

Grzegorz WOJNAR

WYKORZYSTANIE SYGNAŁU PRĘDKOŚCI DRGAŃ KĄTOWYCH WAŁU PRZEKŁADNI DO WYKRYWANIA USZKODZEŃ KÓŁ ZĘBATYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę diagnozowania wykruszenia wierzchołka zęba koła, bazującą na analizie mierzonych bezkontaktowo sygnałów prędkości drgań poprzecznych i kątowych wałów przekładni. Do analizy zarejestrowanych sygnałów wykorzystano ciągłą transformatę falkową.

USING OF TORSIONAL VIBRATIONS VELOCITY FOR THE DETECTION OF TOOTHED WHEELS' FAULT

Summary. The paper presents a method of tooth chipping diagnostics. The method based on the noncontact measure of torsional and transverse vibrations velocity of gear shaft. Recorded signals were analysed with the use of continuous wavelet transform.

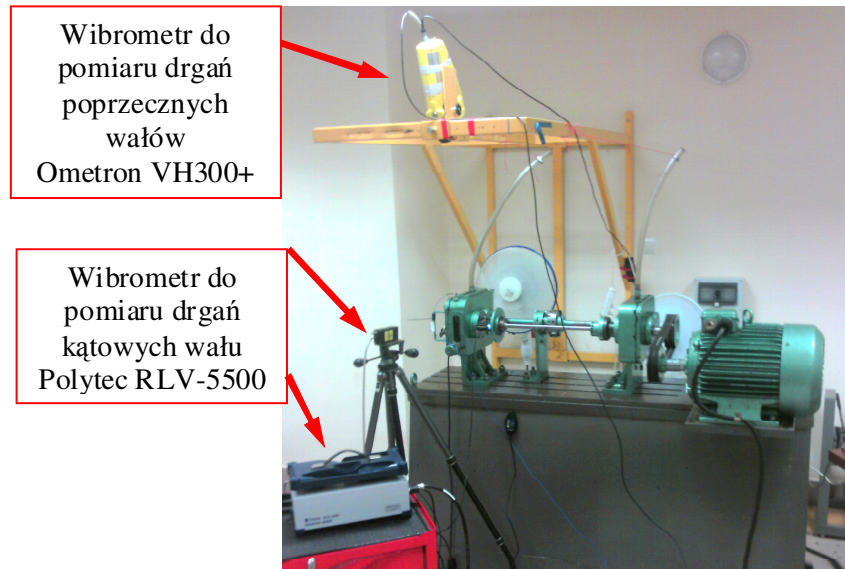
1. WSTĘP

Ze względu na powszechne wykorzystanie przekładni zębatych w układach przeniesienia napędu wiele ośrodków naukowych na całym świecie zajmuje się doskonaleniem metod analizy sygnałów drganiowych, wykorzystywanych w procesie diagnozowania tych obiektów [2-10]. Oprócz sygnałów przyspieszeń drgań obudowy i prędkości drgań poprzecznych wałów przekładni [7, 8] do wykrywania uszkodzeń kół zębatych z powodzeniem są wykorzystywane sygnały przyspieszeń drgań kątowych kół zębatych [10]. W tym przypadku wymagane jest jednak stosowanie zawodnych, mechanicznych układów przesyłania mierzonego sygnału lub kosztownych, bezprzewodowych sposobów przesyłania sygnałów. Ponadto, pomiar przyspieszeń drgań kątowych koła zębatego wymaga zamontowania na diagnozowanym kole przetwornika przyspieszeń drgań. Powoduje to, iż przedstawiona metoda nie jest bezinwazyjna. Rozwój wibrometrii laserowej umożliwił łatwy, bezkontaktowy pomiar sygnału prędkości drgań kątowych wałów przekładni. W niniejszym artykule zostaną przeprowadzone badania doświadczalne, mające na celu wykorzystanie tego sygnału w diagnostyce przekładni zębatych.

2. OBIEKT BADAŃ

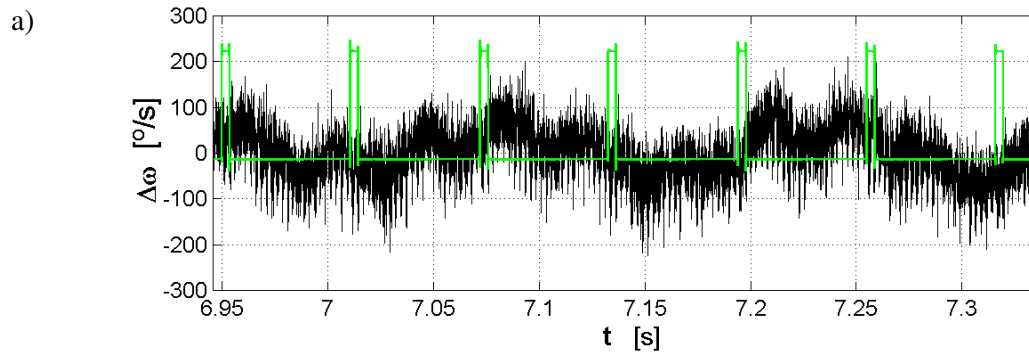
Badania prowadzono na stanowisku pracującym w układzie mocy krążącej (rys. 1) [9]. Parametry przekładni badanej o zębach prostych były następujące: liczba zębów zębownika 16, liczba zębów koła 24, szerokość kół 20 [mm], moduł normalny 4,5 [mm], współczynnik

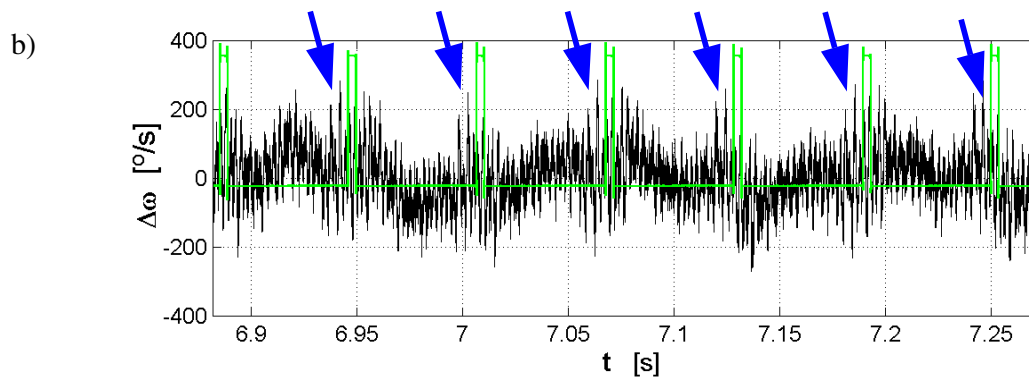
przesunięcia zarysu zębniaka 0,864, współczynnik przesunięcia zarysu koła -0,5, odległość osi 91,5 [mm]. W trakcie badań badana przekładnia pracowała jako reduktor. Wykorzystując wibrometr laserowy RLV-5500, firmy Polytec mierzono prędkości drgań kątowych wałów oraz mierzono prędkości drgań poprzecznych 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 laserowe przetworniki prędkości drgań
Fig. 1. The circulating power test rig and laser vibrometers

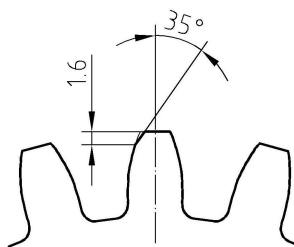
Na rys. 1 przedstawiono sygnały prędkości drgań kątowych wału koła, zarejestrowane w przypadku nieuszkodzonej (a) i uszkodzonej (b) przekładni, pracującej z prędkością obrotową zębniaka około 1500 obr/min i obciążonej momentem $M_1 = 153$ [Nm] ($Q = 2,86$ MPa). Sygnały te zawierają zarówno składowe wysokoczęstotliwościowe, związane z pracą ząbienia, jak i składową niskoczęstotliwościową, związaną ze zmianami prędkości obrotowej wałów. W sygnale przedstawionym na rys. 2b strzałkami wskazano efekty powodowane przez wykruszenie wierzchołka koła (rys. 3) i występujące przed zboczem narastającym impulsu związanego z obrotami uszkodzonego koła.





Rys. 2. Sygnały prędkości drgań kątowych zarejestrowane w przypadkach: a) przekładni bez uszkodzeń, b) przekładni z uszkodzonym kołem zębatym

Fig. 2. Signals of torsional vibrations velocity: a) gear without defects, b) gear with defect of tooth wheel



Rys. 3. Symulowane wykruszenie wierzchołka zęba koła

Fig. 3. Simulated chipping of gear tooth

Ze względu na wiele zalet, w licznych pracach [1, 2, 3, 8, 10] do wykrywania lokalnych uszkodzeń kół zębatych i łożysk stosuje się ciągłą transformatę falkową (CWT), zdefiniowaną następująco:

$$C(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

gdzie:

a - współczynnik skali, $a \in \mathbb{R}^+ - \{0\}$,

b - parametr przesunięcia w dziedzinie czasu $b \in \mathbb{R}$,

ψ - funkcja analizująca (falka bazowa).

W przypadku sygnałów dyskretnych $x(n)$, gdy:

$$t = (n-1) \cdot \Delta t, \quad (2)$$

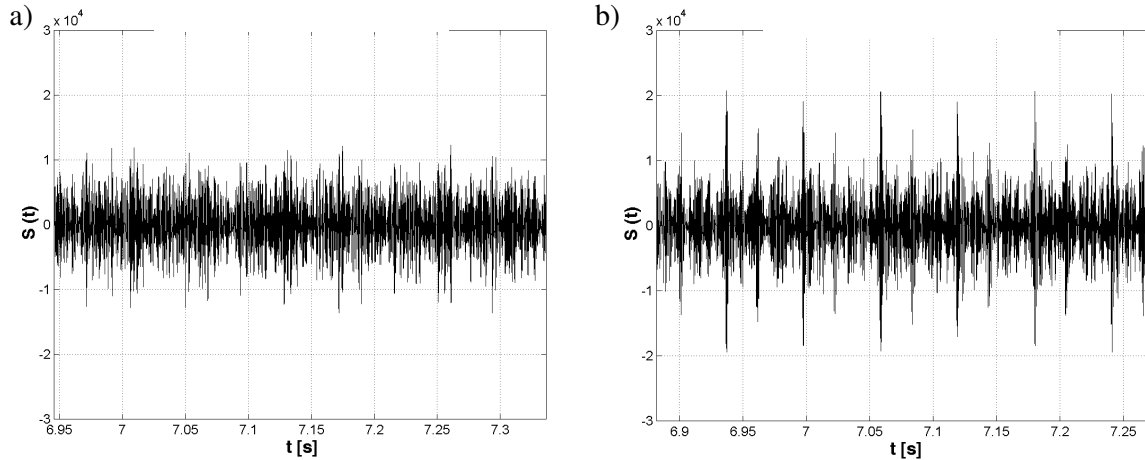
$n=1, 2, 3, \dots, N$; N jest liczbą próbek; Δt jest okresem próbkowania,

$a=2^l$, $b=k \cdot 2^l$, natomiast $C(a,b) = C(l,k)$.

W celu łatwiejszej interpretacji uzyskanych wyników, dokonano sumowania wartości współczynników $C_{a,b}$, zgodnie z zależnością:

$$S(t) = \sum_{l=A}^B C(l,k). \quad (3)$$

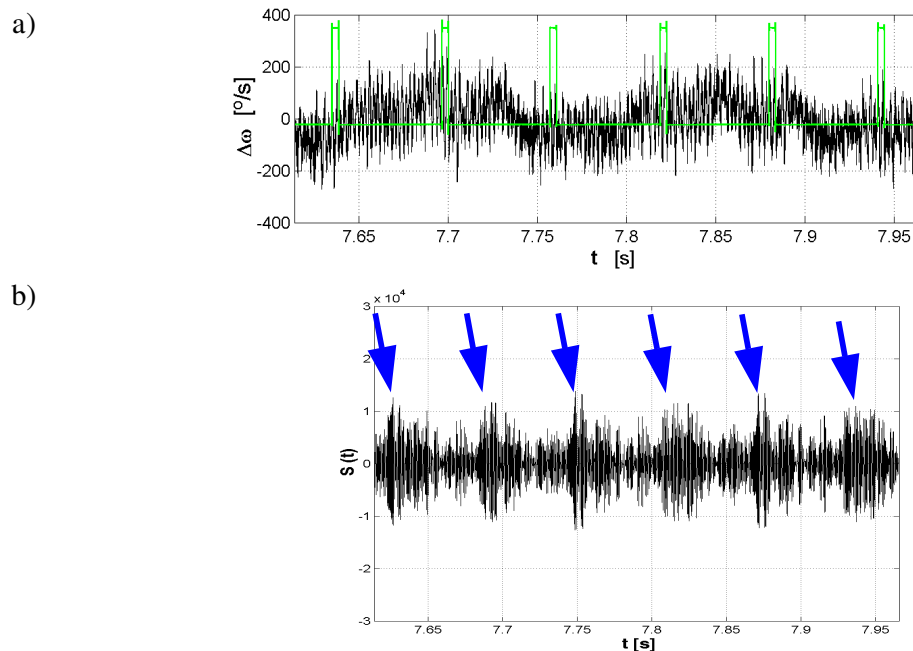
Sumowania (rys. 4) dokonywano w przedziale skali $(A \div B)$, w którym wartości współczynników $C_{a,b}$ dominowały w zakresie kąta obrotu, odpowiadającego współpracy uszkodzonego zęba.



Rys. 4. Suma współczynników $C_{a,b}$: a) przekładni bez uszkodzeń, b) przekładnia z uszkodzonym kołem zębatym; falka Morleta, $A=50$, $B=100$

Fig. 4. Sum of coefficient $C_{a,b}$: a) gear without defects, b) gear with defect of tooth wheel; Morlet wavelet, $A=50$, $B=100$

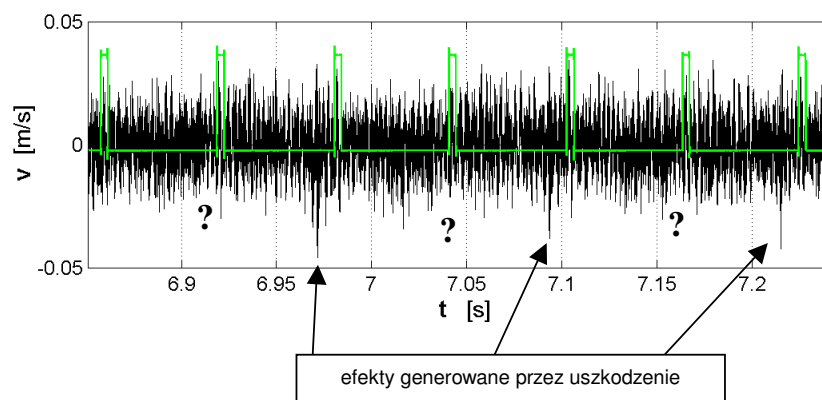
Zwiększanie obciążenia przekładni powoduje wzrost ugięcia pary zębów, będących w przyporze. Z tego powodu w przypadku pewnych wartości wykruszenia wierzchołka zęba koła jego wejście w przypór może odbywać się łagodniej niż w przypadku mniejszego obciążenia. Dlatego sygnały drganiowe i uzyskane na ich podstawie sumy współczynników $C_{a,b}$, otrzymane w przypadku pracy przekładni z tą samą, co powyżej prędkości obrotową i obciążeniem momentem $M_1=209$ [Nm] ($Q=3,9$ MPa) nie są już tak jednoznaczne w interpretacji (rys. 5-7)



Rys. 5. Sygnał prędkości drgań kątowych, zarejestrowany w przypadku przekładni z uszkodzonym kołem zębatym $M_1=209$ [Nm] (a) i suma współczynników $C_{a,b}$ (b); falka Morleta, $A=70$, $B=100$

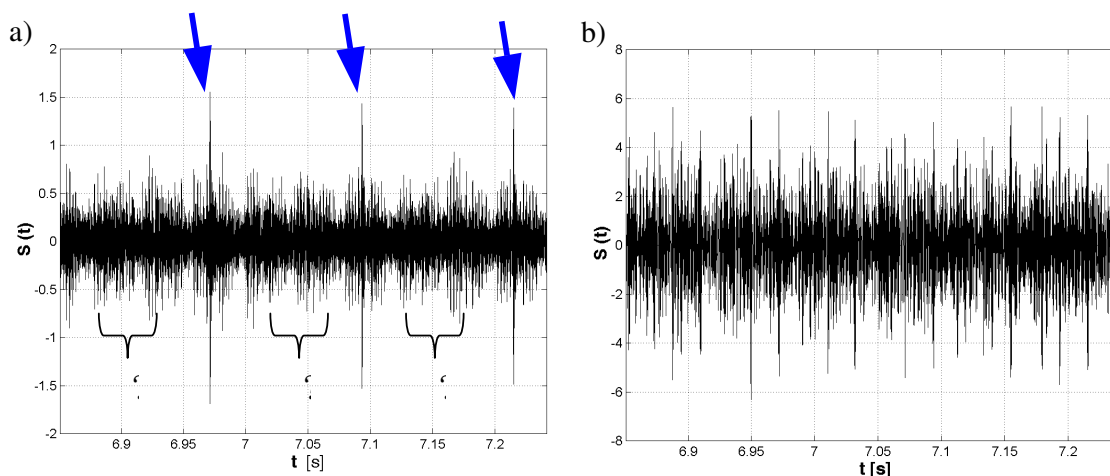
Fig. 5. Signals of torsional vibrations velocity of gear with defect of tooth wheel - $M_1=209$ [Nm] (a), sum of coefficient $C_{a,b}$; Morlet wavelet, $A=70$, $B=100$

W przypadku sygnału prędkości drgań poprzecznych wału koła, zarejestrowanych w kierunku działania siły międzyzębnej widoczne są chwilowe wzrosty amplitudy, spowodowane uszkodzeniem, jednakże występują one tylko co drugi obrót uszkodzonego koła. Jest to spowodowane tym, że uszkodzony ząb koła współpracuje cyklicznie, co obrót z zębami zębnika obciążonymi różnymi wartościami odchyłek wykonania. W rozkładzie współczynników $C_{a,b}$ efekty powodowane przez wymienione uszkodzenie występowały w dwóch zakresach skali i dlatego sumowanie współczynników $C_{a,b}$ wykonano w tych dwóch zakresach (rys. 7). Bardziej jednoznaczne wyniki uzyskano, w przypadku gdy wymieniona suma była obliczana na podstawie niższych wartości skali (rys. 7a), jednakże podobnie jak w przypadku zarejestrowanego sygnału (rys. 6) wyraźny impuls, pochodzący od uszkodzenia występował co dwa obroty uszkodzonego koła.



Rys. 6. Sygnał prędkości drgań poprzecznych wału koła zarejestrowany w przypadku przekładni z uszkodzonym kołem zębatym $M_1 = 209$ [Nm]

Fig. 6. Transverse vibrations velocity of gear with defect of tooth wheel $M_1 = 209$ [Nm]



Rys. 7. Suma współczynników $C_{a,b}$: a) $A=10$, $B=30$, b) $A=50$, $B=100$; falka Morleta

Fig. 7. Sum of coefficient $C_{a,b}$: a) $A=10$, $B=30$, b) $A=50$, $B=100$, Morlet wavelet

3. WNIOSKI

- Na podstawie przeprowadzonych badań i wykonanych analiz można stwierdzić, że:
- Zarówno sygnały prędkości drgań poprzecznych, jak i kątowych wałów przekładni zawierają informacje o występujących lokalnych uszkodzeniach kół zębatych.

- Sygnały prędkości drgań poprzecznych, a także kątowych wałów przekładni mogą być równolegle rejestrowane, a ich analiza zwiększa pewność diagnozy, zwłaszcza w przypadku, gdy występują uszkodzenia innych elementów przekładni np. łożyskowania.
- Celem efektywnego diagnozowania lokalnych uszkodzeń kół zębatach przedstawione w artykule sygnały należy analizować stosując zawansowane metody przetwarzania sygnałów drganiowych.

Bibliografia

1. Batko W., Dąbrowski Z., Engel Z. Kiciński J. Weyna S.: Nowoczesne metody badania procesów wibroakustycznych. PIB Radom 2005.
2. Baydar N., Ball A.: Detection of Gear Failures Via Vibration and Acoustic Signals Using Wavelet Transform. Mechanical Systems and Signal Processing (2003) 17(4), s. 787-804
3. Dalpiaz G., Rivola A., Rubini R.: Effectiveness and Sensitivity of Vibration Processing Techniques for Local Fault Detection in Gears. Mechanical Systems and Signal Processing (2000) 14(3), s. 387-412.
4. Dąbrowski Z., Dziurdź J., Pakowski R.: The impact of varying in time misalignment errors on dynamic properties of machine, Materiały VIII Polsko-Francuskiego Seminarium Mechaniki, Warszawa 2001.
5. Decker H. J.: Effects on Diagnostic Parameter After Removing Additional Synchronous Gear Meshes. NASA/TM – 2003 – 212312 ARL- TR – 2933; 2003.
6. Dziurdź J.: Identyfikacja modelu na potrzeby diagnostyki technicznej. Przegląd Mechaniczny 11/2007 s. 47.
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. Łazarz B., Wojnar G.: Detection of Early Stages of Pinion Tooth Chipping in Transmission Gear. Machine Dynamics Problems 2003, vol. 27, no 3, s. 23-34.
9. Wilk A., Łazarz B., Madej H, Wojnar G.: Metody wczesnego wykrywania lokalnych uszkodzeń kół zębatach. XXIX Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 04.03 - 09.03.2002 r., s.345-354.
10. Zheng H., Li Z., Chen X.: Gear Fault Diagnosis Based on Continuous Wavelet Transform. Mechanical Systems and Signal Processing (2002) 14(2-3), s. 447-457.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

Część wyników uzyskano w ramach realizacji pracy BW – 479/RT2/2009.