

Henryk MADEJ

PRZETWARZANIE SYGNAŁÓW W DIAGNOSTYCE PRZEKŁADNI ZĘBATYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań kół zębatych z uszkodzeniami lokalnymi, takimi jak pęknięcie u podstawy i wykruszenie wierzchołka zęba o różnym stopniu zaawansowania. Wyniki badań wskazują, że sygnał resztkowy jest bardzo wrażliwy na efekty wywołane lokalnymi uszkodzeniami i może ułatwić ocenę stopnia zaawansowania uszkodzenia.

A SIGNAL PROCESSING TECHNIQUE IN GEARBOX DIAGNOSTICS

Summary. The paper presents investigations results of gearbox with local faults. Two types of progressing local faults, broken tooth and gear crack were simulated. The results suggest that residual signals are very affective for early detection of local faults and may provide a powerful tool to indicate the various types of progressing faults in gearboxes.

1. WPROWADZENIE

W wielu ośrodkach naukowych prowadzone są prace, których celem jest znalezienie odpowiednich narzędzi wspomagających proces rozpoznawania uszkodzeń w diagnozowanym obiekcie.

Do wykrywania różnych typów uszkodzeń w przekładniach zębatych najczęściej stosuje się: uśrednianie synchroniczne sygnału drgań [1,2,5], wąskopasmową analizę widmową, cepstrum, demodulację amplitudy i fazy.

Większość tych klasycznych metod opartych na przekształceniu Fouriera pozwala wykrywać zmiany stanu dynamicznego oraz zlokalizować uszkodzenie, nie dostarczając informacji o rodzaju i stopniu zaawansowania uszkodzenia.

W ostatnich latach rozwijane są metody diagnostyki wykorzystujące analizę sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości (rozkład Wignera-Ville'a – WV) lub czasu i skali proporcjonalnej do częstotliwości (ciągła transformata falkowa – CWT) [3,6,9,10] oraz metody wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe [6,7].

W artykule przedstawiono wyniki badań kół z uszkodzeniami lokalnymi, takimi jak pęknięcie u podstawy i wykruszenie wierzchołka zęba o różnym stopniu zaawansowania. Podczas badań rejestrowano sygnał drgań w wybranych punktach obudowy przekładni oraz

drżania skrętne mierzone bezpośrednio na wirującym kole. Sygnał drgań uśredniano synchronicznie w okresie obrotu koła, zębownika i czasu powtarzania cyklu skojarzeń zębów. Obróbce cyfrowej poddano sygnał resztkowy otrzymany poprzez zastosowanie odwrotnej transformacji Fouriera (IFFT) po usunięciu z widma drgań częstotliwości zazębienia i jej harmonicznych wraz z podstawowymi wstęgami bocznymi. Metoda ta po raz pierwszy zaproponowana przez Stewarta [8] ułatwia wykrywanie szerokopasmowej modulacji sygnału drgań wywołanej pobudzeniem impulsowym.

2. WYKORZYSTANIE SYGNAŁU RESZTKOWEGO DRGAŃ

W ogólnym przypadku sygnał drgań przekładni $g(t)$ można przedstawić jako sumę stacjonarnego sygnału zazębienia $y(t)$ i resztkowej części sygnału $r(t)$ zawierającej składowe impulsowe wywołane lokalnymi uszkodzeniami.

$$g(t) = y(t) + r(t), \quad (1)$$

$$y(t) = \sum_{m=0}^M X_m \cdot (1 + a_m(t)) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot m \cdot f_z \cdot t + \Phi_m + b_m(t)), \quad (2)$$

$$r(t) = h(t) * \sum_{-\infty}^{+\infty} \delta(t - mT) + n(t), \quad (3)$$

gdzie:

X_m, Φ_m – amplituda i faza m – tej harmonicznej zazębienia,

$a_m(t), b_m(t)$ – funkcje modulujące amplitudę i fazę,

$h(t)$ – odpowiedź impulsowa układu (koła, łożyska, wały),

$n(t)$ – szum,

T – okres związany z lokalnym uszkodzeniem.

Na rysunku 1 przedstawiono sposób uzyskiwania sygnału resztkowego drgań z uśrednionego synchronicznie przebiegu czasowego.

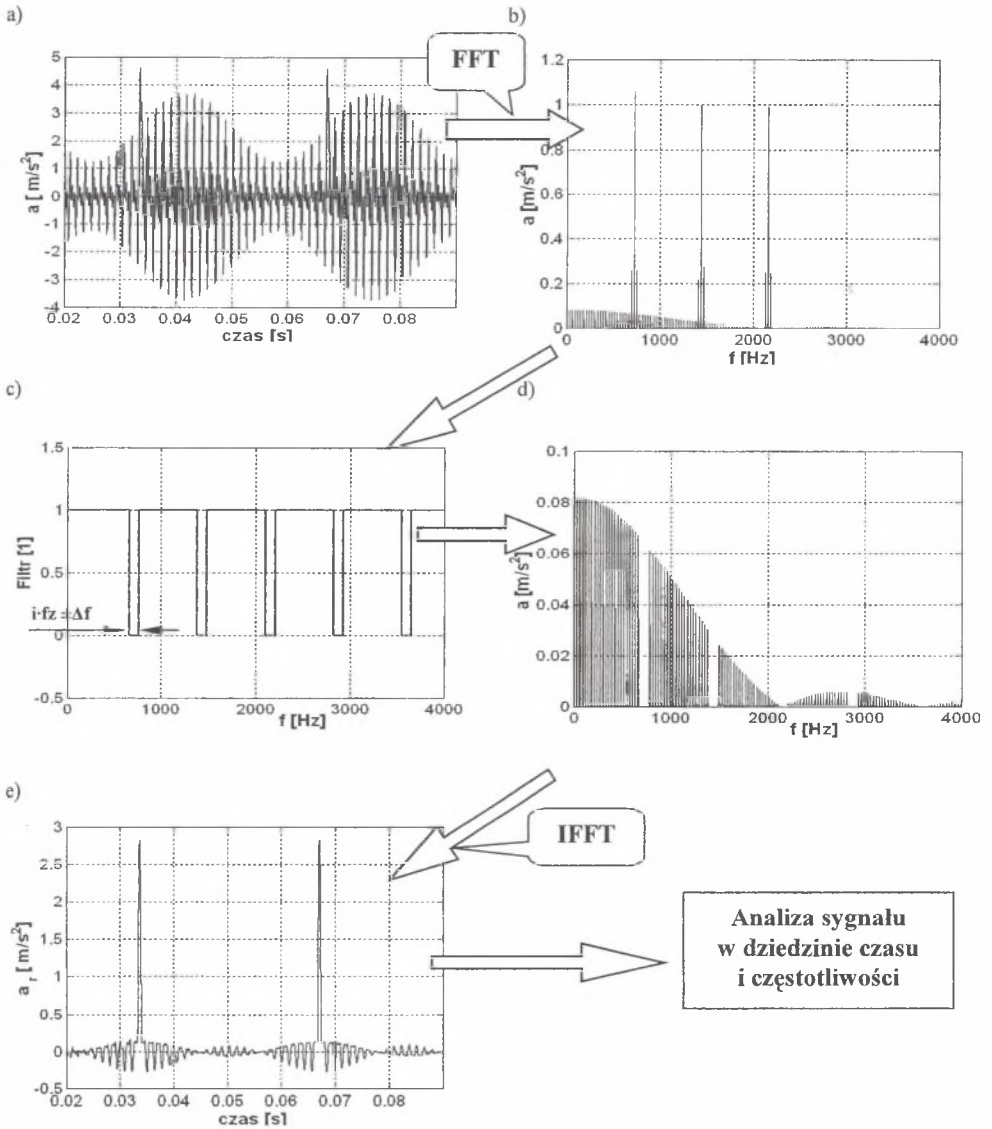
Z przeprowadzonych symulacji cyfrowych [4] wynika, że nawet niewielkie zaburzenia amplitudowe i fazowe są łatwo wykrywalne w sygnale resztkowym, co pozwala przypuszczać, że tego rodzaju analiza może być wrażliwa na wykrywanie uszkodzeń kół, takich jak pęknięcie u podstawy oraz częściowe wyłamanie lub wykruszenie wierzchołka zęba we wczesnych fazach ich rozwoju. Identyfikacja składnika impulsowego w strukturze sygnału diagnostycznego jest dzięki temu dużo łatwiejsza, a jego parametry mogą być miarą stopnia zaawansowania uszkodzenia. Cechy charakterystyczne funkcji $r(t)$ można wyodrębnić na podstawie rozwinięcia w postaci rozkładu energii na płaszczyźnie czasowo-częstotliwościowej. Reprezentacje takie można uzyskać za pomocą rozwinięcia dwuliniowego funkcji $r(t)$. Jednym z najbardziej znanych rozwinięć dwuliniowych jest rozkład Wignera-Ville'a. Rozkład pseudo-WV funkcji $r(t)$ definiuje następująca równość:

$$Wf(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} r\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \cdot r^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot w(\tau) \cdot e^{-2\pi j f \tau} d\tau \quad (4)$$

gdzie:

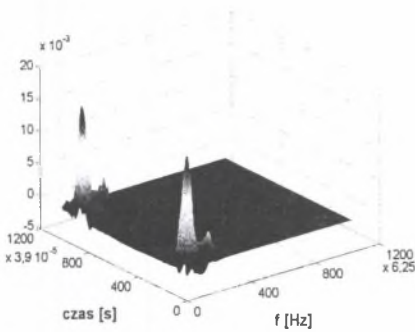
$w(t)$ – funkcja wagi podobna do okna czasowego stosowanego w krótkoczasowej transformacji Fouriera,

$r^*(t)$ – sygnał urojony sprzężony z $r(t)$.



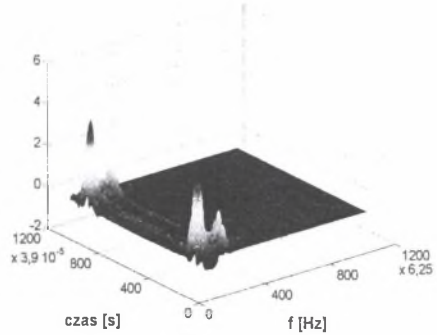
Rys. 1. Algorytm uzyskiwania sygnału resztkowego: a – przebieg czasowy, b – widmo, c – filtr grzebieniowy, d – widmo po usunięciu $i \cdot fz \pm \Delta f$, e – sygnał resztkowy $r(t)$
 Fig. 1. Diagram of residual signal processing: a – time domain signal, b – spectrum, c – comb filter, d – spectrum after extraction $i \cdot fz \pm \Delta f$, e – residual signal $r(t)$

Wyniki transformacji pseudo-WV analitycznego sygnału resztkowego drgań z impulsową modulacją amplitudy i fazy przedstawiono na rysunkach 2 i 3. Jak widać z rysunków, rozkład energii na płaszczyźnie czasowo-częstotliwościowej umożliwia rozróżnienie rodzaju modulacji impulsowej związanej z uszkodzeniem i może stanowić podstawę oceny stopnia zaawansowania uszkodzenia.



Rys.2. Rozkład czasowo-częstotliwościowy (WV) sygnału resztkowego z impulsową modulacją amplitudy

Fig. 2. WV time-frequency distribution of the residual signal with impulse amplitude modulation



Rys.3. Rozkład czasowo-częstotliwościowy (WV) sygnału resztkowego z impulsową modulacją fazy

Fig. 3. WV time-frequency distribution of the residual signal with impulse phase modulation

3. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

W celu potwierdzenia powyższej tezy przeprowadzono badania stanowiskowe modeli kół z lokalnymi uszkodzeniami. Parametry badanych kół o zębach prostych były następujące: liczba zębów zębniaka 16, liczba zębów koła 24, moduł 4,5 mm, szerokość zazębienia 20 mm, współczynnik przesunięcia zarysu zębniaka $x_1=0,864$, współczynnik przesunięcia zarysu koła $x_2=-0,5$, odległość osi kół 91,5 mm. Modelowe uszkodzenia lokalne kół przedstawiono na rysunku 4. Wykonano dwa rodzaje uszkodzeń o różnym stopniu zaawansowania.

Drgania mierzono na obudowie łożysk przekładni oraz bezpośrednio na wirującym kole przy różnych prędkościach i obciążeniach [4,10]. Częstotliwość próbkowania wynosiła 25,6 kHz. Sygnały uśredniano okresem obrotu wałów zębniaka T_z , koła T_k oraz okresem powtarzania cyklu skojarzeń zębów T_p . Uśredniony synchronicznie sygnał przyspieszeń drgań stanowił podstawę dalszej analizy cyfrowej.

Jedną z metod wykrywania wczesnych stadiów uszkodzeń jest zastosowanie bezwymiarowych miar procesu drganiowego, zorientowanych diagnostycznie [2,11]. Do najważniejszych z nich można zaliczyć współczynnik kurtozy, wskaźniki dobroci FM0, FM1÷4 (figures of merit) zaproponowane przez Stewarta [8] oraz dyskryminanty NA4 i NB4 [11]. Dobrą miarą statystyczną stosowaną w diagnostyce przekładni i łożysk jest

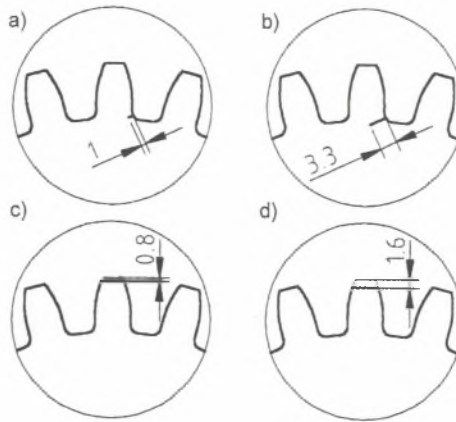
współczynnik kurtozy. Jak wynika z dotychczasowych badań, współczynnik kurtozy sygnału drgań nieuszkodzonej przekładni może zawierać się w przedziale 1,5÷2,5. Wzrost wartości współczynnika świadczy o pojawieniu się składowych impulsowych w sygnale drganiowym związanych z uszkodzeniami lokalnymi. Zmiany współczynnika kurtozy K_j , określonego w oknie czasowym o odpowiednio dobranej szerokości przesuwanym wzdłuż osi czasu, są dobrym symptomem lokalnych uszkodzeń zębów kół [10]. Zmodyfikowany współczynnik kurtozy K_j przedstawia wzór:

$$K_j = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=j}^{j+N-1} (x_i - \bar{x}_j)^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=j}^{j+N-1} (x_i - \bar{x}_j)^2 \right]^2} \quad (5)$$

gdzie:

$i, j = 1, 2, 3, \dots$,

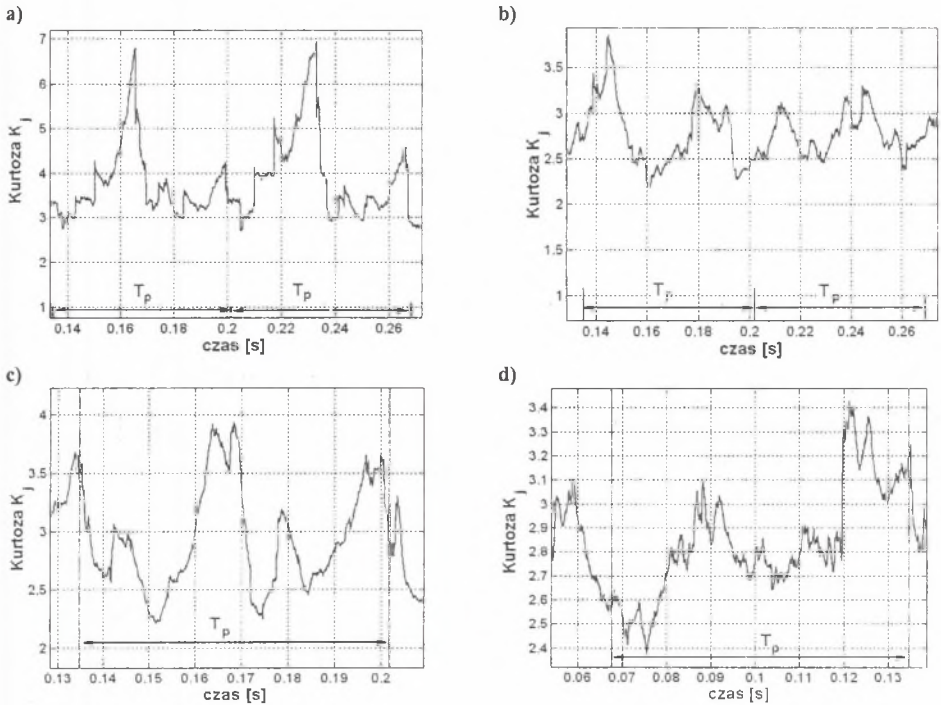
\bar{x}_j - wartość średnia sygnału w oknie czasowym o długości N próbek.



Rys. 4. Modelowe uszkodzenia lokalne zębów kół: a, b – podcięcia stopy zęba na całej szerokości koła, głębokość odpowiednio 1 i 3,3 mm; c, d – skrócenie wysokości zęba 0,8 i 1,6 mm

Fig. 4. Drawing of local damages of teeth used in the experimental investigation: a,b – tooth root crack along the entire toothed gear width, depth 1 and 3,3 mm respectively; c,d – tooth tip chipping 0,8 and 1,6 mm

Na rysunku 4 przedstawiono zmiany współczynnika K_j sygnału resztkowego przyspieszeń drgań, w przypadku wykruszenia wierzchołka jednego zęba koła (0,8 i 1,6 mm) zmierzonych bezpośrednio na kole i na obudowie łożyska. Wartości maksymalne K_{jmax} dla dwóch rodzajów uszkodzeń, pęknięcia stopy zęba oraz wykruszenia zęba, o różnym stopniu zaawansowania przedstawiono w tablicy 1. Wyniki badań wykazują wrażliwość zmodyfikowanego współczynnika kurtozy na wzrost stopnia uszkodzenia.



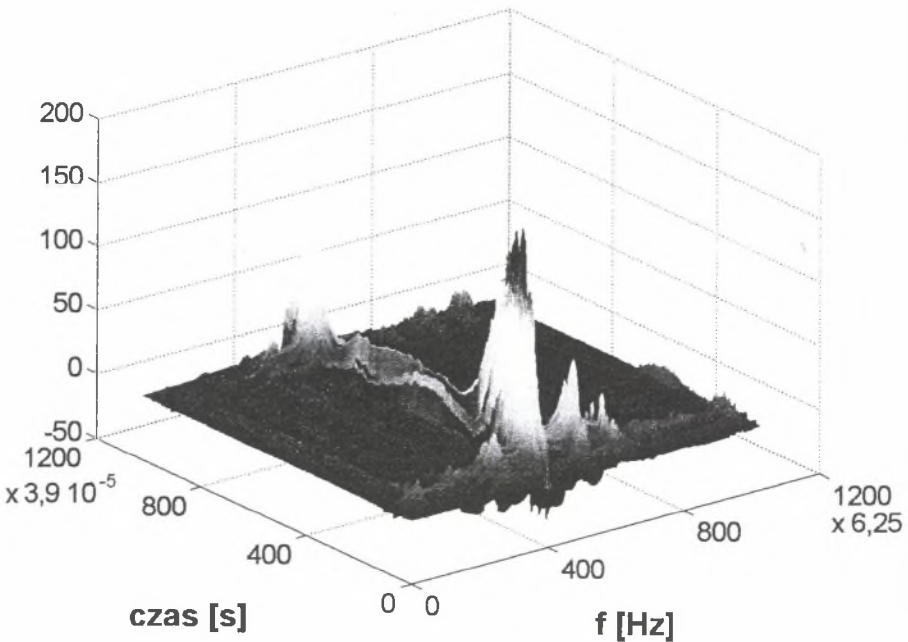
Rys. 5. Zmiany współczynnika kurtozy K_j wyznaczonego w przesuwym oknie: ząb koła skrócony o 1,6 mm, czujnik na kole – a, czujnik na obudowie łożyska – b, ząb koła skrócony o 0,8 mm, czujnik na kole – c, czujnik na obudowie łożyska – d

Fig. 5. The changes of kurtosis coefficient in time window sliding along the time axis: tooth tip chipping 1,6 mm accelerometer mounted on the wheel – a, accelerometer mounted on the bearing box – b, tooth tip chipping 0,8 mm accelerometer mounted on the wheel – c, accelerometer mounted on the bearing box – d

Tablica 1

Wartości K_{jmax} w przypadku różnych uszkodzeń lokalnych kół

Rodzaj uszkodzenia	Pomiar na kole	Pomiar na obudowie łożyska
	K_{jmax}	
Pęknięcie stopy zęba – 1 mm	4,6	3,5
Pęknięcie stopy zęba – 3,3 mm	8,9	3,7
Wykruszenie zęba 0,8 mm	3,8	3,4
Wykruszenie zęba 1,6 mm	7,0	3,9

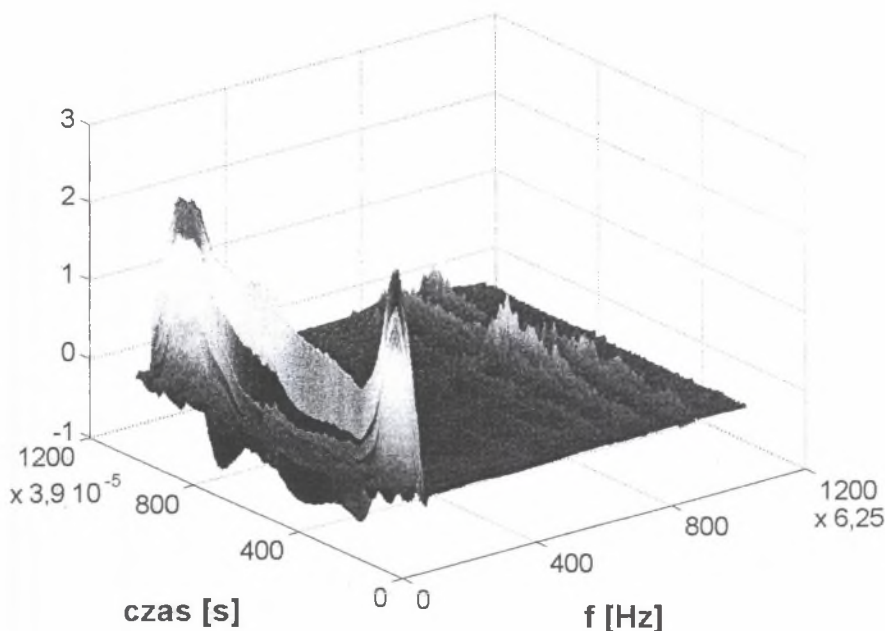


Rys.6. Czasowo-częstotliwościowy rozkład WV sygnału resztkowego przyspieszeń drgań skrętnych zmierzonych na kole z pękniętą stopą jednego zęba (3,3 mm)
 Fig. 6. WV time-frequency distribution of the residual signal (tooth root cracking – 3,3 mm, accelerometer mounted directly on the wheel)

W analizie sygnałów zawierających lokalne niestacjonarności o charakterze impulsowym szczególnie przydatne są metody umożliwiające przedstawienie rozkładu sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości (WV i CWT). Metody te charakteryzują się zmienną rozdzielczością umożliwiającą lokalizację składowych sygnału w obu dziedzinach jednocześnie. Przeprowadzone wcześniej badania wykazały między innymi, że zastosowanie analizy falkowej pozwala wykrywać lokalne uszkodzenia w obecności losowych błędów wykonania kół [9].

Znane są przykłady diagnozowania uszkodzeń kół na podstawie wyników analizy wybranych wierszy macierzy współczynników CWT [3]. Zastosowanie czasowo-częstotliwościowego rozkładu Wignera-Ville'a sygnału WA lub jego obwiedni umożliwia wykrywanie lokalnych niestacjonarności wywołanych uszkodzeniem kół.

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono rozkład czasowo-częstotliwościowy (pseudo-WV) resztkowego sygnału przyspieszeń drgań dla wybranego uszkodzenia lokalnego (pęknięcie stopy zęba – 3,3 mm), w obu przypadkach niezależnie od miejsca pomiaru drgań pęknięcie zęba wywołuje wyraźne maksima lokalne w rozkładzie WV. Analizy WV sygnału resztkowego wykazują dużą użyteczność tej metody w zastosowaniu do wykrywania wczesnych stadiów rozwoju uszkodzeń kół.



Rys.7. Czasowo-częstotliwościowy rozkład WV sygnału resztkowego przyspieszeń drgań zmierzonych na obudowie łożyska (pęknięta stopa jednego zęba – 3,3 mm)

Fig. 7. WV time-frequency distribution of the residual signal (tooth root cracking – 3,3 mm, accelerometer mounted on the bearing housing)

4. PODSUMOWANIE

Do wykrywania wczesnych stadiów uszkodzeń kół zębatych celowe jest stosowanie analizy sygnałów umożliwiającej wykrywanie modulacji impulsowej drgań. Analiza sygnału resztkowego uśrednionego synchronicznie przebiegu przyspieszeń drgań ułatwia wykrywanie lokalnych uszkodzeń. Przeprowadzone analizy sygnału modelowego zmodulowanego amplitudowo i częstotliwościowo oraz badania kół z zaprogramowanymi uszkodzeniami potwierdzają użyteczność transformaty WV sygnału resztkowego w diagnostyce uszkodzeń kół, takich jak pęknięcie lub wykruszenie zęba.

Z badań wynika, że wartość współczynnika kurtozy K_j określonego w przesuwym oknie czasowym może być miarą stopnia zaawansowania uszkodzenia.

Literatura

1. Adamczyk J., Krzyworzeka P., Łopacz H.: Systemy synchronicznego przetwarzania sygnałów diagnostycznych, Kraków 1999.
2. Cempel Cz.: Diagnostically Oriented Measures of Vibroacoustical Process. *Journal of Sound and Vibration* (1980), 73 (4), 547-561.
3. Dalpiaz G., Rivola A., Rubini R.: Dynamic Modeling of Gear System for Condition Monitoring and Diagnostics. *Kongres Diagnostyki Technicznej*, Gdańsk 1996, (2), 185-192.
4. Madej H.: Wykorzystanie sygnału resztkowego drgań w diagnostyce przekładni zębatych. *Diagnostyka*. Vol. 26, 2002.
5. Mc Fadden P.D.: Examination of a technique for the detection of failure in gears by signal processing of the time domain average of the meshing vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 1, 1987, s.173-183.
6. Paya B.A., Esat I.I., Badi M.N.M.: Artificial neural network based fault diagnostics of rotating machinery using wavelet transforms as a preprocessor. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 11,1997, s. 751-765.
7. Roan M. J., Erling J. G., Sibul L. H.: A new, non-linear, adaptive, blind source separation approach to gear tooth failure detection and analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2002, s. 719-740.
8. Stewart R.M.: Some Useful Data Analysis Techniques for Gearbox Diagnostics. Report MHM/R/10/77, Machine Health Monitoring Group, Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, 1977.
9. Wilk A., Łazarz B., Madej H.: The application of wavelet analysis in the diagnosis of toothed wheels damages. *Proceed. InterNoise'99, USA*. 933-938
10. Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Diagnozowanie wczesnych stadiów rozwoju uszkodzeń kół zębatych. *Diagnostyka*, Vol. 24, 2001, s. 46-53.
11. Zakrajsek J.J. i inni.: *Transmission Diagnostic Research at NASA Lewis Research Center*, NASA TM-106901, 1995.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

Abstract

Condition monitoring of rotating machinery based on a vibration signal has been well established over the last few decades. Vibration signal analysis techniques have been investigated developed and used to provide operational information about mechanical power transmission systems for their conditional monitoring. For rotating mechanical design gear the fundamental component. This paper presents an investigation carried out concerning progressing local faults in one-stage spur gear. Two types of progressing local faults, cracked and chipped gear tooth were simulated and the smoothed pseudo-Wigner-Ville distribution was used to demonstrate faults advancement via residual vibration signal analysis. The progression of faults was monitored by observing changes in the features of the pseudo-WV

distribution in the contour plots and changes of kurtosis value. The results show that this analysis techniques are able to localize damages tooth.

Publikacja powstała w wyniku realizacji projektu badawczego numer 8T07C04220 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.