

Grzegorz WOJNAR

WYKRYWANIE WYKRUSZENIA WIERZCHOŁKA ZĘBA W PRZYPADKU PRZEKŁADNI PRACUJĄCEJ ZE ZMIENNĄ W CZASIE PRĘDKOŚCIĄ OBROTOWĄ

Streszczenie. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych, zorientowanych na wykrywanie wykruszenia wierzchołka zęba koła przekładni, która pracuje ze zmienną w czasie prędkością obrotową. Obiektem badawczym była przekładnia stanowiska pracującego w układzie mocy krążącej. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że opracowany algorytm przetwarzania sygnałów drganiowych, obejmujący między innymi interpolację zarejestrowanego sygnału oraz analizę sygnału różnicowego, jest przydatny do wykrywania tego typu uszkodzenia koła zębatego.

DETECTION OF GEAR TOOTH CHIPPING IN CASE OF OPERATING UNDER NON-STATIONARY ROTATIONAL SPEED

Summary. The paper presents results of experimental research oriented on fault diagnostics in case gears operating at varying rotational speed. The researches have been carried out for gear with circulating power, the test stand. The method of processing vibration signals proposed in this paper, which is based (among others) on using linear interpolation makes it possible to acquire residual and differential signals in case of toothed gears operating at varying rotational speed and load. Analysis of obtained signals has proved useful in diagnosing of gear tooth top chipping.

1. WSTĘP

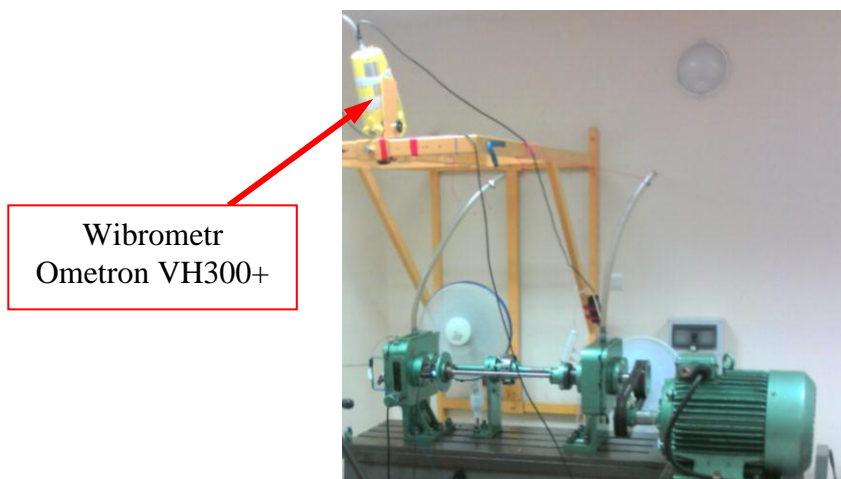
W przeważającej liczbie publikacji dotyczących diagnozowania przekładni zębatych zakłada się, że przekładnia pracuje ze stałą prędkością obrotową wałów [1-4]. Tymczasem układy napędowe statków, pojazdów lądowych i maszyn przemysłowych często pracują ze zmienną w czasie prędkością obrotową. W przypadku gdy prędkość obrotowa wałów przekładni zmienia się znacząco lub jeśli jedynie oscyluje wokół pewnej wartości, metody analizy sygnałów, stosowane w diagnostyce przekładni pracujących przy stałej prędkości obrotowej, nie pozwalają na poprawne wykrywanie lokalnych uszkodzeń zwłaszcza takich elementów, jak koła zębate lub łożyska [5-7]. Na ten fakt zwrócono uwagę w pracach [8-11].

Jednym ze sposobów rozwiązania przedstawionego problemu, który został zaproponowany w pracy [8], jest monitorowanie chwilowej prędkości kątowej (IAS – ang. *Instantaneous Angular Speed*) i zastosowanie uśredniania sygnału nie w dziedzinie czasu (TDA – ang. *Time Domain Averaging*) ale w dziedzinie kąta obrotu koła zębatego (RDA – ang. *Rotation Domain Averaging*). Można to zrealizować np. przez zastosowanie liniowej decymacji sygnału, przedstawionej w [12], lub liniowej interpolacji sygnału [13].

Na podstawie badań przekładni, pracujących ze stałymi prędkościami obrotowymi i obciążeniami, wiadomo, że jednym z bardziej efektywnych sposobów diagnozowania lokalnych uszkodzeń kół zębatach jest analiza sygnałów resztkowego $r(t)$ oraz różnicowego $d(t)$ [14, 15], dlatego w niniejszym artykule do diagnozowania wykruszenia wierzchołka zęba przekładni zastosowano połączenie przedstawionych metod przetwarzania sygnałów drganiowych.

2. OBIEKT BADAŃ

Badania prowadzono na stanowisku pracującym w układzie mocy krążącej (rys. 1) [1]. Parametry badanej przekładni o zębach prostych były następujące: liczba zębów zębnika - 16, liczba zębów koła 24, szerokość kół 20 mm, moduł normalny 4,5 mm, współczynnik przesunięcia zarysu zębnika 0,864, współczynnik przesunięcia zarysu koła -0,5, odległość osi 91,5 mm. Wykorzystując wibrometr laserowy Ometron VH300+, mierzono prędkości drgań poprzecznych wału koła w kierunku działania siły międzyzębnej. Przy wykorzystaniu analizatora SigLab 50-21 i czujników optoelektronicznych rejestrowano również synchronicznie sygnały odniesienia, zgodne z obrotami wałów. W trakcie badań utrzymywano temperaturę oleju w przekładni na poziomie $44 \pm 2^\circ\text{C}$.

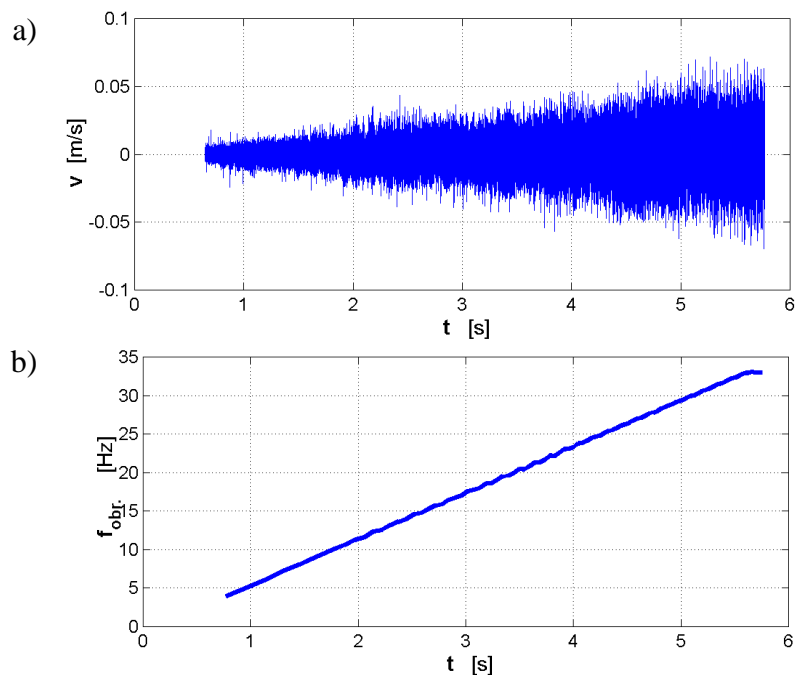


Rys. 1. Stanowisko badawcze i laserowy przetwornik prędkości drgań
Fig. 1. The circulating power test rig and laser vibrometer

3. WYNIKI BADAŃ I ANALIZA WYNIKÓW

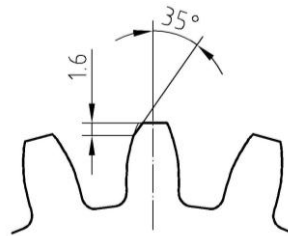
Na rys. 2a przedstawiono sygnał prędkości drgań poprzecznych wału koła, zarejestrowany w przypadku zwiększania prędkości obrotowej wałów przekładni (rys.1b) z uszkodzonym

kołem zębatym. Podczas rejestracji przedstawionego sygnału przekładnia była obciążona momentem $M_1 = 209$ [Nm] ($Q = 3,9$ MPa) i pracowała jako reduktor. W sygnale tym występują różne lokalne wzrosty amplitudy prędkości drgań jednakże na ich podstawie jest stosunkowo trudno wnioskować o lokalnym uszkodzeniu koła zębatego przedstawionym na rysunku 3.



Rys. 2. Zmiany prędkości drgań poprzecznych wału koła (a) i jego częstotliwości obrotowej (b), zarejestrowane w przypadku przekładni z uszkodzonym kołem zębatym

Fig. 2. Change of gear shaft transverse vibration velocity (a) and gear shaft rotation frequency (b) recorded for damaged gear

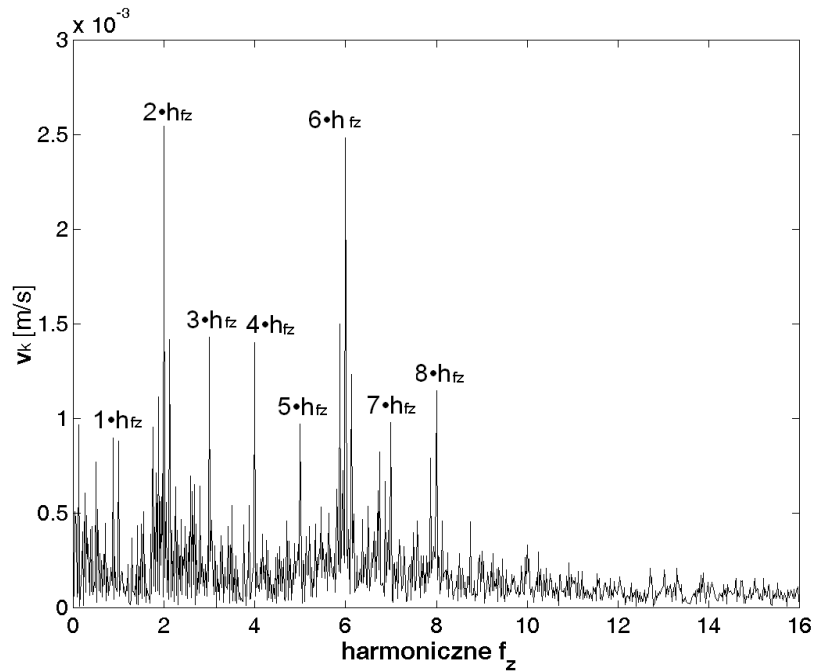


Rys. 3. Symulowane wykruszenie wierzchołka zęba koła

Fig. 3. Simulated chipping of gear tooth

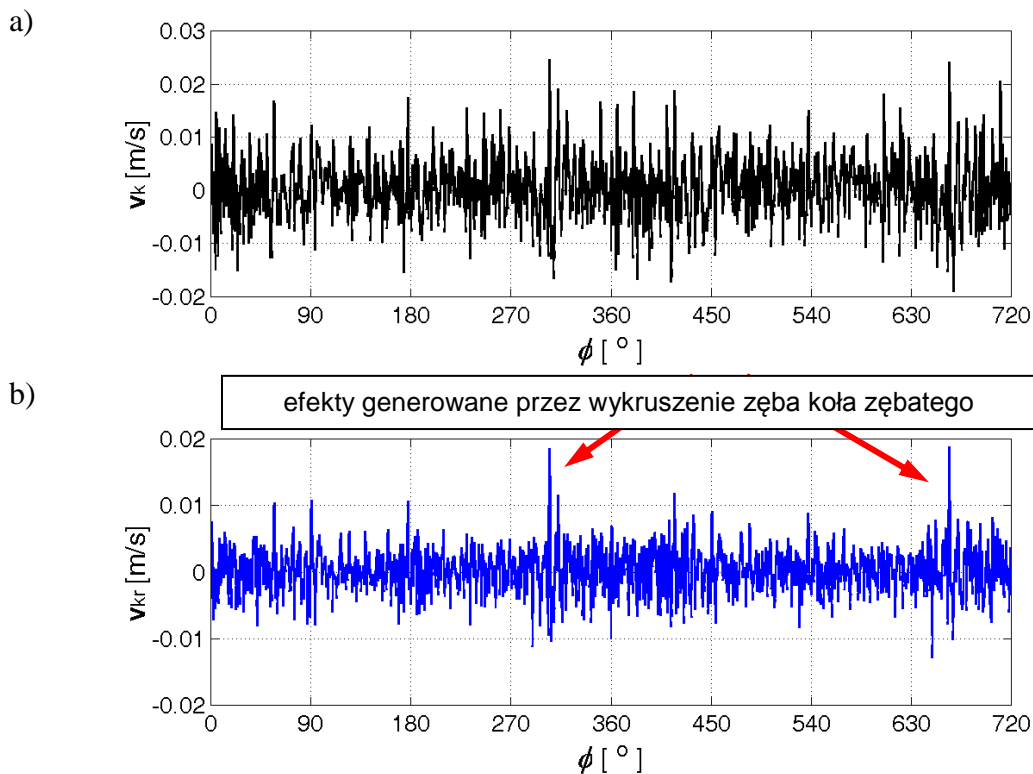
Z powyższego powodu, korzystając z procedury liniowej interpolacji [13], przepróbkowano sygnał drganiowy tak, aby uzyskać stałą liczbę próbek dla każdego obrotu koła o podziałkę. W analizowanym przypadku wynosiła ona 42. Na podstawie sygnału mającego stałą liczbę próbek na kąt obrotu o podziałkę koła, uzyskano sygnał uśredniony okresem powtarzania skojarzeń tych samych zębów zębnika i koła. Na rys. 4 przedstawiono pseudowidmo tego sygnału, w którym na osi odciętych występują kolejne harmoniczne częstotliwości zazębienia. Na podstawie tak uzyskanego pseudowidma możliwe jest uzyskanie sygnałów reszkowego i różnicowego tak jak w przypadku stałej prędkości obrotowej wałów przekładni [1, 5, 14, 15]. Na rys. 5 przedstawiono (uzyskany na podstawie sygnału przedstawionego na rys. 2a) sygnał uśredniony okresem powtarzania skojarzeń tych samych zębów zębnika i koła (rys. 5a) oraz sygnał różnicowy (rys. 5b). Drugi z wymienionych sygnałów jest znacznie łatwiejszy w interpretacji diagnostycznej, ponieważ w

zakresie kąta obrotu koła, przy którym uszkodzony ząb koła współpracuje z zębem zębniaka, występuje znaczący lokalny wzrost amplitudy prędkości drgań.



Rys. 4. Pseudowidmo uzyskane na podstawie sygnału uśrednionego okresem powtarzania skojarzeń tych samych zębów zębniaka i koła

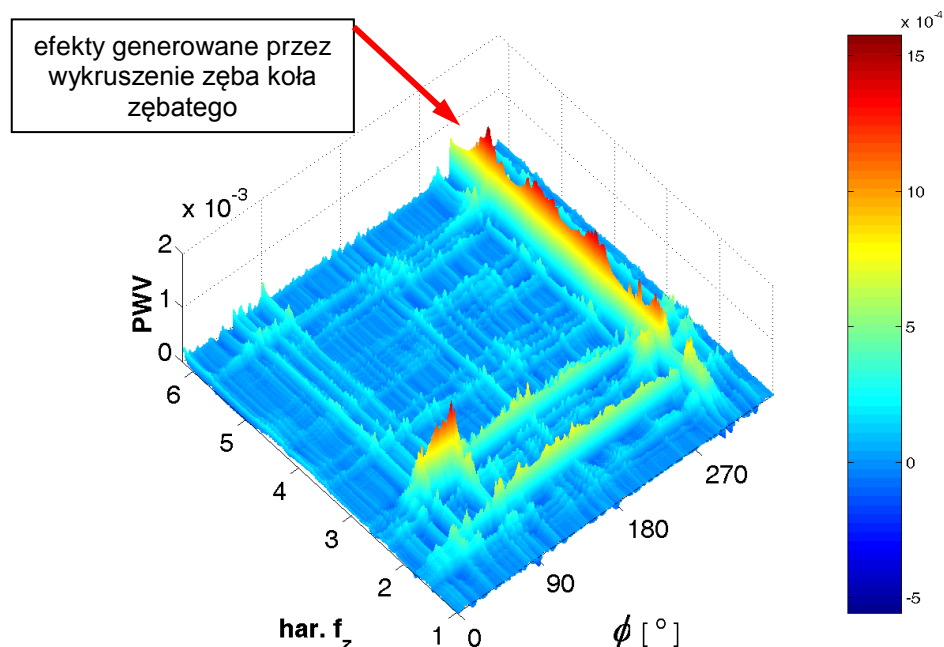
Fig. 4. Pseudospectrum of gear shaft transverse vibration velocity averaged in time domain by contact repetition period of the same the teeth of pinion and gear



Rys. 5. Sygnał uśredniony okresem powtarzania skojarzeń tych samych zębów zębniaka i koła (a), sygnał różnicowy (b)

Fig. 5. Time signal averaged by contact repetition period of the same teeth of pinion and gear (a), differential signal (b)

Na rys. 6 przedstawiono pseudorozkład Wignera-Ville'a [1, 2, 15], w którym osi częstotliwości odpowiadają kolejne harmoniczne częstotliwości zazębienia, a osi czasu odpowiada kąt obrotu diagnozowanego koła zębatego. Uzyskano ten rozkład na podstawie sygnału różnicowego (rys. 5a) uśrednionego okresem obrotu diagnozowanego koła zębatego. Strzałką wskazano lokalne maksimum pochodzące od uszkodzenia koła zębatego, które znacząco dominuje w zakresie od trzeciej do szóstej harmonicznej częstotliwości zazębienia.



Rys. 6. Pseudorozkład Wignera-Ville'a sygnału resztkowego, uzyskanego w przypadku zwiększania prędkości obrotowej wałów przekładni

Fig. 6. The pseudo-Wigner-Ville distribution of differential signal obtained during acceleration of gear shafts

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz sformułowano następujące wnioski:

- Przy zastosowaniu metody liniowej interpolacji w przypadku przekładni pracującej ze zmienną w czasie prędkością obrotową wałów możliwe jest uzyskanie użytecznych diagnostycznie sygnałów resztkowego i różnicowego.
- Na podstawie wyników badań doświadczalnych można stwierdzić, że przedstawiony algorytm przetwarzania sygnałów drganiowych obejmujący między innymi, interpolację zarejestrowanego sygnału oraz analizę sygnału różnicowego jest przydatny do wykrywania wykruszenia wierzchołka zęba koła zębatego. Jego użyteczność potwierdzono również w przypadku zmniejszania prędkości obrotowej kół zębatych.

Bibliografia

1. Łazarz B., Wojnar G., Czech P.: Wibrometria laserowa i modelowanie – narzędzia współczesnej diagnostyki przekładni zębatych. Wyd. PIB, Katowice-Radom 2007.
2. 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* No. 15(6), 2001 p. 1091-1107.
3. Bartelmus W., Zimroz R.: Vibration condition monitoring of planetary gearbox under varying external load, *Mechanical Systems and Signal Processing* No. 23, 2009 p. 246–257.
4. Zawisza M.: Wykorzystanie informacji zawartych w sygnale wibroakustycznym do oceny prawdopodobieństwa wystąpienia awarii w przekładni zębatej. Rozprawa doktorska, Wydział SIMR, Politechnika Warszawska, Warszawa 2003.
5. Łazarz B., Wojnar G.: Detection of early stages of pinion tooth chipping in transmission gear. *Machine Dynamics Problems* vol. 27, No. 3, 2003, p. 23-34.
6. Wojnar G.: Wykrywanie uszkodzeń kół zębatych wybranymi metodami przetwarzania sygnałów drganiowych. Rozprawa doktorska, Wydział Transportu, Politechnika Śląska Gliwice 2004 r.
7. 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.
8. Stander C. J., Heyns P. S.: Instantaneous angular speed monitoring of gearboxes under non-cyclic stationary load conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing* No. 19, 2005, p. 817-835.
9. Stander C. J., Heyns P. S.: Transmission path phase compensation for gear monitoring under fluctuating load conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing* No. 20 (2006) 1511-1522.
10. Meltzer G., Ivanov Yu. Ye.: Fault detection in gear drives with non-stationary rotational speed - part I: The time-frequency approach. *Mechanical Systems and Signal Processing* No. 17 (5) (2003) 1033–1047.
11. Lebold M., McClintic K., Campbell R., Byington C., Maynard K.: Review of vibration analysis methods for gearbox diagnostics and prognostics. 54th Meeting of Society for Machinery Failure Prevention Technology, Virginia Beach, VA, May 1-4, 2000, p. 623÷634.
12. Adamczyk J., Krzyworzeka P., Cioch W.: Dynamiczna redukcja niestacjonarności sygnału drganiowego maszyn wirnikowych. XXIX Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, 2002, s. 9÷18.
13. The MathWorks: Signal Processing Toolbox for Use with Matlab, Version 5. The MathWorks, Inc., 2001.
14. 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.
15. Wilk A., Łazarz B., Madej H., Wojnar G.: Metody wczesnego wykrywania lokalnych uszkodzeń kół zębatych. XXIX Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 04-09.03.2002 r., s. 345-354.

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

Część wyników uzyskano w ramach realizacji pracy BW – 488/RT2/2010.