

## Zastosowanie analizy falkowej w diagnostyce silnika spalinowego

*Streszczenie:* Praca pokazuje możliwości zastosowania analizy falkowej do diagnostyki silnika spalinowego w oparciu o sygnały wibroakustyczne. Zastosowanie analizy falkowej w diagnostyce bazującej na sygnałach wibroakustycznych daje nowe perspektywy zastosowań diagnostycznych. Badania zaprezentowane w pracy dotyczą stanu silnika przed i po remoncie. Wstępne badania pokazują na zróżnicowanie wykresów czasowo-częstotliwościowych współczynników transformaty falkowej. Docelowa diagnostyka bazująca na falkach powinna być diagnostyką on-line uzupełniającą standardowe diagnostyki pokładowe OBD. W tym celu należy oprzeć się nie tylko na analizie skalogramów i obrazów czasowo-przestrzennego rozkładu współczynników transformat falkowych, ale również na wyborze parametrów istotnych diagnostycznie nadających się do szybkiej analizy on-line bazując na dekompozycji wielorozdzielczej.

Słowa kluczowe: diagnostyka silnika spalinowego, falki, sygnały wibroakustyczne, systemy OBD

### 1. Wprowadzenie

Najważniejszym elementem nowoczesnych systemów diagnostycznych pojazdów jest zastosowanie wysoko wyspecjalizowanych urządzeń pokładowych dla wykrywania sytuacji krytycznych. Rolę taką dla samochodów osobowych pełnią systemy diagnostyki pokładowej OBD (*On Board Diagnostic Systems*). Ciągłe jednak pojawia się potrzeba systemów diagnostyki on-line, które uzupełniają standardową diagnostyką pokładową OBD. Systemy te z reguły bazują na analizie odpowiednich sygnałów wibroakustycznych, których pozyskanie jest stosunkowo proste [1, 2, 6, 7, 10, 11].

Obok transportu samochodowego transport kolejowy, mimo chwilowych trudności, jest i na pewno będzie w przyszłości, bardzo popularnym środkiem transportu. Transport kolejowy już niedługo będzie musiał spełnić wiele nowych wymagań, zarówno w zakresie zarządzania, jak i zwiększenia bezpieczeństwa, komfortu jazdy i niezawodności. Niewątpliwie będzie to wymagało wprowadzenia nowych systemów diagnostycznych wzorowanych na systemach OBD w samochodach osobowych.

W pracy przedstawiono wyniki analizy sygnałów wibroakustycznych pozyskanych z silnika spalinowego lokomotywy spalinowej przy użyciu analizy falkowej. Badania w tym zakresie są kontynuacją prac nad analizą sygnałów wibroakustycznych z wykorzystaniem specjalistycznych metod przetwarzania sygnałów.

### 2. Falkowa analiza sygnałów

Falki (*wavelets*) [8, 9, 14] są specjalnymi funkcjami matematycznymi, które tworząc bazę ortogonalną w zbiorze wszystkich funkcji całkowalnych z kwadratem  $L^2$  i pozwalają dowolną funkcję  $f \in L^2$  reprezentować w tej bazie. Nazwa falka (ang. *wavelet*) pochodzi stąd, że żąda się od tej funkcji by całka z niej od  $-\infty$  do  $+\infty$  była równa zero, co w

praktyce znaczy, że musi ona falować tzn. przyjmować wartości zarówno dodatnie jak i ujemne. Zawsze też żąda się by falki były zlokalizowane w określonym miejscu (chwili czasu). Ponadto żąda się często, by falka była funkcją ciągłą, czyli różniczkowalną w całej dziedzinie oraz żeby miała zwarty nośnik tzn. żeby zerowała się poza pewnym domkniętym odcinkiem. Podstawowa idea użycia falek to analiza zgodna ze skalą. Falka wycina „okno” w przedziale zmienności funkcji i jeśli analizujemy sygnał dużym „oknem” to znajdujemy cechy grube, jeśli małym „oknem”, znajdujemy cechy szczegółowe. Pierwsze nietrywialne falki zaproponował Meyer, były one różniczkowalne w sposób ciągły ale nie miały zwartego nośnika. Dopiero Ingrid Daubechies zaproponowała pierwszy zbiór ortonormalnych funkcji bazowych będących falkami o zwartym nośniku i różniczkowalnych w sposób ciągły.

Mając daną tzw. falkę matkę  $\psi(x)$  (tzn. wyjściową falkę bazową) zbiór falek tworzących bazę ortogonalną w przestrzeni funkcyjnej uzyskuje się przez jej przesuwanie i skalowanie tzn. przez wzięcie szeregu falek w postaci:

$$\psi\left(\frac{x-b}{a}\right),$$

gdzie  $b \in \mathbf{R}$  oraz  $a \in \mathbf{R}^+$ . Tutaj  $b$  to liczba rzeczywista tworząca przesunięcie, natomiast  $a$  to liczba rzeczywista dodatnia ( $a \neq 0$ ) tworząca skalę.

Warto zwrócić uwagę, że np. w porównaniu z Fourierowskimi funkcjami bazowymi tzn. sinusem lub cosinusem, falki bazowe powstają przez skalowanie (tzn. rozciąganie lub ściskanie) oraz przez przesunięcie, podczas gdy bazowe funkcje Fourierowskie są jedynie skalowane.

Analiza falkowa jest w gruncie rzeczy specjalnym rodzajem aproksymacji dowolnej funkcji  $f(x) \in L^2$ . W czym więc tkwi nowość zastosowania falek? W analizie Fourierowskiej

funkcje bazowe (sinusy i cosinusy) są zlokalizowane w częstotliwości, ale nie są zlokalizowane w czasie lub przestrzeni. W efekcie mała zmiana w po stronie częstotliwości daje zmianę w dziedzinie czasu lub przestrzeni nie wiadomo gdzie. Falki natomiast są zlokalizowane zarówno w czasie (poprzez przesunięcia), jak i w częstotliwości (poprzez skalowanie).

Falki obcinają dane na różne składowe częstotliwościowe dając możliwość spojrzenia na każdy składnik z rozdzielczością dopasowaną do jego skali. Falki okazały się lepsze od tradycyjnej analizy Fourierowskiej przy analizowaniu sygnałów zawierających nieciągłości oraz ostre nieokresowe piki. Przy obróbce procesów niestacjonarnych analiza Fourierowska traci całą informację o lokalizacji w czasie danego składnika częstotliwościowego. Wiele funkcji można, po prostu, lepiej reprezentować z użyciem analizy falkowej niż analizy Fourierowskiej.

Falki zostały rozwinięte niezależnie w takich dziedzinach jak matematyka, fizyka kwantowa, elektronika i geologia sejsmiczna. Falki znalazły wiele zastosowań, np. do kompresji obrazu, analizy turbulencji, badań nad widzeniem człowieka, radarów, przewidywania trzęsień ziemi itp.

Również w zakresie analizy szerokiej klasy sygnałów pozyskiwanych w mechanice (w tym sygnałów wibroakustycznych) falki są szeroko wykorzystywane do diagnostyki [1, 10, 12, 13].

### 3. Ciągła transformata falkowa

Podstawą tworzenia zbioru falek w ciągłej transformacie falkowej CWT [8, 9, 14] jest tzw. falka matka  $\psi(x)$ , będąca startową falką bazową. Zbiór falek tworzących bazę ortonormalną uzyskuje się przez jej przesuwanie i skalowanie tzn. przez tworzenie falek w postaci:

$$\frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) = \Psi_{a,b}(x) \quad (1)$$

gdzie  $b$  to liczba rzeczywista tworząca przesunięcie, natomiast  $a$  to liczba rzeczywista dodatnia ( $a \neq 0$ ) tworząca skalę.

Dla funkcji jednej zmiennej  $f(x) \in L^2$  CWT z uwzględnieniem falki  $\Psi_{a,b}(x)$  opisanej wzorem (1) może być przedstawiona następująco:

$$W_f(a,b) = \langle f, \Psi_{ab} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \Psi_{ab}(x) dx \quad (2)$$

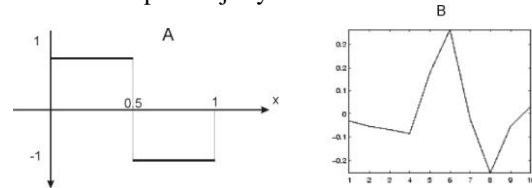
gdzie  $W_f(a,b)$  to CWT funkcji  $f(x)$ , a  $\langle f, \Psi_{ab} \rangle$  to iloczyn skalarny  $f(x)$  i  $\Psi_{a,b}(x)$ . Matematycznie  $W_f(a,b)$  reprezentuje transformatę falkową będącą funkcją dwóch zmiennych zależną od  $a$  i  $b$ . Odwrotna CWT wyraża się wzorem:

$$f(x) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} W_f(a,b) \Psi_{ab}(x) \frac{db da}{a^2} \quad (3)$$

gdzie  $C_\psi$  to stały współczynnik. Transformacja (2) jest liniowym odwzorowaniem zachowawczym ze względu na przesunięcie, zachowawczym ze względu na skalę oraz zachowującym energię.

Ciągła transformata falkowa  $W_f(a,b)$  jednowymiarowej funkcji  $f(x)$ , jest funkcją dwuwymiarową. Z tego względu ciągłą transformatę falkową nazywa się nadkompletną.

Bazowych układów falek jest bardzo wiele i mają bardzo różne postacie, niejednokrotnie nie dające się zapisać analitycznie. Pierwsze funkcje używane obecnie jako falki pojawiły się w dodatku do pracy doktorskiej Haara (1909) i są obecnie znane jako funkcje Haara. Odpowiedni zbiór funkcji Haara jest ortonormalny, posiada zwarty nośnik, ale odpowiednie falki te nie są ciągłe (nie są różniczkowalne w sposób ciągły). To powoduje, że falki Haara nie miały dużego zastosowania. Pierwsze nie trywialne falki zaproponował Meyer. Jego falki były ciągłe, ale nie miały zwartego nośnika. Dopiero Ingrid Daubechies zaproponowała pierwszy zbiór falek ortonormalnych, mających zwarty nośnik i różniczkowalnych w sposób ciągły. Funkcje podstawowe falek Haara i falek Daubechies pokazuje rys. 1.



Rys. 1. Przykładowe falki Haara (A) i Daubechies (B)

Obecnie znanych jest bardzo wiele różnych funkcji spełniających warunki falek. Poza wyżej wymienionymi są falki Meyer'a, Strömberga, Belte-Lemesie'a, Shannona itp. Jeśli transformata Fouriera funkcji rzeczywistej  $\psi(x)$  spełnia warunek:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(x)|}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (4)$$

to funkcja ta może być falka podstawową. Ponieważ  $\omega$  jest mianownikiem funkcji podcałkowej więc z faktu, że  $\psi(0) = \omega$  wynika, że

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x) dx = 0$$

Ponieważ zachodzi  $\psi(\infty) = 0$ , więc widmo amplitudowe falki jest podobne do widma filtru środkowo przepustowego (pasmowego). Tak więc dowolna odpowiedź impulsowa filtru pasmowo-przepustowego z zerową wartością średnią, która wystarczająco dobrze zanika do zera ze wzrostem częstotliwości, może służyć jako falka bazowa. Powyższe uwagi można odwrócić. każda falka poddana transformacie Fouriera daje widmo amplitudowe zawarte głównie w pewnym określonym paśmie. Ogólnie biorąc, można

powiedzieć, że falki „wycinają” w analizowanym sygnale  $f(x)$  pewne „okno”. Jeżeli okno to jest duże to znajdujemy zgrubne cechy sygnału, jeśli zaś okno jest małe to znajdujemy szczegółowe cechy sygnału. Równocześnie falka wycina „okno” po stronie częstotliwości, czyli w Fourierowskim widmie sygnału. Do celów praktycznych należy stosować takie falki (bazę ortonormalną), które dają „dobre” okno zarówno po stronie czasu jak i częstotliwości.

#### 4. Dyskretna transformata falkowa

Mimo, że CWT jest stale w użyciu, to niewątpliwie dokonywania jej dla każdej możliwej skali i przesunięcia daje ogromną ilość danych. Dlatego też częściej używa się dyskretnej transformaty falkowej DWT [8, 9, 14], gdzie sygnał jest transformowany do dyskretnej skali i dyskretnych przesunięć co redukuje znacznie ilość danych.

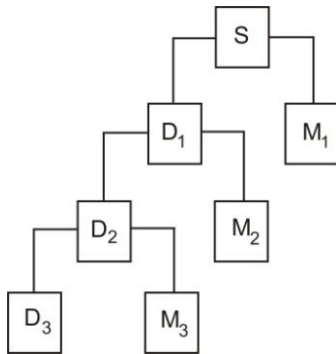
Dyskretna transformata falkowa pozwala reprezentować funkcję  $f(x)$ , gdzie  $x \in \mathbb{R}$ , jako:

$$f(x) = \sum_{j,k} d_{jk} \psi_{jk}(x)$$

gdzie

$$\psi_{jk}(x) = 2^{-j} \psi(2^j x - k)$$

Każda funkcja bazowa jest tutaj generowana przez pojedynczą tzw. macierzystą falkę  $\psi(x)$  z rozszerzeniem  $j$  oraz przesunięciem  $k$ .



Rys. 2. Przykładowa struktura drzewa dla 3-poziomowej wielorozdzielczej dekompozycji

W praktyce używa się tzw. binarną dyskretną transformatę falkową, która można zapisać jako:

$$W_f^k(x, j) = \int_{\mathbb{R}} f(x) \overline{\psi(2^{-k} \cdot 2^{-j} x)} dx$$

gdzie odpowiednie współczynniki są reprezentowane jako potęgi 2, czyli czynnik skali  $a_k = 2^{-k}$  oraz czynnik przesunięcia  $b_k = 2^{-k} j$ .

Dyskretna transformata falkowa jest funkcją filtrującą sygnał. W efekcie po dyskretnej transformacie falkowej sygnał oryginalny można poddać dekompozycji (rozłożyć) na człon aproksymacji niskoczęstotliwościowej oraz człon aproksymacji

wysokoczęstotliwościowej. Operację tą można powtarzać. Na przykład, związki 3-poziomowej wielorozdzielczej dekompozycji oryginalnego sygnału  $S$  zapisujemy jako  $S = D_3 + M_3 + M_2 + M_1$  (patrz rys. 2), gdzie  $D$  jest składnikiem niskoczęstotliwościowym zdekomponowanym z dużą skalą, a  $M$  składnikiem niskoczęstotliwościowym zdekomponowanym z małą skalą. W praktyce obliczanie współczynników  $D$  i  $M$  jest realizowana przy pomocy specjalnych filtrów cyfrowych. Po jednokrotnej dekompozycji ilość próbek, które reprezentują sygnał ulega podwojeniu. Z tego powodu, stosuje się tzw. decymację (ang. downsampling), w której za filtrem dochodzi do usunięcia co drugiej próbki.

#### 5. Metodyka pomiarowa

Badania przeprowadzono dla lokomotywy spalinowej serii ST44. Lokomotywa ta ma sześć zestawów kołowych, umieszczonych na dwóch wózkach. Wszystkie zestawy kołowe są napędowe i każdy z nich jest napędzany oddzielnym elektrycznym silnikiem trakcyjnym. Zadaniem przekładni elektrycznej jest przeniesienie momentu obrotowego od spalinowego silnika wysokoprężnego na zestawy kołowe lokomotywy [6, 7].

Przedmiotem badań był silnik spalinowy 14D40 nr 8849. Pomiary wykonano pod obciążeniem (na oporniku wodnym) dla odpowiednio dostosowanych mocy w wyznaczonych punktach pomiarowych [6, 7].

Badania były przeprowadzono na bazie porównania sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych z silnika przed i po remoncie. Pomiary przyspieszeń dla lokomotywy ST44-2045 były przeprowadzone przed i po naprawie rewizyjnej wykonano w stacji diagnostycznej w Zamościu. Okresowy remont polegał na pełnym serwisie części układów oraz na wymianie elementów uszkodzonych lub zużytych [6, 7].

Pomiary przyspieszeń przed remontem wykonano przy pomocy czujników przyspieszeń serii EGCS firmy Entran Devices o zakresie  $\pm 5g$  (karta analogowo-cyfrowa PCL-818HD firmy ADVANTECH, częstotliwość próbkowania 1004,0161 Hz/kanal). Pomiary po naprawie wykonano również wymienionymi czujnikami EGCS oraz dodatkowo nowymi czujnikami PCB PIEZOELECTRONICS model 393B04 [6, 7].

Czujniki mocowano na korpusie silnika w miejscach odpowiadających łożyskowaniu wału korbowego silnika. Każdy punkt pomiarowy rejestrował przyspieszenia w kierunku pionowym oraz poziomym poprzecznym [6, 7].

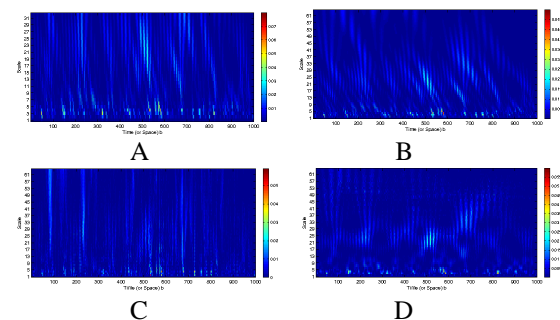
Badania tego typu sygnałów były już realizowane z użyciem metod nieliniowych, metody wektorów wspierających SVN oraz metod krótkoczasowych [2–5]. Wyniki badań metodami krótkoczasowymi potrafiły rozróżnić pomiędzy stanami silnika zużytego i pracującego normalnie, co dało

impuls do przeprowadzenia badań przy użyciu falek.

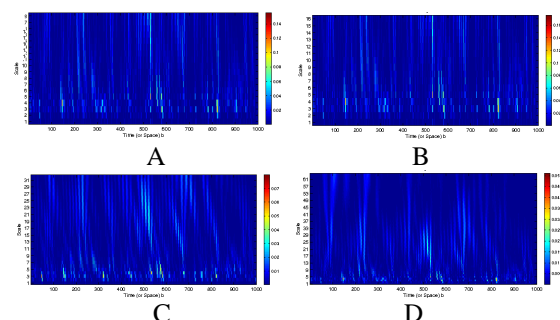
Wszystkie obliczenia zostały wykonane przy użyciu programu MATLAB. Analiza sygnałów wibroakustycznych przed i po remoncie została dokonana na bazie wielorozdzielczej dekompozycji poziomu 5. Tak więc oryginalny sygnał  $S$  po dekompozycji składa się z 6 sygnałów  $S = D_5 + M_5 + M_4 + M_3 + M_2 + M_1$ , gdzie  $D_5$  jest składnikiem niskoczęstotliwościowym zdekomponowanym z dużą skalą, a kolejne  $M_5, M_4, M_3, M_2, M_1$  są składnikami niskoczęstotliwościowymi zdekomponowanym z małą skalą.

## 6. Wybrane rezultaty

Jednym z podstawowych problemów analizy falkowej jest wybór rodzaju falki oraz ich skalowania. Na rys. 3 pokazano przykładowe wykresy dla różnych rodzajów falek bazowych dla wybranego przykładowego sygnału wibroakustycznego pozyskanego z silnika (patrz rys. 5A). Warto zwrócić uwagę, że wyniki różnią się, a więc wybór odpowiedniej reprezentacji falkowej nie jest zagadnieniem banalnym. W przedstawionych dalej rozważaniach zastosowano faleki Daubechies.



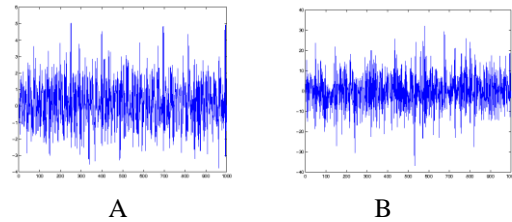
Rys. 3. Przykładowe skalogramy dla CWT dla przykładowego sygnału wibroakustycznego (rys. 5A) dla falek db3 (A), db10 (B), harr (C), morl (D)



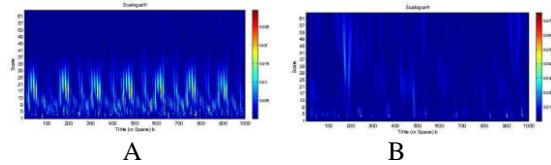
Rys. 4. Przykładowe skalogramy dla CWT dla przykładowego sygnału wibroakustycznego (rys. 5A) funkcji db3 dla różnego skalowania 1:8 (A), 1:16 (B), 1:32 (C), 1:64 (D)

Z kolei na rys. 4 pokazano skalogramy dla tej samej funkcji falkowej db3 przy różnych skalowaniach dla wybranego przykładowego sygnału wibroakustycznego pozyskanego z silnika (patrz rys.

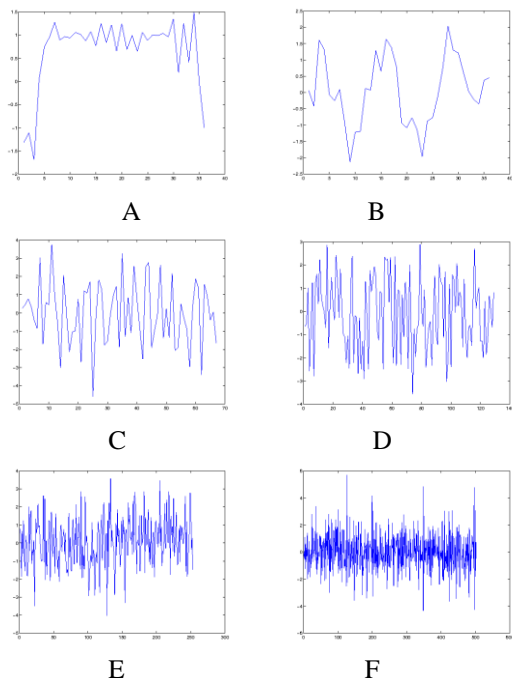
5A). Wybór skalowania okazuje się bardzo istotny podczas obliczeń, bowiem jego dobór ma znaczenie z punktu widzenia zarówno jakości obrazu pokazującego skalowanie, jak i czasu wykonywania obliczeń.



Rys. 5. Przykładowe sygnały wibroakustyczne przed (A) i po (B) remoncie silnika (sygnały poziome, nastawa 2)



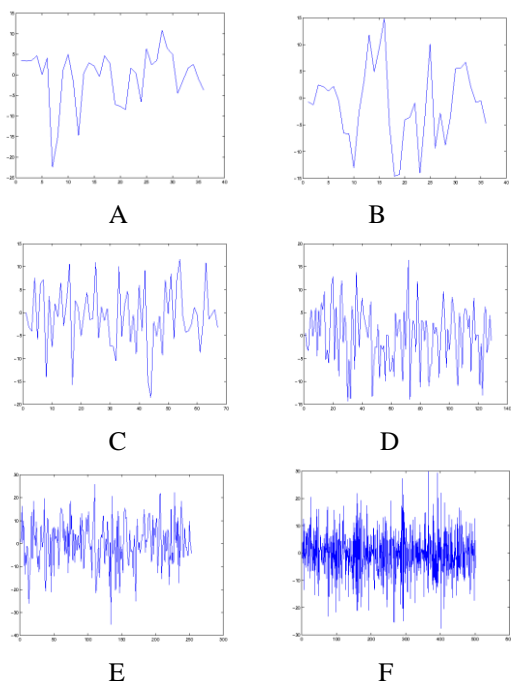
Rys. 6. Skalogramy dla odpowiednich sygnałów z rys. 5 pozyskane dla falek db3



Rys. 7. Składowe dekompozycji wielorozdzielczej na poziomie 5 dla przykładowego sygnału pozyskanego przed remontem (rys. 5A) dla falek db3 – składowe  $D_5$  (A),  $M_5$  (B),  $M_4$  (C),  $M_3$  (D),  $M_2$  (E),  $M_1$  (F)

Typowe klasyczne wykresy dla CWT pokazują różnice (patrz rys. 5 i 6) jednak takie podejście nie nadaje się wprost do prostej diagnostyki on-line. Różnice te nie są jednak jednoznaczne i powtarzalne. Lepsze rezultaty można otrzymać przeprowadzając wielorozdzielczą dekompozycję sygnału.





Rys. 8. Składowe dekompozycji wielorozdzielczej na poziomie 5 dla przykładowego sygnału pozyskanego po remoncie (rys. 5A) dla falek db3 – składowe  $D_5$  (A),  $M_5$  (B),  $M_4$  (C),  $M_3$  (D),  $M_2$  (E),  $M_1$  (F)

Wstępne eksperymenty pokazały, że można rozróżnić sygnał przed i po remoncie po dekompozycji na poziomie 5 używając falek typu db3. Wyniki pokazane na rys. 7 i 8 reprezentują dekompozycję sygnałów wibracyjnych z rys. 5. Sygnały  $M_1$ ,  $M_2$ ,

$M_3$ ,  $M_4$ ,  $M_5$  reprezentują pierwszy, drugi, trzeci, czwarty i piąty poziom wysoko częstotliwościowego sygnału rozłożonego na faleki. Z kolei  $D_5$  jest odpowiednim nisko częstotliwościowym sygnałem wibroakustycznym dekompozycji na poziomie 5.

Rezultaty pokazują, na możliwość rozróżnienia sygnałów wibroakustycznych pozyskanych przed i po remoncie silnika. Szczególnie sygnały  $D_5$  oraz  $M_5$  pokazują duże różnice, przy równocześnie mniejszej liczbie współczynników do ewentualnej analizy.

## 7. Podsumowanie

Wstępne badania nad zastosowaniem metod falkowych do analizy sygnałów wibroakustycznych reprezentujących stan silnika okazały się bardzo interesujące. Otrzymane rezultaty wskazują na użyteczność zaproponowanej metody dla detekcji sytuacji krytycznych i oceny stanu silnika spalowego pojazdu w transporcie, a w tym również w transporcie kolejowym.

Testy i badania w tym zakresie są ciągle kontynuowane. Problemy z użyciem analizy falkowej sprowadzają się w wyborze odpowiednich rodzajów falek oraz dopasowaniu parametrów. Należy też dokonać wyboru pomiędzy analizą ciągłą CWT lub dyskretną DWT. Problemem jest również praktyczna diagnostyka, która wymaga nie tyle oceny dwuwymiarowych obrazów czasowo-częstotliwościowych, ale wyboru parametrów, które umożliwiłyby szybką diagnostykę on-line.

## Nomenclature/Skróty i oznaczenia

CWT Continuous Wavelet Transformation/ciągła transformata falkowa  
 DWT Discrete Wavelet Transformation/dyskretna transformata falkowa  
 db3 Daubechies wavelet rank 3/falka Daubechies 3 rzędu

db10 Daubechies wavelet rank 10/falka Daubechies 10 rzędu  
 haar Haar wavelet/falka Haara  
 morl Morlet wavelet/falka Morleta  
 OBD On-Board Diagnostic Device/pokładowe urządzenie diagnostyczne

**Acknowledgments:** Praca jest finansowana z projektu badawczego nr: 5406/B/T02/2011/40

## Bibliography/Literatura

- [1] Al-Badour F., Sunar M., Cheded L.: Vibration analysis of rotating machinery using time-frequency analysis and wavelet techniques. *Mechanica Systems and Signal Processing*, vol. 25, pp. 2083–2101, 2011.
- [2] Boguś P., Merkisz J., Grzeszczyk R., Mazurek S.: Nonlinear analysis of combustion engine vibroacoustic signals for misfire detection. *SAE Technical Paper Series 2003-01-0354*.
- [3] Boguś P., Merkisz J.: Misfire Detection of locomotive diesel engine by nonlinear analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 19, pp. 881-899, 2005.
- [4] Boguś P., Merkisz J.: Short time analysis of combustion engine vibroacoustic signals with using pattern recognition techniques. *SAE Technical Paper Series 2005-01-2529*.
- [5] Boguś P., Merkisz J.: Misfire detection in a diesel engine using clustering in short-time analysis of vibroacoustic signals. *Combustion Engines*, 2005, No.4, pp. 31-40.
- [6] Boguś P., Sienicki A., Wojciechowska E., Merkisz J.: The Comparison of vibroacoustic

---

signals taken from an engine before and after repair. *Combustion Engines*, vol. 2007-SC3 – PTNSS, pp. 300-306, 2007.

- [7] P. Boguś, A. Sienicki, E. Wojciechowska. The comparison of the state of combustion locomotive ST44 before and after repair by using a vibroacoustic signal. *Pojazdy Szynowe* Nr. 2, 2007, pp. 28-36 (in polish).
- [8] K. Chui K.: *Wavelets: A Mathematical Tool for Signal Processing*. SIAM Society for Industrial and Applied Mathematics, 1997.
- [9] Goswami J. C., Chan A. K.: *Fundamentals of Wavelets. Theory, Algorithms, and Applications*. John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [10] Madej H.: *Metody przetwarzania sygnałów wibroakustycznych w diagnozowaniu silników spalinowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki

Mr Piotr Boguś, DSc., PhD, Eng. – Head of Department of Physics and Biophysics of Medical University of Gdańsk, Professor at Rail Vehicle Institute TABOR in Poznan.

*Dr hab. inż. Piotr Boguś – Kierownik Katedry i Zakładu Fizyki i Biofizyki Gdańskiego Uniwersytetu Medycznego, profesor w Instytucie Pojazdów Szynowych TABOR w Poznaniu.*



Śląskiej, Seria: Transport, z. 69, pp. 97-104, 2010.

- [11] Merkisz J., Mazurek S.; *On-board recording systems of cars*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2002 (in Polish).
- [12] Peng Z. K., Chu F. L.: *Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 18, pp. 199–221, 2004.
- [13] Tsea P. W., Yangb W., Tama H. Y.: *Machine fault diagnosis through an effective exact wavelet analysis*. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 277, pp. 1005–1024, 2004.
- [14] Wojtaszczyk P.: *Teoria falek*. PWN Warszawa, 2000.

Prof. Jerzy Merkisz, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Machines and Transportation at Poznan University of Technology.

*Prof. Jerzy Merkisz – profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.*

