

Tomasz PIETRUSEWICZ

BADANIE STRUKTUR SŁABOPRZEWODZĄCYCH METODĄ MAGNETYCZNEJ TOMOGRAFII INDUKCYJNEJ^{*)}

STRESZCZENIE *W pracy zaprezentowano działanie systemu pomiarowego wykorzystywanego w magnetycznej tomografii indukcyjnej. Przedstawiono budowę układu pomiarowego, podstawowe zależności teoretyczne opisujące jego funkcjonowanie oraz wyniki badań struktur słaboprzewodzących z zaburzeniami cechującymi się różną geometrią i objętością.*

Słowa kluczowe: *magnetyczna tomografia indukcyjna, metoda prądów wirowych, badania nieniszczące*

1. WSTĘP

Magnetyczna tomografia indukcyjna jest stosunkowo nową metodą obrazowania obiektów przewodzących z możliwością zastosowań medycznych. Jej działanie polega na wzbudzaniu pola magnetycznego za pomocą prądu płynącego w cewce. Wytworzone pole indukuje w badanych obiektach prądy wirowe.

^{*)} Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2009 jako projekt badawczy Nr 3 T10A 033 30.

mgr inż. Tomasz PIETRUSEWICZ,
e-mail: tp@ps.pl

Politechnika Szczecińska, Wydział Elektryczny
Katedra Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki

Zaburzenia pola magnetycznego wywołane niejednorodną strukturą próbki są obserwowane za pomocą czujników umieszczonych na zewnątrz obiektu. W wielu ośrodkach naukowych na świecie są prowadzone prace mające na celu doskonalenie tej metody, a w rezultacie skonstruowanie systemu umożliwiającego jej powszechne zastosowanie. Istotne znaczenie ma uzyskiwanie coraz większej dokładności pomiarów wykonywanych za pomocą magnetycznej tomografii indukcyjnej [2].

Omawiana metoda jest zaliczana do badań nieinwazyjnych. Pomiary są dokonywane bezstykowo przy wykorzystaniu niskich częstotliwości (z reguły poniżej 2 MHz). Badania mają na celu zobrazowanie rozkładu parametrów tkanek. Możliwe jest wykrycie zmian konduktywności elektrycznej, przenikalności elektrycznej i magnetycznej.

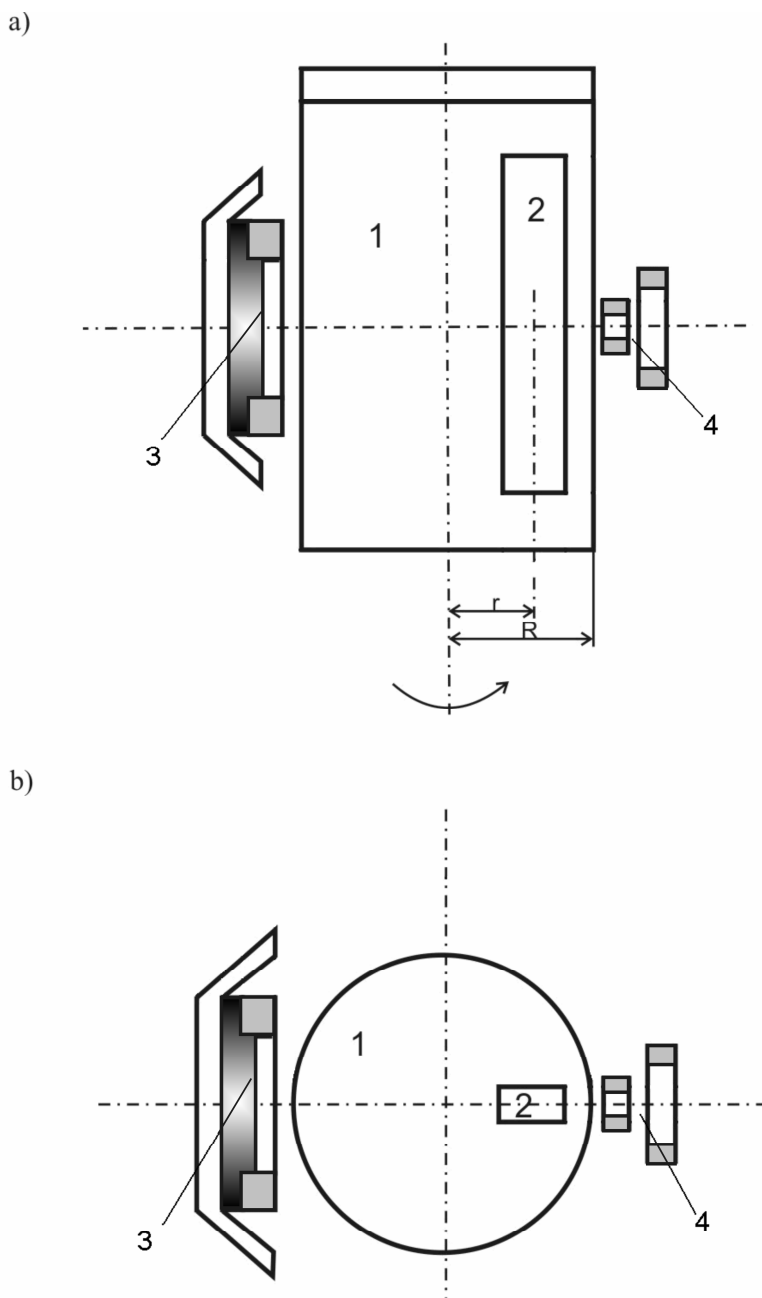
Na Politechnice Szczecińskiej skonstruowano system pomiarowy odczytujący zmiany pola magnetycznego powodowane umieszczeniem nieprzewodzącego zaburzenia w badanym wodnym roztworze soli. Obiekt pomiarowy ma zatem właściwości zbliżone do tkanki żywej. Celem pracy jest przedstawienie układu pomiarowego oraz wstępna interpretacja otrzymanych wyników pomiarów.

2. UKŁAD POMIAROWY

2.1. Budowa układu

Układ pomiarowy jest zbudowany z części wzbudzającej pole magnetyczne, systemu pozycjonującego wraz z częścią sterującą oraz czujnika pomiarowego, z którego sygnał doprowadzony jest do przyrządów rejestrujących. Na podstawie analizy kilkudziesięciu konfiguracji elementów wzbudnika dokonano optymalizacji jego budowy, aby pole magnetyczne skierowane wzdłuż jego osi było jak największe, przy jednoczesnym korzystnym ukształtowaniu jego rozkładu. Do elementów wzbudnika należą: cewka zasilana prądem przemiennym (liczba zwoi: 300, średnica: 42 mm), ekran aluminiowy oraz umieszczony częściowo wewnątrz cewki rdzeń ferrytowy. Układ pozycjonujący stanowi obrotowy, sterowany komputerowo okrągły stół, na którym umieszczono walcowy obiekt wypełniony dziesięcioprocentowym roztworem wodnym NaCl. Wewnątrz obiektu podczas badań umieszczano zaburzenia o różnej geometrii i objętości. Czujnik pomiarowy zbudowany jest z dwóch połączonych różnicowo cewek, z których sygnał wzmocniony i poddany filtracji przesyłany jest do karty pomiarowej komputera. Sterowanie układem oraz odczyt danych pomiarowych odby-

wa się z wykorzystaniem środowiska LabView™. Schemat układu pomiarowego został przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat układu pomiarowego; a) widok z boku, b) widok z góry; 1 – obiekt badany, 2 – zaburzenie, 3 – wzbudnik, 4 – czujnik; $R = 100$ mm, r – odległość zaburzenia od środka obiektu

Oś czujnika pokrywa się z osią wzbudnika, co odróżnia prezentowany system m. in. od wielu opisywanych w literaturze układów, w których cewki wzbudzające i sygnałowe rozmieszczono dookoła obiektu badanego [3, 4].

2.2. Konfiguracja i działanie układu

Czujniki stosowane w magnetycznej tomografii indukcyjnej mają za zadanie mierzyć zmiany wtórnego pola magnetycznego, wywołane przez indukowane w obiekcie prądy wirowe. W rozpatrywanym przypadku czujnik nie wskazuje sygnału zerowego w sytuacji, w której nie występują prądy wirowe. Prądy te pojawiają się po umieszczeniu badanego obiektu w strefie pomiarowej układu, a więc również po zaburzeniu pola pierwotnego (wywołanego przez wzbudnik). Zatem otrzymywany sygnał zawiera również informację o polu pierwotnym. Można ograniczać wpływ zmiany pola pierwotnego do minimum poprzez różnicowe połączenia czujników pomiarowych. W przeciwnym wypadku zmiany pola wtórnego nie mogłyby zostać odczytane, gdyż pole pierwotne jest co najmniej kilkaset razy większe [2] od wtórnego.

2.3. Teoretyczne ujęcie działania układu

Opis teoretyczny i komputerowa symulacja działania omawianego układu są utrudnione przez występowanie niełatwych do dokładnego określenia wielkości, m. in. niedokładności ustawienia cewek, niecentryczności walcowego zbiornika czy występowania pojemności między przewodami doprowadzonymi do cewek. Błędy tym spowodowane mają duże znaczenie ze względu na niski poziom uzyskiwanych sygnałów. Utrudniony dokładny pomiar niektórych parametrów układu powoduje, że błąd metody pomiarowej jest zbyt duży, by dokładnie określić wartość niektórych wielkości mających wpływ na pracę układu.

Niezerowe wartości badanych wielkości σ , μ , ε oraz niska częstotliwość stosowana w badaniach nie pozwalają na wykorzystywanie często spotykanych uproszczeń, co utrudnia opis teoretyczny obserwowanych zjawisk. Poniżej przedstawiono przybliżone równania opisujące rozkład pola w badanym obiekcie [1, 5] i jego zależność od magnetycznego potencjału wektorowego związanego z polem pierwotnym (przyjęto, że prądy wirowe wytworzone w obiekcie nie wpływają na wartość magnetycznego potencjału wektorowego). Wychodząc z równania opisującego pole elektryczne wewnątrz rozpatrywanego obiektu:

$$\mathbf{E} = -j\omega\mathbf{A} - \nabla\Phi \quad (1)$$

ostatecznie otrzymano:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \Phi_i) = -\omega A_p \cdot \nabla \sigma \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial n} = -\omega A_{pn} \quad (3)$$

gdzie:

- E – pole elektryczne w badanym obiekcie,
- Φ – skalarny potencjał elektryczny,
- Φ_i – część urojona skalarnego potencjału elektrycznego,
- n – normalna do granicy analizowanego obszaru,
- A_p – pierwotny magnetyczny potencjał wektorowy,
- A_{pn} – składowa normalna pierwotnego magnetycznego potencjału wektorowego.

Powyższe równania oraz różniczkowe prawo Ohma ($J = \sigma E$) i prawo Biota – Savarta wykorzystuje się w obliczeniach numerycznych rozwiązywania zagadnienia odwrotnego, w którym poszukuje się rozkładu konduktywności wewnątrz badanego obiektu.

3. REZULTATY BADAŃ

Zaprezentowane wyniki pomiarowe otrzymano przy zasilaniu cewki prądem I_{we} równym 100 mA lub 50 mA przy częstotliwości 37 kHz oraz przy 500-krotnym wzmocnieniu różnicowego sygnału wyjściowego. Obrót badanego obiektu o jednorodnej strukturze zamocowanego osiowo powoduje znaczące regularne zmiany sygnału, dlatego zastosowano procedurę, w której wynik pomiaru dotyczącego obiektu zaburzonego odejmowany jest od wyniku pomiaru dla obiektu jednorodnego. Istotne jest, aby oba pomiary odbywały się w podobnych warunkach, a więc w możliwie najkrótszym czasie.

Na rysunku 3a przedstawiono badania obiektu z najmniejszym zaburzeniem. Obiekt badany wraz z zaburzeniem w punkcie startu (0°) znajdował się w pozycji, jaką przedstawia ilustracja. Następnie dokonano obrotu o 360° , mierząc sygnał co 3° i uśredniając wynik z 20 pomiarów dokonanych w jednym punkcie. Ostateczny przebieg krzywej pomiarowej poddawano działaniu cyfrowego filtra dolnoprzepustowego. Zaprezentowano wyniki pomiaru amplitudy i fazy. Wykresy ilustrują napięcie lub fazę uzależnioną od kąta obrotu obiektu.

Kolejne rysunki przedstawiają rezultaty otrzymane dla zaburzeń o różnej wielkości i geometrii.

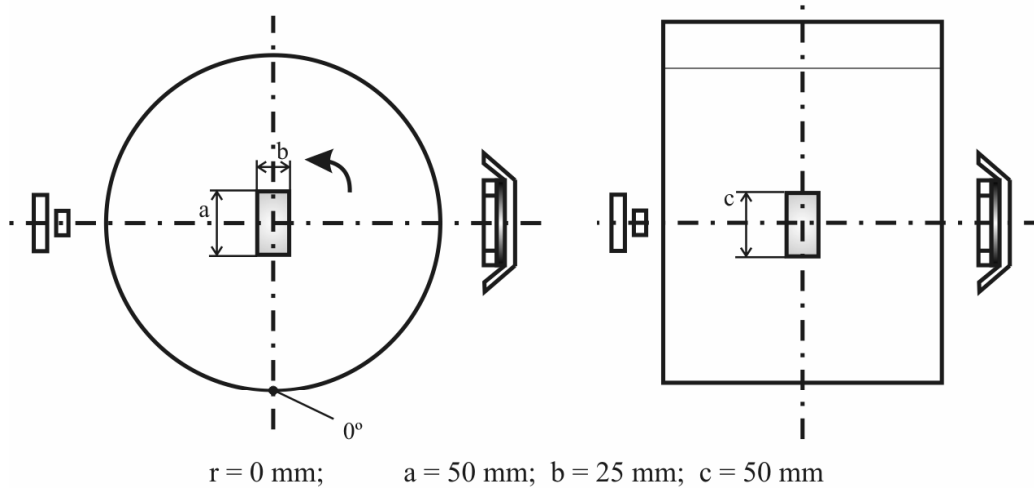


Rys. 2. Widok układu pomiarowego wykorzystywanego w przedstawionych badaniach

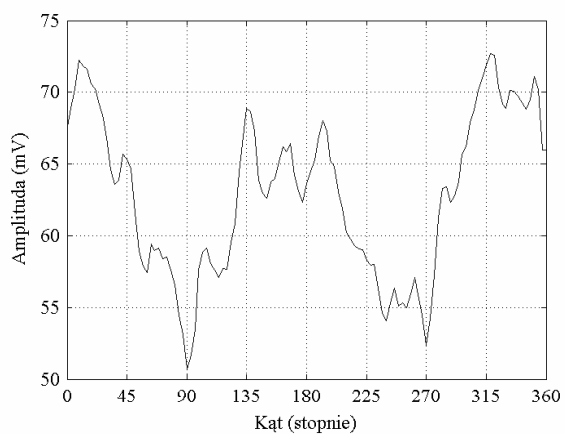
a)

Widok z góry:

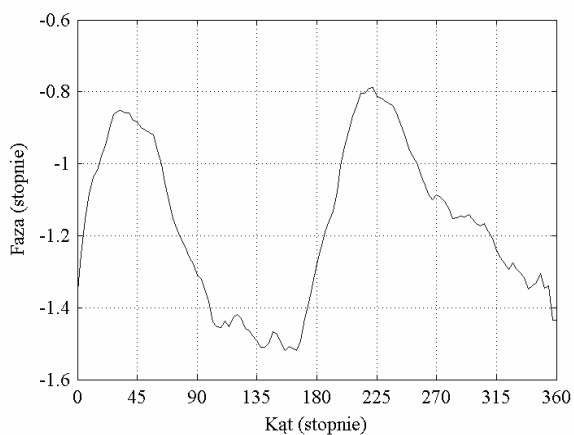
Widok z boku:



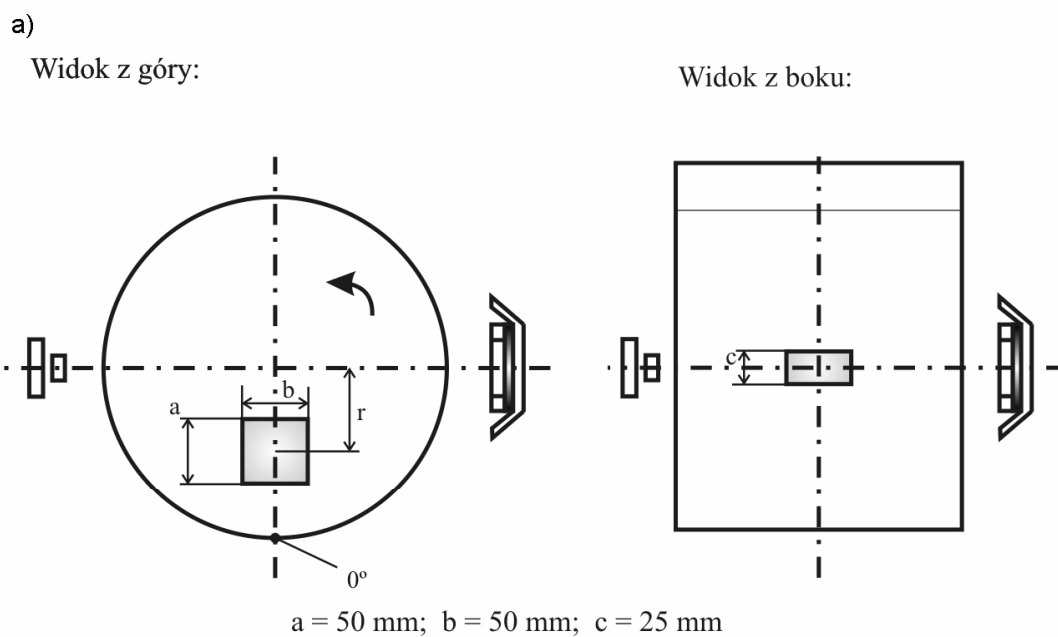
b)



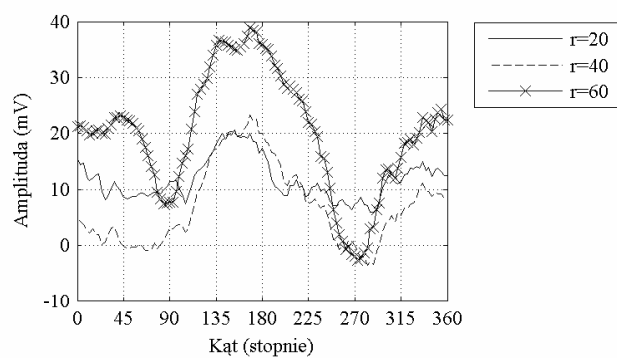
c)



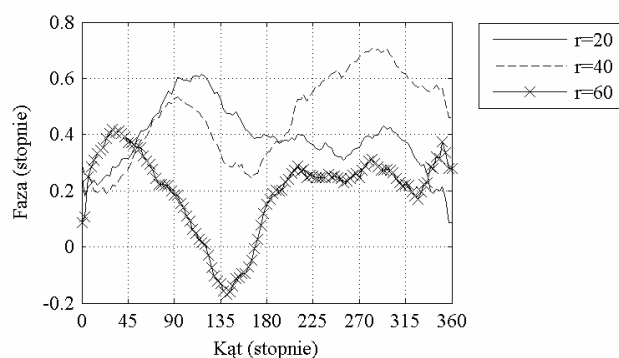
Rys. 3. Obiekt pomiarowy i otrzymane wyniki dla $I_{we} = 100 \text{ mA}$: a) położenie i wymiary zaburzenia, b) moduł napięcia wyjściowego, c) kąt przesunięcia fazowego



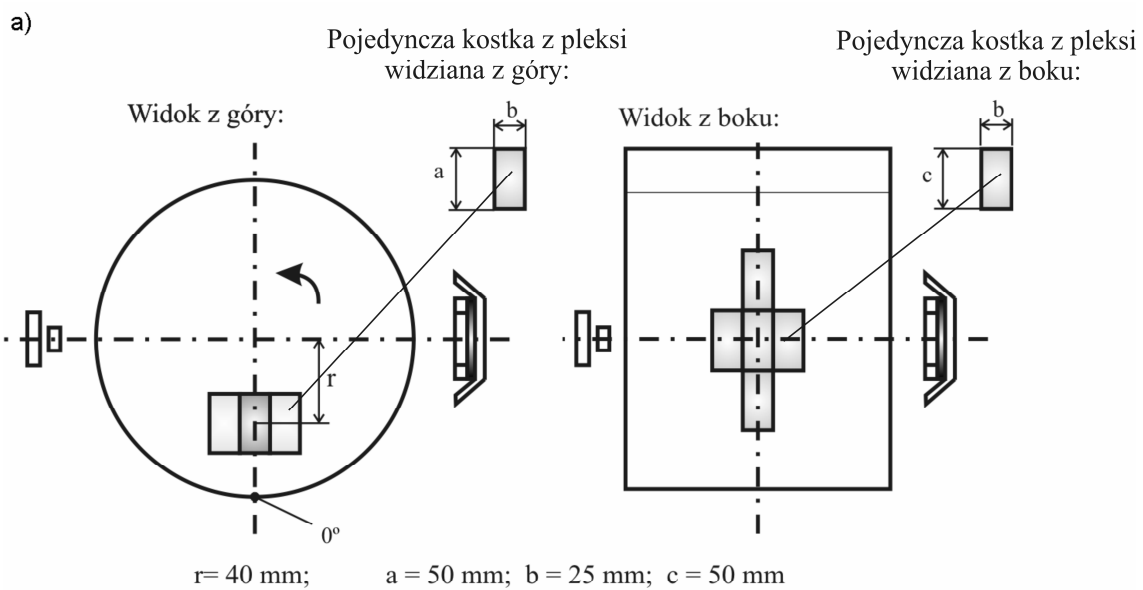
b)



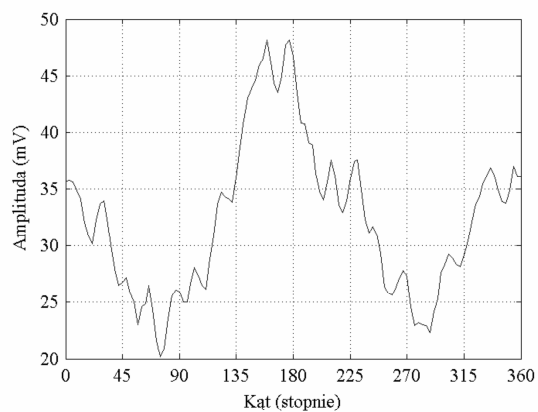
c)



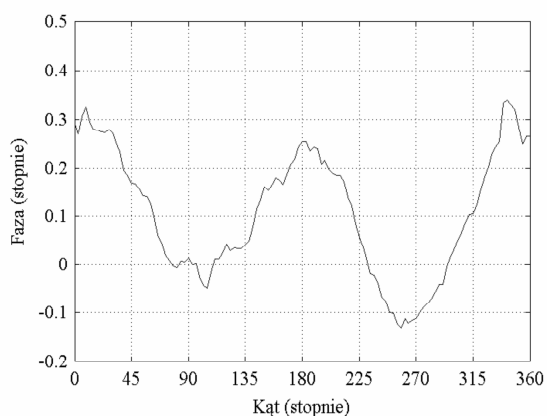
Rys. 4. Obiekt pomiarowy i otrzymane wyniki dla $I_{we} = 100 \text{ mA}$ przy różnych odległościach zaburzenia od środka badanego obiektu: a) położenie i wymiary zaburzenia, b) moduł napięcia wyjściowego, c) kąt przesunięcia fazowego



b)



c)

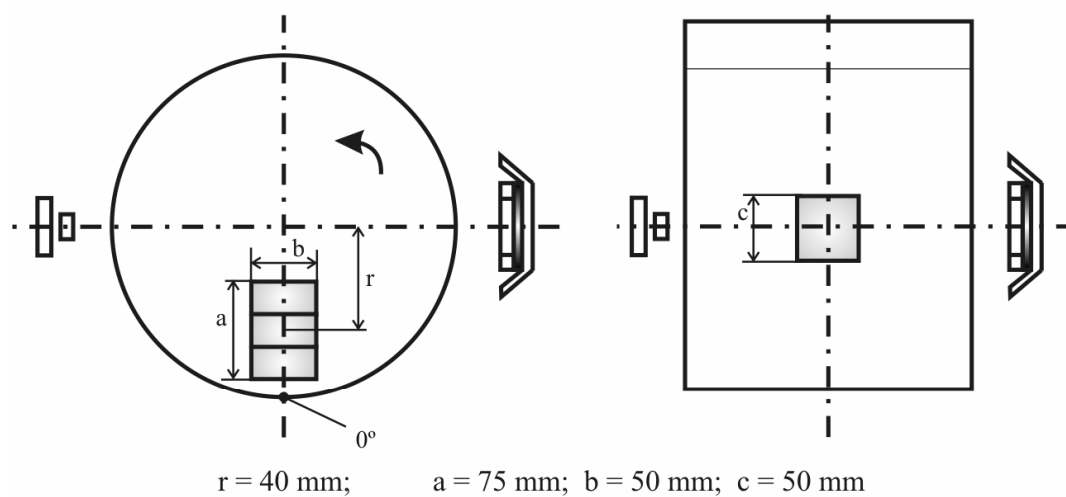


Rys. 5. Obiekt pomiarowy i otrzymane wyniki dla $I_{we} = 50 \text{ mA}$: a) położenie i wymiary zaburzenia, b) moduł napięcia wyjściowego, c) kąt przesunięcia fazowego

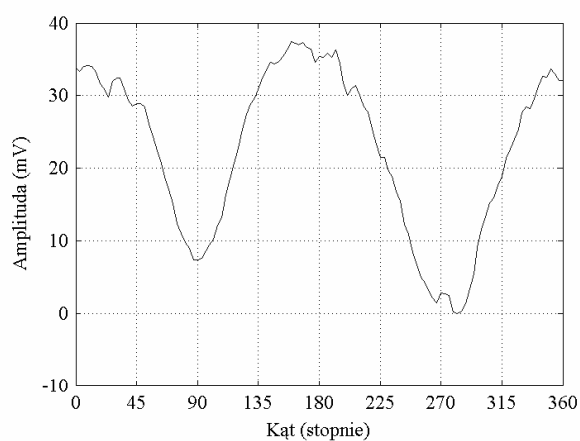
a)

Widok z góry:

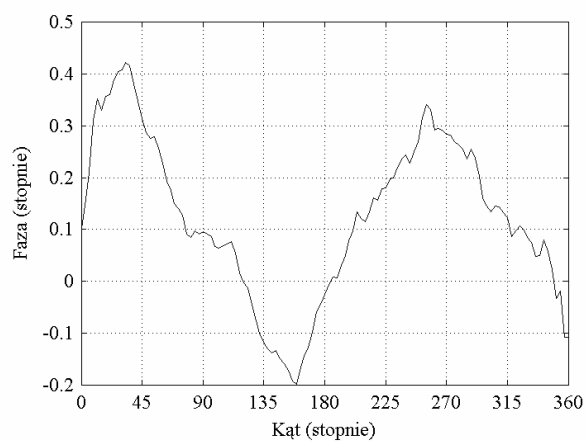
Widok z boku:



b)



c)



Rys. 6. Obiekt pomiarowy i otrzymane wyniki dla $I_{we} = 100 \text{ mA}$: a) położenie i wymiary zaburzenia, b) moduł napięcia wyjściowego, c) kąt przesunięcia fazowego

4. PODSUMOWANIE

Pomimo wielu trudności z utrzymaniem stałych warunków pomiarowych badania cechowała zadowalająca powtarzalność. Wyraźnie potwierdzały się kształty krzywych otrzymanych dla zaburzenia o identycznej konfiguracji, jednak nie zawsze odpowiadały sobie poziomy napięć. Z kształtu krzywej można łatwo wnioskować, w jakim położeniu znajduje się zaburzenie. W przedstawionych wynikach dla położenia zaburzenia w osi wzbudnik – czujnik pojawia się minimum lokalne modułu napięcia, jednak nie musi to być regułą, gdyż omawiane zaburzenia miały podobne kształty (względnie duży wymiar wzdłuż osi wzbudnik – czujnik w stosunku do pozostałych wymiarów) oraz identyczne własności σ , μ , ε . Odwrotne wyniki uzyskano m. in. dla zaburzeń opisanych w [6], gdzie przeprowadzono także porównanie rezultatów uzyskanych za pomocą opisywanego układu pomiarowego z wynikami otrzymanymi poprzez symulację komputerową. Zaobserwowano wyraźne pokrywanie się kształtów obu krzywych.

W eksperymentach zaburzenia nie dotyczyły ścianek obiektu badanego, więc prądy wirowe miały możliwość opływania zaburzenia, co mogło mieć istotny wpływ na wyniki pomiaru.

Niedokładności i błędy pomiarów wynikają z trudności z zachowaniem stałych parametrów, w tym m. in. temperatury. Liczne i różnorodne próby testowe wykonywane w czasie badań pozwalają stwierdzić, iż otrzymane krzywe są wynikiem zmiany położenia zaburzenia. Możliwe jest zatem dokonywanie identyfikacji struktury obiektu na podstawie wyników badań przeprowadzanych za pomocą opisywanego układu.

LITERATURA

1. Gencer N., Kuzuoglu M., Ider Y. Z.: Electrical Impedance Tomography Using Induced Currents. *IEEE Trans. on Medical Imaging.*, vol. 13, 338-350, No. 2, June 1994.
2. Griffiths H.: Magnetic induction tomography. *Measurement Science and Technology*, 12, 1126 – 1131, 2001.
3. Ma X., Peyton A. J., Higson S. R., Lyons A., Dickinson S. J.: Hardware and software design for an electromagnetic induction tomography (EMT) system for high contrast metal process applications. *Measurement Science and Technology*, 17, 111 – 118, 2006.
4. Rosell – Ferrer J., Merwa R., Brunner P., Scharfetter H.: A multifrequency magnetic induction tomography system using planar gradiometers: data collection and calibration. *Physiological Measurement*, 27, 271 – 280, 2006.
5. Stawicki K., Gratkowski S., Komorowski M., Pietruszewicz T.: A New Transducer for Magnetic Induction Tomography. *Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation 2008, PE2-8, P. 420. Praca wysłana do IEEE Transactions on Magnetics.*

6. Stawicki K., Gratkowski S., Komorowski M., Pietrusewicz T.: Numerical simulations and experimental results for Magnetic Induction Tomography system. Praca wysłana na konferencję Computational Problems of Electrical Engineering 2008.

Rękopis dostarczono dnia 3.10.2008 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Stefan F. FILIPOWICZ

LOW-CONDUCTIVITY STRUCTURES INVESTIGATION BY MAGNETIC INDUCTION TOMOGRAPHY

Tomasz PIETRUSEWICZ

ABSTRACT *In this paper a performance of a measuring system has been presented. The system was constructed for Magnetic Induction Tomography (MIT). MIT is a non-invasive method of tissues imaging. A construction and simplified theoretical description of the system have been considered. Results of low-conductivity objects measurements have been presented. The objects had non-conducting inclusions, which had different volumes, configuration and dimensions. Obtained results allow to make an identification of tested objects structures. This work presents also preliminary interpretation of the results.*



Mgr inż. Tomasz Pietrusewicz ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Szczecińskiej, kierunek Elektronika i Telekomunikacja w 2007 r. Obecnie w ramach studium doktoranckiego zajmuje się zagadnieniami związanymi z magnetyczną tomografią indukcyjną.