

# Układ tomografu wiroprowadowego wysokiej rozdzielczości oraz możliwości filtracji sygnału pomiarowego

Jacek Salach, Roman Szewczyk

Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej, Politechnika Warszawska

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono budowę opracowanego tomografu wiroprowadowego wysokiej rozdzielczości do badania obiektów o kształcie zbliżonym do cylindrycznego. W tomografii zastosowano specjalizowany miernik przesunięcia fazowego oraz nowoczesny mikrokontroler o architekturze ARM. Wyniki zrealizowanych badań wykazały, że filtry liniowe (np. filtr Butterwortha) nie umożliwiają poprawy jakości sygnału pomiarowego w tomografii wiroprowadowej. W artykule przytoczono wytyczne do opracowania filtracji nieliniowej minimalizującej wpływ zakłóceń impulsowych na wyniki pomiaru.

**Słowa kluczowe:** badania nieniszczące, tomografia wiroprowadowa

**B**adania tomograficzne elementów konstrukcyjnych są intensywnie rozwijanym obszarem badań nieniszczących. Główną zaletą tego typu badań jest możliwość uzyskania szczegółowej informacji o charakterze i kształcie nieciągłości w badanym elemencie. Jednak stosowana powszechnie tomografia z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego niesie ze sobą wiele zagrożeń typowych dla techniki rentgenowskiej. W rezultacie technika ta jest kosztowna i trudna do stosowania w warunkach przemysłowych.

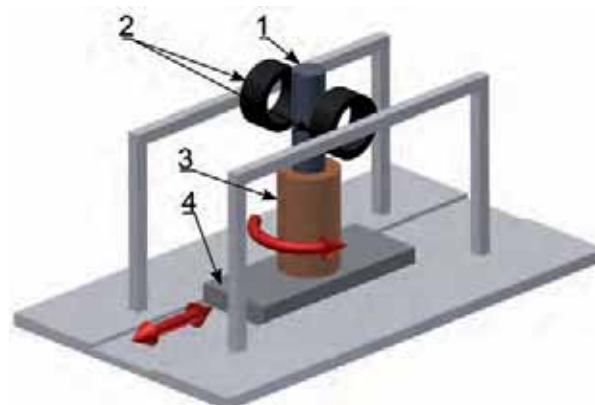
## 1. Wprowadzenie

Niedogodności związane z tomografią rentgenowską powodują konieczność poszukiwania innych rozwiązań umożliwiających badania tomograficzne. Jedną z takich metod jest tomografia wiroprowadowa.

Główną zaletą tomografii wiroprowadowej jest jej całkowite bezpieczeństwo. W tomografii wiroprowadowej promieniowanie rentgenowskie zastąpione jest polem magnetycznym o częstotliwości akustycznej. Z tego względu metodami tomografii wiroprowadowej można badać elementy metalowe wykonane zarówno z materiałów ferromagnetycznych, jak i niemagnetycznych [1]. W rezultacie metoda ta może znaleźć szerokie zastosowanie w przemyśle. Główną barierą upowszechnienia się tomografii wiroprowadowej jest brak wiedzy, zarówno w zakresie metod przetwarzania sygnału pomiarowego, jak i algorytmów analizy tego sygnału z wykorzystaniem przekształcenia tomograficznego odwrotnego [2].

## 2. Konstrukcja tomografu wiroprowadowego

Zasadę działania tomografu wiroprowadowego do badania obiektów cylindrycznych przedstawiono na rys. 1. Cylindryczny obiekt badany (1) umieszczony jest między dwoma cylindrycznymi cewkami (2): sterującą i pomiarową. W trakcie pomiaru obiekt badany (1) jest obracany wokół własnej osi za pomocą mechanizmu obrotowego (3) oraz przemieszczany wraz ze stolikiem liniowym (4).



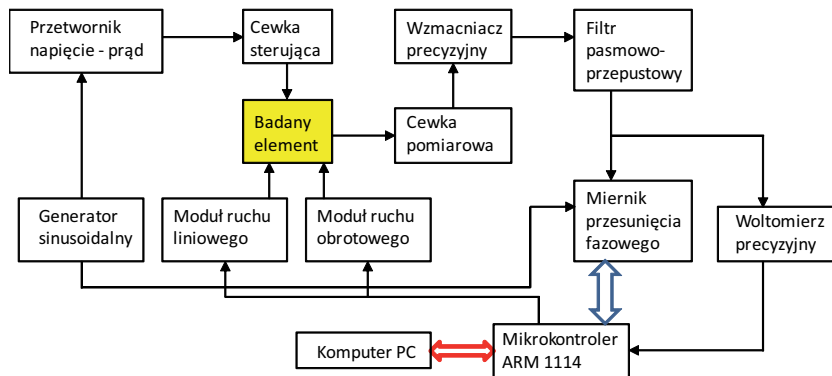
**Rys. 1.** Idea zasady działania tomografu wiroprowadowego do badania obiektów cylindrycznych: 1 – cylindryczny obiekt badany, 2 – cewki cylindryczne: sterująca i pomiarowa, 3 – mechanizm obrotowy, 4 – stolik liniowy

**Fig. 1.** Idea of operation of eddy current tomography: 1 – cylindrical tested element, 2 – cylindrical coils: driving and measuring, 3 – rotation move mechanism, 4 – linear move mechanism

W rezultacie, w realizowanym automatycznie cyklu pomiarowym, uzyskiwana jest informacja zarówno o amplitudzie sygnału mierzonego na cewce pomiarowej, jak i o przesunięciu fazowym tego sygnału względem sygnału sterującego. Zarówno zmiany przesunięcia fazowego, jak i zmiany wartości amplitudy są konsekwencją przejścia strumienia magnetycznego przez badany element i wpływu na ten strumień prądów wirowych indukowanych w elemencie. Ze względu na przemieszczanie się obiektu i jego obrót wokół własnej osi, zestaw wyników pomiarów parametrów sygnału w cewce pomiarowej umożliwia odtworzenie informacji o kształcie

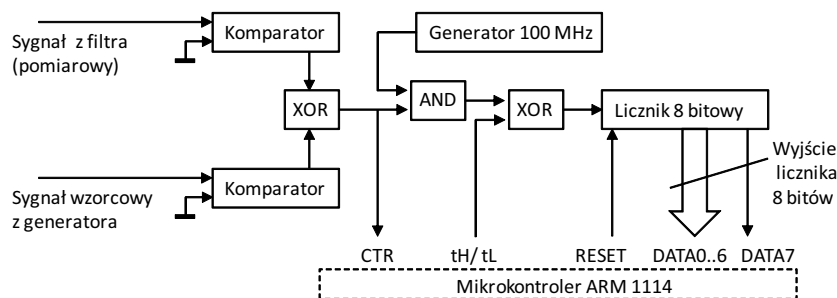
i budowie wewnętrznej badanego elementu. Należy podkreślić, że opracowany tomograf umożliwia pomiary z rozdzielczością przestrzenną znacznie wyższą niż w rozwiązaniach prezentowanych do tej pory [3].

Na rys. 2 zaprezentowano schemat blokowy opracowanego stanowiska tomografu wiroprądowego. Napięciowy generator sinusoidalny o stabilnej częstotliwości  $f = 1$  kHz i stabilnej wartości amplitudy, steruje przetwornikiem napięcie-prąd, połączonym z cewką sterującą. W rezultacie cewka sterująca wytwarza sinusoidalnie zmienne pole magnetyczne o natężeniu proporcjonalnym do wartości prądu w tej cewce. W tym polu umieszczony jest badany obiekt. Po przeciwnej stronie obiektu badanego (co jest widoczne także na rys. 1) umieszczona jest cewka pomiarowa, która jest podłączona do wejścia wzmacniacza o dużej stabilności i liniowości wzmocnienia. Następnie sygnał pomiarowy jest filtrowany, co znacznie zmniejsza poziom zakłóceń. Po filtracji pasmowo-przepustowej, mierzona jest amplituda sygnału pomiarowego oraz jego przesunięcie fazowe względem sygnału sterującego przetwornik napięcie-prąd. Procesem pomiaru steruje mikrokontroler ARM 1114 z rodziny Cortex [4]. Mikrokontroler ten steruje także modułami sterującymi silnikami krokowymi odpowiedzialnymi za ruch obrotowy i przesunięcie liniowe. Uzyskane dane pomiarowe przesyłane są do komputera PC z wykorzystaniem portu szeregowego RS-232. W komputerze PC dane są gromadzone, przetwarzane i archiwizowane z wykorzystaniem oprogramowania LabVIEW.



Rys. 2. Schemat blokowy opracowanego stanowiska tomografu wiroprądowego

Fig. 2. Schematic block diagram of eddy-current tomograph



Rys. 3. Schemat blokowy opracowanego miernika przesunięcia fazowego

Fig. 3. Schematic block diagram of developed phase shift meter

Z aparaturowego punktu widzenia najtrudniejszy do zrealizowania jest pomiar przesunięcia fazowego sygnału z cewki pomiarowej względem sygnału z generatora sinusoidalnego. Na rys. 3 przedstawiono schemat blokowy opracowanego miernika przesunięcia fazowego z wykorzystaniem generatora o częstotliwości 100 MHz, współpracującego z mikrokontrolerem ARM1114.

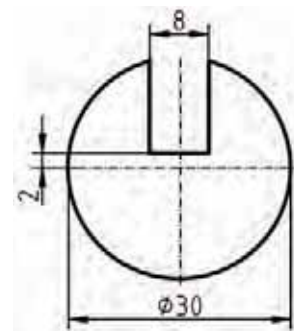
W zastosowanym rozwiązaniu, na początku toru pomiarowego, sygnały mierzone są podawane na wejście komparatorów, co umożliwia ich przetworzenie na sygnały prostokątne. Następnie wyznaczane jest przesunięcie fazowe jako opóźnienie czasowe w przypadku, gdy sygnały z komparatorów są zgodne oraz gdy są różne. Zgodność wartości sygnałów określana jest za pomocą bramki XOR. W opracowanym mierniku przesunięcia fazowego wykorzystano licznik ośmiobitowy. Kolejne bity licznika realizowane są za pomocą szesnastobitowego licznika wbudowanego w strukturę mikrokontrolera ARM1114. Jednak należy podkreślić, że częstotliwość zliczania tym licznikiem ograniczona jest do 5 MHz, co spowodowało konieczność zastosowania rozwiązania przedstawionego na rys. 3.

### 3. Wyniki badań obiektu modelowego

W ramach pracy zrealizowano pomiar charakterystyk tomograficznych wałka z podcięciem o długości 250 mm (rys. 4). Podcięcie o szerokości 8 mm symuluje nieciągłość obiektu. Wałek został wykonany z ferromagnetycznej stali konstrukcyjnej typu 45.

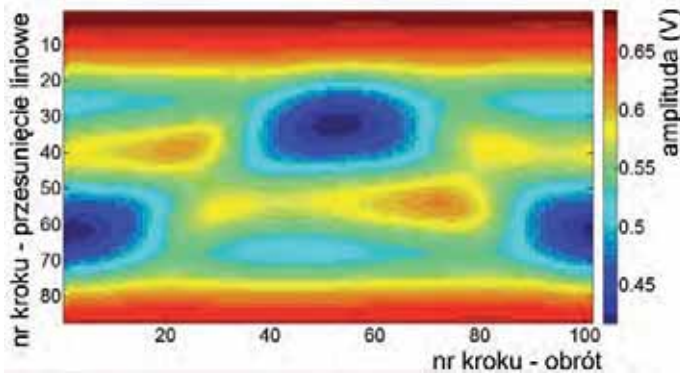
Na rys. 5 przedstawiono wyniki pomiaru amplitudy na uzwojeniu pomiarowym. Natomiast wyniki pomiarów tangensa kąta przesunięcia fazowego  $\phi$  sygnału uzyskanego na wyjściu cewki pomiarowej względem sygnału podawanego na cewkę sterującą podano na rys. 6.

W trakcie realizowanych pomiarów tomograficznych, pełny obrót obiektu zamykał się w 100 krokach, czyli każdy krok odpowiadał obrotowi mierzonego wałka



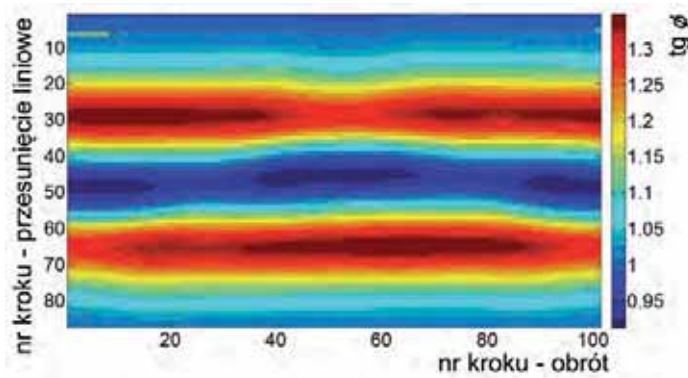
Rys. 4. Wałek z podcięciem wykorzystywany jako obiekt testowy

Fig. 4. Cylinder with the groove used as testing element



**Rys. 5.** Wyniki pomiarów amplitudy napięcia na uzwojeniu pomiarowym w funkcji obrotu (oś x) i przesunięcia liniowego (oś y)

**Fig. 5.** Results of measurements of amplitude of voltage on measuring coil as a function of rotation (x axis) and linear movement (y axis)



**Rys. 6.** Wyniki pomiarów tangensa kąta przesunięcia fazowego  $\phi$  sygnału uzyskanego na uzwojeniu cewki pomiarowej względem sygnału podawanego na cewkę sterującą w funkcji obrotu (oś x) i przesunięcia liniowego (oś y)

**Fig. 6.** Results of measurements of tangent of angle between signal on measuring coil and signal given on driving coil as a function of rotation (x axis) and linear movement (y axis)

o  $3,6^\circ$ . Natomiast krok przesunięcia liniowego wynosił 1 mm.

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarowych możliwe jest odtworzenie kształtu obiektu mierzonego z wykorzystaniem tomograficznego przekształcenia odwrotnego. Przekształcenie to, bazując na elektromagnetycznych równaniach Maxwella, umożliwia odtworzenie rozkładu zarówno przenikalności magnetycznej  $\mu$ , jak i rezystywności materiału  $\rho$  [5]. W prosty sposób umożliwia to detekcję nieciągłości [6].

Jednak równania Maxwella, konieczne do wyznaczenia tomograficznego przekształcenia odwrotnego, nie mają postaci jawnej. Z tego względu rozkład przenikalności magnetycznej  $\mu$  i rezystywności materiału  $\rho$  wyznaczany jest w trakcie procesu optymalizacji gradientowej, wykorzystując najczęściej metody bazujące na algorytmie Newtona.

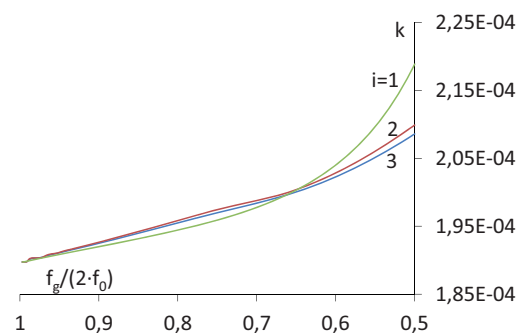
#### 4. Filtracja sygnału pomiarowego

Z metrologicznego punktu widzenia na dokładność wyników przekształcenia tomograficznego wpływają zarówno niepewność pomiaru sygnału na cewce detekcyjnej, jak również dokładność optymalizacyjnych obliczeń numerycznych. Głównym źródłem poprawy jakości obliczeń numerycznych jest wzrost szybkości nowo opracowywanych komputerów. Natomiast minimalizacja zakłóceń sygnału pomiarowego odbywa się poprzez filtrację sygnału, zarówno analogową jak i cyfrową.

Do analizy zakłóceń sygnału pomiarowego wykorzystano 30 pomiarów zrealizowanych w trakcie pełnego

obrotu mierzonego obiektu w ustalonej pozycji na osi przesunięcia liniowego w opracowanym układzie tomograficznym. Następnie, traktując średnią z 30 pomiarów jako charakterystykę wzorcową, podjęto próbę zastosowania dolnoprzepustowego filtra liniowego Butterwortha  $i$ -tego rzędu, w którym częstotliwość graniczną  $f_g$  zmieniano proporcjonalnie do częstotliwości  $f_0$  próbkowania sygnału pomiarowego. Do oceny jakości filtra wykorzystano parametr  $k$ , będący sumą kwadratów różnic między sygnałem wzorcowym (średnią) a filtrowanymi sygnałami pomiarowymi. Wyniki tych badań podano na rys. 7.

Jak wynika z rys. 7 zastosowanie liniowego, dolno-



**Rys. 7.** Zmiany parametru  $k$  w wyniku filtracji z zastosowaniem dolnoprzepustowego filtra Butterwortha  $i$ -tego rzędu o częstotliwości granicznej  $f_g$

**Fig. 7.** Changes of parameter  $k$  due to filtration with low pass Butterworth filter ( $i$  – order of filter,  $f_g$  – cut off frequency)

przepustowego filtra Butterwortha, niezależnie od  $i$ -tego rzędu filtra i od jego częstotliwości granicznej, nie prowadzi do poprawy jakości sygnału pomiarowego. Wynika to z ograniczeń rozdzielczości przestrzennej sygnału pomiarowego w tomografie wiroprądowym.

Pomimo braku możliwości zastosowania filtrów liniowych do filtracji sygnału w tomografie wiroprądowym stwierdzono, że niektóre punkty pomiarowe są obciążone błędami grubymi, wynikającymi z impulsowych zakłóceń pojawiających się w otoczeniu układu pomiarowego. Punkty te zidentyfikowano i korygowano wykorzystując jako kryterium różnicę między wartością uzyskaną w danym punkcie, a interpolacją (wielomianami trzeciego stopnia) oczekiwanej wartości tego pomiaru z wykorzystaniem otaczających go punktów.

## 5. Podsumowanie

Przedstawiona konstrukcja tomografu wiroprądowego do pomiaru elementów walcowych umożliwia realizację pomiarów z rozdzielczością przestrzenną znacznie wyższą niż w dotychczas prezentowanych rozwiązaniach [1]. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów zrealizowanych dla ferromagnetycznego wałka z podcięciem, wykonanego ze stali konstrukcyjnej, które potwierdziły prawidłowość konstrukcji.

Przedstawione wyniki badań wykazały, że filtry liniowe, jak filtr Butterwortha, nie umożliwiają poprawy jakości sygnału pomiarowego w tomografie wiroprądowym. Natomiast zastosowanie filtracji nieliniowej, wykorzystującej interpolację wielomianami trzeciego stopnia, umożliwia minimalizację wpływu zakłóceń impulsowych na wyniki pomiaru.

## Bibliografia

1. Soleimani M., Tamburrino A., *Shape reconstruction in magnetic induction tomography using multifrequency data*, "International Journal of Informaton and Systems Sciences", Vol. 2, No. 3, 2006, 343–353.
2. Premel D., Mohammad-Djafari A., *Eddy current tomography in cylindrical geometry*, "IEEE Transactions on Magnetics", Vol. 31, No. 3, 1995, 2000–2003.
3. Soleimani M., *Simultaneous reconstruction of permeability and conductivity in magnetic induction tomography*, "Journal of Electromagnetic Waves and Applications", Vol. 23, No. 5–6. 2009, 785–798.
4. Sawicki M., Wujek P., *Mikrokontrolery LPC1100*, BTC 2011.
5. Tamburrino A., Rubinacci G., *Fast methods for quantitative eddy-current tomography of conductive materials*, "IEEE Transactions on Magnetics", Vol. 42, No. 8, 2006, 2017–2028.
6. Ioan D., Rebian M., *Numerical model for eddy-current testing of ferromagnetic steel parts*, "IEEE Transactions on Magnetics", Vol. 38, No. 2, 2002, 629–632. ■

## High resolution eddy current tomography setup and possibilities of its signal filtering

**Abstract:** Paper presents developed, high resolution eddy current tomography setup for testing of cylindrical objects. In developed tomograph, specialized phase shift measuring system was applied together with ARM microcontroller. Experimental results indicated, that linear filters (such as Butterworth filter) don't enable increasing of signal quality. Paper presents guidelines for development of non-linear filter for removing pulse disruptions in measuring signal.

**Keywords:** non-destructive testing, eddy current tomography

---

### dr inż. Jacek Salach

Od 2005 r. pracownik Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej. Zaangażowany w prace związane z badaniem wpływu momentu skręcającego na właściwości magnetyczne materiałów, opracowaniem sensorów mechatronicznych, miernictwem elektrycznym oraz metodami badań nieniszczących.

e-mail: [j.salach@mchtr.pw.edu.pl](mailto:j.salach@mchtr.pw.edu.pl)



### prof. nzw. dr hab. inż. Roman Szewczyk

Od 2000 r. pracownik Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów oraz Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej. Zaangażowany w prace związane z modelowaniem zjawisk magnetomechanicznych, opracowaniem sensorów mechatronicznych, miernictwem elektrycznym oraz prognozowaniem rozwoju technologii (technological foresight).

e-mail: [rszewczyk@piap.pl](mailto:rszewczyk@piap.pl)

