona czuła na wystąpienie lokalnego uszkodzenia bieżni łożyska. Zauważono również, że zużycie powierzchni roboczych elementów tocznych łożysk kół jezdnych, w przypadku symulowania zużycia eksploatacyjnego i braku obecności ciał obcych powodowały znaczący wzrost wartości amplitud kolejnych harmonicznych częstotliwości obrotowej koła. W pracy [16] przeanalizowano wpływ zużycia łożysk kół jezdnych samochodu na zmiany wybranych cech sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych w warunkach drogowych przy zmiennej w czasie prędkości jazdy. Określono zakres prędkości pojazdu, w którym zmiany wartości skutecznej ciśnienia akustycznego występującego we wnętrzu kabiny i sygnału drganiowego węzłów łożyskowych, powodowane przez zużycie eksploatacyjne łożysk tocznych był najbardziej znaczące. Na podstawie uzyskanych doświadczeń opracowano stanowiska diagnostyczne przedstawione w pracach [17 - 19]. Z kolei w niniejszej publikacji podjęto próbę określenia wpływu zużycia eksploatacyjnego na wartości różnych wskaźników amplitudowych sygnałów akustycznego i drganiowego.

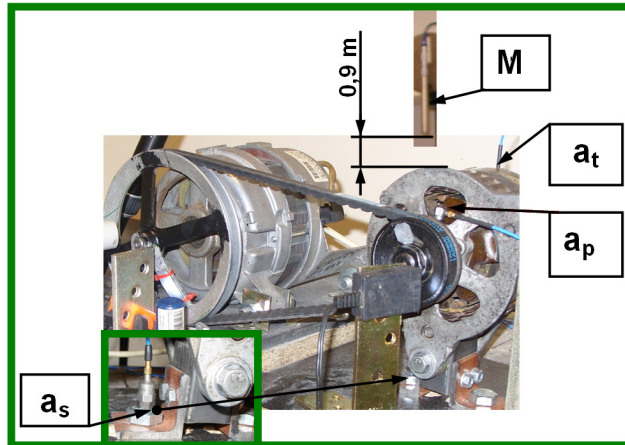
## 2. OBIEKT BADAŃ

Obiekt badań powstał na bazie alternatora samochodu osobowego. W trakcie badań jego wirnik był napędzany przez silnik elektryczny za pośrednictwem przekładni pasowej (rys. 1). Rejestrowano synchronicznie:

- w kierunku pionowym sygnały przyspieszeń drgań obudów obu łożysk alternatora  $a_p$  i  $a_s$  (rys. 1),

- w kierunku pionowym sygnał przyspieszeń drgań śruby mocującej alternator do podstawy stanowiska w punkcie  $a_s$ ,
- sygnał ciśnienia akustycznego ( $p$ ) w odległości 90 cm nad obudową alternatora,
- sygnały referencyjne związane z prędkością obrotową wirników silnika i alternatora.

Podczas rejestracji sygnałów wibroakustycznych alternator pracował bez obciążenia prądem elektrycznym.



Rys. 1. Obiekt badań

Fig. 1. Object of research

### 3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

W diagnostyce wibroakustycznej powszechnie stosowane są estymaty amplitudowe i dyskryminanty bezwymiarowe [20], z których najczęściej stosowane przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

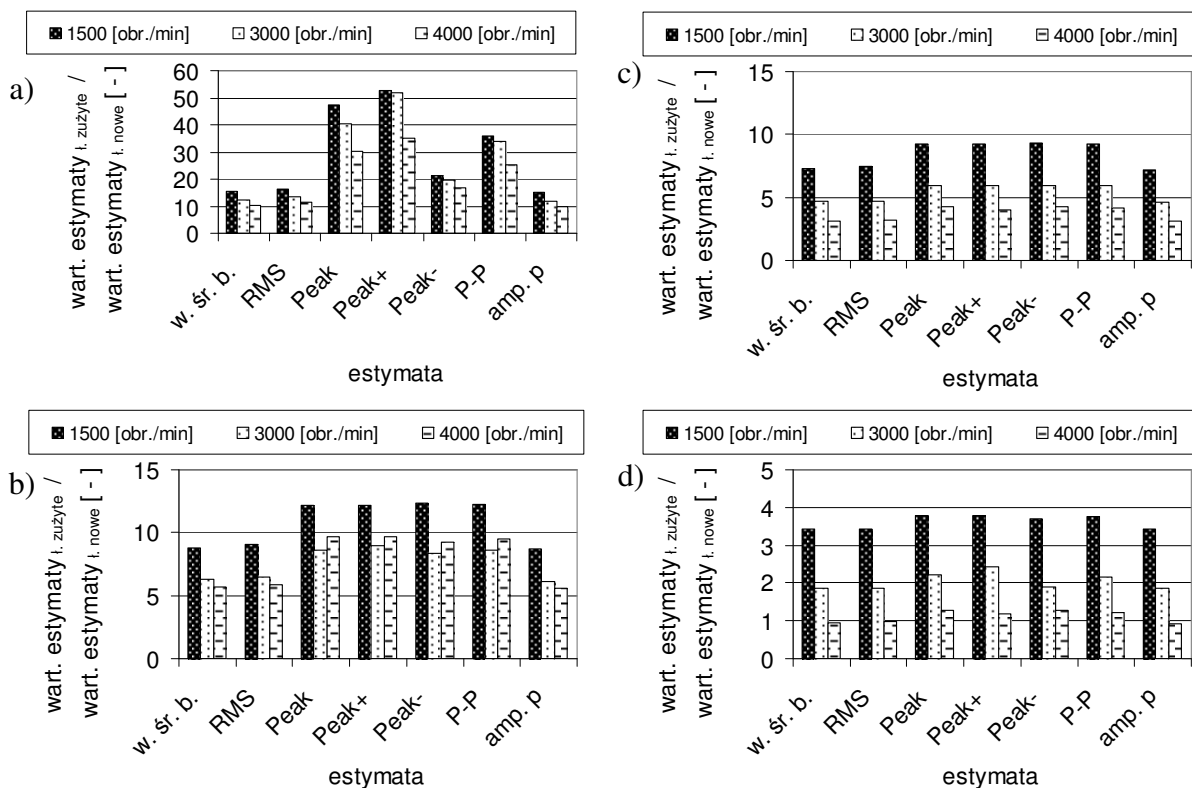
Estymaty amplitudowe i dyskryminanty bezwymiarowe stosowane w diagnostyce

Lp.	Nazwa estymaty	Definicja	Lp.	Nazwa dyskryminanty	Definicja
1.	wartość średnia:	$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt,$	9.	współczynnik szczytu:	$C = \frac{x_{PEAK}}{x_{RMS}},$
2.	wartość średnia bezwzględna:	$x_{AVE} = \frac{1}{T} \int_0^T  x(t)  dt,$	10.	współczynnik impulsowości:	$I = \frac{x_{PEAK}}{x_{AVE}},$
3.	wartość skuteczna:	$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt},$	11.	współczynnik kształtu:	$K = \frac{x_{RMS}}{x_{AVE}},$
4.	wartość szczytowa absolutna:	$x_{PEAK} = \max_{0 < t \leq T}  x(t) ,$	12.	współczynnik luzu:	$L = \frac{x_{PEAK}}{x_p}.$
5.	wartość szczytowa dodatnia:	$x_{PEAK+} = \max_{0 < t \leq T} x(t),$			
6.	wartość szczytowa ujemna:	$x_{PEAK-} = \min_{0 < t \leq T} x(t),$			

cd. tabeli 1

7.	wartość międzyszczytowa:	$x_{P-P} = x_{PEAK+} - x_{PEAK-}$ ,
8.	amplituda pierwiastkowa:	$x_p = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T  x(t) ^2 dt \right]^{\frac{1}{2}}$ .

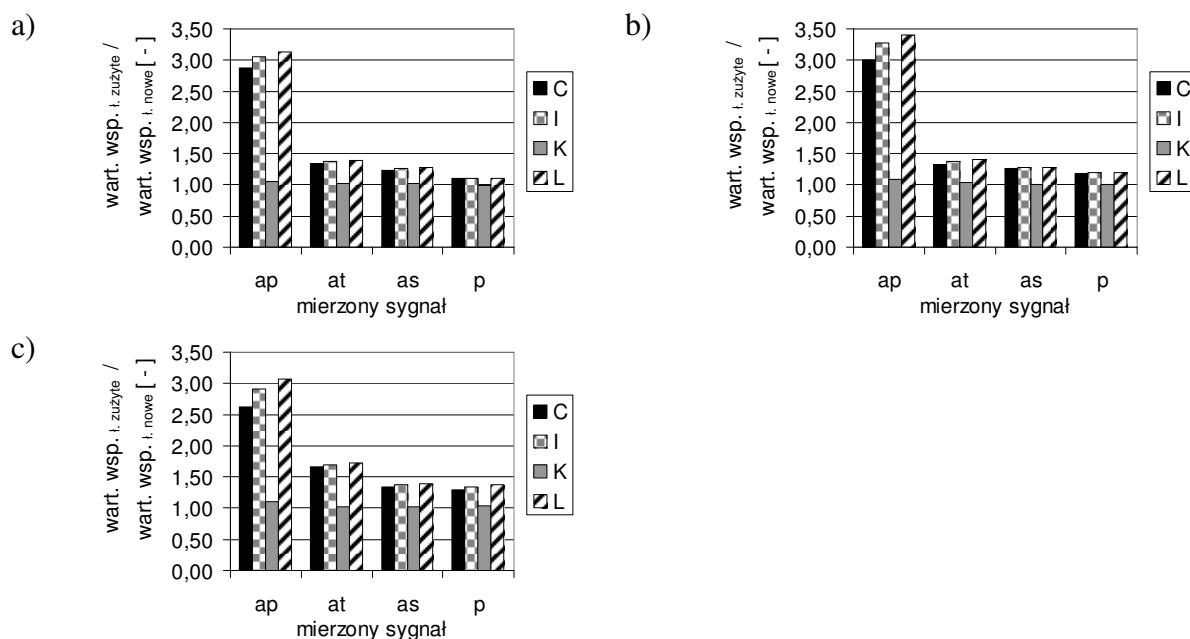
Na rysunku 2 przedstawiono stosunek wartości różnych estymat amplitudowych, określonych na podstawie sygnałów zarejestrowanych w przypadku zastosowania łożysk zużytych, do wartości odpowiednich estymat amplitudowych, określonych na podstawie sygnałów zarejestrowanych w przypadku zastosowania łożysk nowych. Niższe wartości występują, gdy stosunek ten jest obliczany na podstawie sygnału ciśnienia akustycznego, natomiast najwyższe wartości występują, gdy jest on obliczany na podstawie sygnału przyspieszeń drgań obudowy łożyska znajdującego się bliżej przekładni pasowej.



Rys. 2. Stosunek wartości estymat amplitudowych obliczanych na podstawie sygnału przyspieszeń drgań rejestrowanych w punktach:  $a_p$  (a),  $a_t$  (b),  $a_s$  (c) i ciśnienia akustycznego - p (d)

Fig. 2. Ratio of amplitude estimates calculated on the basis of vibration accelerations recorded in points  $a_p$  (a),  $a_t$  (b),  $a_s$  (c) and acoustic pressure - p (d)

Analizując wyniki przedstawione na rysunku 3, można stwierdzić, że z pośród rozważanych dyskryminant bezwymiarowych jedynie w przypadku współczynnika kształtu zużycie eksploatacyjne łożysk tocznych w żadnym z analizowanych przypadków nie miało wpływu na istotną zmianę jego wartości.



Rys. 3. Stosunek wartości dyskryminant bezwymiarowych obliczanych w przypadku prędkości obrotowej silnika wynoszącej: a) 1500 obr/min, b) 3000 obr/min, c) 4000 obr/min

Fig. 3. Ratio of nondimensional discriminant values calculated for motor speed equal to: a) 1500 rpm, b) 3000 rpm, c) 4000 rpm

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz sformułowano następujące wnioski:

- Jedynie w przypadku sygnału rejestrowanego na obudowie łożyska bliższego przekładni pasowej współczynniki szczytu, luzu i impulsowości wykazywały istotną zmianę wartości, spowodowaną zużyciem eksploatacyjnym łożysk alternatora.
- Zużycie eksploatacyjne łożysk nie miało wpływu na istotną zmianę wartości współczynnika kształtu.
- W przypadku sygnału ciśnienia akustycznego i prędkości obrotowej silnika wynoszącej 4000 obr/min, zmiana wartości estymat amplitudowych i dyskryminant bezwymiarowych spowodowana zużyciem eksploatacyjnym łożysk, była pomijalnie mała.
- Zużycie eksploatacyjne łożysk największy wpływ miało na zmianę estymat bezwymiarowych określanych na podstawie sygnałów przyspieszeń drgań obudów łożysk.

#### Bibliografia

1. SKF: Narzędzia do obsługi łożysk i środki smarne SKF. Grupa SKF - Pl, 2008/04.
2. Grządziela A.: Analiza oddziaływań dynamicznych na łożyska linii wałów okrętów do zwalczania min. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, zeszyt 2 (150) 2007 s. 81.
3. Batko W., Dąbrowski Z., Pakowski R. i inni: Nowoczesne metody badania procesów wibroakustycznych - cz. II. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii ITE, Radom 2006.

4. Homišin J.: Governing of dangerous in drives of mechanical systems. Transactions of the Universities of Košice, No. 3 – 2009, p. 1-4.
5. Grega, R.; Kaššay, P.; Krajňák, J.: Impact of pneumatic flexible coupling on effective vibration value within the mechanical systems. Transactions of the Universities of Košice, No. 3 – 2009, p. 5-8.
6. Krajňák, J.; Kaššay, P.; Grega R.: Advantage of high-flexible coupling 4-2/70-T-C application in comparison to the Periflex couplings. Transactions of the Universities of Košice, No. 3 – 2009, p. 21-24.
7. Wojnar G.: Wpływ sztywności sprzęgieł na siły dynamiczne w zazębieniu przekładni zębatej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śl., seria Transport, z. 61, 2007, s. 273-280.
8. Wojnar G., Łazarz B.: Wpływ charakterystyk sprzęgieł na obciążenie elementów przekładni zębatej, [w:] Wasilczuk M. (red.): Podstawy konstrukcji maszyn – kierunki badań i rozwoju, Pol. Gd. W. Mech., Gdańsk 2011, Tom.1 s.126-134.
9. Dziurdź J.: Wibroakustyczna analiza obciążenia łożyska tocznego. Przegląd Mechaniczny nr 7-8, 2006, s. 50 – 53.
10. N. Sawalhi, R.B. Randall: Vibration response of spalled rolling element bearings: Observations, simulations and signal processing techniques to track the spall size. Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 25, issue 3, 2011, p. 846-870.
11. Cheng Junsheng, Yu Dejie, Yang Yu : Application of an impulse response wavelet to fault diagnosis of rolling bearings, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 21, issue 2, 2007, p. 920-929.
12. Łazarz B., Wojnar G., Figlus T.: Wykrywanie uszkodzeń łożysk w przekładni zębatej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śl., seria Transport, z. 46, 2002 r., s. 47÷54.
13. Łazarz B., Wojnar G.: Bezkontaktowe pomiary laserowe drgań w diagnostyce wibroakustycznej. XI Sympozjum Naukowe „Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej”, Katowice, 16.05.2003 r.
14. Łazarz B., Wojnar G., Stanik Z.: Wykrywanie zużycia i uszkodzenia łożysk kół jezdnych pojazdu samochodowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śl., seria: Transport, nr 57, 2005, s. 223-230.
15. Wojnar G., Łazarz B., Stanik Z.: Diagnostics of rolling bearing by vibration analysis. Diagnostyka, nr 3 (39), 2006, s. 7-11.
16. Wojnar G., Czech P., Stanik Z.: Influence of wear of bearings carriageable wheels on vibroacoustics signals. III International Scientific Conference Transport Problems, Katowice-Tarnowskie Góry, 20-22 June 2011.
17. Wojnar G., Stanik Z.: Zgłoszenie Patentowe nr DZ-IV / P389902 pt.: Urządzenie i sposób diagnozowania stanu technicznego łożysk kół jezdnych pojazdów samochodowych. 14 12 2009.
18. Wojnar G., Stanik Z.: Zgłoszenie Patentowe nr DZ-IV / P389901 pt.: Urządzenie do diagnozowania stanu technicznego łożysk napędzanych kół jezdnych samochodów zwłaszcza z napędem na jedną oś. 14 12 2009.
19. Wojnar G., Stanik Z.: Zgłoszenie Patentowe nr DZ-IV / P389900 pt.: Urządzenie i sposób diagnozowania stanu technicznego łożysk napędzanych i nienapędzanych kół jezdnych samochodów zwłaszcza z napędem na jedną oś. 14 12 2009.
20. Cempel Cz.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. PWN, Warszawa 1989.

Recenzent: Dr hab. inż. Andrzej Grządziela, prof. Akademii Marynarki Wojennej

*Część wyników uzyskano w ramach realizacji projektu 4989/02/2010/38*