

BADANIA DIAGNOSTYCZNE METALI I STOPÓW METODĄ PEC

Maria WRZUSZCZAK¹, Janusz WRZUSZCZAK²

1. Politechnika Opolska, Instytut Automatyki, Katedra Elektroniki i Metrologii,
tel.: 774498648 e-mail: m.wrzuszczak@po.opole.pl
2. Politechnika Opolska, Instytut Automatyki, Katedra Systemów Sterowania i Automatyki Przemysłowej
tel.: 774498650 e-mail: j.wrzuszczak@po.opole.pl

Streszczenie: W publikacji przedstawiono wyniki badań metali nieferromagnetycznych z wykorzystaniem zjawiska prądów wirowych techniką PEC (Pulsed Eddy Current). Badania przeprowadzono na próbkach metali i stopów o znanej konduktywności w których wykonano wady wzorcowe w formie nacięć i nawiertów o znanych (zmierzonych) wymiarach geometrycznych. Zarejestrowane napięcia wyjściowe z przetwornika wiropądowego poddano analizie metodą falkową z wykorzystaniem falek typu Morleta (morl) oraz symlet ósmego rzędu (sym8).

Słowa kluczowe: PEC, przetwornik wiropądowy z impulsowym prądem wzbudzenia, analiza falkowa.

1. WSTĘP

Badania metodą prądów wirowych odgrywają ważną rolę w diagnostyce metali i stopów oraz produktów z nich wytworzonych. Przetwornik wiropądowy 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 lub czujnik Halla. Badania nieniszczące metodą prądów wirowych są szczególnie przydatne do detekcji niewielkich wad typu nieciągłości materiału na powierzchni metali lub nieciągłości niewidocznych, leżących w warstwie przypowierzchniowej. Na przykład możliwe jest wykrywanie pęknięć na konstrukcjach metalowych lub częściach maszyn na wczesnym etapie powstania wad, a następnie obserwacja w czasie ich propagacji, co ułatwia personelowi podjęcie decyzji co do dalszej eksploatacji lub konieczności wymiany elementu.

Detekcja i klasyfikacja wad powierzchniowych i podpowierzchniowych w metalach i stopach ciągle stawia sporo wyzwań przed personelem wykonującym te badania. Jako jedno z możliwych rozwiązań jest zastosowanie techniki impulsowej PEC (ang. Pulsed Eddy Current) [1,2].

2. METODA WIROPĄDOWA Z IMPULSOWYM PRĄDEM WZBUDZENIA

Cewka wzbudzająca przetwornika wiropądowego jest zwykle zasilana prądem lub napięciem sinusoidalnie zmiennym o wybranej częstotliwości. Niejednokrotnie konieczne jest wykonanie badań dla kilku częstotliwości wzbudzenia. Przyjmuje się, że głębokość wnikania prądów

wirowych, a więc również możliwość wykrycia wad zależy od częstotliwości prądu wzbudzenia według wzoru

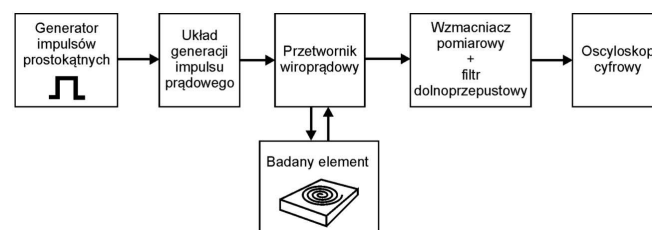
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (1)$$

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

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

Przy podaniu sygnału impulsowego prostokątnego na cewkę wzbudzającą uzyskuje się złożony sygnał odpowiedzi układu (zwany dalej sygnałem wyjściowym), który jest sumą wielu harmonicznych, a więc uzyskuje się informacje o zaburzeniach pola elektromagnetycznego jak przy badaniach sinusoidalnych przeprowadzanych dla różnych częstotliwości (tzw. badaniach wieloczęstotliwościowych).

W artykule przedstawiono doświadczenia własne autorów na podstawie badań przeprowadzonych na wzorcach z metali nieferromagnetycznych, głównie aluminium i jego stopów z wadami nieciągłości w postaci nacięć i rowków o znanych wymiarach.

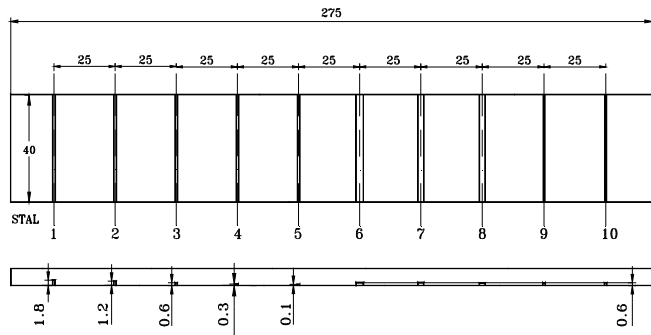


Rys.1. Schemat blokowy układu badawczego

Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy układu badawczego. Zastosowano przetwornik wiropądowy 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 funkcji. Sygnał wyjściowy z przetwornika jest wzmacniany oraz przechodzi przez filtr dolnoprzepustowy. Do rejestracji sygnału wykorzystano oscyloskop cyfrowy.

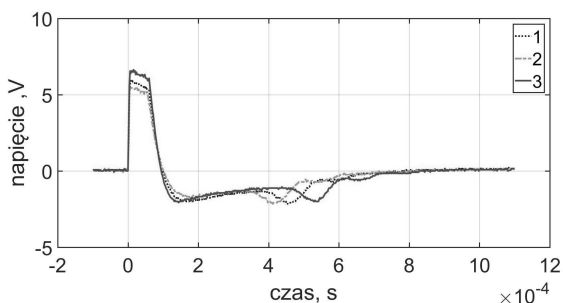
Badania prowadzono na próbkach w kształcie prostopadłościanu z metalu lub stopu o znanej konduktywności, w których wykonano wady wzorcowe w formie nacięć o różnych wymiarach. Na rysunku 2 przedstawiono poglądowo jeden z płaskowników z wadami powierzchniowymi wzorcowymi o znanych wymiarach.



Rys.2. Metalowy płaskownik z wadami wzorcowymi w kształcie rowków, wymiary w mm; wady nr 1÷5 mają stałą szerokość i różną głębokość, wady nr 6÷10 mają stałą głębokość i różną szerokość

Wady wzorcowe w formie rowków zostały wykonane metodą elektroiskrową. Metoda ta wykorzystuje zjawisko erozji materiału podczas powstawania łuku elektrycznego między elektrodą a materiałem przewodzącym przy zastosowaniu napięcia impulsowego. Szerzej sposoby wykonania wad wzorcowych dla celów badań nieniszczących metodą prądów wirowych opisano w publikacji [3].

Podczas badań metodą PEC rejestrowano sygnał odpowiedzi przetwornika wiroprowodowego umieszczanego kolejno nad wadami powierzchniowymi o znanych wymiarach geometrycznych w różnych próbkach metali lub stopów. Przykłady zarejestrowanych sygnałów przedstawiono na rysunku 3. Są to sygnały dla wad typu rowki o tej samej szerokości ale różnej głębokości w aluminium o konduktywności 34 MS/m. Jako sygnał odniesienia zarejestrowano sygnał dla materiału bez wad.



Rys.3. Sygnał wyjściowy z przetwornika wiroprowodowego dla trzech przypadków: 1 – metal bez wady, 2 – metal z wadą o głębokości 1.5 mm., 3 – metal z wadą o głębokości. 3 mm

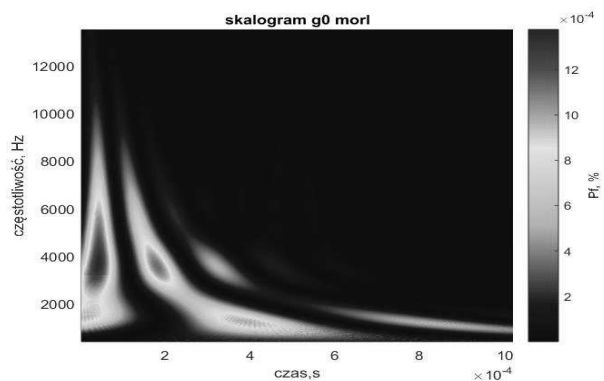
Pliki z danymi zarejestrowanych sygnałów nazwano odpowiednio: dla materiału bez wady – g0, dla wady o głębokości 1.5 mm. – g6, dla wady o głębokości. 3 mm – g10. Takie oznaczenia pojawiają się na rysunkach

przedstawiających wyniki analizy sygnałów w dalszej części artykułu.

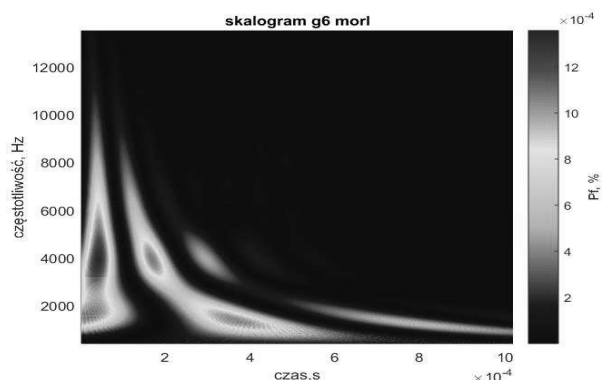
2. ANALIZA FALKOWA ZAREJESTROWANYCH SYGNAŁÓW

Aby wyodrębnić informacje o wadach materiałowych zarejestrowane sygnały poddano analizie falkowej z wykorzystaniem przybornika Matlab Wavelet Toolbox wersja 4.18. Falki znajdują coraz szersze zastosowanie w analizie i przetwarzaniu sygnałów cyfrowych [4-6]. W publikacjach analiza taka często dotyczy sygnałów uzyskanych w wyniku symulacji komputerowych, np. w publikacjach [7, 8]. W niniejszym artykule przedstawiono analizę sygnałów zarejestrowanych z wykorzystaniem ciągłego przekształcenia falkowego.

Pierwszy etap analizy to dobór rodzaju falek. Przeprowadzono analizę z wykorzystaniem falek Morleta, Haara, symlet2, symlet8. Największe zróżnicowanie skalogramów sygnałów g0, g6, g10 zauważono w przypadkach zastosowania falek Morleta i symlet8. Na rysunkach 4, 5, 6 przedstawiono wynik analizy falkowej sygnałów z rysunku 3 z wykorzystaniem falki Morleta. Jest to zależność względnej gęstości energii sygnału dla każdej falki analizującej w stosunku do całkowitej energii sygnału, od czasu i częstotliwości.

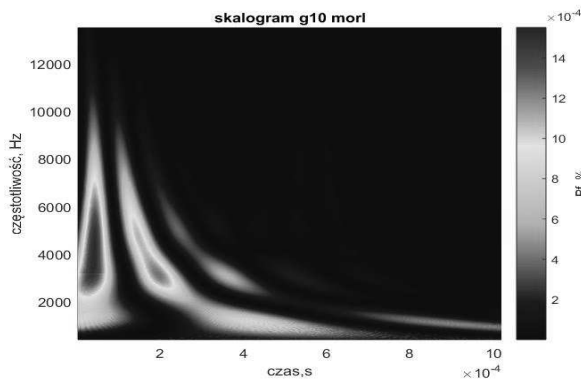


Rys. 4. Skalogram dla sygnału g0 (bez wady) uzyskany z wykorzystaniem falki Morleta, Pf – względna gęstość energii sygnału

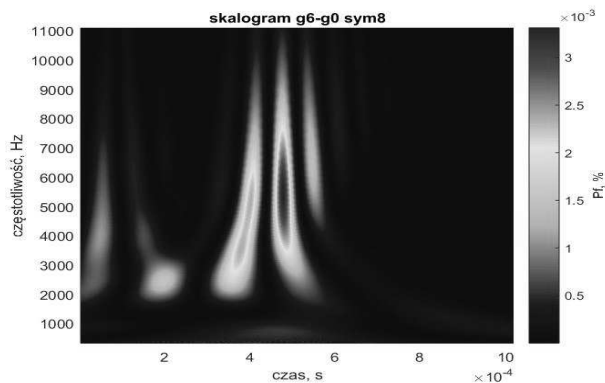


Rys. 5. Skalogram dla sygnału g6 (wada o głębokości 1,5mm) falką Morleta, Pf – względna gęstość energii sygnału

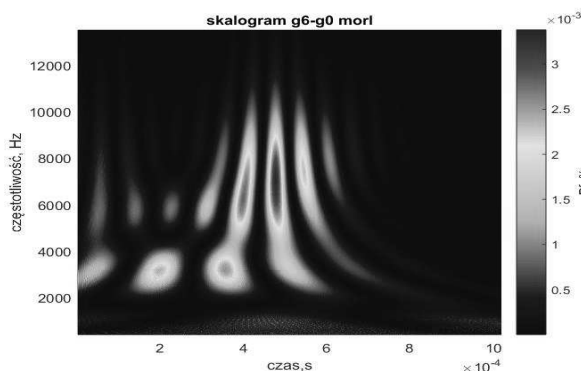
Następnie dokonano analizy falkowej sygnału różnicy pomiędzy sygnałem z wadą oraz sygnałem bez wady. Wyniki analizy z wykorzystaniem falki Morleta przedstawione są na rysunkach 7 i 8.



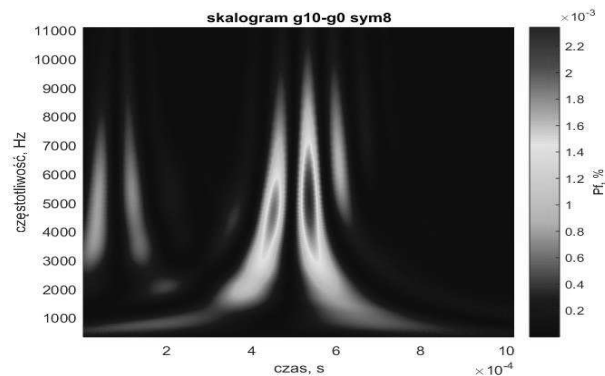
Rys. 6. Skalogram dla sygnału g10 (wada o głębokości 3mm) falką Morleta, Pf – względna gęstość energii sygnału



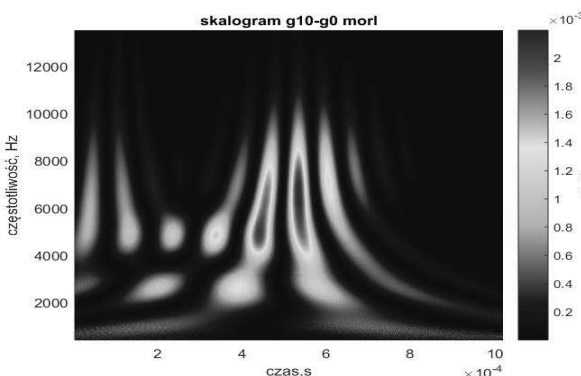
Rys. 9. Skalogram dla sygnału różnicowego g6-g0 falką symlet8



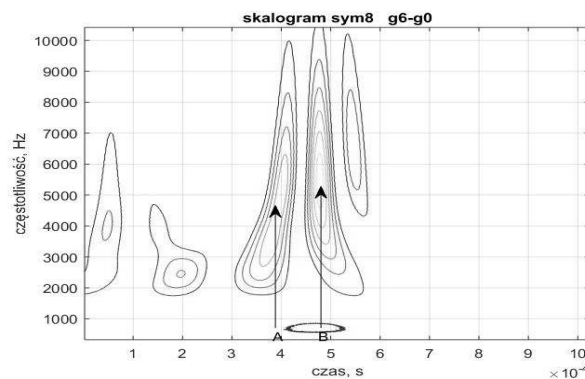
Rys. 7. Skalogram dla sygnału różnicowego g6-g0 falką Morleta



Rys. 10. Skalogram dla sygnału różnicowego g10-g0 falką symlet8



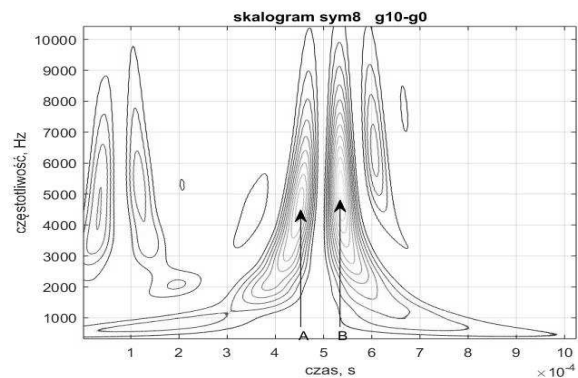
Rys. 8. Skalogram dla sygnału różnicowego g10-g0 falką Morleta



Rys. 11. Konturowy skalogram dla sygnału różnicowego g6-g0 falką symlet8; strzałkami A, B oznaczono położenie obszarów o maksymalnych wartościach współczynników falkowych

Na podstawie porównania charakterystyk typu skalogram (rys. 7 i 8) można wykazać korelację pomiędzy lokalizacją detali o znaczącej energii oraz rodzajem defektów. Widoczna jest prawidłowość polegająca na przesuwaniu się lokalizacji czasowej charakterystycznych detali w prawo wraz ze zwiększaniem się głębokości wady. Dla porównania na rysunkach 9 i 10 przedstawiono analizę tych samych sygnałów różnicowych z wykorzystaniem falki symlet8. Kwadrat współczynników ciągłej transformaty falkowej opisuje poziomy energetyczne badanego sygnału w przestrzeni skala – czas lub częstotliwość – czas.

Z porównania skalogramów z rysunków 9 i 10 wynika ta sama zależność: przesuwanie się obszarów o energii maksymalnej w prawo po osi czasu wraz ze zwiększaniem się głębokości wady. Można to dostrzec na kolejnych rysunkach 11 i 12 w formie skalogramów konturowych. Obszary, na których współczynniki transformaty falkowej przyjmują maksymalne wartości oznaczono strzałkami. Występuje w nich maksymalne podobieństwo falek analizujących o danej skali/częstotliwości i przesunięciu w czasie z analizowanym sygnałem.



Rys. 12. Konturowy skalogram dla sygnału różnicowego g10-g0 falką symlet8

W badaniach do analizy falkowej wykorzystano rodzinę rzeczywistych falek Morleta z uwagi na dobrą

rozdzielczość częstotliwości dla dużych wartości skali czyli niskich częstotliwości. Drugim rodzajem falek wykorzystanych w badaniach była rodzina prawie symetrycznych symletów rzędu 8 o prawie liniowej fazie widma częstotliwościowego.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że ciągła transformata falkowa w stosunku do dyskretnej wymaga znacznie większego obszaru pamięci do przechowywania zmiennych, ale pozwala wychwycić dodatkowe artefakty o charakterze przyczynowym.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Zastosowanie techniki Pulsed Eddy Current (PEC) w badaniach wiroprądowych materiałów przewodzących daje obiecujące wyniki. Pozwala na wykrywanie wad materiałów przewodzących leżących na różnych głębokościach podczas jednego badania, ponieważ sygnał wyjściowy jest odpowiedzią złożoną z odpowiedzi na wiele harmonicznych występujących w sygnale wzbudzenia, jest więc bogatszy w informacje. Konwencjonalna technika badań nieniszczących metodą prądów wirowych stosuje sinusoidalny prąd wzbudzenia pola elektromagnetycznego. Chcąc uzyskać informacje o wadach materiałowych leżących na różnych głębokościach, trzeba powtórzyć badania kilkakrotnie, zmieniając częstotliwość wzbudzenia. Z tym wiąże się często konieczność zmiany źródła prądu wzbudzenia oraz zmiany przetwornika wiroprądowego.

Sygnał wyjściowy z przetwornika wiroprądowego może zostać poddany analizie z zastosowaniem zaawansowanych metod analizy sygnału.

W niniejszym artykule przedstawiono sposób przeprowadzania analizy sygnałów wyjściowych z przetwornika wiroprądowego z impulsowym prądem wzbudzenia z zastosowaniem dwu rodzaju falek: Morleta oraz symletów ósmego rzędu (sym8), z wykorzystaniem przybornika Wavelet programu Matlab. Odpowiedni dobór rodzaju falek pozwala wyodrębnić lub uwypuklić różnice w sygnałach i uzyskać czasowo-częstotliwościowe zależności gęstości energii sygnału dla zbioru falek o różnych współczynnikach skali i przesunięcia.

Wykrycie wad polegało na wykryciu istotnych różnic właściwości sygnału dla metalu z wadą i sygnału dla metalu bez wady. Wykonano również analizę falkową różnicy sygnałów. Uzyskane wyniki potwierdziły skorelowanie właściwości sygnału z istnieniem defektów materiałowych.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Ali Sophian, Gui Yun Tian, David Taylor, John Rudlin: Design of a pulsed Eddy current sensor for detection of defects in aircraft lap-joints. Elsevier, Sensors and Actuators A, 101 (2002), pp. 92-98.
2. Yunze He, Feilu Luo, Mengchun Pan, Feibing Weng, Xiangchao Hu, Junzhe Gao, Bo Liu: Pulsed eddy current technique for defect detection in aircraft riveted structures. Elsevier, NDT&E International 43 (2010) pp. 176-181.
3. Wrzuszczak M.: Wytwarzanie wzorców wad w materiałach przewodzących dla celów diagnostyki wiroprądowej, Pomiary Automatyka Robotyka 2010 nr 12, str.138-141.
4. Lingqi Li, Kazuhiko Tsukada, Koichi Hanasaki, Zheng Liu: Fusion of Multi-Frequency Eddy Current Signals by using Wavelet Analysis Method. ISIF 2002, pp.108-113.
5. 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.
6. Białasiewicz J. T.: Falki i aproksymacje, Wydawnictwo Naukowo- Techniczne, Warszawa 2000.
7. Gombarska D., Smetana M.: Wavelet based signal analysis of pulsed Eddy current signals, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), R.87, NR 5/2011, pp. 37-39.
8. Józefczyk I.: Dyskretna transformata falkowa dla wybranego modelu symulacyjnego sygnału wibroakustycznego, Diagnostyka 34, str. 137-141.

PULSED EDDY CURRENT TESTING OF METAL AND ALLOY

In this paper the results of pulsed eddy current testing (PEC) for nonferrous materials are presented. The research deals with metal and alloy probe (Al) with known value of conductivity with artificial defects in form discontinuities (notches) with known depth and width. The output signals from eddy current transducer for PEC technique picked up with a digital oscilloscope were recorded in separate files and then investigated by the set of analyzing wavelets. The programming environment of Matlab with the Wavelet Toolbox of The MathWorks was employed. The local properties of signals were derived applying Morlet wavelet (morl) and symlet of eighth order (sym8). Based on one-dimensional real signal in time the jointly frequency and time analysis was performed to extract the localization distinguishing details of meaning energy correlated with type and size of fabricated material flaws. Detecting the fundamental properties was performed with the scalogram plots. Some kind of causality was observed depending on localization the sound details the more right on the time axis the deeper or more extensive was the size of material flaw.

Keywords: PEC, pulsed Eddy current testing, wavelet analysis.