

WYKORZYSTANIE ANALIZY FALKOWEJ W DIAGNOZOWANIU LOKALNYCH USZKODZEŃ KÓŁ ZĘBATYCH

Grzegorz WOJNAR, Bogusław ŁAZARZ

Politechnika Śląska Wydział Transportu
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

e-mail: grzegwoj@polsl.katowice.pl ; lazarz@polsl.katowice.pl ; tel: (032) 6034108, 6034323

Streszczenie

W referacie przedstawiono wykorzystanie ciągłej transformaty falkowej w diagnozowaniu lokalnych uszkodzeń kół zębatach przekładni. Przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych diagnostyczne eksperymenty czynne polegające na pomiarach drgań poprzecznych wałów przekładni z zamodelowanymi lokalnymi uszkodzeniami kół zębatach takimi jak wykruszenie wierzchołka i pęknięcie u podstawy zęba. Wyniki pomiarów pozwoliły wybrać najbardziej przydatne do celów diagnostycznych falki bazowe i zaproponować nową miarę przydatną do wykrywania uszkodzeń elementów przekładni wykorzystującą wyniki analizy falkowej.

Abstract

This paper presents carried out laboratory tests, which were aimed at detecting early stages of chipping of the pinion tooth tip and tooth crack by measurement and analysis of transverse vibration speed of the transmission gear shafts. During co-operation of defected gear wheels the local unsteadiness appear in the generated vibration signal and therefore a complex continuous wavelet transform has been employed to its processing. It was selected a group of wavelets useful in diagnostics of pinion tooth chipping and tooth crack as well as the measure for tooth damage was proposed.

Keywords: Gear, wavelet analysis, tooth damage, laser measurements

1. WPROWADZENIE

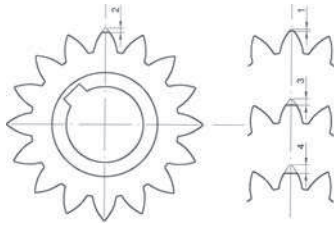
W przypadkach lokalnych uszkodzeń kół zębatach takich jak: wykruszenie wierzchołka lub pęknięcie u podstawy zęba, w początkowej ich fazie nie są zauważalne zmiany ogólnego poziomu drgań a uszkodzenie wywołuje krótkotrwałe impulsy siły przyspieszające jego rozwój i prowadzące do awarii. Wykrywanie tego typu uszkodzeń we wczesnej fazie jest bardzo trudne. Obiecujące wyniki daje w tym przypadku wykorzystanie laserowego bezkontaktowego pomiaru prędkości drgań poprzecznych wirujących wałów przekładni połączone z zaawansowanymi metodami przetwarzania sygnałów takimi jak rozkład Wignera Ville'a i ciągła transformata falkowa. W przypadku pomiaru prędkości drgań wału przekładni droga sygnału generowanego przez uszkodzenie koła zębatego lub łożyska ulega skróceniu i zostaje wyeliminowany wpływ złożonej transmitancji układu łożysko-korpus przekładni [5]. W referacie przedstawiono próbę wykorzystania sygnału prędkości drgań poprzecznych wału przekładni zębatej do wykrywania wykruszenia i pęknięcia u podstawy zęba. Do analizy zarejestrowanych sygnałów wykorzystano ciągłą zespoloną transformatę falkową (CCWT).

2. BADANIE PRZEKŁADNI Z USZKODZONYMI KOŁAMI

Celem sprawdzenia przydatności ciągłej zespolonej transformaty falkowej (CCWT) do wykrywania wykruszenia wierzchołka lub pęknięcia u podstawy zęba przeprowadzono badania doświadczalne i symulacyjne. Obiektem badań była przekładnia badana stanowiska pracującego w układzie mocy krążącej [3], w której zamontowany był komplet kół: o następujących parametrach geometrycznych:

- odległość osi 91,5 mm,
- szerokość zazębienia 20 mm,
- moduł 4.5 mm,
- liczba zębów zębniaka $z_1=16$,
- liczba zębów koła $z_2=24$,
- współczynnik przesunięcia zarysu zębniaka $x_1 = 0,8635$,
- współczynnik przesunięcia zarysu koła $x_2 = -0,5$,
- kąt pochylenia linii zęba $\beta = 0^\circ$.

Wykruszenie zęba zębniaka modelowano skracając ząb w kolejnych etapach, o 1 mm (rys. 1).



Rys. 1. Model koła z wykruszonym wierzchołkiem zęba (0, 1, 2, 3, 4 mm)

Skrócenie to spowodowało zmniejszenie czołowej liczby przyporu. do wartości przedstawionych w tabeli 1.

Tabela 1

Wpływ skrócenia zęba zębnika na wartość czołowej liczby przyporu

Wartość skrócenia [mm]	Długość odcinka przyporu [mm]	Względna długość odcinka przyporu [%]	ε_u	Podziałka zasadnicza [mm]
0	17,60506	100	1,33	13,278
1	16,03002	91,05348122	1,21	13,278
2	14,39671	81,77597804	1,08	13,278
3	12,69308	72,09904425	0,96	13,278
4	10,90272	61,92946801	0,82	13,278

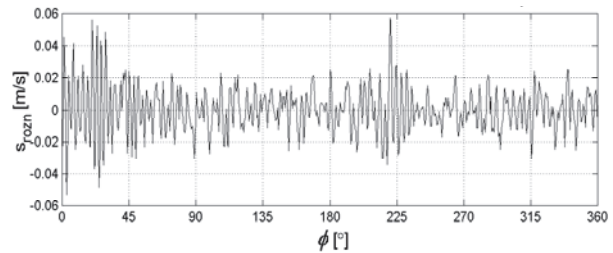
Podczas badań mających na celu wykrywanie wykruszenia wierzchołka zęba zębnika prędkość obrotowa zębnika wynosiła około 2700 obr/min, a moment obciążenia przekładni $M_2=207$ Nm, co odpowiadało obciążeniu jednostkowemu $Q=2,57$ MPa. Sygnał próbkowano z częstotliwością 25,6 kHz. Rejestrowano również synchronicznie sygnały odniesienia zgodne z obrotami wałów. Uszkodzony ząb zębnika współpracował z zębem koła w zakresie kąta obrotu wału Φ 200÷230° mierzonego od znacznika uśredniania. Na podstawie analizy pomiarów w różnych punktach i kierunkach pomiarowych stwierdzono, że najłatwiej można wykryć uszkodzenie koła zębatego dokonując pomiaru prędkości drgań poprzecznych wału w kierunku działania siły międzyzębnej.

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

W celu wykrycia lokalnego uszkodzenia koła zębatego zastosowano uśrednianie synchroniczne okresem obrotu zębnika, które pozwoliło usunąć składowe niezwiązane z obrotem zębnika i poprawiło stosunek sygnału do szumu. Celem zminimalizowania wpływu odchyłki położenia znacznika uśredniania, która wynosiła maksymalnie ± 2 próbki, przeprowadzono obliczeniową korektę jego położenia wykorzystując estymację opóźnienia czasowego pomiędzy kolejnymi zarejestrowanymi rekordami, przedstawioną w [6].

Na podstawie przebiegu czasowego uśrednionego sygnału prędkości drgań poprzecznych wału zębnika trudno było stwierdzić czy nastąpiło wykruszenie zęba. Największa energia sygnału występowała w pasmach częstotliwości zazębienia f_z i jej harmonicznym. Składowe te maskują niskoenergetyczne zaburzenie spowodowane

uszkodzeniem [9]. Aby uwydatnić to zaburzenie wygenerowano sygnał różnicowy zgodnie z algorytmem przedstawionym w [7]. W sygnale tym (rysunek 2) nadal trudno było wyróżnić zaburzenie, które mogłoby pochodzić od uszkodzenia.



Rys. 2. Sygnał różnicowy prędkości drgań wału zębnika uśredniony okresem obrotu zębnika – wykruszenie zęba zębnika 2 mm

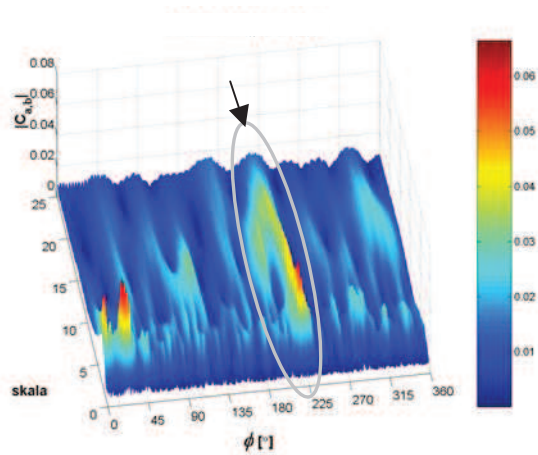
W ostatnich latach rozwijane są metody diagnostyki wykorzystujące analizę sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości (rozkład Wignera Ville'a – WV) lub czasu i skali proporcjonalnej do częstotliwości (ciągła transformata falkowa – CWT) [1,2,7] oraz metody oparte na sztucznej inteligencji. Transformata falkowa zapewnia automatyczne zawężenie okna przy analizie wysokich częstotliwości i jego poszerzenie dla niskich częstotliwości. Dlatego w niniejszej pracy do analizy sygnałów drganiowych pochodzących z przekładni zębatej wybrano ciągłą analizę falkową (CWT):

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

W przypadku sygnałów ciągłych współczynnik skali $a \in \mathbb{R}^+ - \{0\}$, parametr przesunięcia w dziedzinie czasu $b \in \mathbb{R}$. W przypadku sygnałów dyskretnych $x(n)$ gdy: $t=(n-1)\cdot\Delta t$, gdzie: $n=1,2,3,\dots,N$; N jest liczbą próbek; Δt jest okresem próbkowania: $a=2^j$, $b=k \cdot 2^l$ natomiast $C_f(a,b) = C(j,k)$.

Analizy prowadzono w systemie Matlab [8], który umożliwia wykorzystanie różnych falek bazowych. Zaproponowana w pracy [7] metoda pozwoliła na wytypowanie grupy falek bazowych szczególnie przydatnych do diagnozowania wykruszenia zęba zębnika takich jak: cGaus 2; cGaus 4; cGaus 5; cMorlet1 1,0; Frequency B-Spline 1-1-1,0; Shannon 2 3,0 oraz biorthogonal 3,5 i Meyer.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy rozkład modułu współczynników $C_{a,b}$ CCWT sygnału różnicowego prędkości drgań poprzecznych wału zębnika w funkcji skali i kąta obrotu zębnika będącego liniową funkcją czasu, w przypadku zastosowania falki cGaus 4. Zaburzenie w sygnale różnicowym spowodowane uszkodzeniem wywołuje wzrost modułu współczynników $C_{a,b}$ w obszarze zaznaczonym na rysunku 3.

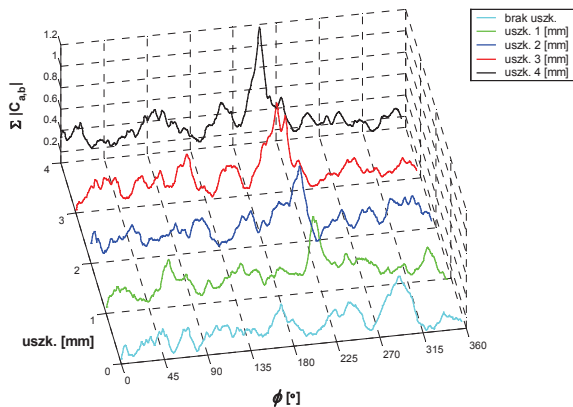


Rys. 3. Moduł współczynników $C_{a,b}$ CCWT – sygnał różnicowy w przypadku wykruszenia zęba zębniaka 2 mm – falka zespolona Gaus 4

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

$$s(\phi) = \sum_{j=A}^B |C(j,k)| \quad (2)$$

Sumowania tego dokonywano, w przedziale skali ($A \div B$), w którym wartości współczynników $C_{a,b}$ dominowały w zakresie kąta obrotu odpowiadającego współpracy uszkodzonego zęba. Na rysunku 4 przedstawiono sumy modułów współczynników $C_{a,b}$ CCWT sygnału różnicowego przy zastosowaniu falki cGaus4.



Rys. 4. Suma modułów współczynników $C_{a,b}$ CCWT w przypadku zastosowania falki cGaus 4 - sygnał różnicowy

W zakresie kąta obrotu odpowiadającego współpracy uszkodzonego zęba widoczne są wyraźne ekstrema rosnące wraz ze wzrostem uszkodzenia.

Celem dalszych analiz było znalezienie miary, proporcjonalnej do wielkości wykruszenia. Zaproponowano miarę M_w określaną z zależności:

$$M_w = \frac{S'_u}{S'_{z=0}} [1], \quad (3)$$

gdzie:

S'_u – największe lokalne maksimum w:

$$S'(\phi) = |S(\phi)| - \overline{|S(\phi)|}, \quad (4)$$

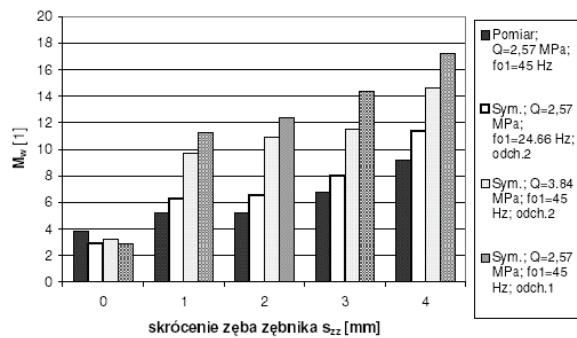
$\overline{|S(\phi)|}$ – wartość średnia w zakresie kąta obrotu wału zębniaka $0 \div 360^\circ$,

$S'_{z=0}$ – wartość średnia z z_i najwyższych lokalnych wartości maksymalnych $S'(\phi)$, w przedziale: $\phi \in (0^\circ, \phi_u - 0,5\phi_z) \cup (\phi_u + 0,5\phi_z, 360^\circ)$ dla kół bez uszkodzeń (nowych)

ϕ_u - kąt obrotu wału odpowiadający wystąpieniu S'_u ,

ϕ_z - kąt obrotu odpowiadający jednej podziałce zazębenia

W celu sprawdzenia wpływu obciążenia przekładni, prędkości obrotowej i wartości odchyłek wykonania kół na zmiany zaproponowanej miary uszkodzenia wykorzystano zidentyfikowany model dynamiczny przekładni zębatej w układzie napędowym [4], który pozwalał na uzyskanie wyników zgodnych z doświadczeniem i skrócenie czasu badań [5]. Na rysunku 5 przedstawiono zmiany zaproponowanej miary M_w w funkcji skrócenia zęba zębniaka, w przypadku zastosowania CCWT i falki Gaus4. Miara ta sygnalizuje pojawienie się nawet nieznacznego wykruszenia wynoszącego 1 mm - w przypadku falki cGaus 4 jest to wzrost M_w o około 30%, a w przypadku falki Shannon 2 3,0 wzrost M_w o około 60%. Podsumowując można stwierdzić, że zaproponowana miara jest wrażliwa na wczesne stadia wykruszenia.

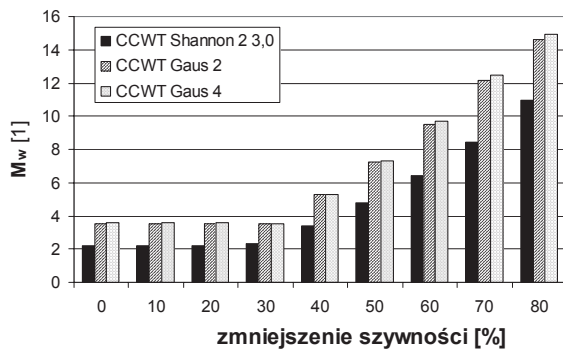


Rys. 5. Zmiany miary wykruszenia zęba M_w w funkcji głębokości wykruszenia w przypadku zastosowania CCWT i falki Gaus4 oraz różnych obciążeń przekładni, prędkości obrotowych i odchyłek wykonania kół (odch. 1 - $f_1 = -7 \mu\text{m}$; $f_2 = 5 \mu\text{m}$; $s_{1max} = s_{2max} = \pm 4,8 \mu\text{m}$; odch. 2 - $f_1 = 14 \mu\text{m}$; $f_2 = -10 \mu\text{m}$; $s_{1max} = s_{2max} = \pm 9,6 \mu\text{m}$)

Najłatwiej jest wykryć wykruszenie zęba zębniaka w przypadku przekładni z mniejszymi odchyłkami wykonania kół. Wzrost obciążenia przekładni powoduje większe ugięcie statyczne zębów a zatem maleją względne odchyłki wykonania kół zębatych

odniesione do ugięcia statycznego zęba i z tego powodu większa jest dynamika wzrostu miary M_w (rys. 5).

Podjęto również próbę zastosowania zaproponowanej miary M_w do wykrywania pęknięcia zęba, które modelowano poprzez zmniejszenie sztywności zazębienia w przypadku współpracy uszkodzonego zęba [3]. Na rysunku 6 przedstawiono zmiany M_w w przypadku zastosowania trzech różnych falek bazowych. Zaproponowana miara zaczyna wzrastać, gdy na skutek pęknięcia u podstawy zęba następuje zmniejszenie sztywności zazębienia o 40%. W przypadku zastosowanego obciążenia jednostkowego przekładni zmniejszenie sztywności zazębienia o 30% powoduje wzrost ugięcia statycznego zęba o około $6 \mu\text{m}$ a wartość ta jest mniejsza od występującej sumarycznej odchyłki wykonania kół i dlatego wykrycie uszkodzenia nie było możliwe.



Rys. 6. Wpływ falki bazowej na zmianę miary M_w - pęknięcie zęba koła, $f_{o1} \approx 45 \text{ Hz}$, $Q=2,57 \text{ MPa}$, odchyłki $f_1 = -7 \mu\text{m}$, $f_2 = +5 \mu\text{m}$; $s_{1\text{max}} = s_{2\text{max}} = \pm 4,8 \mu\text{m}$

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych i symulacyjnych można stwierdzić iż:

- ciągła zespolona transformata falkowa szczególnie w przypadku zastosowania odpowiednich falek bazowych jest dobrym narzędziem do wykrywania lokalnych uszkodzeń kół zębatych takich jak: wykruszenie wierzchołka zęba koła lub pęknięcie u podstawy zęba
- zaproponowana miara M_w jest wrażliwa na wczesne stadia wykruszenia i pęknięcia a jej czułość wzrasta w przypadku gdy maleją względne wartości odchyłek wykonania odniesionych do ugięcia statycznego zęba.

LITERATURA

- [1] Batko W., Ziółko M.: Zastosowanie teorii falek w diagnostyce technicznej. AGH Kraków 2002.
- [2] Dalpiaz G., Rivola A., Rubini R.: Dynamic Modeling of Gear System for Condition Monitoring and Diagnostics. Kongres

Diagnostyki Technicznej, Gdańsk, 1996, (2), str. 185-192.

- [3] Dąbrowski Z., Radkowski S., Wilk A.: Dynamika przekładni zębatych. Warszawa-Katowice-Radom 2000.
- [4] Łazarz B.: Zidentyfikowany model dynamiczny przekładni zębatej w układzie napędowym jako podstawa projektowania. WiZP I.T.E w Radomiu, Katowice-Radom 2001.
- [5] Łazarz B., Wojnar G.: Modelowanie lokalnych uszkodzeń łożysk tocznych w przekładni zębatej do celów diagnostycznych. Materiały V Krajowej Konferencji "Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów" DIAG' 2003.
- [6] Łazarz B., Wojnar G.: Uśrednianie sygnału drganiowego przekładni zębatej z wykorzystaniem różnych metod estymacji opóźnienia czasowego. DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 2004 r.
- [7] Łazarz B., Wojnar G.: Detection of early stages of pinion tooth chipping in transmission gear. Machine Dynamics Problems 2003, Vol. 27, str. 23-34.
- [8] Misiti M., Misiti Y., Oppenheim G., Poggi J. M.: „Wavelet toolbox for use with Matlab” Version 2, Copyright 2000 by The Math Works, Inc.
- [9] Radkowski S.: Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych, Warszawa-Radom 2002.



Mgr inż. Grzegorz WOJNAR obecnie jest doktorantem na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej. Specjalizuje się w zakresie modelowania procesów dynamicznych, wspomagania komputerowego procesu projektowania oraz metod przetwarzania sygnałów.



Dr hab. inż. Bogusław ŁAZARZ jest pracownikiem naukowym Katedry Budowy Pojazdów Samochodowych Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej. Specjalizuje się w zakresie diagnostyki wibroakustycznej przekładni zębatych, modelowania i wspomaganego komputerowo projektowania układów przeniesienia

napędu z przekładnią zębatą oraz metod przetwarzania sygnałów. Jest autorem i współautorem ok. 85 artykułów opublikowanych w czasopiśmie oraz materiałach konferencyjnych. Członek Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej i Sekcji Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn