

**Marek STENCEL, Piotr PIWOWAR**

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA METROLOGII, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

## Model i badania czujnika wiroprowadowego

Dr inż. Marek STENCEL

Urodzony 3 kwietnia 1965r. Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki, AGH w Krakowie w 1990r. W 1998r. uzyskał stopień doktora na tym samym wydziale. Autor ponad 60 prac z zakresu miernictwa i przetwarzania sygnałów. Zajmuje się konstruowaniem przyrządów pomiarowych wykorzystujących technikę mikrokontrolerów oraz DSP. Głównym obszarem zainteresowań zawodowych są pomiary parametrów ruchu drogowego. Pracuje jako adiunkt w Katedrze Metrologii AGH w Krakowie.

e-mail: masten@uci.agh.edu.pl



Dr inż. Piotr PIWOWAR

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki AGH w 1999 r., uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna w 2007 r. Obecnie zatrudniony na stanowisku asystenta w Katedrze Metrologii AGH. Zajmuje się modelowaniem i konstrukcją systemów pomiarowych w biomedycynie, oraz pomiarami parametrów pojazdów w ruchu.

e-mail: ppiwowar@agh.edu.pl



### Streszczenie

Praca przedstawia eksperymentalny model czujnika wiroprowadowego oraz wskazuje częstotliwości pracy pozwalającej uzyskać maksymalną jego czułość. Badany czujnik przeznaczony jest do pracy w systemach obrazowania 2-D obiektów metalowych, a przeprowadzone badania mają na celu wskazanie warunków pracy pozwalających osiągnąć maksymalną strefę detekcji zależną od jego czułości.

**Słowa kluczowe:** czujnik wiroprowadowy, charakterystyki częstotliwościowe, czułość czujnika, model nieliniowy, optymalna częstotliwość pracy.

### Eddy current sensor – model and sensitivity analysis

#### Abstract

The paper presents the principle of operation and experimental model of an eddy current sensor. The investigated sensor will work in systems of 2D visualization of metal objects. The aim of measurement experiments was to reach operation frequencies at which the sensor sensitivity is maximum, and to determine such conditions of work which allow getting the maximal detection zone of the sensor dependent on its sensitivity. In the preliminary research a circuit model of the sensor was formulated. It was pointed out that such a model has to be nonlinear in order to obtain consistence with verification measurements. The investigation results show that there are four resonances on the frequency characteristics. These points of characteristics are also points of the maximum sensor sensitivity. The maximum value of the amplitude-frequency characteristic was at about 147 kHz which was the lowest resonance frequency and was chosen as a work frequency for scanning process. The final investigations deal with observation of the influence of the type of object on the sensor sensitivity. They show that the sensor sensitivity is higher under influence of nonferromagnetic materials.

**Keywords:** eddy current sensor, frequency characteristic, sensor sensitivity, nonlinear model, optimal frequency.

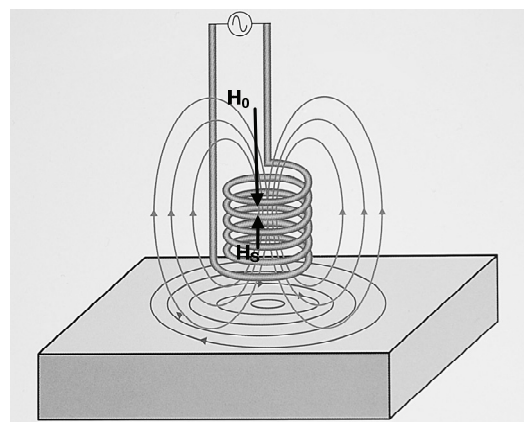
### 1. Wstęp

Występowanie prądów wirowych jest zwykle, głównie w maszynach elektrycznych, zjawiskiem niepożądanym, którego skutki próbuje się minimalizować. Często jednak zjawisko to jest celowo wywoływane i wykorzystywane w pomiarach. Znane, a w ostatnich latach nabierające szczególnego znaczenia, jest wykorzystanie prądów wirowych w hamulcach i sprzęgłach elektromagnetycznych. Dużym obszarem wykorzystania tego zjawiska jest także sensoryka. Czujniki wiroprowadowe stosowane są od lat w badaniach nieniszczących (ang. None Destructive Testing-NDT), w których stosuje się zarówno czujniki z rdzeniem, jak i czujniki powietrzne. Osobną grupę zagadnień stanowią aplikacje czujników wiroprowadowych do detekcji i obrazowania obiektów metalowych [4, 5, 6, 7]. Aplikacje te, począwszy od powszechnie stosowanych detektorów metalu a na wiroprowadowych skanerach 2-D skończywszy [1, 2, 3], wykorzystują najczęściej czujniki

powietrzne. Czujniki te w zależności od parametrów konstrukcyjnych, typu układu kondycjonowania oraz częstotliwości zasilania posiadają różne własności metrologiczne. Jednym z ważnych parametrów czujnika jest jego czułość rozumiana jako nachylenie charakterystyki statycznej czujnika. Jak pokazują badania, czułość ta zależy między innymi od częstotliwości napięcia zasilania.

### 2. Zasada pracy czujnika

Czujnik wiroprowadowy jest cewką powietrzną o zadanych parametrach konstrukcyjnych, która jest zarówno wzbudnikiem pola magnetycznego jak i elementem czułym. Zadaniem badanego czujnika jest wykrywanie różnic fizycznych własności materiału za pomocą zmiennego pola magnetycznego [8].



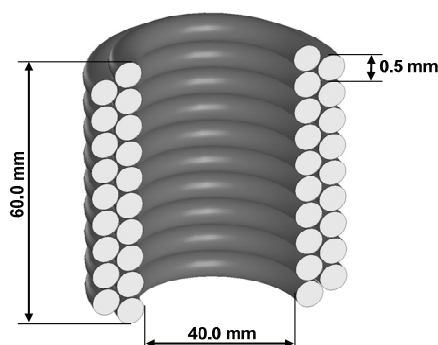
Rys. 1. Czujnik wiroprowadowy – zasada działania [11]

Fig. 1. Eddy current sensor - principle of operation [11]

Badany element o danej przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej wprowadza się w obszar pola magnetycznego czujnika zasilanego prądem zmiennym. Pod wpływem tego pola w badanym obiekcie indukują się prądy wirowe, które wytwarzają własne pole magnetyczne, skierowane zgodnie z regułą Lenza, przeciwieństwo do pola czujnika (rys. 1). W rezultacie w obrębie cewki powstaje wypadkowe pole magnetyczne różne od pierwotnego. Zmiana pola wywołana wprowadzeniem obiektu metalowego zależy od wielu czynników: własności elektrycznych i magnetycznych obiektu, jego wymiarów, geometrii, odległości od czujnika, konstrukcji czujnika oraz częstotliwości prądu zasilającego.

Przy wszystkich parametrach stałych zależnych od konstrukcji czujnika i jego warunków pracy zmiana pola wypadkowego zależy wyłącznie od parametrów obiektu i jego usytuowania w stosunku do czujnika. Zmiana pola wypadkowego objawia się zmianami wartości zastępczych składowych impedancji czujnika.

Zmiany te za pomocą układu kondycjonowania można przekształcić na sygnał elektryczny, który może być poddawany dalszej obróbce.



Rys. 2. Przekrój badanego czujnika  
Fig. 2. Cross-section of the sensor

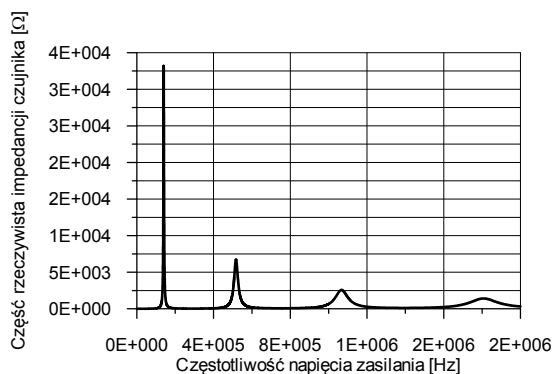
### 3. Badania eksperymentalne

Badaniom poddano powietrzny czujnik wiroprądowy, którego budowę w przekroju przedstawia rysunek 2, a jego najważniejsze dane konstrukcyjne zestawiono w tabeli 1.

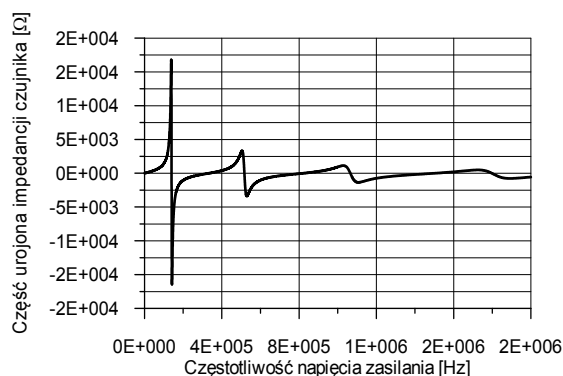
Tab. 1. Dane konstrukcyjne czujnika  
Tab. 1. Construction parameters of the sensor

Liczba warstw nawojowych	2
Liczba zwojów warstwy dolnej	122
Liczba zwojów warstwy górnej	117
Średnica drutu	0,5 mm
Materiał	miedź
Oporność właściwa $\gamma$	$55 \cdot 10^6 \frac{1}{\Omega \cdot m}$
Przenikalność magnetyczna względna $\mu_r$	0,967

Przeprowadzone badania polegały na pomiarze punktów charakterystyk częstotliwościowych czujnika w zakresie od 20 Hz do 2MHz. Pomiar przeprowadzono zarówno bez obiektu pomiaru jak i w jego obecności. Wyznaczone charakterystyki (rys. 3 i 4) były podstawą do dalszych badań, mających na celu, zarówno opracowanie modelu czujnika jak i określenie jego czułości.



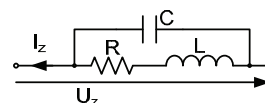
Rys. 3. Charakterystyka częstotliwościowa części rzeczywistej impedancji czujnika bez obiektu  
Fig. 3. Real part of the impedance frequency characteristic of a sensor without excitation



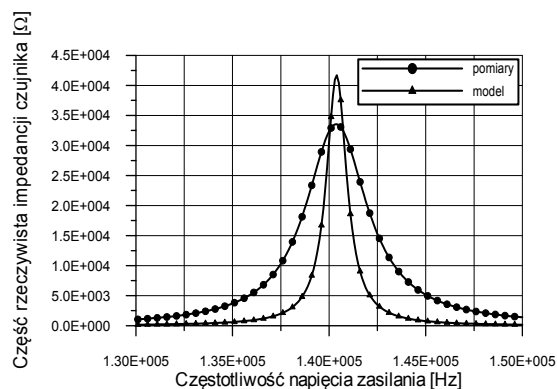
Rys. 4. Charakterystyka częstotliwościowa części urojonej impedancji czujnika bez obiektu  
Fig. 4. Imaginary part of the impedance frequency characteristic of the sensor without excitation

### 4. Model czujnika

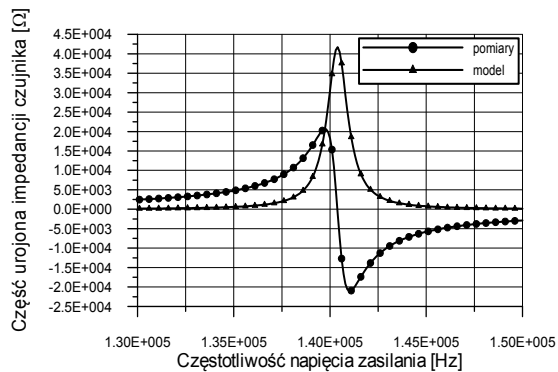
Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyznaczono charakterystyki częstotliwościowe czujnika. Jak ilustrują to rysunki 3 i 4, posiadają one cztery częstotliwości rezonansowe. Sugeruje to że model czujnika zawiera cztery obwody rezonansowe R, L, C. Potencjalnych struktur takiego modelu jest wiele zwłaszcza że obserwowane zjawiska fizyczne w sposób prosty nie dostarczają co do tego wskazówek. Ponieważ zazwyczaj w aplikacjach skanerów wiroprądowych do pomiaru kształtu obiektu i detekcji rodzaju materiału pracuje się przy częstotliwości napięcia zasilania czujnika od ok. 100 do ok. 150 kHz [1, 2], zakres obserwacji charakterystyk częstotliwościowych został ograniczony w ten sposób aby obejmował jedynie obszar pierwszego rezonansu (rys. 6 i 7). Dla tak postawionego zadania, przyjęto model o strukturze przedstawionej na rysunku 5, założono liniowości parametrów L i C a następnie dokonano identyfikacji parametrów obiektu opisanego takim modelem. Identyfikację została przeprowadzona według algorytmu strojonego modelu AMT (*Adjusted Model Technique*) z wykorzystaniem kryterium średniokwadratowego.



Rys. 5. Struktura modelu obwodowego badanego czujnika  
Fig. 5. Structure of the sensor circuit model

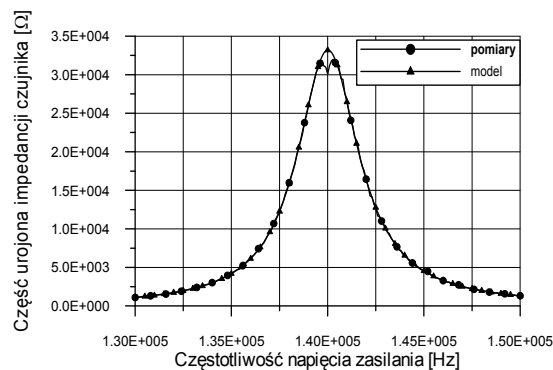


Rys. 6. Charakterystyki częstotliwościowe części rzeczywistej impedancji modelu liniowego oraz eksperymentalna  
Fig. 6. Real part of the sensor impedance frequency characteristics obtained from the optimised sensor linear model and from measurements

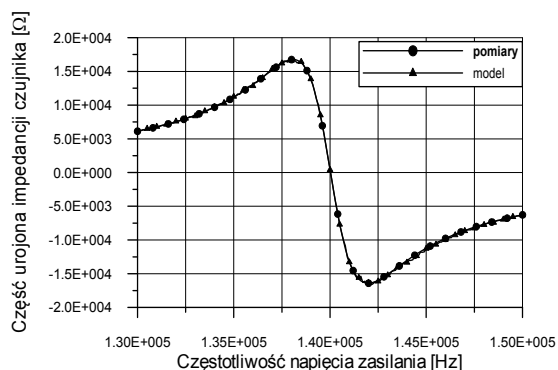


Rys. 7. Charakterystyki częstotliwościowe części urojonej impedancji modelu liniowego oraz eksperymentalna  
Fig. 7. Imaginary part of the sensor impedance frequency characteristics obtained from the optimised sensor linear model and from measurements

Otrzymane wyniki identyfikacji przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Dopasowanie charakterystyk modelowych do charakterystyk otrzymanych w wyniku pomiarów jest dalekie od zadowalającego. Zwiększanie wartości parametru R w przedstawionym modelu polepsza dopasowanie charakterystyk, powoduje jednak znaczne (około czterokrotne) różnice w wartościach części rzeczywistej impedancji modelu i eksperymentalnej w obszarze niskich (do 100 Hz) częstotliwości. Płyne stąd wniosek, że przyjęta struktura modelu nie przystaje do rzeczywistości.



Rys. 8. Charakterystyki częstotliwościowe części rzeczywistej modelu nieliniowego oraz eksperymentalna  
Fig. 8. Real part of the sensor impedance frequency characteristics obtained from the optimised sensor nonlinear model and from measurements



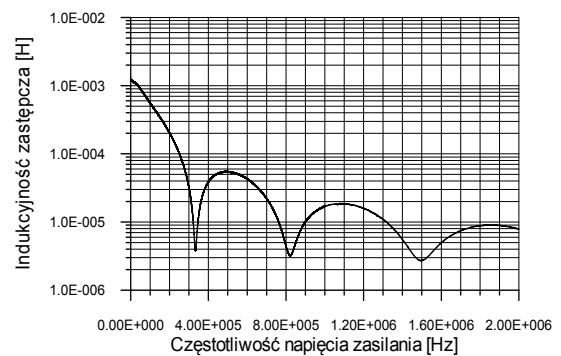
Rys. 9. Charakterystyki częstotliwościowe części urojonej impedancji modelu nieliniowego oraz eksperymentalna  
Fig. 9. Imaginary part of the sensor impedance frequency characteristics obtained from the optimised sensor nonlinear model and from measurements

W dalszej części badań przyjęto metodykę stosowaną w analizie linii długich i anten [9]. Zakłada ona, na podstawie przesłanek natury fizycznej, zmienność parametrów modelu w zależności od częstotliwości zasilania układu, a więc model nieliniowy. Bardziej szczegółowe badania dowodzą również zmienności struktury modelu. Przy tak postawionych założeniach wyliczono ponownie wartości współczynników modelu metodą optymalizacji w każdym z punktów zmierzonej charakterystyki.

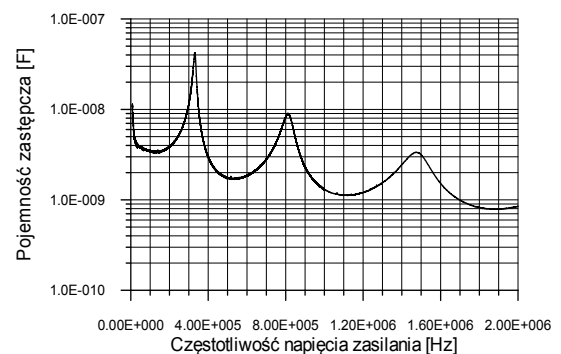
Dla takiego modelu otrzymano znacząco lepsze dopasowanie charakterystyk i to w całym, możliwym do pomiaru obszarze częstotliwości (rys. 8 i 9), a także wyznaczono:

- zależność funkcyjną zmian rezystancji modelu, która wynika z występowania zjawiska naskórkowości, zgodną z zależnościami podawanymi przez literaturę [10],
- zmienność indukcyjności i pojemności elementów modelu.

Zależności współczynników modelu L i C od częstotliwości przedstawiają rysunki 10 i 11.



Rys. 10. Zmienność wartości indukcyjności zastępczej modelu nieliniowego w zależności od częstotliwości  
Fig. 10. Equivalent inductance of the nonlinear model vs. frequency



Rys. 11. Zmienność wartości pojemności zastępczej modelu nieliniowego w zależności od częstotliwości  
Fig. 11. Equivalent capacity of the nonlinear model vs. frequency

W poszukiwaniach lepszego dopasowania modelu można iść dalej jak czyni się to w analizie linii długich obciążonych impedancją (impedancję tę należy rozumieć jako antenę nadawczą), a mianowicie zmieniając strukturę modelu w zależności od częstotliwości [9]. Granice zmian struktury modelu wyznaczane są przez podwielokrotność zastępczej długości fali napięcia zasilającego dla danej częstotliwości. Podkreślić należy fakt, że jest to zastępcza długość fali a nie długość fali wynikająca z częstotliwości napięcia zasilania i prędkości fali elektromagnetycznej w przewodniku. Zastępcza długość fali jest zawsze niższa od teoretycznej. W liniach długich obciążonych jednowojowymi antenami pętlowymi możliwe jest obliczenie zastępczych długości fali. Dla badanego czujnika autorzy nie dotarli do rozwiązania analitycznego takiego problemu co nie znaczy, że rozwiązanie to nie istnieje.

## 5. Czułość czujnika

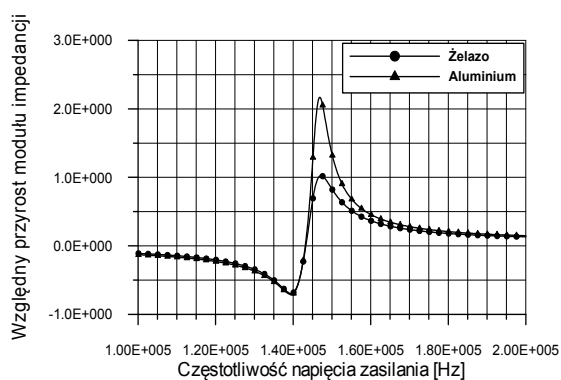
W przetwornikach wiroprądowych używanych w systemach skanowania obiektów dąży się do uzyskania maksymalnej czułości układu przetwornika wraz z układem kondycjonowania. Jest to o tyle ważne, że czułość ta przekłada się na zasięg pracy przetwornika. W przetwornikach wiroprądowych zasięg ten nie jest duży ponieważ natężenie pola magnetycznego w dielektrykach zanika z trzecią potęgą odległości od przetwornika [10]. Szacunkowo przyjmuje się że zasięg ten jest równy trzykrotnej średnicy czujnika o przekroju kołowym.

Jak wynika z badań przeprowadzonych na etapie tworzenia modelu czułość samego przetwornika silnie zależy od częstotliwości napięcia zasilania. Wybór zatem częstotliwości pracy jest o tyle ważny, że trudno jest zrekomensować straty czułości na dalszym etapie przetwarzania sygnału w układzie kondycjonowania.

W celu wyboru częstotliwości pracy przetwornika zmierzone zostały charakterystyki częstotliwościowe przetwornika poddanego wpływowi obiektu metalowego. Wybrano dwa typy obiektu w formie blach wykonanych z żelaza oraz aluminium. Uzyskane charakterystyki nie odbiegają znacząco od pokazanych wcześniej charakterystyk samego czujnika, dlatego nie są tutaj prezentowane. Istotnym elementem, który odróżnia je od pokazanych wyżej charakterystyk jest nieznaczne przesunięcie częstotliwości rezonansowych. Jeśli przyjąć że wielkością wyjściową jest zmiana parametrów zastępczych (rezystancji i reaktancji zastępczej) czujnika, to można określić wpływ częstotliwości zasilania na zmianę tych parametrów przy ustalonej wielkości wejściowej. Wpływ ten jest określony zależnością (1) i przedstawiony graficznie na rysunku 12.

$$C_z(j\omega) = \frac{|Z_p(j\omega)| - |Z_0(j\omega)|}{|Z_0(j\omega)|} \quad (1)$$

gdzie:  $C_z$  - czułość czujnika,  $Z_p$  - impedancja czujnika bez obiektu pomiaru,  $Z_0$  - impedancja z wpływem obiektu pomiaru.



Rys. 12. Względna zmiana modułu impedancji czujnika wywołana obecnością obiektu

Fig. 12. Relative change of the sensor impedance magnitude caused by presence of the object

Dla obiektu wykonanego z żelaza częstotliwość pracy pozwalająca uzyskać maksymalną czułość wynosi 147,2 kHz przy względnej zmianie modułu impedancji wynoszącej około 1,02 natomiast dla obiektu wykonanego z aluminium częstotliwość ta wynosi 146,9 kHz przy względnej zmianie modułu impedancji około 2,16. Zatem jak widać z podanej zależności przyrost modułu impedancji w pierwszym przypadku jest ponad stu, a w drugim ponad dwustuprocentowy. Taki wybór częstotliwości pracy umożliwia potencjalnie budowę wiroprądowego czujnika skanującego o bardzo wysokiej czułości.

## 6. Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań mających na celu próbę budowy modelu powietrznego czujnika indukcyjnego stosowanego w wiroprądowych skanerach obiektów metalowych. Podczas badań zmierzone zostały charakterystyki częstotliwościowe, które wykazały silną nieliniowość czujnika w zależności od częstotliwości napięcia zasilania. W zakresie częstotliwości od 20 Hz do 2MHz wystąpiły cztery maksima rezonansowe. Taka specyfika charakterystyk częstotliwościowych stworzyła możliwość poszukiwania częstotliwości zasilania, przy której czułość czujnika byłaby maksymalna. Bazując na pierwszej częstotliwości rezonansowej czujnika uzyskano ponad stuprocentowy przyrost modułu impedancji zastępczej obiektu wykonanego z żelaza i dwustuprocentowy dla obiektu aluminiowego dla jednakowych położeń obiektów. Kolejnym etapem badań powinna być analiza pracy czujnika z wybranym (lub kilku wybranymi) układem kondycjonowania. W warunkach zasilania układu napięciem o częstotliwości zapewniającej dużą czułość układu.

*Praca została wykonana w ramach projektu badawczego MNiSW nr. N N505 375537.*

## 7. Literatura

- [1] Gaydecki P., Silva I., Fernandes B.T., Yu Z.Z.: A portable inductive scanning system for imaging steel-reinforcing bars embedded within concrete, *Sensors and Actuators* 84, (2000), 25–32.
- [2] Gaydecki P. A., Burdekint F. M.: An inductive scanning system for I two-dimensional imaging of reinforcing I components in concrete structures, *Meas. Sci. Technol.* 5 (1994) 1272-1280.
- [3] Gaydecki P., Quek S., Miller G., Fernandes B.T., Zaid M.A.M.: Design and evaluation of an inductive Q-detection sensor incorporating digital signal processing for imaging of steel reinforcing bars in concrete, *Measurement Science and Technology* 13 (2002) 1327–1335 Institute of Physics Publishing.
- [4] Quek S, Gaydecki P, Zaid M A M, Miller G, Fernandes B.: Three-dimensional visualization of steel reinforcing bars using Pearson and Bleasdale models applied to depth response images taken from an inductive sensor, *Proc. Conf BInstNDT 2002*.
- [5] Fenniri H., Moineau A., Delaunay G.: The use of some iterative deconvolution algorithms to improve the spatial resolution of a flat magnetic sensor, *Sensor and Actuators, A* 63 (1997) 7-13, Elsevier.
- [6] Belloir F., Huez R., Billat A.: A smart flat-coil eddy-current sensor for metal-tag recognition, *Meas. Sci. Technol.* 11 (2000) 367–374.
- [7] Huez R., Belloir F., Billat A.: Original improvements of a smart eddy current sensor by BSS techniques, *Measurement Science and Technology* 13 (2002) 547–555.
- [8] Heptner H., Stroppe H.: *Magnetyczne i indukcyjne badania metali*, Wyd. Śląsk 1972.
- [9] Linde D. P.: *Anteny i ich zasilanie*, Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa (1957).
- [10] Goworkow W. A.: *Pola elektryczne i magnetyczne*, WNT, Warszawa (1962).
- [11] <http://www.olympus-ims.com/pl/ndt-tutorials/eca-tutorial/what-is-eca/basic/>

otrzymano / received: 19.06.2010

przyjęto do druku / accepted: 02.08.2010

artykuł recenzowany