

Tomasz FIGLUS

## ZASTOSOWANIE DEKOMPOZYCJI SYGNAŁU DRGANIOWEGO DO DIAGNOZOWANIA USZKODZEŃ ZAZĘBIENIA PRZEKŁADNI

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono badania, których celem jest zastosowanie dekompozycji sygnału drganiowego do diagnozowania uszkodzeń kół przekładni zębatej. Pomiary sygnałów drganiowych wykonano podczas eksperymentów czynnych realizowanych na stanowiska mocy krążącej FZG.

Analizy sygnałów wykonano przy użyciu paczkowej transformaty falkowej sygnału jednowymiarowego (ang. Wavelet Packed 1-Dimensional) stosując proponowany algorytm wyboru sygnału, do diagnozowania uszkodzeń zazębienia.

## THE USE OF DECOMPOSITION OF VIBRATION SIGNAL IN DIAGNOSING DAMAGES OF TOOTH GEAR

**Summary.** The paper presents investigation, whose aim is the use of decomposition of vibration signal in detection of damages of wheels of toothed gear. The measurements of vibration signals were executed during active experiments on the examined transmission (gear).

The analyses of signals were executed using the one - dimensional wavelet packed of signal applying then the proposed algorithm of choice of signal in analyses.

### 1. WSTĘP

Diagnostyka uszkodzeń przekładni zębatach należy od lat do ważnym zagadnień podejmowanych w pracach wielu ośrodków badawczych. Szczególnego znaczenia nabierają badania możliwości wykrywania wczesnych przypadków uszkodzeń, czy też zużywania się elementów przekładni przemysłowych. Opracowane dotychczas metody pomiarów i przetwarzania sygnałów drganiowych umożliwiają identyfikację występujących zmian w elementach przekładni, jednak przy bardzo wielu ograniczeniach. Do najważniejszych zaliczyć należy stacjonarność warunków pracy urządzeń podczas przeprowadzenia pomiaru.

Do analiz stosować można metody wykorzystujące przetwarzanie sygnałów w dziedzinie czasu - [1,2], częstotliwości - [2,3], jak też w dziedzinie czasu i częstotliwości - [2,4]. W procesie przetwarzania sygnałów stosuje się jednocześnie różne metody filtracji, m. in. filtry grzebieniowe i różnicowe. Zastosowanie praktyczne proponowanych metod wymaga przeprowadzania skomplikowanych operacji matematycznych wymagających wysokiej klasy sprzętu komputerowego i odpowiedniego oprogramowania.

Przedstawione kwestie powodują, iż poszukuje się coraz nowszych metod obróbki sygnałów drganiowych dedykowanych diagnozowaniu uszkodzeń i zużycia elementów przekładni, w celach zwiększenia ich dokładności i zmniejszenia stopnia skomplikowania.

W pracy zaproponowano zastosowanie do diagnozowania stanu zazębienia dekompozycji sygnału drganiowego wykonanej na podstawie paczkowej transformaty falkowej (ang. Wavelet Packed 1-Dimensional). Otrzymane (wybrane) dekompozycje sygnału drganiowego

wykorzystano następnie w procesie rekonstrukcji do wyznaczenia nowego sygnału, który umożliwia analizę uszkodzenia ząbienia.

## 2. PACZKOWA TRANSFORMATA FALKOWA

Analiza falkowa jest narzędziem umożliwiającym identyfikację niestacjonarnych składowych sygnału wibroakustycznego w dziedzinie czasu i skali częstotliwości. Falka podstawowa  $\psi(t)$  jest filtrem środkowoprzepustowym, przy użyciu której generuje się rodzinę falek wg wzoru (1) [5]:

$$\psi_{ab} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

gdzie:

a - parametr skali, b - parametr przesunięcia.

Dyskretna transformata falkowa sygnału jednowymiarowego obliczana jest przy użyciu algorytmu Mallata [6]. W procedurze tej rozwinięcie falkowe ma bezpośredni związek ze strukturą wielorozdzielczą sygnału i prowadzi do wyznaczenia algorytmu dyskretnego, realizowanego przy użyciu wielostopniowego zespołu filtrów. Uogólniony przypadek dekompozycji aproksymacji dyskretniej  $f_n^{(j-1)}$  sygnału  $f(t)$  na aproksymację  $f_n^{(j)}$  i reprezentację szczegółową  $d_n^{(j)}$  otrzymuje się wg wzoru (2 i 3) [5].

$$f_n^{(j)} = \sum_l \tilde{h}_{2n-1} f_l^{(j-1)} \quad (2)$$

$$d_n^{(j)} = \sum_l \tilde{g}_{2n-1} f_l^{(j-1)} \quad (3)$$

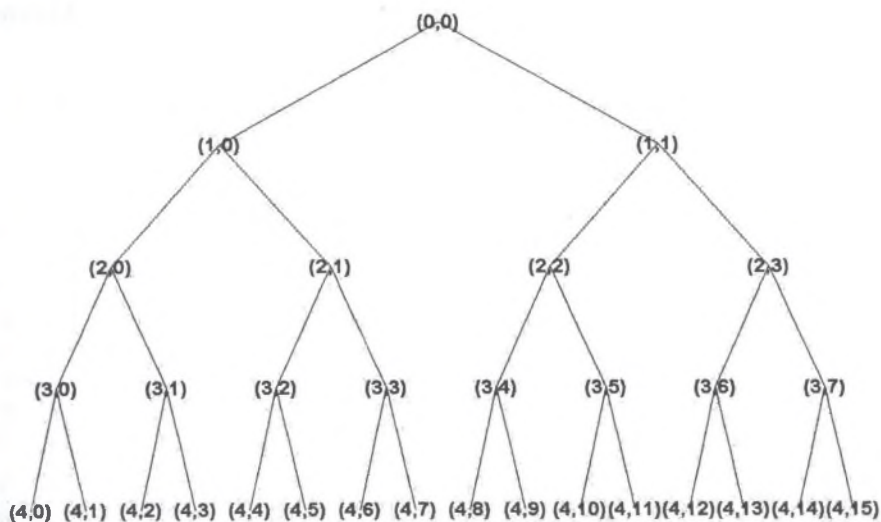
gdzie:

j - poziom rozkładu, n - próbka funkcji,

$\tilde{h}$  i  $\tilde{g}$  - filtry.

W wyniku obliczeń otrzymuje się aproksymację sygnału  $f_n^{(j)}$ , będącą składową niskoczęstotliwościową oraz detal  $d_n^{(j)}$ , będącą składową wysokoczęstotliwościową o dwukrotnie zredukowanych częstotliwościach próbkowania.

Paczkowa dyskretna transformata falkowa jest rozwinięciem opisanej powyżej dyskretniej transformaty falkowej oraz dekompozycji sygnałów wykonanych zgodnie z zależnościami (1)-(3). Stosując ją, przeprowadza się również dekompozycje sygnałów będących składowymi wysokoczęstotliwościowymi na różnych poziomach dekompozycji, na kolejne aproksymacje i detale. Dzięki tym działaniom otrzymać można tzw. drzewo dekompozycji (rys.1), które zawiera rozkład sygnału na wielu poziomach. Taki zabieg umożliwia wybór w procesie rekonstrukcji sygnału drganiowego tylko optymalnych jego składowych częstotliwościowych do dalszych analiz.

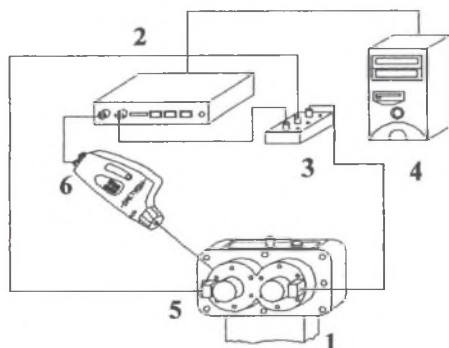


Rys. 1. Przykładowe drzewo dekompozycji sygnału wykonane na 4 poziomach dekompozycji z wykorzystaniem paczkowej transformaty falkowej sygnału jednowymiarowego  
 Fig. 1. The example presents the tree decomposition of signal executed on 4 levels of decomposition with used the wavelet packet transforms of one - dimensional signal

### 3. BADANIA STANOWISKOWE

Badania wykonano na stanowisku mocy krążącej FZG [2,4]. Do rejestracji sygnałów drganiowych zastosowano układ pomiarowy zaprezentowany na rysunku 2.

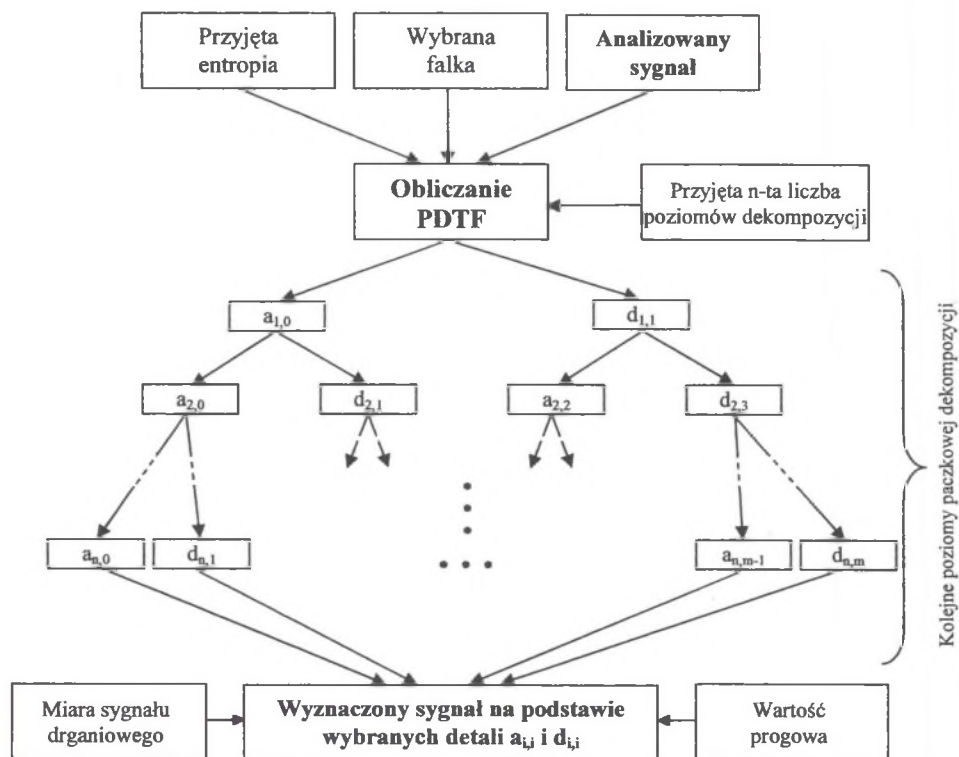
W badaniach wykorzystano koło zębate, na którym wykonywano wykruszenie zęba o trzech wartościach, odpowiednio o 0,75 mm, 1,5 mm i 2,0 mm. Wykruszenie to spowodowało lokalne zmniejszenie liczby przyporu od wartości  $\varepsilon_a=1,32$  (przekładnia nieszkodzona) do wartości  $\varepsilon_a=0,93$ , jak zaprezentowano w pracach [2, 4].



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego: 1 – badana przekładnia, 2 – analizator sygnałów DSTP SigLab, 3 – układ logiczny, 4 – komputer PC, 5 – czujniki położenia wałów, 6 – wibrometr laserowy  
 Fig. 2. 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 – laser vibrometer

#### 4. PROPONOWANA METODA DEKOMPOZYCJI SYGNAŁU - PRZYKŁADOWE WYNIKI ANALIZ

Do przeprowadzenia analiz zaproponowano algorytm zamieszczony na rysunku 3, gdzie skrótem PDTF oznaczono paczkową dyskretną transformatę falkową.



Rys. 3. Metoda dekompozycji sygnału drganiowego  
Fig. 3. The method of decomposition of vibration signal

W proponowanej metodzie wymagane jest podanie takich informacji, jak:

- rodzaj entropii,
- rodzaj wybranej falki,
- liczba poziomów dekompozycji,
- wartość progowa - określa wybrane detale do dalszych analiz,
- miara sygnału drganiowego.

Sygnały drganiowe poddane rozkładowi na ostatnim poziomie dekompozycji zostają zrekonstruowane do długości sygnału bazowego. Następnie stosując odpowiednią miarę sygnału drganiowego i wartość progową, wybieramy tylko te detale, które zawierają najwięcej informacji z punktu widzenia diagnozowanego uszkodzenia.

Do testowania możliwości wykorzystania proponowanej metody dekompozycji sygnału drganiowego wykorzystano sygnał drganiowy zarejestrowany w pomiarach opisanych w punkcie 3 artykułu.

Zaproponowano następujące założenia metody:

- entropia - shannon,

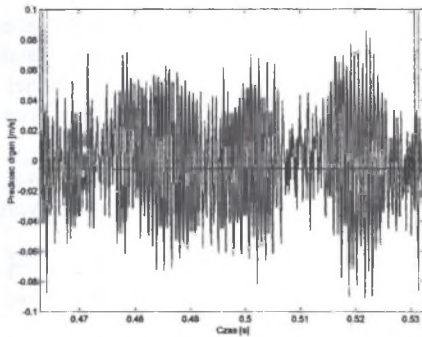
- falka - Daubechies 2,
- liczba poziomów dekompozycji - 7,
- wartość progowa pr.=6; 7; 8,
- miara sygnału drganiowego - współczynnik impulsowości I [3] wyznaczony na podstawie energii sygnału po dekompozycji.

Przyjęte w obliczeniach wartości progowe 6, 7 i 8 odpowiadały odpowiednio 48, 25 i 9 pasmom częstotliwości, na podstawie których wyznaczono sygnał zrekonstruowany, zawierający informację o wykruszeniu zęba koła.

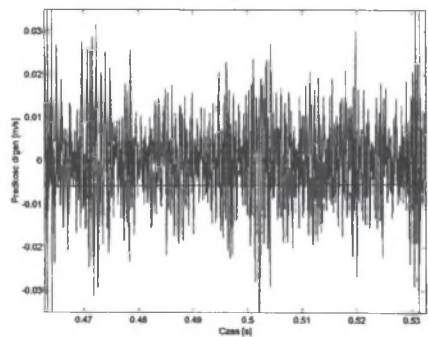
Na rysunku 4 zamieszczono przykładowy sygnał drganiowy zarejestrowany na stanowisku, gdy w przekładni montowano koło z wykruszonym zębem o wartości 2 mm. Rysunek 4a prezentuje sygnał niepoddany dekompozycji, natomiast na rysunku 4 b-d sygnały drganiowe po procesie rekonstrukcji, w zależności od przyjętej wartości progowej.

Analiza otrzymanych przebiegów czasowych sygnału drganiowego wskazuje, że tylko w przypadku wartości progowej 8 można w sygnale zrekonstruowanym jednoznacznie określić wzrost amplitudy, który towarzyszy zakresowi przypołu wykruszonego zęba.

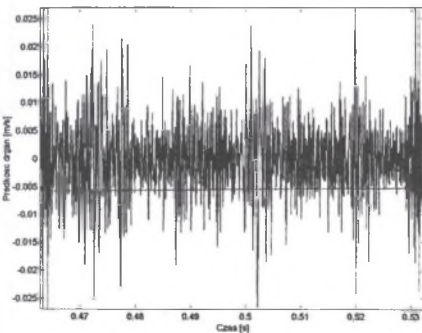
a)



b)



c)



d)



Rys. 4. Sygnał drganiowy: a) zarejestrowany podczas pomiarów; po dekompozycji i rekonstrukcji detali: b) pr. = 6, c) pr. = 7, d) pr. = 8

Fig. 4. Vibration signal: a) raw signal; after decomposition and reconstructed coefficients: b) pr. = 6, c) pr. = 7, d) pr. = 8

W tabeli 1 zamieszczono wyznaczoną wartość miary I sygnału drganiowego w zależności od różnych wartości wykruszenia zęba i przyjętej w obliczeniach wartości progowej.



Tabela 1

Zmiana miary I w zależności od lokalnej wartości  $\epsilon_\alpha$ 

	Wartość progowa [-]	Wykruszenie [mm]			
		0	0,75	1,5	2,0
Lokalna wartość liczby przyporu $\epsilon_\alpha$	-	1,32	1,18	1,03	0,93
Współczynnik impulsowości I [-]	6	3,04	2,98	3,1	5,08
	7	3,66	3,91	4,3	5,72
	8	3,63	3,78	4,28	6,88

## 5. PODSUMOWANIE

Diagnozowanie napędów zębatych jest ciągle rozwijającą się dziedziną badań. Dzięki rozwojowi techniki komputerowej można obecnie stosować zaawansowane techniki pomiarów i analizy sygnałów również w warunkach przemysłowych.

Przedstawione w pracy eksperymenty, których celem było diagnozowanie wykruszenia zęba przekładni, wskazują na przydatność zaproponowanej w pracy metody analizy sygnałów. Zastosowanie odpowiedniej dekompozycji sygnału drganiowego wykonanej na podstawie paczkowej dyskretnej transformaty falkowej umożliwiło odseparowanie z sygnału drganiowego przekładni sygnału, który zawiera informację o wykruszeniu zęba koła.

Wyznaczona miara, którą jest współczynnik impulsowości I, jest wrażliwa na występujące uszkodzenie koła zębatego. Wartość jej (tab. 1), podobnie jak zmiana sygnału drganiowego (rys. 4) w dużej mierze zależą od przyjętej wartości progowej.

Proponowana metoda wymaga dalszych prac, których celem jest zastosowanie jej do diagnozowania innych uszkodzeń, czy zużycia zazębienia, jak też do diagnozowania uszkodzeń łożysk tocznych.

## Literatura

1. Dwojak J., Rzepiela M.: Diagnostyka techniczna. Diagnostyka i obsługa techniczna łożysk tocznych. Poradnik. Biuro Gamma, Warszawa 2003. Informacja produkcyjna.
2. Figlus T.: Metoda drganiowa diagnozowania stanu kół zębatych w przypadkach zużycia i uszkodzeń łożysk tocznych przekładni. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Wydział Transportu, 2005, s. 274.
3. Cempel Cz.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. PWN, Warszawa 1989.
4. Wilk A., Figlus T.: Diagnozowanie uszkodzeń łożysk tocznych przekładni z wykorzystaniem komputerowych analiz sygnałów drganiowych, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, ser. Transport, z. 56, Gliwice 2004, s. 61-70.
5. Mallat S.: A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence 1989; vol.11 s. 674-693.
6. Białasiewicz J. T.: Falki i aproksymacje. WNT Warszawa 2000.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski