

Tomasz FIGLUS, Andrzej WILK, Piotr FOLEGA

DIAGNOZOWANIE ZŁOŻONYCH PRZYPADKÓW USZKODZEŃ PRZEKŁADNI ZĘBATYCH Z WYKORZYSTANIEM RÓŻNYCH TECHNIK POMIARU DRGAŃ

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę wykrywania zużycia powierzchni roboczych kół zębatach na podstawie analizy sygnału drganiowego przekładni. Pomiar drgań przeprowadzono w różnych punktach przekładni, stosując czujnik piezoelektryczny oraz metodę bezdotykowego pomiaru z wykorzystaniem wibrometru laserowego. Analizę sygnału drganiowego wykonano stosując kolejno: filtrację grzebieniową, uśrednianie synchroniczne oraz transformatę Wignera-Ville'a.

DIAGNOSIS COMPLEX CASES GEAR TRANSMISSION DAMAGE WITH USE DIFFERENT TECHNIQS VIBRATION MEASUREMENTS

Summary. In the paper presents application research took advantage for detect tooth surface failure in complex cases gear transmission damage. Vibration measurements were made in different points of gearbox used accelerometer and laser vibrometer. Vibration signal was analysis by means comb filtration, the letter used synchronous averaging and Wigner-Ville'a analysis.

1. WSTĘP

Diagnozowanie przekładni zębatach jest dziedziną nauki, która umożliwiać powinna określenie stanu poszczególnych jej elementów, niezależnie od zaawansowania ich zużycia. Do najpopularniejszych metod wykorzystywanych w tego typu badaniach są pomiary drgań.

W praktyce przemysłowej pomiary wykonuje się mierząc przyspieszenia drgań obudowy przekładni w punktach położonych najbliżej miejsca występowania ewentualnego przyspieszonego zużycia lub uszkodzenia [1,2,3,4]. Sposób przeprowadzania tych badań, a w szczególności odpowiedni dobór punktów pomiarowych, z uwzględnieniem wpływu struktury rezonansowej obudowy przekładni na przenoszone drgania, powinien umożliwiać poprawne wnioskowanie diagnostyczne. Zakłócenia sygnału drganiowego spowodowane uszkodzeniem innych elementów przekładni znacznie utrudniają wykrywanie różnych przypadków zużycia kół zębatach i ustalenia ich stanu.

Wraz z rozwojem technik komputerowych opracowano metodę bezdotykowego pomiaru prędkości drgań. Metoda ta umożliwia wykonywanie pomiarów drgań nie tylko w wybranych punktach elementów nieruchomych przekładni, np. obudowy, ale również elementów ruchomych przekładni, np. wałów [5,6]. Umożliwia ona pomiar drgań poprzecznych wałów, które przenoszą informację o współpracy kół zębatach i o stanie łożysk tocznych. Sygnał taki pozbawiony jest wpływu transmitancji występującej na drodze koło zębate – wał – łożysko toczne – obudowa przekładni, która wpływać może na jego zniekształcenie.

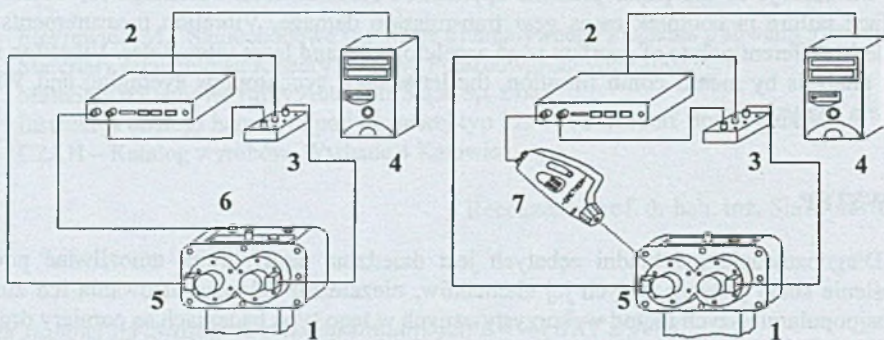
W pracy wykorzystano pomiary drgań w wybranych punktach obudowy przekładni oraz wału przekładni podczas narastania zużycia powierzchni roboczej kół zębatach. W trakcie badań montowano w przekładni łożyska toczne z różnymi rodzajami uszkodzeń. Zarejestrowane sygnały analizowano za pomocą filtracji opartej na szybkiej transformacie Fouriera [6,7,8], a następnie uśrednianiu synchronicznym. Na podstawie takiego sygnału wyznaczono transformatę Wignera-Ville'a oraz zdefiniowano i obliczono miarę zużycia powierzchni roboczej kół zębatach.

Analiza uzyskanych wyników różnych metod pomiaru sygnału drganiowego posłużyła do oceny ich przydatności do wykrywania zużycia kół zębatach przekładni.

2. BADANIA STANOWISKOWE

W celu określenia możliwości wykrywania zużycia kół zębatach w różnych punktach – elementach – przekładni badania przeprowadzono na stanowisku mocy krążącej FZG (schemat stanowiska przedstawiono w artykule A.Wilk, T.Figlus „Diagnozowanie uszkodzeń łożysk ...” zamieszczonym w niniejszym zeszycie naukowym). Stanowisko to umożliwia prowadzenie badań zarówno kół zębatach, jak i łożysk tocznych w różnych stanach zużycia.

Pomiary na stanowisku wykonywano czujnikiem piezoelektrycznym, mierząc przyspieszenia w różnych punktach obudowy (6 rys.1) oraz wibrometrem laserowym, mierząc prędkość drgań poprzecznych wałów przekładni (7 rys.1). Do synchronizacji sygnału drganiowego wykorzystano impulsy (5 rys.1), odpowiadające kolejnym skojarzeniom współpracy zębniaka i koła przekładni, które rejestrowano podczas badań.



Rys.1. Schematy układów pomiarowych: 1 – badana przekładnia, 2 – analizator sygnałów DSTP SigLab, 3 – układ logiczny, 4 – komputer PC, 5 – czujniki położenia wałów, 6 – czujnik piezoelektryczny, 7 – wibrometr laserowy

Fig.1. The diagram of measurement system: 1 - the examined transmission (gear), 2 - DSTP signal analyzer (SigLab), 3 - logic system, 4 - PC, 5 - sensors of shaft's position, 6 - accelerometer, 7- laser vibrometer

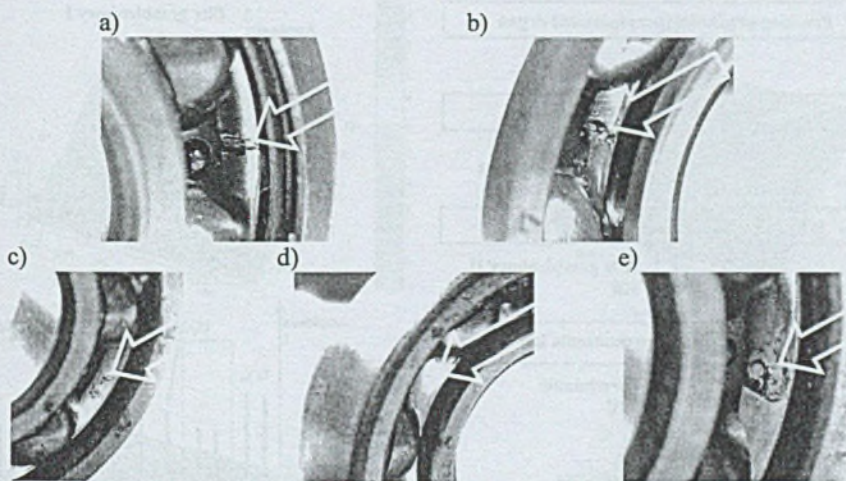
Do badań wykorzystano koła walcowe o zębatach prostych, o parametrach przedstawionych w tab. 1. Koła te w procesie produkcyjnym poddawane są nawęglaniu do twardości 60-62 HRC. Ze względu na specyfikę wykonywanego eksperymentu, którego celem było badanie przyspieszonego zużycia powierzchni roboczej zębatach, koła zębatach odpuszczano do twardości 38-40 HRC.

Tabela 1
Parametry kół zębatach

Parametr	Ozn.	Wartość liczbowa	Jedn. miary
Liczba zębów zębika	z_1	16	-
Liczba zębów koła	z_2	24	-
Moduł	m	4,5	mm
Odległość osi kół	a	91,5	mm
Szerokość kół	b	20	mm
Współczynnik przesunięcia zarysu zębika	x_1	0,864	-
Współczynnik przesunięcia zarysu koła	x_2	-0,5	-

Eksperyment realizowano przy założeniu dwóch różnych wartości obciążenia kół, tj. $Q_1=3,1\text{MPa}$ i $Q_2=1,5\text{MPa}$, natomiast w pracy przedstawiono wyniki pomiarów drganiowych przy obciążeniu Q_1 .

Do podparcia wału koła wykorzystano cztery łożyska kulkowe zwykłe. Na dwóch z nich wykonano w sposób sztuczny lokalne uszkodzenia w postaci rowka o szerokości ok.2 mm – odpowiednio na bieżni zewnętrznej oraz wewnętrznej – w jednym miejscu na obwodzie (rys.2 a i b); trzecie posiadało uszkodzenia obu bieżni i elementów tocznych powstałe w wyniku długotrwałej eksploatacji łożyska (rys.2 c-e); a czwarte – bez uszkodzenia – wykorzystano do pomiarów sygnałów bazowych.



Rys.2. Uszkodzenia łożysk tocznych:

- a) uszkodzenie bieżni zewnętrznej, b) uszkodzenie bieżni wewnętrznej,
c)-e) uszkodzenia eksploatacyjne

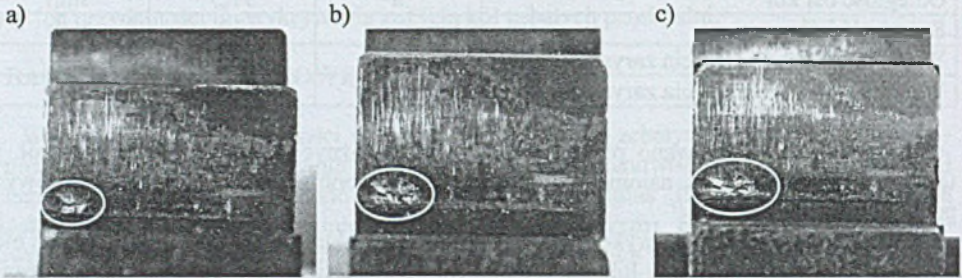
Fig.2. Bearings damage: a) outer race, b) inner race, c)-e) exploitation

Pomiary wykonano przy częstotliwości obrotowej $f_{o2}=30\text{ Hz}$. Charakterystyczne częstotliwości odpowiadające pojawianiu się uszkodzeń obliczono na podstawie zależności przedstawionych w [2,3,4]. W przypadku uszkodzenia bieżni zewnętrznej łożyska wynosiła ona 90,1 Hz, a dla bieżni wewnętrznej 130 Hz. Natomiast w częstotliwościowym sygnale drganiowym emitowanym przez łożysko zużyte podczas eksploatacji nie stwierdzono wyraźnych częstotliwości charakterystycznych.

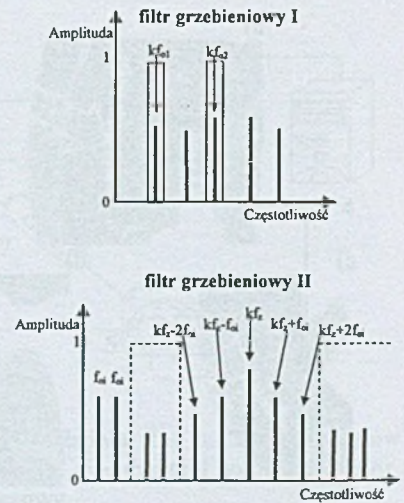
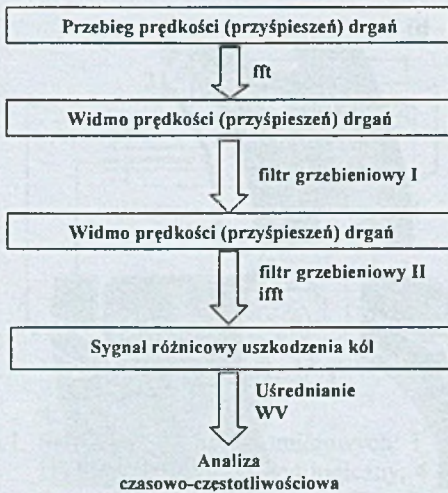
3. ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

Pomiary drgań przekładni wykonywano w czterech fazach zużycia powierzchni roboczej zęba. W trakcie badań stwierdzono, iż zużycie powierzchni zębów wystąpiło i narastało nierównomiernie, co związane jest rozkładem odchyłek zazębienia współpracującej pary kół.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy ząb z narastającym zużyciem.



Rys.3 a)-c). Kolejne fazy zużycia powierzchni roboczej zęba
Fig.3 a)-c). Phase tooth surface failure



Rys.4. Schemat algorytmu obliczeniowego:

fft – transformata Fouriera, ifft – odwrotna transformata Fouriera, WV – transformata Wignera-Ville’a, f_{o1} – częstotliwość obrotowa zębownika, f_{o2} – częstotliwość obrotowa koła, f_z – częstotliwość zazębienia, k – harmoniczna 1,2,3,..., linią ciągłą ozn. analizowane częstotliwości sygnału, linią przerywaną ozn. filtrację dla sygnału różnicowego

Fig.4. Diagram computation:

fft – fast Fourier transform, ifft – inverse fast Fourier transform, WV – Wigner-Ville’a analysis, f_{o1} – frequency of pinion revolution, f_{o2} – frequency of wheel revolution, f_z – meshing revolution, k – harmonic 1,2,3,..., the continual line means analysis of signal frequency, the dasher line means filtration for differential signal

Algorytm przeprowadzanej w pracy analizy sygnałów przedstawiono na rys. 4. Opracowane na jego podstawie wyniki analiz sygnałów drganiowych umożliwiły wnioskowanie o uszkodzeniu kół zębatach w postaci wykruszenia zęba [6,7,8].

Na podstawie otrzymanych rozkładów czasowo-częstotliwościowych WV przyjęto miarę zużycia powierzchni roboczej zęba określoną zależnością:

$$SWV = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K WV(i, j), \quad (1)$$

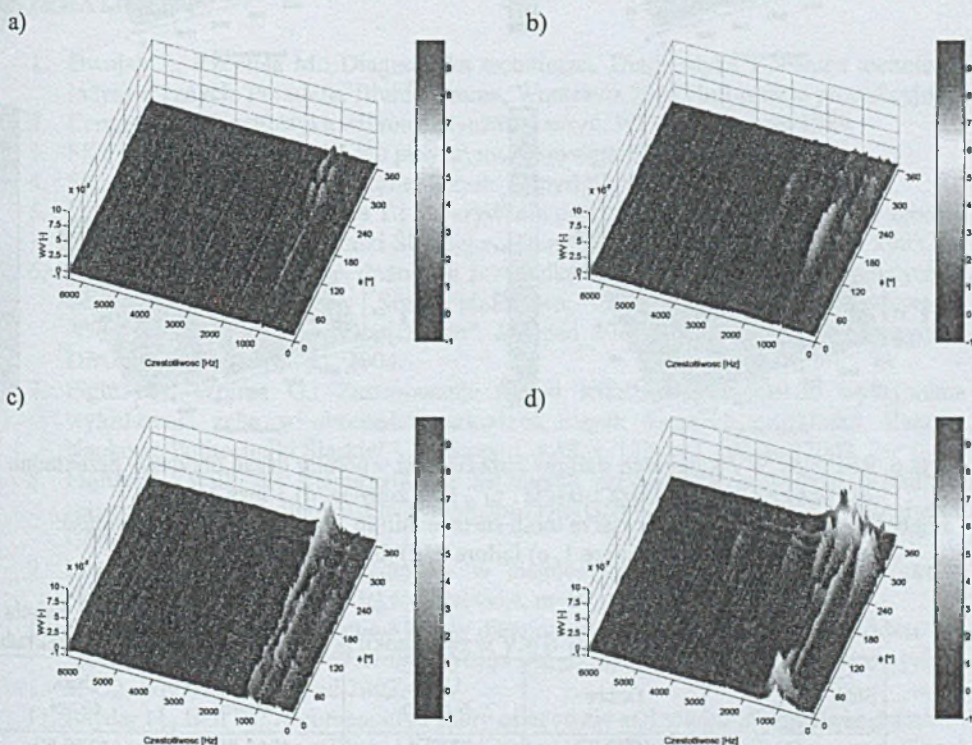
gdzie:

N – dyskretny numer próbki odpowiadający pełnemu obrotowi koła,

K – dyskretny numer próbki odpowiadający maksymalnej częstotliwości rozkładu WV.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono przykładowe rozkłady czasowo-częstotliwościowe Wignera-Ville'a prędkości drgań wału oraz przyspieszeń drgań obudowy w przypadku, gdy w przekładni zamontowano łożysko z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej w kolejnych stadiach zużycia koła.

W tabelach 2 i 3 zamieszczono obliczone na podstawie rozkładów WV miary zużycia powierzchni roboczej zęba (zgodnie ze wzorem (1)) w zależności od stopnia zużycia koła przy różnych rodzajach uszkodzeń łożysk.



Rys.5. Rozkłady WV kolejnych stadiów zużycia koła – pomiar drgań wału przekładni:

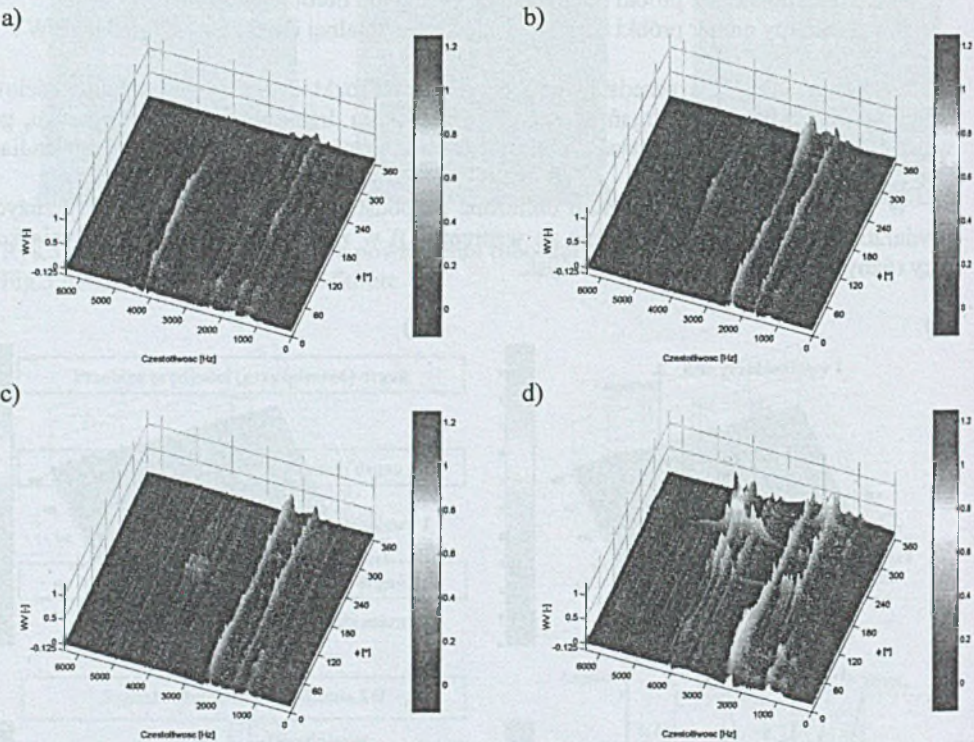
a) bez zużycia, b) 1 faza zużycia, c) 2 faza zużycia, d) 3 faza zużycia

Fig.5. WV distribution of successive tooth surface failure – measurement on shaft gearbox:

a) without failure, b) failure 1, c) failure 2, d) failure 3

Tabela 2
Zmiana miary SWV w przypadku pomiaru drgań wału przekładni

łożysko Stan zużycia koła	Dobre	Uszk. b.zewn.	Uszk. b.wewn.	Uszk. ekspl.
0	29,62	31,90	28,86	37,91
1	37,12	47,19	54,91	35,44
2	53,59	64,61	44,86	38,68
3	64,97	89,70	92,93	92,89



Rys.6. Rozkłady WV kolejnych stadiów zużycia koła – pomiar drgań obudowy przekładni:
a) bez zużycia, b) 1 faza zużycia , c) 2 faza zużycia, d) 3 faza zużycia
Fig.6. WV distribution of successive tooth surface failure – measurement on gearcase:
a) without failure, b) failure 1, c) failure 2, d) failure 3

Tabela 3
Zmiana miary SWV w przypadku pomiaru drgań obudowy przekładni

łożysko Stan zużycia koła	Dobre	Uszk. b.zewn.	Uszk. b.wewn.	Uszk. ekspl.
0	4073,27	5324,44	4612,60	4279,50
1	5239,20	6090,92	6544,91	6237,02
2	6420,56	6335,01	6527,83	6952,80
3	12503,83	13525,52	14151,56	16042,04

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania zużycia powierzchni roboczej zęba przy jednoczesnym występowaniu uszkodzeń łożysk tocznych wykazały, iż wykrycie uszkodzenia było możliwe niezależnie od metody realizacji pomiaru, a zatem miejsca wyboru punktu pomiarowego.

Przedstawione w pracy rozkłady czasowo-częstotliwościowe zmiany wartości sygnału wywołane uszkodzeniem wskazują na wzrost energii drgań w pasmach niskoenergetycznych, w zakresach poza częstotliwością ząbienia i jej harmonicznymi. Zmiany te w przypadku pomiarów drgań wału przekładni występują w niższym zakresie częstotliwości do $3f_z$, a w przypadku pomiarów obudowy przekładni w całym zakresie częstotliwości.

Analiza wyznaczonych w pracy miar (tab. 2 i 3) potwierdza możliwość wykrywania zużycia koła w przypadku jednoczesnego uszkodzenia łożysk tocznych przekładni. Zaproponowana miara cechuje się dużą wrażliwością na wzrastające zużycie powierzchni zębów. Prawidłowość ta występowała zarówno w przypadku pomiarów drgań obudowy, jak i wałów przekładni.

LITERATURA

1. Dwojak J., Rzepiela M.: Diagnostyka techniczna. Diagnostyka i obsługa techniczna łożysk tocznych. Poradnik. Biuro Gamma, Warszawa 2003 (Informacja produkcyjna)
2. Cempel Cz.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. PWN, Warszawa 1989.
3. SKF: Uszkodzenia łożysk i ich przyczyny. Copyright SKF, 2001.
4. SKF Poradnik obsługi technicznej łożysk. Copyright SKF, 1994.
5. Łazarz B., Wojnar G., Figlus T.: Wykrywanie uszkodzeń łożysk w przekładni zębatej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 46, s. 47-54, Gliwice 2003.
6. Figlus T.: Diagnozowanie złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych w eksperymencie czynnym. Sesja plakatowa, Seminarium międzynarodowe - "Degradacji Systemów Technicznych", listopad 2003, Warszawa, opublikowany w DIAGNOSTYKA vol. 31, 2004.
7. Figlus T., Wojnar G.: Zastosowanie metod wibroakustycznych do wykrywania wykruszenia zęba w obecności uszkodzeń łożysk tocznych przekładni. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 48, s. 133-142, Gliwice 2003.
8. Figlus T., Wilk A.: Diagnozowanie złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych. XXXI Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 2004.
9. Madej H.: Przetwarzanie sygnałów w diagnostyce przekładni zębatych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, nr 46, s. 55-64, Gliwice 2002.
10. Radkowski S.: Wykorzystanie SWA w diagnozowaniu zmęczeniowych uszkodzeń kół zębatych. II Seminarium Wibroakustyczna Diagnostyka Procesów Zmęczeniowych, s. 35-52, Warszawa, listopad 2002.
11. Baydar N., Ball A.: A comparative study of acoustic and vibration signals in detection of gear failures using Wigner-Ville distribution. Mechanical Systems and Signal Processing (2001) 15(6), 1091-1107.
12. Wang W.: Early detection of gear tooth cracking using the resonance demodulation technique. Mechanical Systems and Signal Processing (2001) 15(5), 887-903.

13. Oehlmann H., Brie D., Tomczak M., Richard A.: A method for analysing gearbox faults using time-frequency representations. *Mechanical Systems and Signal Processing* (1997) 11(4), 529-545.

Recenzent: Prof. dr hab.inż. Jan Adamczyk

Praca wykonana w ramach BW – 441/RT2/2004.