

DOBÓR WŁAŚCIWEJ FALKI DLA OPISU CECH DYSTYNKTYWNYCH DRGAŃ PARASEJSMICZNYCH

Jordan MEŻYK, Piotr KRZYWORZEKA
Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, Mickiewicza 30, 30-053 Kraków
fax: 012 633 23 14, jordan.mezyk@wp.pl

Streszczenie

Przy opisie sygnałów niestacjonarnych jakimi bez wątpienia są sygnały parasejsmiczne kluczowym zagadnieniem jest dobór właściwej falki stosowanej do ich analizy, której właściwości jak najbardziej odpowiadałyby typom zmienności przebiegów. W artykule autorzy proponują kilka kryteriów doboru falek, oraz przykład wyboru odpowiedniej falki za pomocą testów przeprowadzonych na kilkudziesięciu falkach oraz kilkunastu wielokanałowych próbkach sygnału drgań.

Słowa kluczowe: drgania, analiza falkowa, kopalnia odkrywkowa, bezpieczeństwo.

THE CHOICE OF THE PROPER WAVELET FUNCTION FOR DISTINCTIVE FEATURES OF PARASEISMIC SIGNALS DESCRIPTION

Summary

When the non-stationary signals are described with paraseismic being a good example of those, the key term is the choice of the proper wavelet function to be used for analysis. Its parameters should fit the variation types of the signals as good as possible. The authors of the article suggest several criterias for choosing the wavelet function and show the example of choosing the proper function with tests based on several wavelet function and some multi-channel signals.

Keywords: vibration, wavelet analysis, quarry, safety.

1. WSTĘP

Przy obecnie obserwowanych tendencjach zwiększających się ilości inwestycji drogowych oraz budowlanych należy spodziewać się zwiększenia ilości wydobycia surowców używanych w budownictwie głównie tłuczni oraz wapienia. Pociągnie to za sobą rozwój kopalń odkrywkowych, które rozwijając się zajmują coraz większą powierzchnię zbliżając swoje granice do najbliższych zabudowań otaczających tereny odkrywkowe. Jak do tej pory stosowane są klasyczne metody oceny zagrożeń drganiami oparte na normie PN-85/B-02170. Wprowadza się również nowe metody oparte na analizie trójowej [1] oraz analizie Fouriera [7] jednak są one nieadekwatne naturze sygnału. Wciąż poszukuje się takiego opisu drgań parasejsmicznych, który będzie wyraźnie eksponował te cechy sygnałów drgań, które są krytyczne z punktu widzenia zwalczania zagrożeń wibracyjnych w otoczeniu kopalń odkrywkowych ze szczególnym uwzględnieniem przenoszenia drgań z gruntu na budynki mieszkalne. Dysponując bogatym materiałem eksperymentalnym uzyskanym w trakcie robót strzałowych autorzy proponują jako przesłanki wyboru falki kryteria:

- najlepszej rekonstrukcji;
- największej energii;
- największego zróżnicowania.

Analiza falkowa

Analiza falkowa (WA) jest już dość dobrze znanym narzędziem, ale ze względu na dość duże wymaganie odnośnie maszyn liczących dopiero w ostatnich latach zaczyna zdobywać popularność. Ciągła analiza falkowa (CWT) należy do grupy narzędzi analizy czasowo-częstotliwościowej, pozwalające śledzić w czasie zmienność poszczególnych składowych częstotliwościowych analizowanego sygnału. W odróżnieniu od STFT transformata falkowa zadowalająco wyróżnia lokalne cechy w obu dziedzinach – czasu i częstotliwości – co jest szczególnie istotne przy analizie niestacjonarności rozpatrywanego typu.

Zarówno analiza Fouriera (FA) jak i analiza falkowa polegają na „porównaniu” badanego sygnału z funkcją bazową o znanych właściwościach (parametrach). W przypadku FA funkcjami bazowymi są pary funkcji sinus i cosinus o amplitudzie jednostkowej i znanej częstotliwości, natomiast w przypadku WA są to również pary funkcji: tzw. falka i funkcja skalująca. Dokładność (jakość) analizy zależy więc od doboru funkcji bazowych. Jedną z często wymienianych wad FA jest niedokładna aproksymacja sygnałów innych niż poliharmoniczne. W przypadku WA mamy do wyboru kilkadziesiąt różnych funkcji i nie jest to zbiór zamknięty (skończony). Ta cecha pozwala na lepsze dopasowanie funkcji analizującej spośród już

istniejących, a także umożliwi stworzenie własnej funkcji analizującej. Pierwszym etapem przed przystąpieniem do analizy konkretnego typu sygnałów (w tym przypadku są to sygnały parasejsmiczne) jest wybór odpowiedniej falki, dopasowanej do sygnału.

2. KRYTERIA DOBORU FALEK

Material eksperymentalny

Analizie poddano sygnały drgań zarejestrowane w kopalni gipsu Borków (rys. 1) podczas strzelań z różnymi opóźnieniami milisekundowymi 25, 42 oraz 67ms. Za pomocą cyfrowego rejestratora ośmiokanałowego UVS 1608 DIN zarejestrowano drgania na gruncie (trzy składowe) przy budynku położonym najbliżej kopalni (stanowisko 1), na stanowisku 2 na przedłużeniu linii łączącej miejsce strzelania i stanowisko 1 kolejne trzy składowe na gruncie oraz dodatkowo dwie składowe (bez pionowej) na fundamencie wspomnianego wyżej budynku (stanowisko 1'). Wyniki zgromadzone są w piętnastu plikach zawierających wektor czasu oraz wektory drgań odpowiednio: w kanałach 1-3 drgania ze stanowiska 1, w kanałach 5-7 drgania ze stanowiska 2 oraz w kanałach 4 i 8 drgania ze stanowiska 1'.



Rys. 1. Szkic sytuacyjny miejsca badań: 1 - miejsce wykonywania pomiarów drgań, 2 - miejsce wykonywania odstrzałów doświadczalnych

Zebrany materiał poddano analizie zgodnie z poniższymi kryteriami. Na tym etapie badań nie rozróżniano pomiędzy poszczególnymi składowymi zarejestrowanych wektorów drgań a jedynie ograniczono się do porównywania danych w tym samym kanale dla różnych realizacji (próbek), tak, aby nie porównywać ze sobą różnych składowych co nie miało by sensu, ale sprawdzono czy wyniki

działań we wszystkich kanałach prowadzą do takich samych wniosków.

Tab. 1. Przyporządkowanie mierzonych sygnałów drgań do kanałów aparatury pomiarowej

Kanał	1	2	3	5	6	7	4	8
Stanowisko	1			2			1'	
Lokalizacja	grunt			grunt			funda- ment	
Składowa drgań	podłużna	poprzeczna	pionowa	podłużna	poprzeczna	pionowa	podłużna	poprzeczna

Kryterium najlepszej rekonstrukcji

Transformacja falkowa pozwala na rozłożenie (dekompozycję) analizowanego sygnału $x(t)$ na współczynniki aproksymacji $c_{m,n}$ oraz współczynniki detali $d_{m,n}$. Współczynniki te wylicza się za pomocą następujących wzorów [7]:

$$c_{m,n} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) 2^{\frac{m}{2}} \varphi^*(2^m t - n) dt \quad (1)$$

$$d_{m,n} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) 2^{\frac{m}{2}} \psi^*(2^m t - n) dt, \quad (2)$$

gdzie:

$m = 0, 1, 2, \dots$, - kolejne poziomy dekompozycji,

$\varphi(\dots)$ - falka,

$\psi(\dots)$ - funkcja skalująca.

Po ponownym zsyntezowaniu sygnału ze wszystkich współczynników otrzymujemy sygnał $x'(t)$:

$$x'(t) = \sum_n c_{m_0,n} \varphi_{m_0,n}(t) + \sum_{m=m_0}^{k-1} \sum_n d_{m,n} \psi_{m,n}(t) \quad (3)$$

gdzie:

k - najwyższy poziom dekompozycji.

Jeżeli falka swoim charakterem nie będzie odpowiadać charakterowi sygnału $x(t)$, możemy utracić część informacji podczas procesu analizy i ponownej syntezy. Im falka lepiej dopasowana jest do analizowanego sygnału tym mniejsze straty. Na tym założeniu oparte jest kryterium najlepszej regeneracji. Błąd regeneracji policzony został jako suma kwadratów różnic pomiędzy poszczególnymi próbkami sygnału. Współczynnik jakości jest logarytmem z odwrotności tego błędu (równania 4 oraz 5). Na rys. 2 przedstawiono współczynnik jakości Q_{rec} dla poszczególnych falek. Na osi kategorii oznaczono różne falki oraz różne ich rzędy. Na osi odciętych przedstawiono wartości współczynnika Q_{rec} wyliczone według wzoru 5.

W każdej kategorii (dla każdej falki) wartości na wykresie reprezentują uśrednione wartości współczynnika Q_{rec} w każdym kanale. Uśrednienie wykonano dla piętnastu różnych sygnałów drgań zarejestrowanych w tej samej kopalni, w tych samych punktach pomiarowych, dla strzelań z różnymi wartościami opóźnień milisekundowych. Łatwo stwierdzić, że dla różnych sygnałów dana falka daje podobne wyniki. Godne uwagi są falki Daubechies wyższych rzędów oraz falki biortogonalne (bior i rbio). Rys. 3 przedstawia wartości współczynnika jakości Q_{rec} dla kryterium najlepszej regeneracji dla jednego pliku (jednej próbki). Na osi kategorii oznaczono różne falki oraz różne ich rzędy. Na osi odciętych przedstawiono wartości współczynnika Q_{rec} wyliczone według wzoru 5:

$$\varepsilon = \sum_i^N (x_i' - x_i)^2 \quad (4)$$

$$Q_{rec} = \log\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) \quad (5)$$

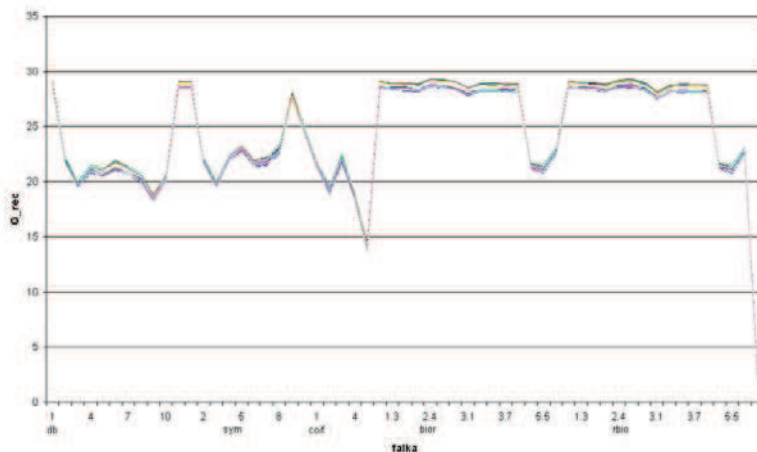
Kryterium największej energii

Kryterium największej energii zachowanego sygnału jest w swojej koncepcji podobne do kryterium najlepszej regeneracji. Miarą doskonałości dopasowania falki do sygnału jest zachowany poziom energii przy danym stopniu kompresji sygnału. Im większa energia sygnału została zachowana tym lepiej falka jest dopasowana do tego sygnału.

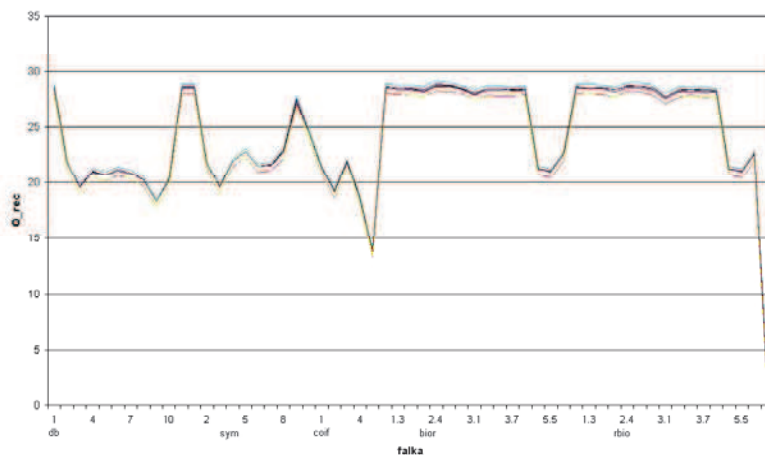
Porównując rys. 5 oraz 4 można zauważyć bardzo duże podobieństwo wartości współczynników zarówno dla drgań w różnych kanałach (różne rodzaje fal sejsmicznych) jak i dla powtórzonych pomiarów dla tego samego kanału.

$$E_x = \frac{|X_c|^2}{|X|^2} \cdot 100 \quad (6)$$

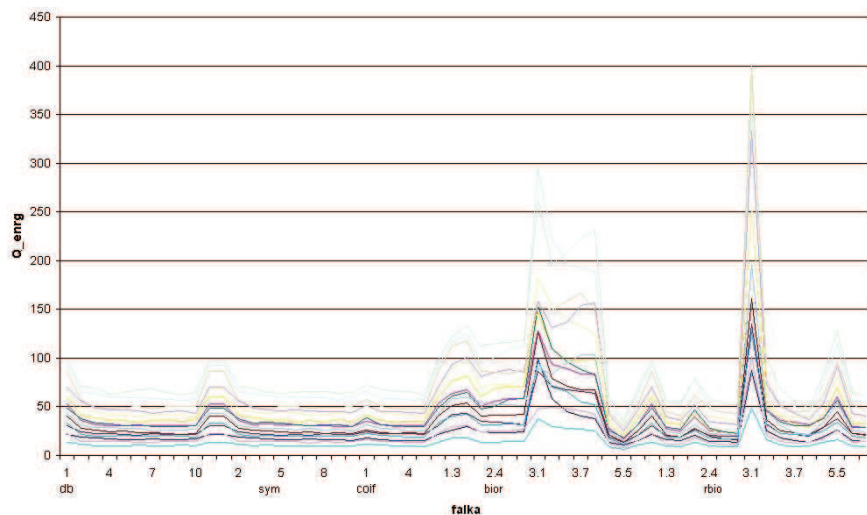
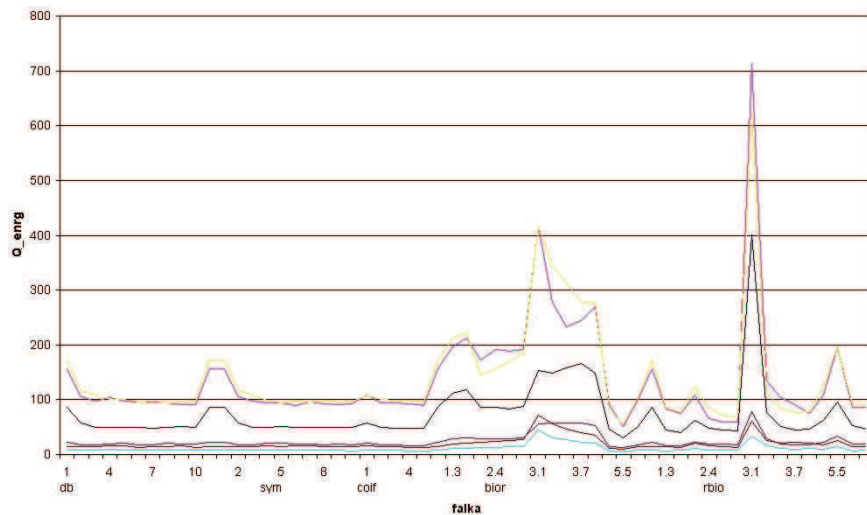
$$Q_{enrg} = \frac{1}{100 - E_x} \quad (7)$$



Rys. 2. Współczynnik jakości Q_{rec} dla kryterium najlepszej regeneracji dla jednego kanału (wielu plików)



Rys. 3. Współczynnik jakości Q_{rec} dla kryterium najlepszej regeneracji dla jednego pliku (jednej próbki)

Rys. 4. Wartości współczynnika jakości Q_{eng} dla jednego kanału (wielu plików)Rys. 5. Wartości współczynnika jakości Q_{eng} dla jednego pliku (jednej próbki)

Kryterium największego zróżnicowania

Ostatnim kryterium jest kryterium największej różnicy. W bardzo dużym uproszczeniu można powiedzieć, że współczynniki transformacji falkowej są miarą podobieństwa transformowanego sygnału do pewnej funkcji-falki, przeskalowanej i przesuniętej w czasie. To znaczy, że wysokie wartości (co do modułu) współczynników transformacji oznaczają duże podobieństwo sygnału do danej falki. Cechę tą wykorzystujemy przy kryterium największego zróżnicowania – szukamy największej różnicy pomiędzy najbardziej ujemną wartością współczynników a najbardziej dodatnią wartością współczynników transformacji. Biorąc pod uwagę kształt krzywych SWD określających wpływ drgań gruntu na budynki [5] skupiamy się na skalach, dla których pseudoczęstotliwości bliskie są 25Hz. Dla tej skali poszukujemy maksimum

globalnego oraz minimum globalnego¹. Współczynnikiem jakości Q_{diff} jest różnica pomiędzy minimum oraz maksimum (patrz równanie 11). Przykładowe wartości współczynnika Q_{diff} dla jednej próbki przedstawiono na rys. 7.

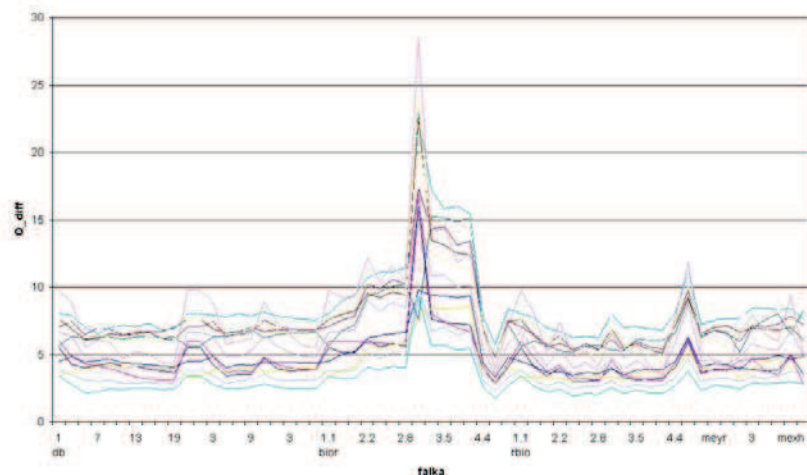
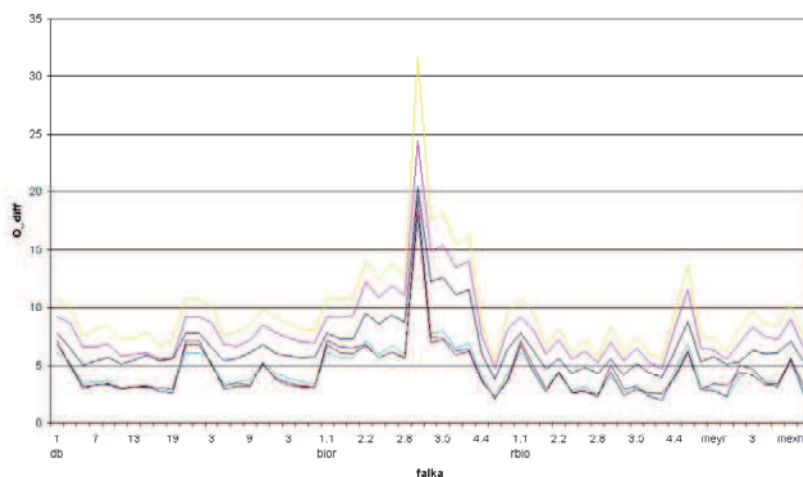
$$C_x(t, S) = \frac{1}{\sqrt{|S|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \psi^* \left(\frac{\tau - t}{S} \right) d\tau \quad (8)$$

$$E_x = \max(C_x(t, S))_{S \rightarrow 25\text{Hz}} \quad (9)$$

$$E_n = \min(C_x(t, S))_{S \rightarrow 25\text{Hz}} \quad (10)$$

$$Q_{diff} = E_x - E_n \quad (11)$$

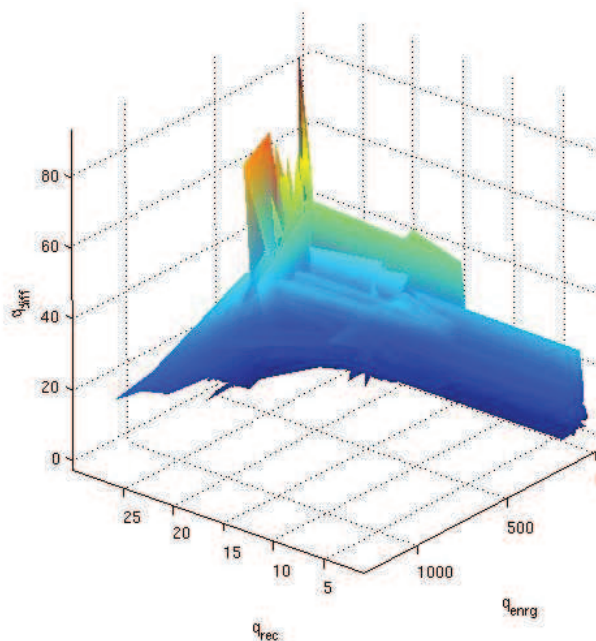
¹ globalnego, w rozumieniu tylko jednej skali a nie wszystkich skal, czyli całego sygnału

Rys. 6. Wartości współczynnika jakości Q_{diff} dla jednego kanału (wiele plików)Rys. 7. Wartości współczynnika jakości Q_{diff} dla jednego pliku (wielu kanałów - jedna próbka)

3. PODSUMOWANIE

W trakcie badań uzyskano dość wysoką powtarzalność wyników. Wartości współczynników przyjmują wartości zbliżone zarówno dla poszczególnych kanałów w jednej próbce (drżania na gruncie jak również drżania na fundamencie budynku) jak również przy porównaniu drgań w poszczególnych kanałach dla różnych próbek. Interesujący jest fakt, że opóźnienia milisekundowe z jakimi wykonano strzelania wydają się nie mieć wpływu na wynik powyższych obserwacji. O wpływie opóźnień milisekundowych na charakter

drgań można poczytać w literaturze [8]. Jednoznaczna interpretacja wyników jest zagadnieniem wciąż pozostawiającym wiele pytań. Jedną z prób odpowiedzi może być określenie dziedzin zadowalającego wyboru. Na rys. 8 przedstawiono wartości wszystkich współczynników jakości w jednym układzie współrzędnych. Rosnące wartości na każdej z osi oznaczają lepsze dopasowanie falki do badanego sygnału. Wyniki badań mogą wskazywać na to, że najlepiej do opisu tego typu drgań nadaje się falka z rodziny falek biortogonalnych rzędu 3.1.



Rys. 8. Wartości współczynników jakości przedstawione na wspólnym wykresie

LITERATURA

1. Meżyk J., Winzer J.: Ocena wpływu robót strzałowych prowadzonych w kopalniach odkrywkowych na obiekty w ich otoczeniu – aktualne problemy. *Górnictwo odkrywkowe*, (5-6), 2004.
2. Krzyworzecka P.: *Wspomaganie synchroniczne w diagnozowaniu maszyn*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom, 2004.
3. Oppenheim G., Poggi J. M., Misiti M., Misiti Y.: *Matlab Wavelet Toolbox (Version 3.0): Tutorial and Reference Guide*. The Mathworks, Natick, USA, 2004.
4. Batko W., Ziółko M.: *Zastosowanie teorii falek w diagnostyce technicznej*. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie. Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Kraków, 2002.
5. PN-85/B-02170. Ocena szkodliwości drgań przekazywanych na budynki przez podłoże.
6. Timofiejczuk A.: *Metody analizy sygnałów niestacjonarnych*. Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2004.
7. Zieliński T.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności sp. z o.o., Warszawa, 2005.
8. Winzer J.: *Wpływ opóźnień milisekundowych przy prowadzeniu strzałów eksploatacyjnych na częstotliwościowe charakterystyki drgań gruntu i budynków*. *Górnictwo i geoinżynieria*. Kwartalnik Akademii Górniczo – Hutniczej, Zeszyt 3/1, rok 28, 2004.

Objaśnienie skrótów

CWT - ang. *Continuous Wavelet Transform*, Ciągła Transformata Falkowa;
 FA – ang. *Fourier Analysis*;
 WA – ang. *Wavelet Analysis, Analiza Falkowa*;
 STFT – ang. *Short-Time Fourier Transform*, Krótkookresowa Transformata Fouriera.



Mgr inż. **Jordan MEŻYK**, ur. 1977, jest doktorantem na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki. Wśród jego zainteresowań znajdują się: analiza sygnałów, przetworniki pomiarowe oraz automatyka przemysłowa.

Dr hab. inż. **Piotr KRZYWORZEKA**, prof. AGH – informacja o autorze na stronie 208.