

Bogusław ŁAZARZ, Henryk MADEJ

## CZASOWO-CZĘSTOTLIWOŚCIOWE ANALIZY SYGNAŁU DRGANIOWEGO W DIAGNOSTYCE PRZEKŁADNI ZĘBATYCH

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych kół zębatych z lokalnymi uszkodzeniami przeprowadzonych na stanowisku mocy krążącej. W badaniach wykorzystano analizę czasowo-częstotliwościową Wignera-Ville'a (WV). Wyniki badań wykazały, że analiza WV umożliwia identyfikację momentu wystąpienia lokalnych uszkodzeń kół, takich jak wykruszenie lub pęknięcie zęba. Analiza ta może być więc stosowana do wczesnego wykrywania lokalnych uszkodzeń w przekładniach zębatych.

## THE APPLICATION OF TIME-FREQUENCY ANALYSIS OF VIBRATION FOR GEARS DIAGNOSTICS

**Summary.** The paper presents results of experimental tests. Experimental data was obtained from a FZG stand. Time-frequency analysis Wigner-Ville Distribution (WV) have been applied to the detection of local fault in gears. Many types of local gear damages as tooth breaking/cracking or chipping produce localized changes in the vibration signal. Time-frequency analysis (WV) localize faults in time and therefore may be a powerful toll in detecting local gear damage at an early state.

### 1. WPROWADZENIE

Generowany przez przekładnię zębatą losowy sygnał drganiowy stanowi podstawowe źródło informacji o stanie zaszerebia. Na aktywność wibroakustyczną przekładni mają wpływ czynniki konstrukcyjne, w tym przede wszystkim odchyłki wykonania zaszerebia oraz jego zużycie.

Z punktu widzenia diagnostyki istotne jest rozpoznanie w początkowych stadiach rozwoju zjawisk zmęczeniowych, takich jak: wykruszenie warstwy wierzchniej, częściowe wyłamanie wierzchołka lub pęknięcie u podstawy zęba. Tradycyjna analiza widmowa daje jedynie informacje o średnich amplitudach częstotliwości analizowanego sygnału charakteryzując się dobrą rozdzielczością w dziedzinie częstotliwości i brakiem informacji w dziedzinie czasu. Metoda ta daje dobre wyniki w analizie sygnałów stacjonarnych, jednakże drgania generowane w zaszerebiu posiadają również składowe o charakterze impulsowym.

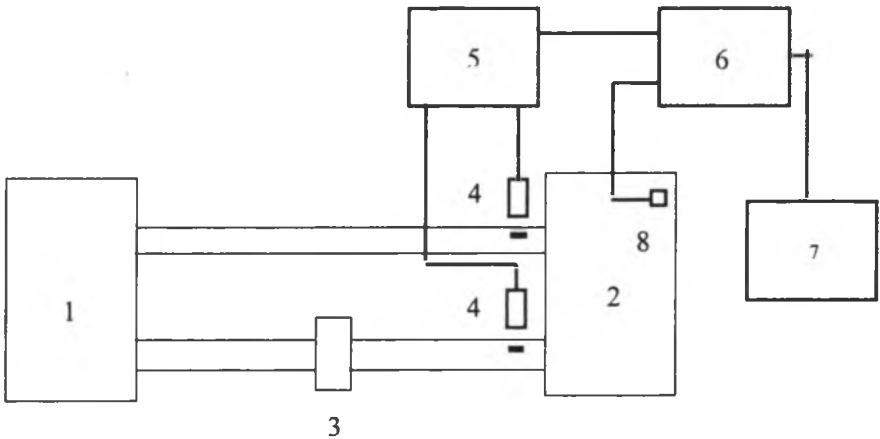
Lokalne uszkodzenia kół generują zaburzenia niestacjonarne sygnału drganiowego oraz modulację amplitudowo-fazową [4,5,6] i mogą być wykrywane poprzez jednoczesne określenie struktury czasowej i częstotliwościowej sygnału. Należy podkreślić, że początkowe

fazy rozwoju uszkodzeń wywołujące wyżej wymienione zaburzenia nie powodują wzrostu ogólnego poziomu drgań, co stwarza konieczność stosowania zaawansowanych metod analizy sygnałów [2,3,5,7].

## 2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Badania wpływu zaprogramowanych uszkodzeń kół na postać sygnału drganiowego prowadzono na stanowisku laboratoryjnym przedstawionym na rys. 1. Obiektem badań były koła o zębach prostych ( $z_1 = 16$ ,  $z_2 = 24$ ), w których wykonano uszkodzenie: pęknięcie u podstawy i wykruszenie wierzchołka zęba.

Drgania przekładni rejestrowano w wybranych punktach obudowy przy zadanej prędkości i obciążeniu kół. Zastosowany analizator sygnałów DSPT SigLab jest całkowicie zintegrowany z pakietem MATLAB i posiada możliwość wprowadzania bezpośrednio do przestrzeni roboczej wyników pomiarów zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości w zakresie od 0 do 20 kHz.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – przekładnia zamykająca, 2 – przekładnia badana, 3 – sprzęgło napinające, 4 – czujniki położenia kąowego wałów, 5 – układ logiczny, 6 – analizator sygnałów DSPT SigLab, 7 – komputer, 8 – przetworniki przyspieszeń mocowane bezpośrednio na kole lub obudowie przekładni

Fig. 1. Schematic diagram of instrumented gear test rig: 1 – closing gear, 2 – tested gear, 3 – tightening clutch, 4 – shaft angular position optical sensors, 5 – logical unit, 6 – signal analyser DSPT SigLab, 7 – personal computer, 8 – accelerometers mounted on the wheel or on gear housing

Przedstawiony układ pomiarowy umożliwia analizę sygnału uśrednionego synchronicznie okresem obrotu wałów: zębniaka –  $T_z$ , koła –  $T_k$  oraz okresem powtarzania cyklu skojarzeń –  $T_p$ . Uśrednianie synchroniczne sygnału eliminuje wpływ szumów losowych poprawiając stosunek sygnału do szumu. Uśrednianie sygnału zwłaszcza w przypadku diagnozowania przekładni wielostopniowych pozwala odseparować oddziaływania poszczególnych węzłów kinematycznych ułatwiając diagnozę.

### 3. METODY CZASOWO-CZĘSTOTLIWOŚCIOWE ANALIZY SYGNAŁÓW DRGANIOWYCH

Wiele miar diagnostycznych stosowanych obecnie w badaniach przekładni zębatych opartych jest na analizie częstotliwościowej drgań. Podstawową techniką analizy częstotliwościowej jest transformata Fouriera. Jak już wspomniano wcześniej, wadą metody jest brak możliwości określenia czasu wystąpienia efektów wywołanych lokalnymi niestacjonarnościami sygnału. Niedogodność ta została częściowo usunięta w transformacie Gabora, która jest modyfikacją transformaty Fouriera. Z kolei uogólnieniem transformaty Gabora jest krótkoczasowe przekształcenie Fouriera STFT (Short Time Fourier Transform).

$$S(b, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} \cdot w(t-b) dt \quad (1)$$

W przekształceniu tym wprowadzono okno lokalizacyjne  $w(t-b)$ , w którym parametr  $b$  przesuwa okno w dziedzinie czasu. Funkcją okna może być dowolna funkcja spełniająca określone warunki. Okno to ze względu na stałą szerokość okazało się mało efektywne w analizie sygnałów zawierających jednocześnie składowe o niskiej i wysokiej częstotliwości.

Inną metodą analizy czasowo-częstotliwościowej struktury sygnału jest transformacja Wignera-Ville'a

$$WD(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) w(\tau) e^{-j2\pi ft} dt, \quad (2)$$

gdzie:

$x^*(t)$  – sygnał urojony sprzężony z  $x(t)$ ,

$w(t)$  – funkcja wagi podobna do okna czasowego stosowanego w krótkoczasowej transformacie Fouriera (STFT).

W przypadku transformaty STFT zwięzanie przedziału czasowego poprawia rozdzielczość czasową widma mocy pogarszając jednocześnie jego dokładność w dziedzinie częstotliwości, na skutek tak zwanego przecieku widma. W przeciwieństwie do STFT, której rozdzielczość w dziedzinach czasu i częstotliwości jest ograniczona z powodu stałej szerokości okna, rozkład WV ma bardzo dobrą rozdzielczość w obu dziedzinach. Dzięki tym cechom transformaty WV umożliwia rozróżnienie zjawisk modulacji amplitudowej i fazowej, co z punktu widzenia diagnostyki stanu zazębienia jest bardzo ważne. Z badań wynika, że podstawowe uszkodzenia wywołane eksploatacyjnym zużyciem zębów to:

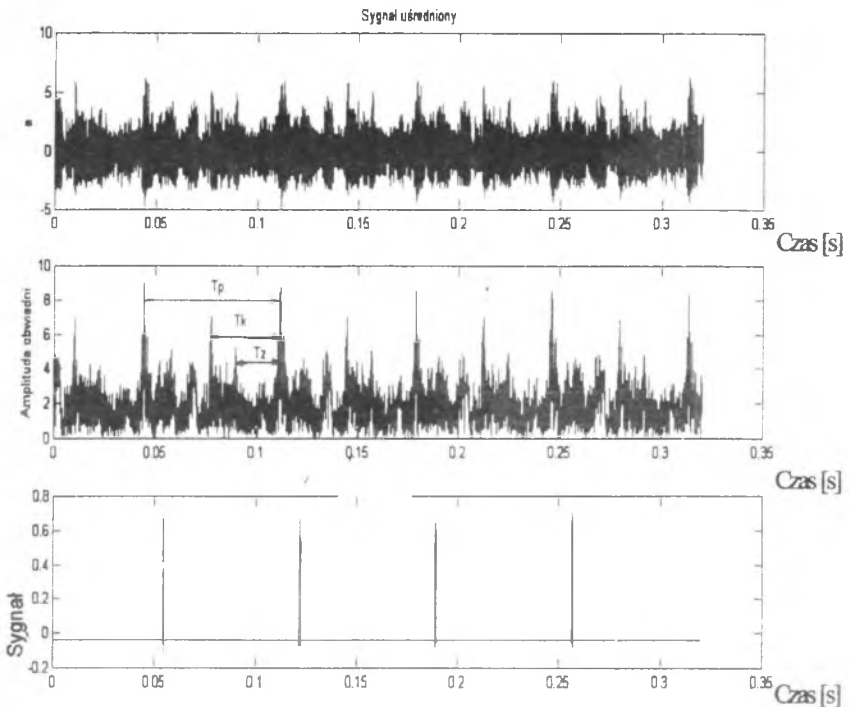
- pitting,
- częściowe wylamanie zębów,
- zatarcie,
- zużycie ściernie.

Uszkodzenia te wywołują jednocześnie modulacje amplitudy i fazy sygnału drganiowego. Charakter rozkładu czasowo-częstotliwościowego ułatwia wnioskowanie diagnostyczne rozróżniając zjawiska zużyciowe.

## 4. WYNIKI ANALIZY SYGNAŁÓW DRGANIOWYCH

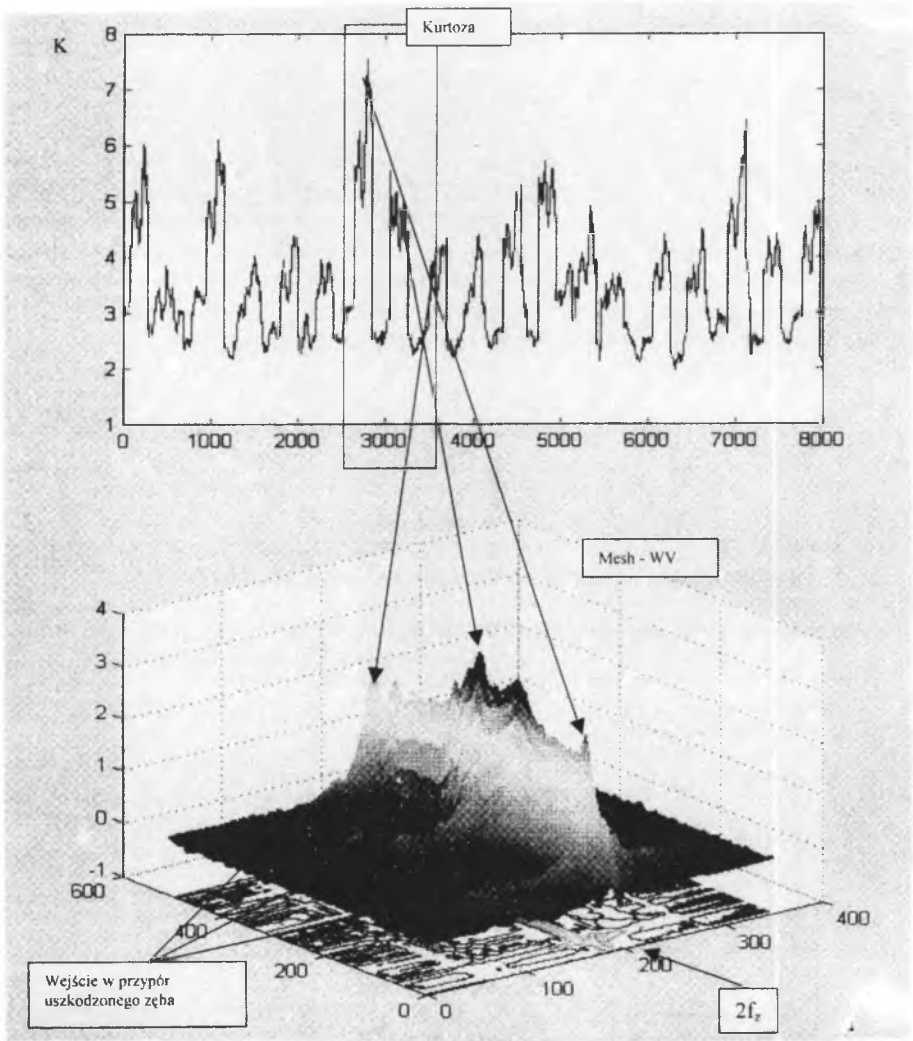
Badania przeprowadzono w celu sprawdzenia przydatności różnych metod analizy sygnałów drganiowych do wykrywania uszkodzeń kół zębatach, takich jak wyłamanie i pęknięcie zęba. Uszkodzenia te wywołują impulsową modulację sygnału generowanego w zazębieniu nie powodując istotnego wzrostu ogólnego poziomu drgań.

Na rysunku 2 przedstawiono sygnał przyspieszeń drgań skrętnych z czujnika umieszczonego bezpośrednio na uszkodzonym lokalnie kole. Sygnał został uśredniony synchronicznie za pomocą układu pomiarowego przedstawionego na rysunku 1. W tym przypadku jako sygnał synchronizujący zastosowano impulsy zgodne z czasem powtarzania cyklu skojarzeń zębów. Pomiar przyspieszeń drgań bezpośrednio na kole umożliwia identyfikację lokalnego uszkodzenia. Impulsy związane z wchodzeniem uszkodzonego zęba w przypór są szczególnie dobrze uwidocznione w przebiegu czasowym obwiedni sygnału przyspieszeń. W warunkach przemysłowych tego rodzaju pomiary są trudne do zrealizowania z powodu braku możliwości bezpośredniego pomiaru drgań wirującego koła. Należy podkreślić, że uśrednianie synchroniczne poprawia stosunek sygnału do szumu, jednak sygnał synchronizujący powinien być generowany z dokładnością wyższą niż czas próbkowania  $t_p$ .



Rys. 2. Uśredniony synchronicznie sygnał przyspieszeń drgań skrętnych, obwiednia sygnału i sygnał synchronizujący – czujnik umieszczony bezpośrednio na uszkodzonym kole

Fig. 2. Time synchronous averaged torsional acceleration, envelope of the signal and reference signal-accelerometer mounted on the wheel



Rys. 3. Zmiany współczynnika kurtozy  $K$ , w funkcji czasu i rozkład WV dla przekładni z wykruszonym zębem zębnika, obciążenie  $M = 138$  Nm, prędkość obrotowa  $n = 2700$  obr/min, czujnik umieszczony na korpusie łożyska koła, uśrednianie w okresie  $T_z$ .

Fig. 3. The time function of the kurtosis  $K$ , and time-frequency WV distribution of the gear with chipped pinion tooth, load  $M = 138$  Nm, rotational speed  $n = 2700$  rpm, accelerometer mounted on bearing housing, time synchronous averaging in period  $T_z$ .

Zastosowanie analizy czasowo-częstotliwościowej Wignera-Ville'a umożliwia wykrycie uszkodzenia lokalnego zarówno w przypadku sygnału uśrednionego, jak i nieuśrednionego. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki analizy czasowo-częstotliwościowej przyspieszeń drgań zarejestrowanych na obudowie łożysk przekładni w przypadku wykruszonego zęba zębnika. Górny wykres przedstawia zmiany współczynnika kurtozy w funkcji czasu. Współczynnik

kurtozy (spłaszczenia) jest jedną ze znanych bezwymiarowych dyskryminant stosowanych w diagnostyce uszkodzeń przekładni zębatych.

$$K = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{x_{RMS}^4} \quad (3)$$

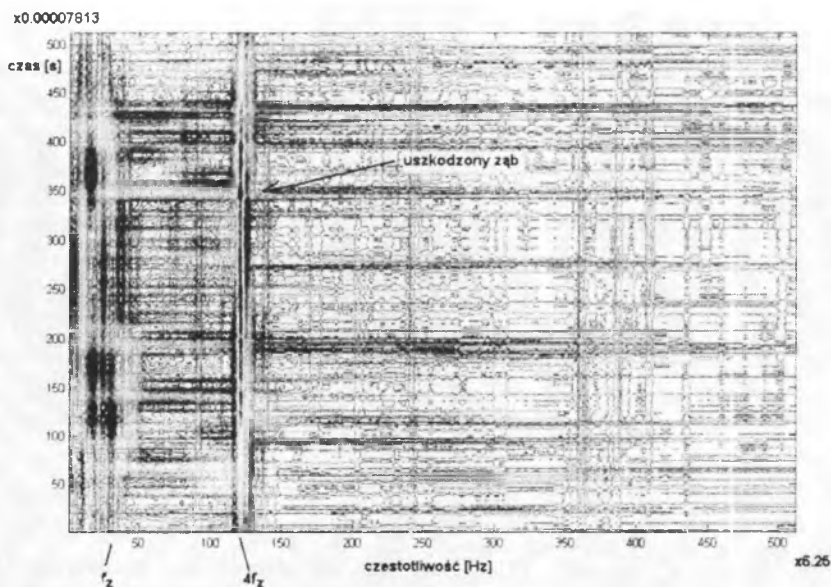
Współczynnik ten dla sygnału o rozkładzie Gaussa ma wartość 3.0. Wzrost wartości współczynnika świadczy o zmianie rozkładu sygnału w dziedzinie amplitudy. Podczas badań zauważono, że zmiany współczynnika kurtozy w oknie czasowym o odpowiednio dobranej szerokości  $N$  przesuwanych wzdłuż osi czasu są dobrym symptomem lokalnych uszkodzeń kół. W tym przypadku jako miarę diagnostyczną proponuje się zmodyfikowany współczynnik kurtozy opisany wzorem:

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

gdzie:

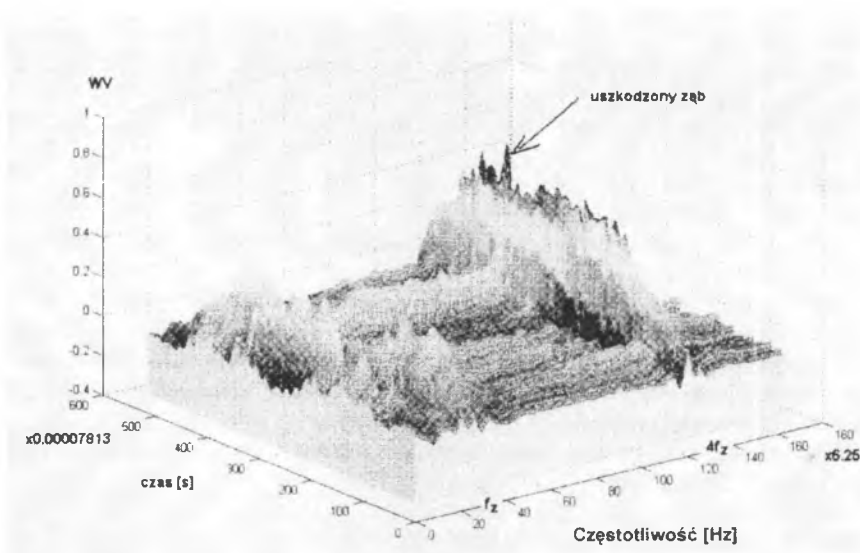
$i, j = 1, 2, 3, \dots$ ,

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



Rys. 4. Wyniki czasowo-częstotliwościowego rozkładu WV uśrednionego synchronicznie sygnału przyspieszeń drgań (w przypadku pęknięcia zęba u podstawy)

Fig. 4. 2D time-frequency distribution WV of the synchronously averaged acceleration (cracked tooth)



Rys. 5. Przestrzenny czasowo-częstotliwościowy rozkład WV uśrednionego synchronicznie sygnału przyspieszeń drgań (w przypadku pęknięcia zęba u podstawy)

Fig. 5. 3D time-frequency distribution WV of the synchronously averaged acceleration (cracked tooth)

Na dwóch kolejnych rysunkach przedstawiono dwa sposoby prezentacji wyników analizy czasowo-częstotliwościowych WV. Na rysunku 4 przedstawiono dwuwymiarowy konturowy, natomiast na rysunku 5 trójwymiarowy wykres. Skala amplitudy jest obrazowana kolorem i dlatego w przypadku publikacji czarno-białej bardziej czytelny jest wykres przestrzenny. Na przedstawionych rysunkach można rozróżnić zaburzenia spowodowane wchodzeniem zębów w przypór. Na rysunku 3 w paśmie  $2f_z$  strzałkami zaznaczono lokalne ekstrema rozkładu WV wywołane wejściem w przypór uszkodzonego zęba. Jak wynika z rysunków 4 i 5, również w przypadku pęknięcia zęba u podstawy zaobserwowano lokalne ekstrema rozkładu WV widoczne w paśmie  $f_z$  i  $4f_z$ . Niestacjonarność sygnału w paśmie  $4f_z$  jest obserwowana w dłuższym okresie czasu obejmującym wejście w przypór kolejnych zębów (rys. 4). Efekty wejścia w przypór uszkodzonych lokalnie zębów są wyraźnie widoczne jednocześnie w dziedzinach częstotliwości i czasu. Pęknięcie zęba u podstawy wywołuje modulację fazową sygnału zążeń, co uwidacznia się w rozkładzie czasowo-częstotliwościowym (rys. 4, 5) w postaci niesymetrycznie rozłożonych wstęg bocznych.

## 5. WNIOSKI

Zastosowany do analizy wyników pomiarów współczynnik kurtozy  $K_3$ , wyznaczany w przesuwającym oknie czasowym o odpowiednio dobranej szerokości jest bardzo wrażliwym na lokalne uszkodzenia symptomem.

Analiza Wignera-Ville'a jest użytecznym narzędziem do wykrywania impulsowych zaburzeń w szerokopasmowym widmie drgań. Przestrzenny rozkład WV sygnału przyspieszeń przekładni z lokalnymi uszkodzeniami dostarcza większą ilość informacji o rozkładzie energii

drgań wywołanych uszkodzeniem. Z przeprowadzonych badań wynika, że celowe jest stosowanie analizy WV do diagnozowania lokalnych uszkodzeń łącznie z klasycznymi metodami analizy sygnałów, które ułatwiają poprawną interpretację wyników analizy WV.

## Literatura

1. Dąbrowski Z., Radkowski S., Wilk A.: Dynamika przekładni zębatych. Warszawa-Katowice-Radom 2000.
2. Lee S. K., White P. R.: Detection of impulsive sound and vibration signal using the sliced Wigner fourth order moment spectra (SWFOMS). INTER-NOISE 99, Florida, USA.
3. Krishnappa G., Donovan M.: Some examples of signal analysis techniques to diagnose faults in machines. VI INTERNATIONAL CONGRESS ON SOUND AND VIBRATION 1999, Copenhagen, Denmark.
4. Radkowski S.: Bispektralna analiza sygnału wibroakustycznego. Kongres Diagnostyki Technicznej, Gdańsk 1996.
5. Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Wavelt Analysis in Diagnosis of Selected Damages in Toothed Wheels. Machine Dynamic Problems, 1999, vol. 23, No 2, s45-53.
6. Wilk A., Madej H., Łazarz B.: Diagnostic of Industrial Gear. VI International Congress on Sound and Vibration, Copenhagen, Denmark 1999.
7. Wilk A., Madej H., Łazarz B.: Struktura częstotliwościowa widma drgań przekładni z lokalnie uszkodzonymi kołami XXVIII Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 2001.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

## Abstract

The paper presents results of experimental tests. Experimental data was obtained from a FZG stand. In standard Fourier analysis, a signal is decomposed into individual frequencies. Many types of gear damage produce localized changes in the signal so that the signal is no longer stationary on the time scale of the gear tooth meshing. Time-frequency methods have been applied to the detection of fault in gears give local information about both time and frequency. These methods localised faults in time and therefore may be more sensitive to early changes in the signal due to impending faults. The conducted experimental tests show, that time-frequency methods (WV) allow detecting local damages with wheel random deviations.

Publikacja powstała w wyniku realizacji pracy BW-429/RM10/2001