

Zastosowanie analizy falkowej w defektoskopii wiroprowadowej z impulsowym prądem wzbudzenia

Maria Wrzuszczak, Janusz Wrzuszczak

Politechnika Opolska, Instytut Automatyki, ul. Prószkowska 76 (budynek nr 3), 45-758 Opole

Streszczenie: W publikacji przedstawiono zastosowanie przekształcenia falkowego do analizy sygnałów uzyskanych w wyniku badań metali nieferromagnetycznych z wykorzystaniem zjawiska prądów wirowych techniką PEC. Badania przeprowadzono na próbkach metali i stopów o znanej konduktywności z wadami wzorcowymi w formie nacięć o znanych (zmierzonych) wymiarach geometrycznych. Zarejestrowane przebiegi napięć wyjściowych z przetwornika wiroprowadowego poddano analizie z wykorzystaniem transformat falkowych ciągłej i dyskretnej.

Słowa kluczowe: defektoskopia wiroprowadowa z impulsowym prądem wzbudzenia, analiza falkowa

1. Wprowadzenie

Badania metodą prądów wirowych należą do grupy badań nieniszczących (NDT) i spełniają ważną rolę w badaniach diagnostycznych metali i stopów oraz wszelkich produktów z nich wytworzonych. Badania takie można przeprowadzać w sposób bezstykowy, bezpośrednio w procesie produkcji, jak również później, w fazie użytkowania produktu. Są szeroko stosowane w celu zapewnienia bezpieczeństwa środków transportu (lotnictwo, kolej, transport morski), w energetyce, w przemyśle chemicznym i petrochemicznym a także w badaniach wytrzymałości metalowych konstrukcji.

Przetwornik do badań metodą prądów wirowych składa się z cewki indukcyjnej wytwarzającej pole elektromagnetyczne (tak zwanej cewki wzbudzającej) oraz czujnika do pomiaru pola elektromagnetycznego, którym może być również cewka lub dwie cewki w układzie różnicowym, względnie czujnik Halla lub czujnik magnetorezystancyjny AMR. Metodą prądów wirowych można wykrywać wady typu pęknięcia lub inne nieciągłości materiału na bardzo wczesnym etapie ich zaistnienia, zarówno na powierzchni metalu jak również niewidocznych, leżących w warstwie przypowierzchniowej. Obserwacja w czasie propagacji wad, ułatwia personelowi technicznemu podjęcie decyzji, co do dalszej eksploatacji lub konieczności wymiany elementu lub części konstrukcji. Okresowe badania wałów dużych maszyn elektrycznych, badania łożysk, łopatek wirników, spawów, pozwalają zapobiegać awariom i katastrofom oraz zapewnić bezpieczeństwo personelowi.

W badaniach diagnostycznych metodą prądów wirowych ważne jest nie tylko wykrycie wady, ale również klasyfikacja (jaki jest to rodzaj wady materiałowej) oraz jakie są jej wymiary. Naturalne wady mogą mieć oczywiście różne kształty. Defekty występujące w materiałach przewodzących można podzielić w ogólności na: nieciągłości materiału typu pęknięcia, szczeliny, pustki oraz wtrącenia obce (o innej konduktywności). Pęknięcie materiału rozpoczyna się najczęściej od wady powierzchniowej, stąd ważność wykrywania właśnie tego typu defektów. Kolejnym zagadnieniem jest klasyfikacja wykrytych wad, określenie (zmierzenie) ich rozmiarów geometrycznych oraz w przypadku wad podpowierzchniowych podanie, na jakiej leżą głębokości. Tak więc detekcja, klasyfikacja oraz pomiar to trzy etapy badań diagnostycznych.

Klasyfikacja wad w metalach i stopach oraz pomiar wielkości charakteryzujących je ciągle stawia sporo wyzwań przed personelem wykonującym te badania. Jako jedno z możliwych rozwiązań jest zastosowanie w badaniach metodą prądów wirowych techniki impulsowej PEC (ang. *Pulsed Eddy Current*) [1–3].

2. Defektoskopia wiroprowadowa z impulsowym prądem wzbudzenia

Cewka wzbudzająca przetwornika wiroprowadowego jest zwykle zasilana prądem lub napięciem sinusoidalnie zmiennym o wybranej częstotliwości. Niejednokrotnie konieczne jest wykonanie badań z użyciem kilku częstotliwości wzbudzenia. Przyjmuje się, że głębokość wnikań prądów wirowych, a więc również możliwość wykrycia wad, zależy od częstotliwości prądu wzbudzenia według wzoru

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (1)$$

gdzie: δ – głębokość wnikań prądów wirowych, f – częstotliwość prądu wzbudzenia, μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni, μ_r – przenikalność magnetyczna względna materiału (przewodnika), σ – konduktywność materiału.

Autor korespondujący:

Maria Wrzuszczak, m.wruszczak@po.opole.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 17.06.2019 r., przyjęty do druku 09.09.2019 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

Umownie przyjęta wielkość, zwana głębokością wnikania prądów wirowych, jest to odległość od powierzchni metalu, na której gęstość prądu maleje do wartości $1/e$ wartości początkowej na powierzchni metalu.

Po podaniu sygnału impulsowego prostokątnego na cewkę wzbudzającą uzyskuje się złożony sygnał odpowiedzi przetwornika (zwany dalej sygnałem wyjściowym), który jest sumą wielu harmonicznych, a więc uzyskuje się informacje o zaburzeniach pola elektromagnetycznego tak, jak podczas badań z użyciem prądów sinusoidalnych o różnych częstotliwościach (tzw. badaniach wieloczęstotliwościowych).

W artykule przedstawiono doświadczenia własne autorów nabyte podczas badań przeprowadzonych na wzorcach wykonanych z metali nieferromagnetycznych (aluminium i jego stopów, mosiądzu) z wadami nieciągłości w postaci nacięć i rowków o znanych rozmiarach.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy układu badawczego. Zastosowano w nim przetwornik wiroprądowy własnej konstrukcji, składający się z cewki wzbudzającej pole elektromagnetyczne oraz z dwu cewek w obwodzie wyjściowym w układzie różnicowym, pełniących funkcję czujnika zmian pola elektromagnetycznego. Do badań metali i stopów techniką PEC zaprojektowano i wykonano układ elektroniczny pozwalający wygenerować krótki impuls prądowy. Układ ten wyzwalany jest sygnałem prostokątnym z generatora. Sygnał wyjściowy z przetwornika jest wzmacniany, a następnie prze-



Rys. 1. Schemat blokowy układu badawczego

Fig. 1. Block diagram of investigation system

Tab. 1. Wymiary wad wzorcowych (wzorec nr 1) materiał: aluminium o konduktywności 35 MS/m

Tab. 1. Dimensions of flaws in aluminum samples with conductivity $35 \cdot 10^6$ S/m (width and depth)

Numer wady	Głębokość [mm]	Szerokość [mm]
1	0,2	0,8
2	0,4	0,8
3	0,6	0,8
4	0,8	0,8
5	1,0	0,8
6	1,5	0,8
7	2,0	0,8
8	2,5	0,8
9	3,0	0,8
10	3,5	0,8

Źródło: dane własne

chodzi przez filtr dolnoprzepustowy. Do rejestracji sygnału wykorzystano oscyloskop cyfrowy.

Badania prowadzono na próbkach w kształcie prostopadłościanu wykonanych z metalu lub stopu o znanej konduktywności, w których wykonano wady wzorcowe w formie nacięć o różnych rozmiarach. W tabeli 1 zestawiono wymiary wad wzorcowych w jednym z płaskowników wykonanych z aluminium o konduktywności 35 MS/m.

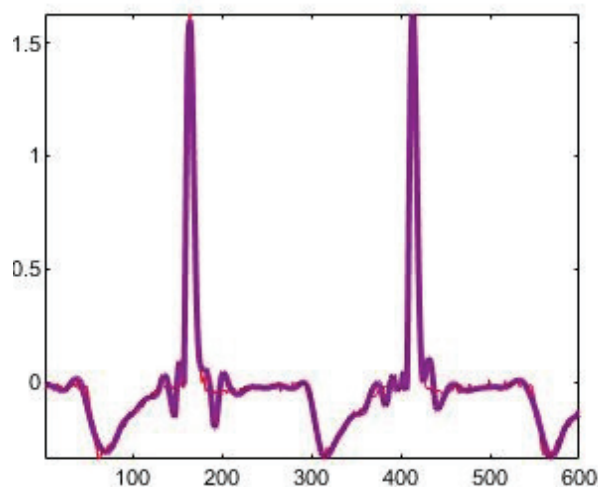
Wady wzorcowe w formie rowków zostały wykonane metodą elektroiskrową. Metoda ta wykorzystuje zjawisko erozji materiału podczas powstawania wyładowania elektrycznego między elektrodą a elementem przewodzącym, wywołanego napięciem impulsowym. W publikacji [4] opisano również inne możliwe do zastosowania techniki wykonania wad wzorcowych do badań nieniszczących metodą prądów wirowych oraz przedstawiono sposoby zmierzenia rozmiarów geometrycznych tak uzyskanych sztucznych wad w metalach, między innymi z wykorzystaniem mikroskopu.

Podczas badań metodą PEC rejestrowano sygnał odpowiedzi przetwornika wiroprądowego umieszczanego kolejno nad wadami powierzchniowymi o znanych rozmiarach geometrycznych w różnych próbkach metali lub stopów. Jako sygnał odniesienia użyto sygnał zarejestrowany z badań próbki materiału bez wad.

3. Analiza zarejestrowanych sygnałów

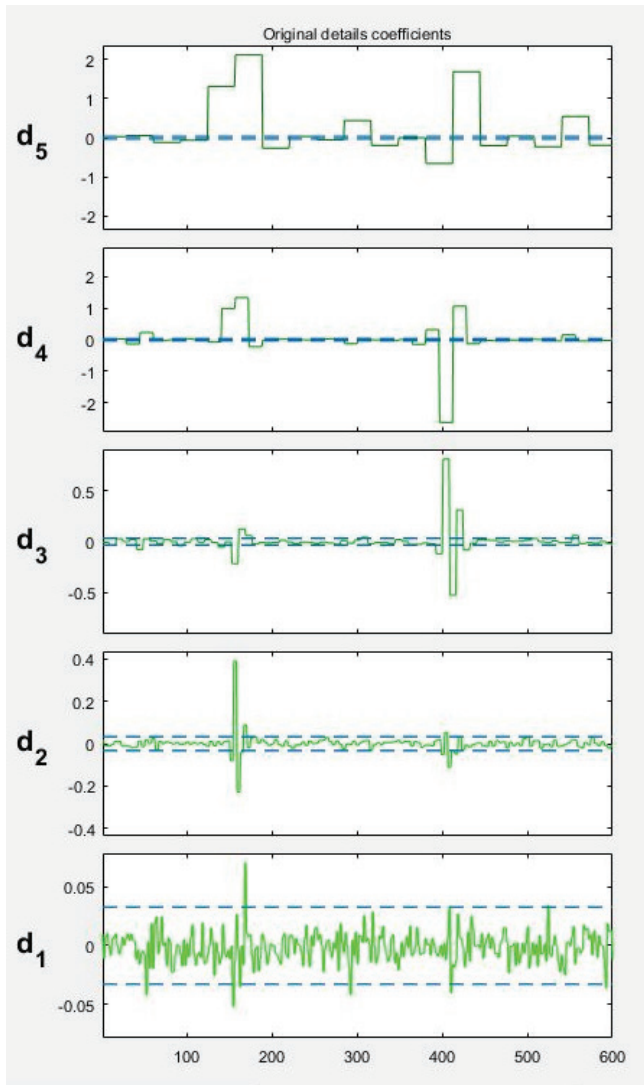
Pakiet plików zawierających zarejestrowane sygnały, uzyskanych w wyniku przeprowadzonych badań nad zestawem próbek z wybranego materiału poddano analizie z wykorzystaniem narzędzia Wavelet Analyzer będącego integralną częścią przybornika MATLAB Wavelet Toolbox ver. 5.2. Metody analizy falkowej, bazujące na ciągłej CWT oraz dyskretnej DWT analizie falkowej, znajdują coraz szersze spektrum zastosowań w analizie i przetwarzaniu sygnałów [5–8]. W omawianym przypadku poddano analizie sygnały jednowymiarowe typu 1D reprezentujące przebiegi napięcia w dziedzinie czasu (rys. 2). Wykorzystano właściwości transformaty falkowej do analizy sygnałów niestacjonarnych [7].

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono dekompozycję falkową sygnału wyjściowego z przetwornika wiroprądowego zarejestrowanego nad wadą typu rowek (nieciągłość) w płaskowniku wykonanym ze stopu aluminium o konduktywności 35 MS/m. Ograniczono się do pięciu poziomów dekompozycji.



Rys. 2. Sygnał wyjściowy z przetwornika wiroprądowego PEC diagnostycznego wzorcowo aluminium z wadą o głębokości 1,5 mm poddany analizie falkowej

Fig. 2. Output signal from PEC transducer for flaw of 1.5 mm depth in Al probe investigated by wavelet methods



Rys. 3. Analiza falkowa dla pięciu poziomów dekompozycji
Fig. 3. Five level wavelet decomposition of signal

Sygnal badany można przedstawić w postaci sumy ważonej współczynników falkowych $wf_a[b]$ i falek $\psi(t)_{a,b}$

$$f(t) = \sum_{a,b} (f, \psi_{a,b}) \psi_{a,b} = \sum_a \sum_b wf_a[b] \psi(t)_{a,b} \quad (2)$$

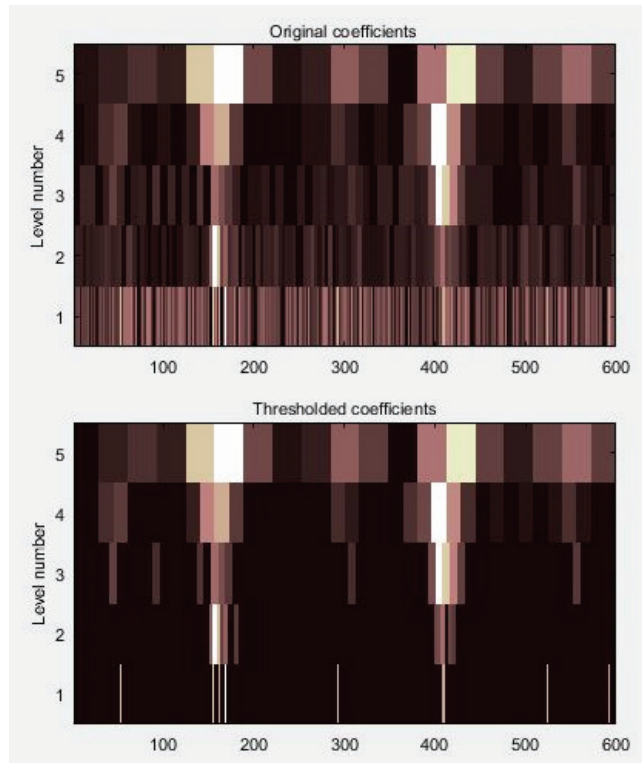
gdzie nawias oznacza iloczyn skalarny funkcji f i falki o współczynnikach a i b , natomiast falki

$$\psi(t)_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3)$$

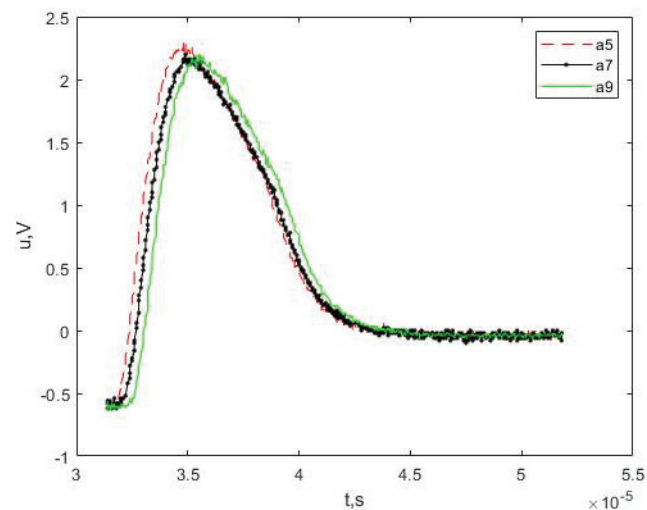
są składowymi wektora bazowego rozwinięcia funkcji $f(t)$ w szereg, uzyskane przez operacje skalowania i translacji w dziedzinie czasu przeprowadzone na tzw. falce macierzystej *mother wavelet* $\psi(t)$.

Grupując składniki sumy rozwinięcia względem kolejnych wartości współczynników skali i analizując odpowiadające im wagi można wykryć wzajemne uwarunkowania występowania podobieństwa kształtu falki o danym współczynniku skali w kolejnych interwałach czasu.

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi czasowe trzech sygnałów z przetwornika wiroprowodowego PEC diagnozującego wady typu rowki w aluminium o różniących się głębokościach. Przy-



Rys. 4. Analiza falkowa sygnału z rys.2 z zastosowaniem eliminacji progowej
Fig. 4. Wavelet decomposition of signal from Fig. 2 with threshold elimination

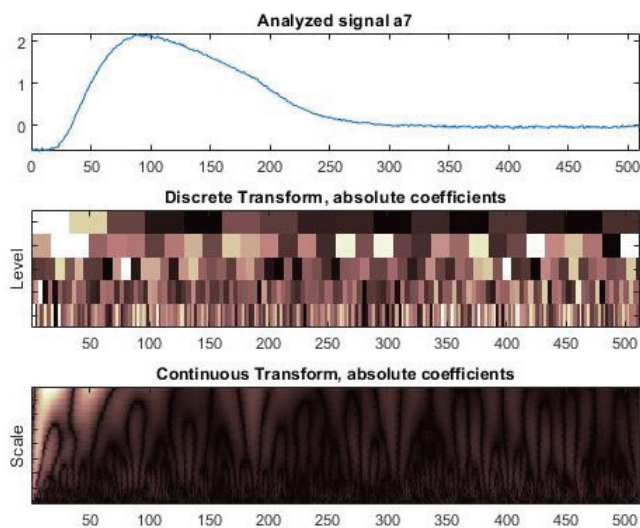


Rys. 5. Przebieg czasowy trzech sygnałów wyjściowych z przetwornika PEC rozpoznającego wady w aluminium oznaczone jako a5, a7, a9

Fig. 5. Time response from PEC transducer for defects a5, a7, a9

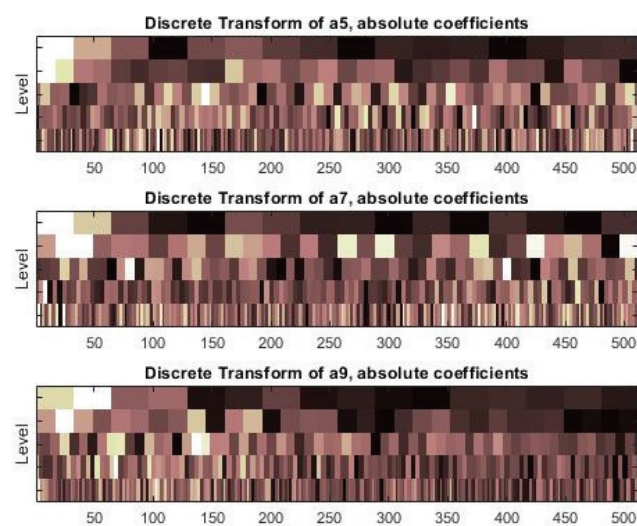
jęto oznaczenia: a5 – wada o głębokości 1 mm, a7 – wada o głębokości 2 mm, a9 – wada o głębokości 3 mm. Sygnały te poddano analizie falkowej dyskretnej i ciągłej (rys. 6). Z kolei na rysunku 7 przedstawiono mapy współczynników dekompozycji trzech sygnałów wad różniących się głębokością.

Analizę można rozszerzyć o badanie rozkładu mocy poszczególnych składowych dekompozycji w wybranych interwałach czasu. Jeśli wybrane sygnały charakteryzują określone rodzaje defektów, to wyróżnikiem informacji może być przesunięcie



Rys. 6. Mapy współczynników dekompozycji po zastosowaniu transformacji falkowych dyskretnej i ciągłej jednego z sygnałów (a7) z wykorzystaniem falki sym8 dla poziomów 1–5

Fig. 6. Maps of decomposition coefficients for discrete and continuous wavelet transform for signal a7 using sym8 wavelet with 5 levels

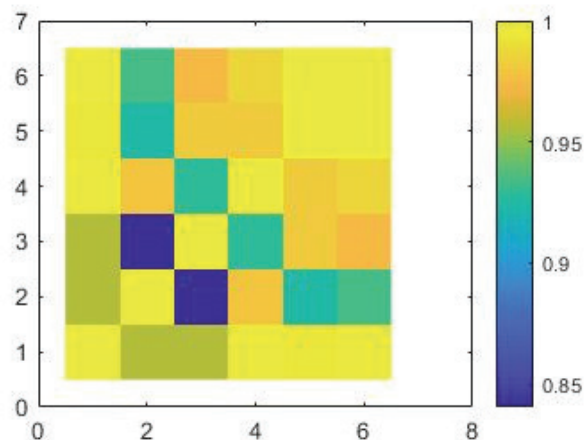


Rys. 7. Porównanie amplitud współczynników dekompozycji dla trzech sygnałów wad w aluminium, oznaczonych a5, a7, a9
Fig. 7. Comparison of decomposition coefficients for signals a5, a7, a9 of Al defects

fazowe sygnału badanego względem sygnału referencyjnego (pochodzącego z materiału bez wady) wyznaczane metodami korelacji. Na rysunku 8 przedstawiono mapę wartości współczynników korelacji sześciu sygnałów, z których pięć jest sygnałami wad, a ostatni – szósty pochodzi od próbki bez wady. Najmniejszą wartość współczynnika korelacji uzyskano dla pary sygnałów a2 i a3. Im mniejsza wartość współczynnika korelacji tym większe są różnice w sygnałach, co można wykorzystać do klasyfikacji wad materiałowych.

4. Wnioski końcowe

Przedstawione wyniki badań pozwalają stwierdzić dużą przydatność ciągłej i dyskretnej transformaty falkowej do wykrywania i klasyfikacji wad w metalach z wykorzystaniem techniki PEC poprzez wyodrębnienie charakterystycznych cech sygna-



Rys. 8. Mapa współczynników korelacji sześciu sygnałów (pięciu sygnałów wad różniących się głębokością i sygnału szóstego)
Fig. 8. Map of correlation coefficients for six signals (five testing signals from flaws with different depth and one from Al test sample without flaw)

łów w dziedzinie czasu i częstotliwości. W obecności niektórych rodzajów wad stwierdzono zależność między amplitudą, kształtem lub przesunięciem w czasie sygnału badanego i referencyjnego.

Transformacja falkowa jest szczególnie przydatna do analizy cech sygnałów niestacjonarnych. Narzędzia wykorzystujące technikę falkową pozwalają również na odfiltrowanie zakłóceń na podstawie doboru progów filtrów (ręcznie, metodą optymalizacji lub z wykorzystaniem innych algorytmów eliminacji progowej) dla różnych poziomów dekompozycji.

Bibliografia

- He Y., Luo F., Pan M., Weng F., Hu X., Gao J., Liu B., *Pulsed eddy current technique for defect detection in aircraft riveted structures*. Elsevier, “NDT & E International”, Vol. 43, No. 2, 2010, 176–181, DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.10.010.
- Sophian A., Tian G.Y., Taylor D., Rudlin J., *Design of a pulsed eddy current sensor for detection of defects in aircraft lap-joints*. Elsevier, “Sensors and Actuators A”, Vol. 101, No. 1–2, 2002, 92–98, DOI: 10.1016/S0924-4247(02)00195-4.
- Wrzuszczak M., Wrzuszczak J., *Badania diagnostyczne metali i stopów metodą PEC*, „Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej”, Nr 59, 2018, 215–218, DOI: 10.32016/1.59.47.
- Wrzuszczak M., *Wytwarzanie wzorców wad w materiałach przewodzących dla celów diagnostyki wiroprądowej*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 14, Nr 12, 2010, 138–141.
- Lingqi Li, Kazuhiko Tsukada, Koichi Hanasaki, Zheng Liu, *Fusion of Multi-Frequency Eddy Current Signals by using Wavelet Analysis Method*. ISIF 2002, 108–113.
- Sasi B., Rao B.P.C., Thirunavukkarasu S., Jayakumar T., Kalyanasundaram P., *Wavelet transform based method for eddy current testing of cladding tubes*. NDE 2002, Predict, Assure, Improve, National Seminar of ISNT Chennai, www.nde2002.org.
- Białasiewicz J.T., *Falki i aproksymacje*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- Ewert P., Dorosławska A., *Zastosowanie analizy falkowej do wykrywania uszkodzeń łożysk tocznych*, „Przeгляд Elektrotechniczny”, R. 93, Nr 1, 2017, 305–310, DOI: 10.15199/48.2017.01.72.

Application of Wavelet Analysis in Defectoscopy with Pulsed Eddy Current

Abstract: In the paper there are presented the results of an experimental research oriented towards solving defectoscopy problems applying continuous and discrete wavelet transform (CWT and DWT) for pulsed eddy current response analysis. The investigations has been performed on some sets of categories of material flaws made of different metals of, with various depth, width and regular/ non regular shapes fabricated in form surface and subsurface defects. Detecting and recognizing selected types of flaws and classifying them due to derivation of distinguished features of the tested materials has been performed in an environment of MATLAB Wavelet Toolbox ver. 5.2 in the framework of Wavelet Analyzer functionality. The certain part of analysis was made out with Multiple 1D tool and Regression Estimation 1-D support taking advantage of their facilities. In fact some families of signal records exhibited correlation between lag versus reference signal and flaw properties, while in the other cases the amplitude or shape of the signal was the crucial thing. The proposed approach seems as affective tool for PEC defectoscopy and defectometry.

Keywords: pulsed eddy current testing, PEC, wavelet analysis

dr hab. inż. Maria Wrzuszczaek, prof. PO

m.wrzuszczaek@po.edu.pl
ORCID: 0000-0001-7236-8259

Jest profesorem nadzwyczajnym na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. W 2012 r. uzyskała stopień naukowy doktora habilitowanego. Jest autorką lub współautorką kilkudziesięciu publikacji naukowych. Zainteresowania naukowe to metrologia, cyfrowe układy pomiarowe, cyfrowe przetwarzanie sygnałów oraz badania materiałów metodą prądów wirowych.



dr inż. Janusz Wrzuszczaek

j.wrzuszczaek@po.edu.pl
ORCID: 0000-0002-6487-5995

Pracuje w Instytucie Automatyki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Jest autorem lub współautorem kilkudziesięciu publikacji naukowych. Zainteresowania naukowe to teoria sterowania, automatyzacja procesów przemysłowych, modelowanie i symulacja układów dynamicznych, systemy czasu rzeczywistego.

