

Henryk MADEJ, Piotr CZECH

DIAGNOSTYKA PRZEKŁADNI KLATEK WALCOWNICZYCH Z ZASTOSOWANIEM WIDM WYŻSZYCH RZĘDÓW

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań diagnostycznych przekładni zębatych napędów klatek walcowniczych. Badaniami objęto przekładnie zębate znajdujące się w różnym stanie technicznym. Zarejestrowane sygnały drganiowe analizowano za pomocą momentów i widm wyższych rzędów.

INDUSTRIAL GEARBOXES DIAGNOSIS BY USED HIGHER ORDER SPECTRUM

Summary. This paper deals with industrial gear condition monitoring based on vibration analysis techniques. Several gearboxes in different condition were chosen to research. Recorded vibration signals were analyzed by higher order moments and spectra.

1. WPROWADZENIE

Podstawowym zadaniem diagnostyki eksploatacyjnej przekładni zębatych jest wykrycie procesów degradacji i zużycia we wczesnych stadiach, zanim doprowadzą one do awarii.

Przedstawiana w wielu pracach analiza sygnałów wibroakustycznych jest jednym ze sposobów oceny stanu technicznego przekładni zębatych. Należy jednak zauważyć, że w przypadku sygnałów niestacjonarnych analizy oparte na korelacji, widmie, rozkładach czasowo-częstotliwościowych nie pozwalają na identyfikację zachodzących specyficznych zmian w sygnale, tj. zmiany fazy [14]. W warunkach występowania niestacjonarności zaleca się stosowanie momentów wyższych rzędów i ich widm [1,2,9,10,11,12,14].

W przypadku analizy sygnałów Gaussowskich widma momentów wyższych rzędów, od drugiego w górę, są równe zero. Sygnały drganiowe rejestrowane z obiektów rzeczywistych zwykle różnią się od rozkładu Gaussa. Zastosowanie momentów wyższych rzędów i ich widm pozwala w takich warunkach wyeliminować szum, zidentyfikować nieliniowość układów oraz określić rodzaj nieliniowości [14].

W artykule przedstawiono przykład wykorzystania momentów i widm wyższych rzędów do diagnostyki stanu technicznego przekładni zębatych napędów klatek walcowniczych pracujących w Hucie Katowice (jeden z oddziałów Mittal Steel Poland SA).

2. OBIEKT BADAŃ

Badaniami objęto 10 przekładni jedno- i dwustopniowych z dodatkowym zazębieniem klatki walców [4,5,6,7]. W układach napędowych klatek zastosowano silniki asynchroniczne o mocy 200 kW. Prędkości obrotowe wałów wejściowych są stałe dla poszczególnych przekładni i zawierają się w zakresie od 380 do 800 [obr/min].

W ramach badań wykonano pomiary przyspieszeń drgań w trzech kierunkach oraz zarejestrowano sygnały impulsowe zgodne z obrotami wału wejściowego służące do uśredniania synchronicznego.

Do dalszych badań wybrano dwie przekładnie różniące się znacznie stanem technicznym:

- przekładnię po remoncie (k4),
- przekładnię przeznaczoną do remontu (k12).

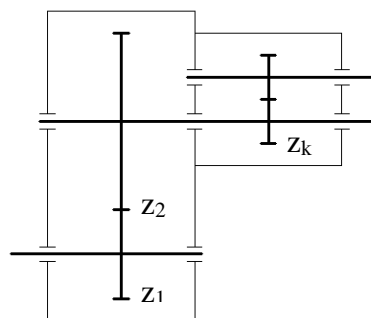
Wybrane parametry badanych przekładni przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Parametry wybranych przekładni zębatych

	<i>Przekładnia po remoncie (k4)</i>	<i>Przekładnia przeznaczona do remontu (k12)</i>
<i>Prędkość obrotowa wału wejściowego n_1 [obr/min]</i>	486	656
<i>Liczba zębów zębniaka z_1</i>	22	41
<i>Liczba zębów koła z_2</i>	142	89
<i>Liczba zębów klatki walców z_k</i>	26	32

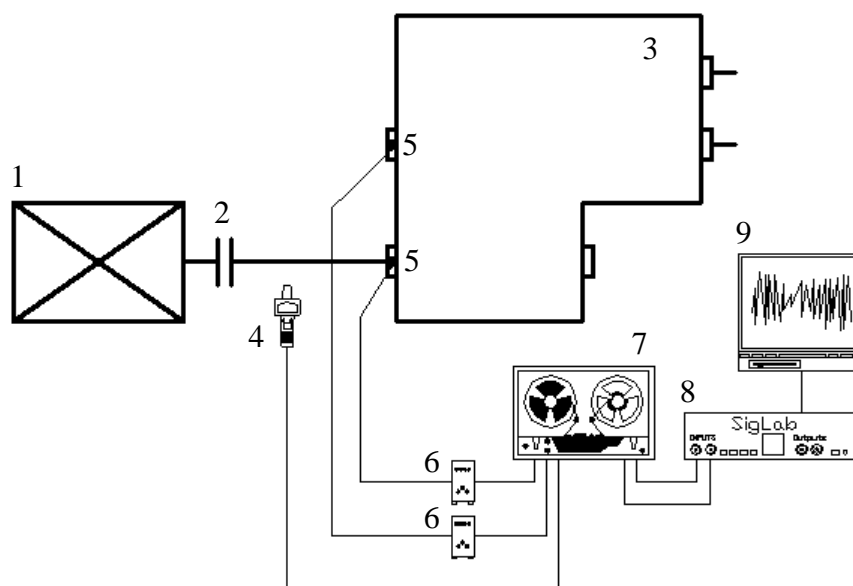
Schemat kinematyczny poddanej badaniom jednostopniowej przekładni zębatej przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat jednostopniowej przekładni zębatej

Fig. 1. Scheme of single-stage gearbox

Rejestrację i przetwarzanie sygnałów drganiowych wykonano za pomocą układu pomiarowo-analizującego i przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego przekładni zębatych napędów klatek walcowniczych:

1 – silnik, 2 – sprzęgło, 3 – badana przekładnia, 4 – czujnik prędkości obrotowej, 5 – punkty pomiarowe, 6 – przedwzmacniacz BK2626, 7 – magnetofon pomiarowy BK7003, 8 – analizator sygnałów SigLab50-21, 9 – komputer

Fig. 2. Scheme of measure system for industrial gearboxes:

1 – engine, 2 – clutch, 3 – gearbox, 4 – sensor of rotary velocity, 5 – measure points, 6 – preamplifier BK2626, 7 – tape recorder BK7003, 8 – analyser SigLab50-21, 9 – computer

Pomiary drgań przekładni wykonano podczas biegu luzem oraz pod obciążeniem w czasie walcowania. Sygnały diagnostyczne przetwarzano w środowisku Matlab-Simulink.

Zastosowana metoda pomiaru umożliwiła uśrednianie synchroniczne sygnałów drganiowych obrotami wałów wejściowych.

3. ANALIZA SYGNAŁÓW DRGANIOWYCH Z WYKORZYSTANIEM MOMENTÓW I WIDM WYŻSZYCH RZĘDÓW

Towarzyszące wczesnym stadiom niesprawności elementów układów napędowych niskoenergetyczne zmiany o charakterze modulującym są możliwe do wykrycia przy zastosowaniu analizy bispektrum [10].

W analizie bispektralnej wykorzystuje się kumulantę trzeciego rzędu, opisaną zależnością [10]:

$$C_3(\tau_1, \tau_2) = E[x(t)x(t+\tau_1)x(t+\tau_2)] \quad (1)$$

gdzie $E[\]$ – wartość oczekiwana.

Kumulanty wyższych rzędów, nazywane również semiinwariantami, są miarami wielkości zmiany sygnału wokół jego średniej. Posiadają one zdolność eksponowania występowania nieliniowości w sygnale [10].

Kumulanty są powiązane z momentami statystycznymi następującymi zależnościami [13]:

$$C_1 = m_1 \quad (2)$$

$$C_2 = m_2 - m_1^2 \quad (3)$$

$$C_3 = m_3 - 3m_2m_1 + 2m_1^3 \quad (4)$$

$$C_4 = m_4 - 4m_3m_1 - 3m_2^2 + 12m_2m_1 - 6m_1^4 \quad (5)$$

Stąd, dla procesu o zerowej wartości średniej możemy zapisać:

$$C_1 = 0 \quad (6)$$

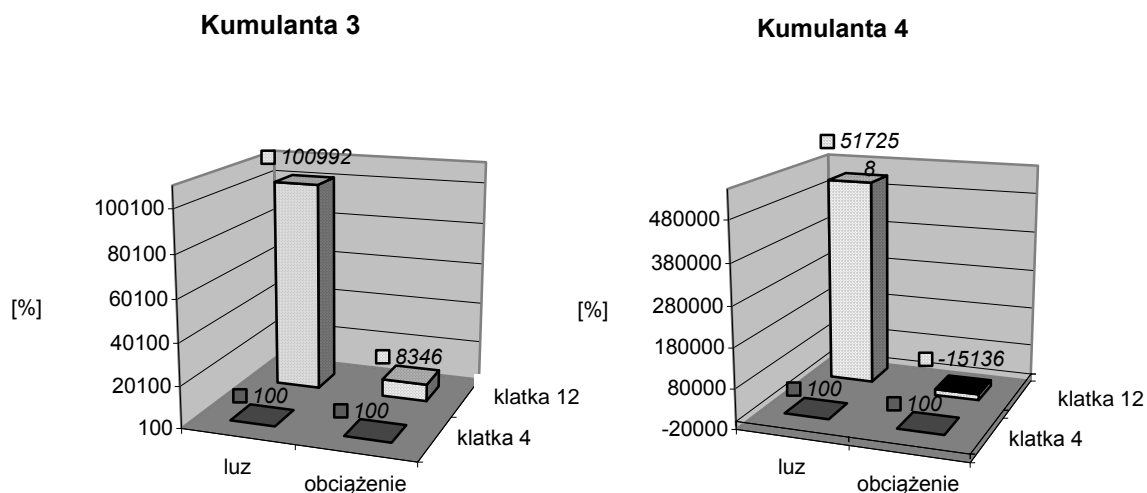
$$C_2 = m_2 \quad (7)$$

$$C_3 = m_3 \quad (8)$$

$$C_4 = m_4 - 3m_2^2 \quad (9)$$

Wykorzystanie kumulant wyższego rzędu do celów diagnostycznych można znaleźć w pracach [3,4].

Przykład wyznaczonych kumulant wyższego rzędu dla sygnału drganiowego przekładni zębatych napędów klatek walcowniczych przedstawiono na rys. 3. W celach porównawczych przyjęto wartość danej miary wyznaczonej z sygnału drganiowego przekładni w stanie dobrym na poziomie 100%.



Rys. 3. Kumulanty wyższego rzędu wyznaczone z uśrednionych sygnałów drganiowych przekładni zębatych napędów klatek walcowniczych; k4 – przekładnia w ogólnym stanie dynamicznym dobrym, k12 – przekładnia przeznaczona do remontu

Fig. 3. Higher order cumulants of averaged signals vibration of industrial gearboxes; k4 - gearbox in good condition, k12 – gearbox in bad condition

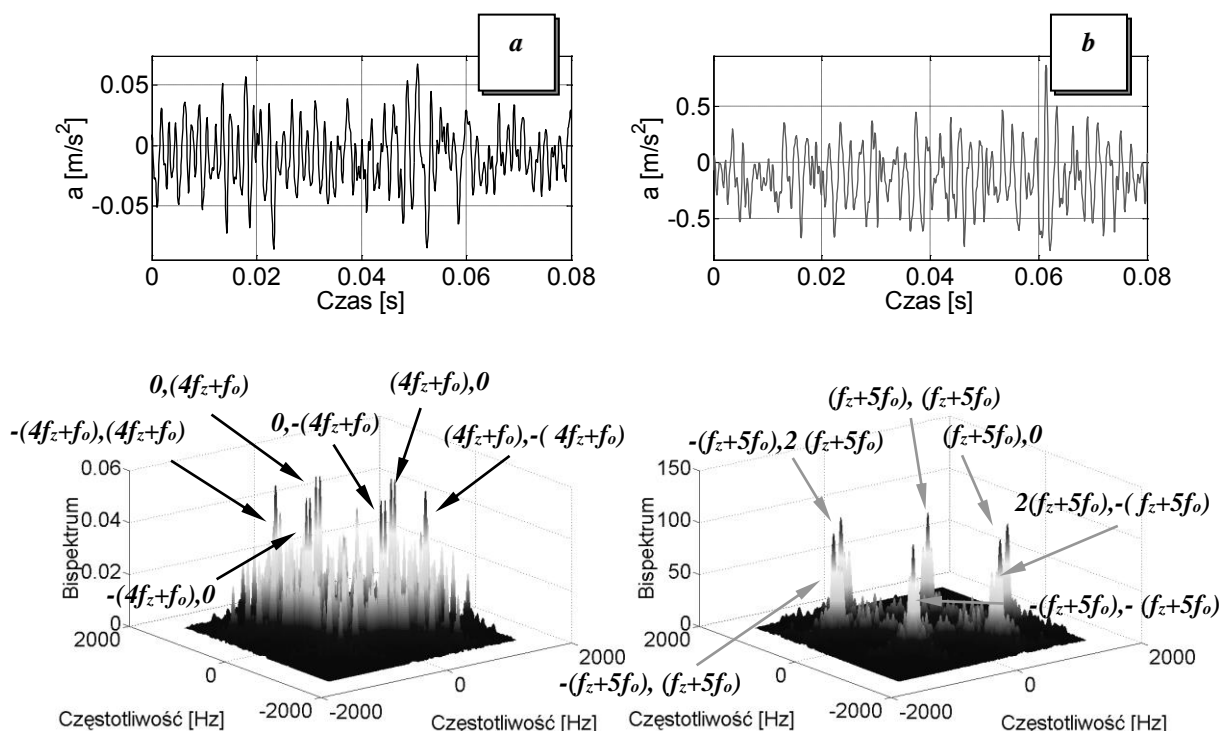
Wyznaczone kumulanty pozwalają jednoznacznie sklasyfikować stan zużycia zębów kół przekładni klatek walcowniczych na podstawie sygnałów drganiowych. Najlepsze wyniki osiągnęto dla klasyfikacji pomiędzy stanem dobrym a złym w przypadku pracy bez obciążenia walców.

Bispektrum jest funkcją dwóch częstotliwości, zdefiniowaną jako transformata *FFT* z kumulanty rzędu trzeciego [1]:

$$BS(f_1, f_2) = \int \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} C_3(\tau_1, \tau_2) e^{-j2\pi(f_1\tau_1+f_2\tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 \quad (10)$$

Bispektra przyjmują wartości zespolone, zawierając informacje o amplitudzie i fazie sygnału [10].

Wpływ stanu przekładni zębatych napędów klatek walcowniczych na rozkład bispektrum przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Przebiegi czasowe oraz rozkłady bispektrum drgań przekładni zębatych napędów klatek walcowniczych w czasie pracy na luzie: a – przekładnia w ogólnym stanie dynamicznym dobrym (klatka k4), b – przekładnia przeznaczona do remontu (klatka k12)

Fig. 4. Time series and bispectrum of vibrations of industrial gearboxes, work without load: a – gearbox in good condition (gear-cage k4), b – gearbox in bad condition (gear-cage k12)

Uzyskane rozkłady bispektrum pozwalają na jednoznaczne sklasyfikowanie przekładni zębatych klatek walcowniczych na zdadne do dalszej pracy oraz przeznaczone do remontu.

Przykłady wykorzystania analizy bispektrum do celów diagnostycznych można znaleźć w pracach [1,2,3,4,8,9,10,11,12].

Bibliografia

1. Bartelmus W., Zimroz R.: Zastosowanie analizy bispektrum w diagnostyce przekładni zębatych – część 1: charakterystyka sygnałów generowanych przez przekładnie i analizy sygnałów modelowych. V Krajowa Konferencja „Diagnostyka Techniczna Urzędów i Systemów Diag”. Ustroń 2003.
2. Bartelmus W., Zimroz R.: Zastosowanie analizy bispektrum w diagnostyce przekładni zębatych – część 2: analizy sygnałów drganiowych. V Krajowa Konferencja „Diagnostyka Techniczna Urzędów i Systemów Diag”. Ustroń 2003.
3. Barzykowski J., Domańska A., Kujawińska M., Mroczka J., Osowski S., Polański Z., Tłaga W., Turzeniecka D., Winiecki W.: Współczesna metrologia, zagadnienia wybrane. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.

4. Czech P.: Wykrywanie uszkodzeń przekładni zębatych za pomocą metod sztucznej inteligencji. Rozprawa doktorska. Katowice 2006.
5. Madej H., Czech P., Konieczny Ł.: Diagnostyka przekładni zębatych klatek walcowniczych. XI Seminarium Naukowe „Nowe Technologie i Materiały w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej”. Katowice 2003.
6. Madej H., Czech P., Konieczny Ł.: Wykorzystanie dyskryminant bezwymiarowych w diagnostyce przekładni zębatych. „Diagnostyka”, Vol. 28, 2003, s. 17÷22.
7. Madej H., Czech P., Konieczny Ł.: Zastosowanie dyskryminant bezwymiarowych w diagnostyce przekładni zębatych. XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Sympozjum „Diagnostyka Maszyn”. Węgierska Górka 2003.
8. Parker B. E., Ware H. A., Wipf D. P., Tompkins W. R., Clark B. R., Larson E. C., Poor H. V.: Fault diagnostics using statistical change detection in the bispectral domain. *Mechanical Systems and Signal Processing* (2000) 14(4), p. 561÷570.
9. Radkowski S.: Diagnostics of gears using higher order spectral analysis techniques. 5th International Congress on Sound and Vibration. Adelaide, South Australia, 1997, p. 1041÷1048.
10. Radkowski S.: Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych. Biblioteka Problemów Eksploatacji, Warszawa-Radom 2002.
11. Radkowski S., Mączak J., Zawisławski D., Jasiński M.: Badanie wpływu zmian właściwości warstwy wierzchniej zębniaka na generowany sygnał wibroakustyczny. „Przegląd Mechaniczny”, z. 11–12, 2000.
12. Rivola A., White P. R.: Bispectral analysis of the bilinear oscillator with application to the detection of fatigue cracks. *Journal of Sound and Vibration* (1998) 216(5), p. 889÷910.
13. Socha L.: Równania momentów w stochastycznych układach dynamicznych. Biblioteka Naukowa Inżyniera. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
14. Timofiejczuk A.: Metody analizy sygnałów niestacjonarnych. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski