

Tomasz PIETRUSEWICZ
Mieczysław KOMOROWSKI
Stanisław GRATKOWSKI

ANALIZA WYBRANYCH UKŁADÓW MAGNETYCZNEJ TOMOGRAFII INDUKCYJNEJ^{*)}

STRESZCZENIE *W pracy przedstawiono wyniki badań systemu magnetycznej tomografii indukcyjnej. Badano obiekty słaboprzewodzące z nieprzewodzącymi wtrąceniami. Wyniki eksperymentalne zostały uzupełnione o symulacje komputerowe trójwymiarowego rozkładu gęstości prądów wirowych zaindukowanych w badanych obiektach. Przeanalizowano pracę układów pomiarowych oraz opisano nowe problemy zaobserwowane podczas badań.*

Słowa kluczowe: *magnetyczna tomografia indukcyjna (MIT), metoda elementów skończonych (FEM), badania wiroprądowe, symulacje*

^{*)} Publikacja współfinansowana jest przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Społecznego i Budżetu Państwa Poddziałanie 8.2.2 Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki 2007-2013 w ramach projektu „Inwestycja w wiedzę motorem rozwoju innowacyjności w regionie”

mgr inż. Tomasz PIETRUSEWICZ
e-mail: tp@zut.edu.pl

dr inż. Mieczysław KOMOROWSKI
dr hab. inż. Stanisław GRATKOWSKI, prof. ZUT
e-mail: sg@zut.edu.pl

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki

1. WSTĘP

W literaturze światowej można spotkać wiele układów magnetycznej tomografii indukcyjnej (Magnetic Induction Tomography, MIT). Różnią się one między innymi budową przetworników pomiarowych. Najczęściej badane są obiekty o regularnych kształtach (np. walec, sześcian) z umieszczonym wewnątrz pojedynczym wtrąceniem [4, 5]. Opisane w niniejszej pracy wyniki badań niejednorodnych obiektów słaboprzewodzących sugerują, iż czułość pomiarowa w znacznym stopniu zależy od położenia wtrącenia oraz jego wielkości w stosunku do objętości obiektu. Do przeprowadzenia badań wykorzystano kilka układów o podobnej konfiguracji przetworników pomiarowych i obiektach o różnych kształtach.

W pracy [6] omówiono ogólny zarys metody MIT oraz przedstawiono rezultaty badań dla niejednorodnych obiektów słaboprzewodzących o kształcie walcowym. Zasada działania układu pomiarowego polegała na odczytywaniu zmian wartości wtórnego pola magnetycznego wytworzonego przez zaindukowane w obiekcie prądy wirowe. Pierwotne pole magnetyczne było wytwarzane przez specjalnie zaprojektowany wzbudnik. Rolę czujnika spełniały dwie cewki połączone różnicowo. Wzbudnik i czujnik umieszczone były po przeciwnej stronie obiektu. Badany zbiornik zawierał dziesięcioprocentowy wodny roztwór NaCl, wtrąceniem były kostki z pleksi. Sygnał wyjściowy był bardzo niski, jednak przedstawione w pracy [6] wyniki świadczą o dużej czułości przetwornika.

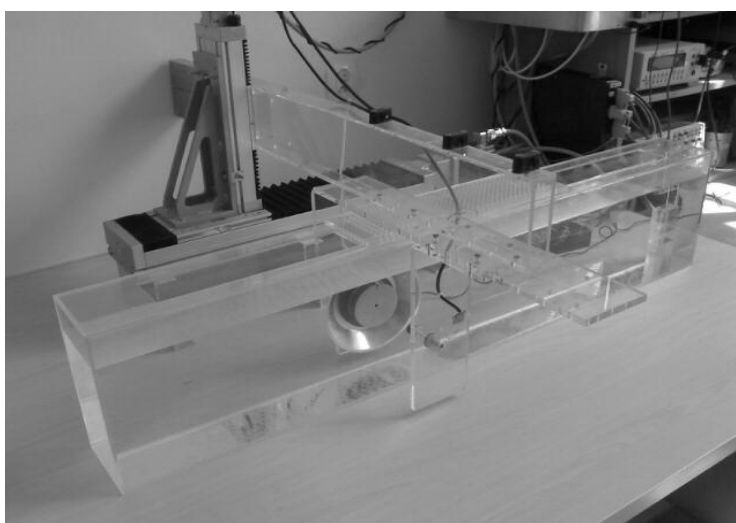
Niniejsza praca jest kontynuacją magnetycznych badań niejednorodnych obiektów słaboprzewodzących i dotyczy głównie obiektów o kształcie prostopadłościanu. Budowa układu pomiarowego nie została zmieniona z wyjątkiem odległości wzbudnik – czujnik, dostosowywanej do konkretnego obiektu. Przeanalizowano wpływ dwukrotnego powiększenia grubości badanego zbiornika i zarazem dwukrotnego wzrostu jego objętości na wyniki pomiarów. Dokonano symulacji komputerowych działania systemu pomiarowego dla obiektów o kształtach: walca, prostopadłościanu o grubości 12 cm oraz prostopadłościanu o grubości 24 cm.

2. BADANIA

2.1. System pomiarowy

Budowa układu pomiarowego jest przedstawiona na rysunku 1. Parametry geometryczne są analogiczne do opisanych w pracy [6]. Pomiarów

dokonywano, przesuwając wzbudnik wraz z czujnikiem wzdłuż obiektu z wtrąceniem umieszczonym w jego centralnej części. Dla każdej konfiguracji wtrącenia badano jego położenia różniące się odległością wtrącenia od ścianki bocznej prostopadłościanu (odległością od wzbudnika i czujnika). W celu określenia wpływu grubości obiektu na czułość pomiarową powiększono dwukrotnie szerokość badanego zbiornika z zachowaniem jego długości i wysokości. Wymiary badanych obiektów wynosiły: (1200×200×120) mm i (1200×200×240) mm (dł. × wys. × szer.).



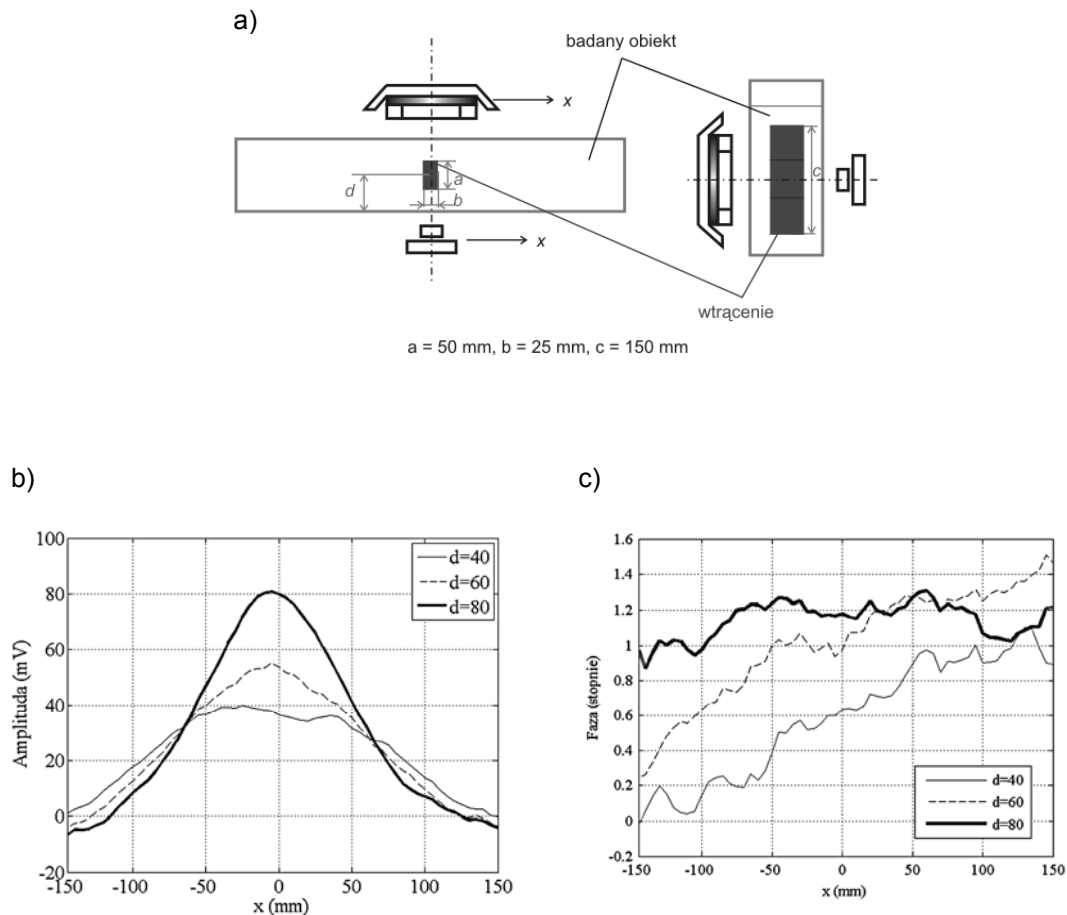
Rys. 1. Widok systemu pomiarowego z badanym obiektem w kształcie prostopadłościanu

Wzbudnik zasilano prądem przemiennym o wartości 85 mA oraz częstotliwości: 36 kHz i 33 kHz, odpowiednio dla zbiorników o mniejszej i większej szerokości, co gwarantowało maksymalny poziom napięcia na cewkach odbiorczych. Sygnał wyjściowy filtrowano i wzmacniono. W celu wyeliminowania wpływu kształtu zbiornika na końcowy wynik, dokonywano pomiaru dla obiektu bez wtrąceń i odejmowano otrzymaną wartość sygnału od wartości uzyskanej w wyniku pomiaru dla obiektu z wtrąceniami. Zabieg taki umożliwia przeprowadzenie analizy poprawności działania systemu. Ostateczna wersja przetestowanego i odpowiednio skalibrowanego układu powinna być odporna nawet na nieznaczne zmiany kształtu obiektu w czasie przeprowadzania pomiaru. Wymóg taki wynika m. in. z planów zastosowania MIT w medycynie, gdzie można spotkać się na przykład z wpływem oddychania badanego pacjenta na wyniki uzyskiwane w tomografii [1]. Rozwiązanie tego rodzaju problemów wymagałoby na przykład zastosowania układu automatycznego dostrajania do rezonansu.

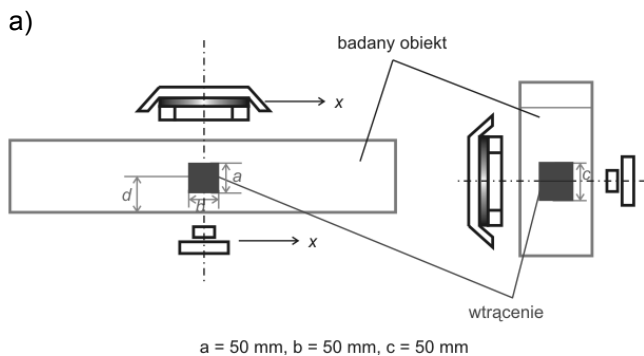
W czasie trwania pomiaru starano się utrzymywać stałą temperaturę otoczenia. Ze względu na możliwy wpływ oświetlenia na wynik pomiaru, utrzymywano równomierne oświetlenie całego obiektu badanego.

2.2. Rezultaty badań

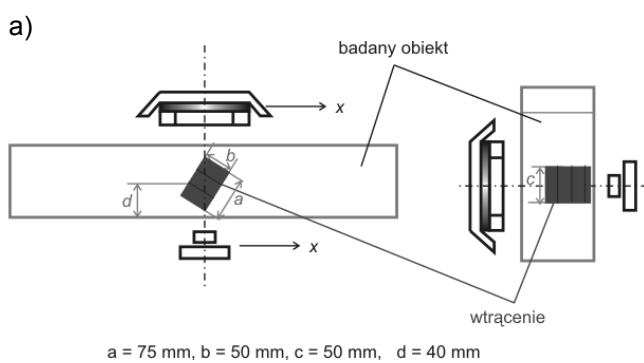
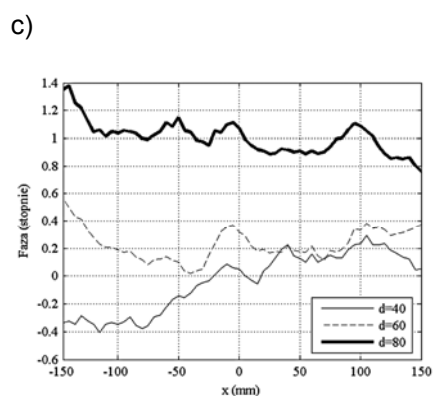
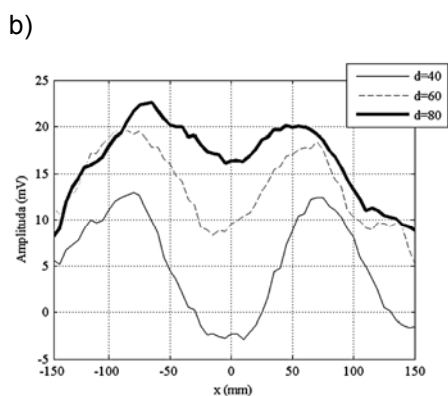
W przypadku obiektu o mniejszej grubości, pomiary wykazały na tyle wysoką czułość przetwornika na obecność wtrącenia, iż nie jest wymagane odejmowanie wartości sygnału otrzymanego w pomiarze dla obiektu bez wtrąceń. Zmiany sygnału powodowane kształtem zbiornika były nieznaczne w stosunku do zmian powodowanych obecnością wtrącenia. Wybrane wyniki pomiarów zaprezentowano na rysunkach 2 – 7.



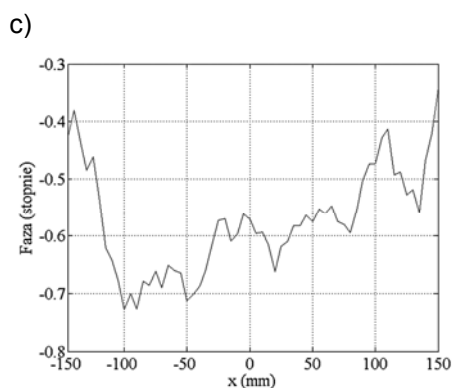
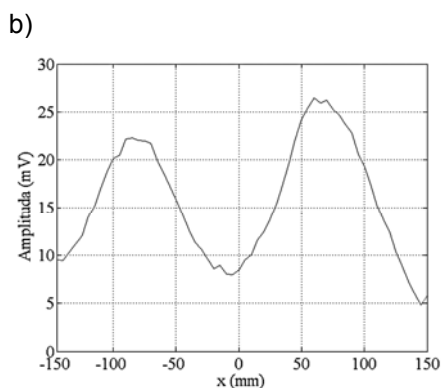
Rys. 2. Schemat układu oraz wyniki pomiarów (zbiornik o szerokości 120 mm, wzmocnienie $k = 20$): a) położenie i wymiary wtrącenia umieszczonego w badanym obiekcie, b) moduł napięcia wyjściowego, c) kąt przesunięcia fazowego

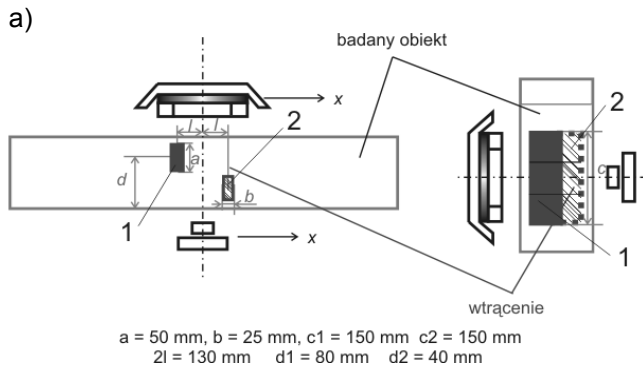


Rys. 3. Schemat układu oraz wyniki pomiarów (zbiornik o szerokości 120 mm, wzmocnienie $k = 20$):
 a) położenie i wymiary wtrącenia umieszczonego w badanym obiekcie, b) moduł napięcia wyjściowego, c) kąt przesunięcia fazowego

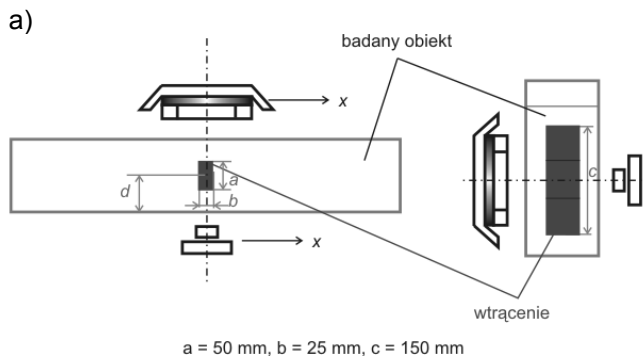
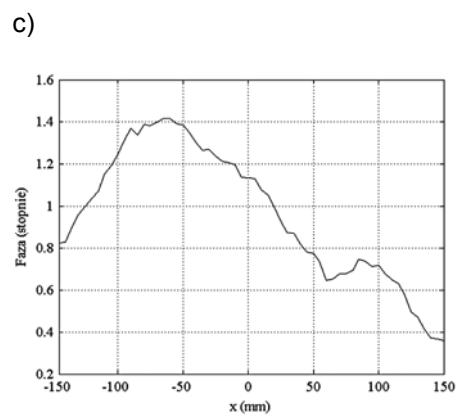
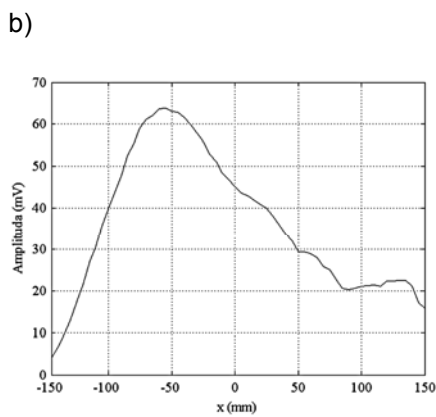


Rys. 4. Schemat układu oraz wyniki pomiarów (zbiornik o szerokości 120 mm, wzmocnienie $k = 20$):
 a) położenie i wymiary wtrącenia umieszczonego w badanym obiekcie, b) moduł napięcia wyjściowego, c) kąt przesunięcia fazowego

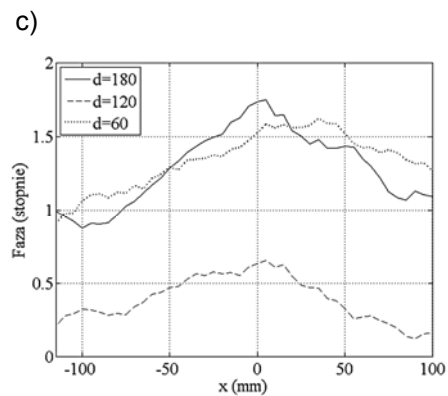
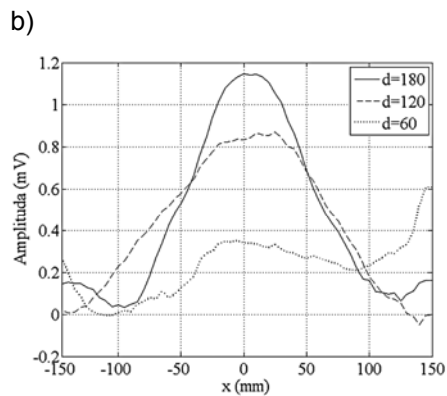


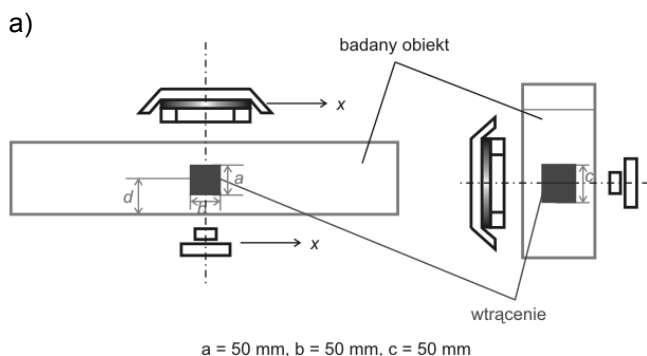


Rys. 5. Schemat układu oraz wyniki pomiarów (zbiornik o szerokości 120 mm, wzmacnienie $k = 20$):
 a) położenie i wymiary wtrącenia umieszczonego w badanym obiekcie,
 b) moduł napięcia wyjściowego,
 c) kąt przesunięcia fazowego

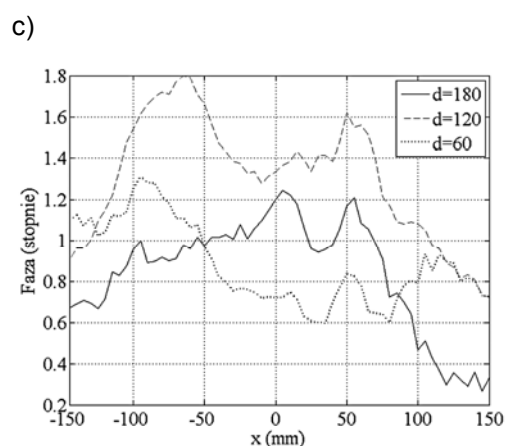
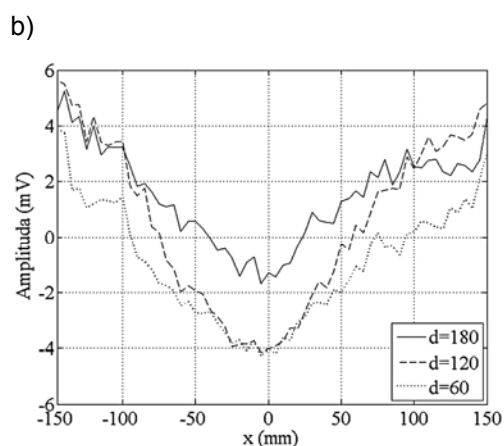


Rys. 6. Schemat układu oraz wyniki pomiarów (zbiornik o szerokości 240 mm, wzmacnienie $k = 10$):
 a) położenie i wymiary wtrącenia umieszczonego w badanym obiekcie,
 b) moduł napięcia wyjściowego,
 c) kąt przesunięcia fazowego





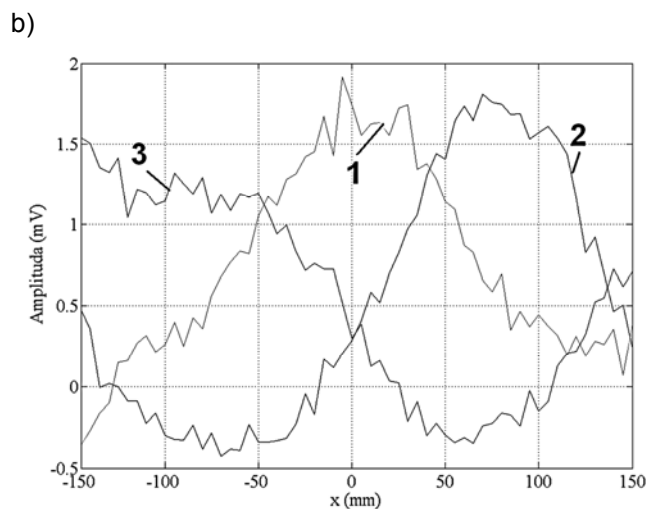
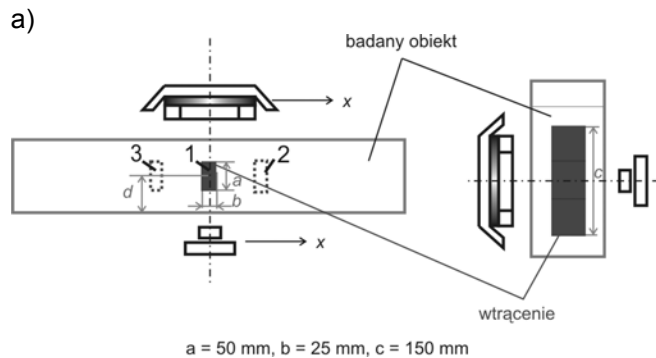
Rys. 7. Schemat układu oraz wyniki pomiarów (zbiornik o szerokości 240 mm, wzmacnienie $k = 10$):
 a) położenie i wymiary wtrącenia umieszczonego w badanym obiekcie,
 b) moduł napięcia wyjściowego,
 c) kąt przesunięcia fazowego



Rysunek 8 przedstawia jeden ze sposobów testowania wiarygodności wyników. Przeanalizowano wpływ zmiany położenia wtrącenia na osi, wzdłuż której poruszały się wzбудnik z czujnikiem. Rezultat powinien zatem różnić się jedynie położeniem krzywych na osi odciętych.

Krzywe z rysunku 8 odzwierciedlają przede wszystkim położenie wtrącenia. Krzywa nr 3 posiada w niewielkim przedziale zmiennej x inny kształt w porównaniu z dwiema pozostałymi. Pomiar ten był wykonywany jako ostatni i można przypuszczać, iż minimalnie zmieniły się warunki zewnętrzne. Zmiany takie były bardzo często obserwowane w trakcie badań i wymagały w niektórych przypadkach ponownego dokonania pomiaru. Krzywa nr 3 odbiega od teoretycznych oczekiwań jedynie na początku przebiegu. Można zatem doszukiwać się wpływu zmian warunków zewnętrznych pojawiających się tylko na małym obszarze (np. zmiana temperatury fragmentu obiektu jedynie w okolicy miejsca, w którym najdłużej znajdował się uruchomiony wzbudnik).

W przypadku wyników pomiarów przedstawionych na rysunku 4 przeprowadzono również badania dla takiego samego wtrącenia przemieszczonego symetrycznie względem środka obiektu badanego. Wówczas krzywa pomiarowa była również symetryczna względem środka [3]. Doświadczalnie stwierdzono również brak wpływu na końcowy rezultat zmiany kierunku przesuwu układu wzbudnik – czujnik.



Rys. 8. Schemat układu oraz wyniki pomiarów (zbiornik o szerokości 120 mm, wzmacnienie $k = 20$):
 a) położenie i wymiary wtrącenia umieszczonego w badanym obiekcie: 1, 2, 3 – kolejne położenia wtrącenia,
 b) moduł napięcia wyjściowego

Wyniki badań obiektu w kształcie prostopadłościanu są o wiele łatwiejsze w interpretacji od wyników badań obiektu walcowego. Oprócz większej amplitudy, krzywe posiadają bardziej wyraźną informację o kształcie i położeniu wtrącenia.

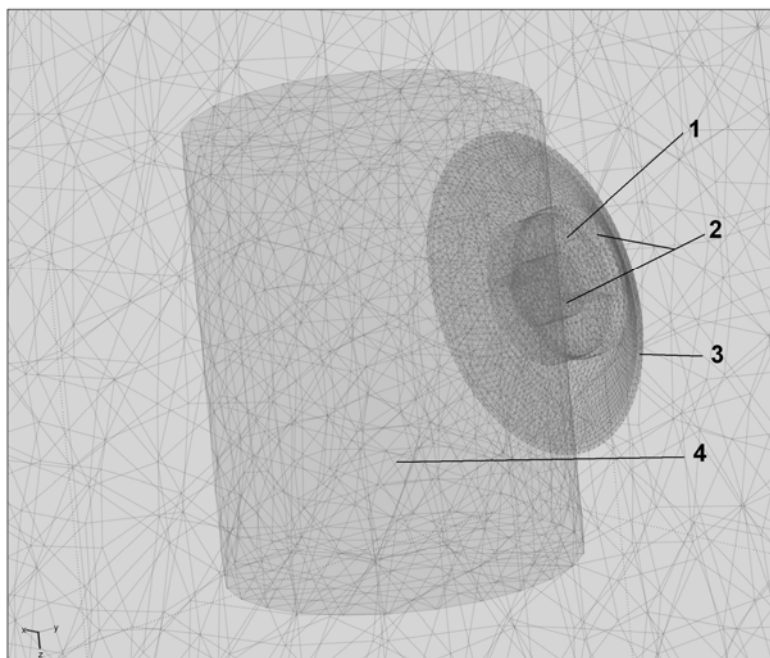
Powyższe wyniki wykazują, iż dla obiektu o powiększonej objętości czułość układu pomiarowego jest zdecydowanie niższa. Gdy wtrącenie znajdowało się w stałej odległości od wzbudnika i zwiększyła się jedynie grubość obiektu (wraz z odległością czujnika od wzbudnika, rysunku 2 i 6, 3 i 7) czułość również zmalała. Uzyskaniu odpowiedzi na pytanie o przyczynę takiej zmiany posłużyć może ustalenie rozkładu prądów wirowych w badanych obiektach.

Więcej podobnych wyników można znaleźć w [2, 3]. Badano m.in. różne sposoby rozmieszczenia dwóch wtrąceń w obiekcie. Zarówno z owych wyników jak i z rezultatów przedstawionych w niniejszej pracy wyraźnie wynika, iż ze wzrostem odległości od wzbudnika maleje czułość pomiarowa układu.

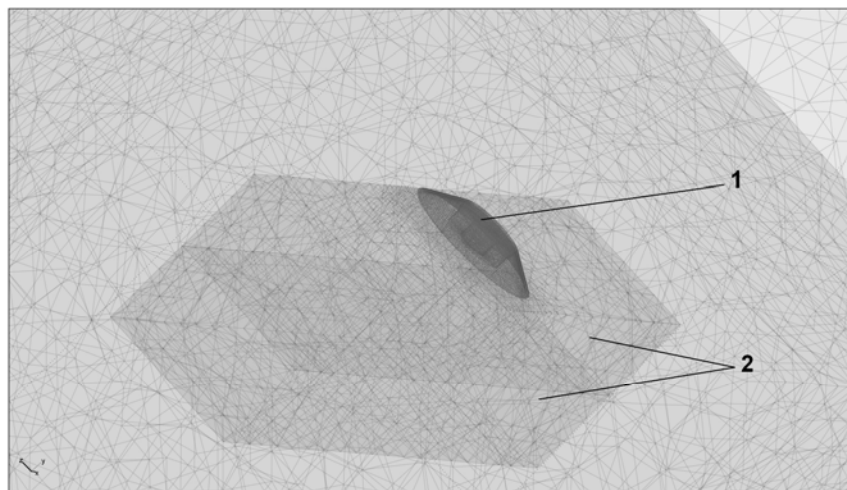
3. SYMULACJE

Chcąc, na podstawie pomiarów indukcji magnetycznej B , przeanalizować rozkład prądów wirowych w obiekcie, można posłużyć się prawem Biota-Savarta. Obliczenia narzucają jednak konieczność dokonania pomiarów poszczególnych składowych B w wielu punktach przy niezmiennym położeniu wzbudnika. Wymaga to rozbudowy istniejących systemów pomiarowych.

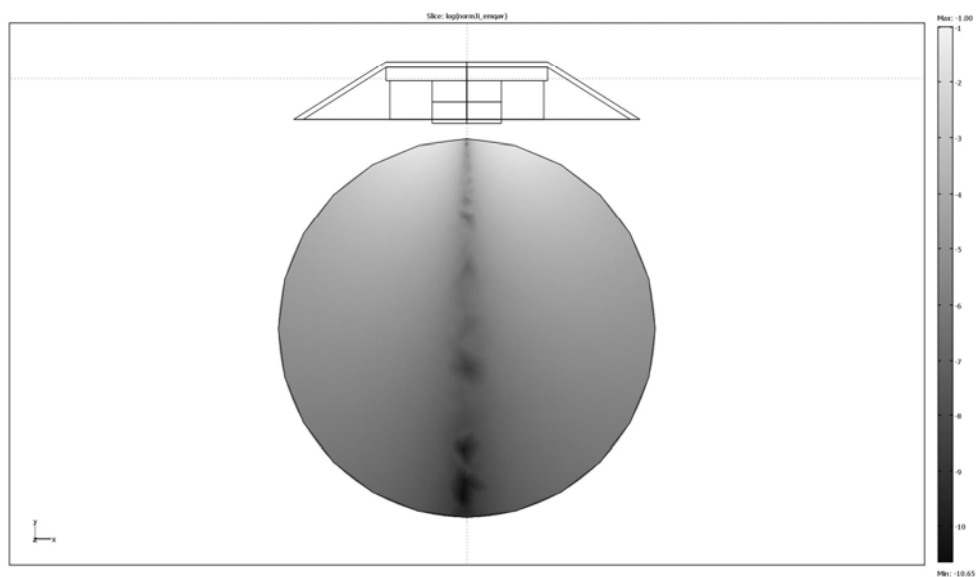
Dla opisanych badań dokonano symulacji komputerowej w programie Comsol®, wykorzystując metodę elementów skończonych. Obiekty zamodelowano w rzeczywistych rozmiarach, w trybie 3D. Rysunki 9 i 10 przedstawiają strukturę symulowanych układów pomiarowych z wygenerowaną siatką elementów skończonych. Układ z rysunku 9 odnosi się do wyników badań zawartych w [6] oraz [7]. Rysunki 11–15 przedstawiają obliczony rozkład gęstości zaindukowanych w obiekcie prądów w skali logarytmicznej. Przyjęto założenie, że obecność czujnika nie wpływa na rozkład pola magnetycznego w badanym obszarze.



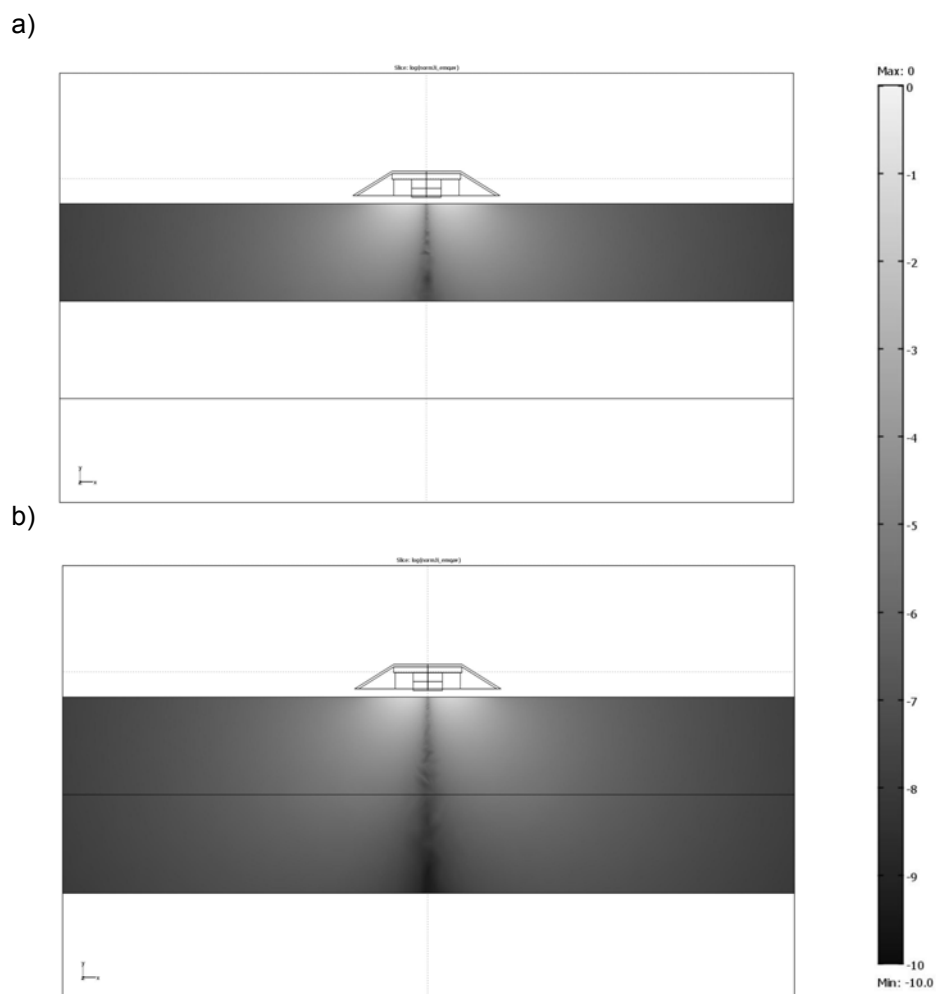
Rys. 9. Budowa symulowanego układu pomiarowego z wygenerowaną siatką elementów skończonych. 1 – cewka wzbudnika, 2 – rdzeń ferrytowy, 3 – ekran aluminiowy, 4 – badany obiekt. Wydruk z programu Comsol® [8]



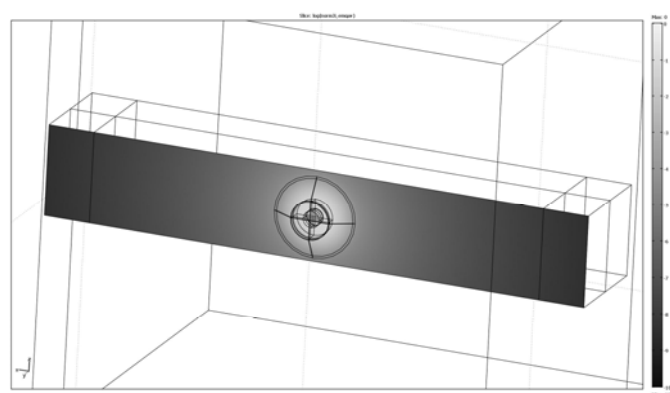
Rys. 10. Budowa symulowanego układu pomiarowego z wygenerowaną siatką elementów skończonych: 1 – wzбудnik, 2 – badany obiekt (o zmiennej szerokości). Siatka dla całego układu jest identyczna w przypadku obu szerokości obiektu. Wydruk z programu Comsol® [8]



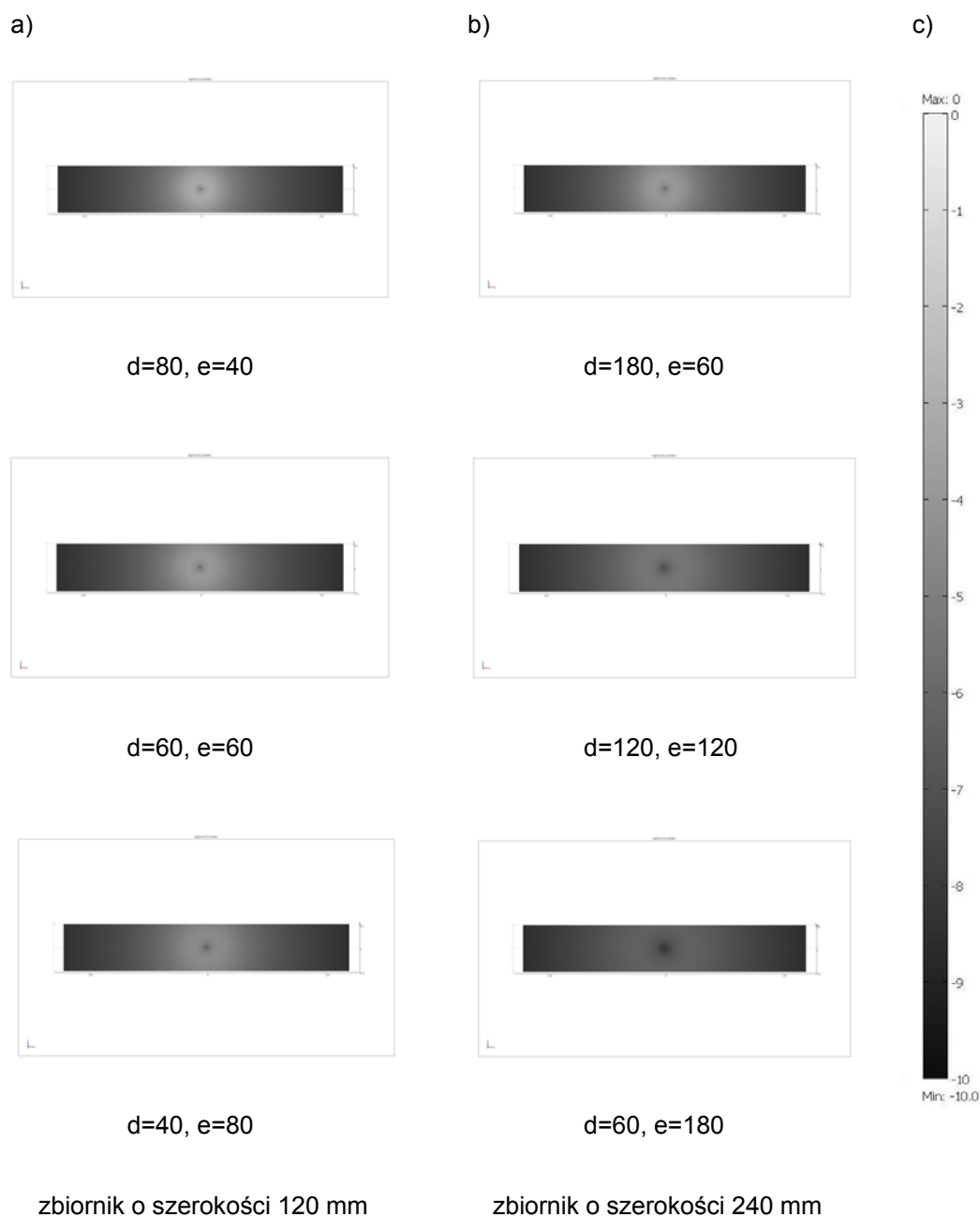
Rys. 11. Rozkład gęstości prądów wirowych w obiekcie walcowym w przekroju poziomym. Wynik symulacji w programie Comsol® [8]



Rys. 12. Rozkład gęstości prądów wirowych w obiekcie prostokątnym w przekroju poziomym dla wspólnej skali logarytmicznej: a) obiekt o szerokości 120 mm, b) obiekt o szerokości 240 mm. Wynik symulacji w programie Comsol® [8]



Rys. 13. Rozkład gęstości prądów wirowych w obiekcie prostokątnym w przekroju pionowym po stronie wzbudnika. Wynik symulacji w programie Comsol® [8]



Rys. 14. Rozkład gęstości prądów wirowych w obiekcie prostokątnym w przekroju pionowym: a) obiekt o szerokości 120 mm, b) obiekt o szerokości 240 mm, c) skala logarytmiczna ta sama dla wszystkich wykresów; d) – odległość od czujnika (mm), e) – odległość od wzbudnika (mm). Poszczególne odległości odpowiadają położeniom wtrącenia. Wynik symulacji w programie Comsol® [8]

4. ANALIZA WYNIKÓW

Pomiarów dokonywano przesuwając wzbudnik i czujnik względem nieruchomego obiektu z wtrąceniem na długości 300 mm, co stanowi niewielki odcinek w stosunku do długości badanego zbiornika. Ogranicza to wpływ końców obiektu na rezultat pomiaru. Analizując wynik symulacji, można przyjąć, iż wtrącenie przemieszcza się względem nieruchomego wzbudnika generującego zawsze ten sam rozkład prądów wirowych, widoczny na wyniku symulacji. W przypadku wtrąceń o większej wysokości, maksima sygnału oznaczają ich położenie na osi x, ponieważ rozcinają one większy obszar o dużej gęstości prądu. Natomiast mniejsze wtrącenia przecinają obszar o dużej gęstości prądu dwukrotnie, skąd wynikają inne położenia maksimów sygnału.

Wyniki zawarte w [7] dla obiektu walcowego wskazują na podobną czułość w strefie położonej w okolicy wzbudnika oraz w strefie przy czujniku. Z rysunku 11 wynika, iż może to być spowodowane dużą zmianą gęstości zaindukowanych w obiekcie prądów wzdłuż drogi, po której przemieszczało się wtrącenie. W przypadku zbiorników prostopadłościennych wraz ze wzrostem odległości od wzbudnika maleją zmiany gęstości prądów wzdłuż toru względnego przesuwu wtrącenia (rys. 12-13). Maleje również czułość pomiarowa, jak wynika z badań eksperymentalnych. Wpływ na wynik ma zarówno spadek gęstości prądów wirowych wraz z oddalaniem od wzbudnika oraz różnicowe połączenie cewek pomiarowych. Rysunek 15 ukazuje przyczyny odmiennych wyników dla poszczególnych położzeń wtrącenia wzdłuż osi wzbudnik-czujnik.

Ze względu na niski poziom otrzymywanych sygnałów bardzo istotne było utrzymywanie stałych warunków zewnętrznych i uwzględnienie różnego rodzaju zakłóceń. Zaobserwowano powtarzalne zmiany przebiegu krzywych pojawiające się po dokonaniu kilku pomiarów. Istnieje zatem możliwość powstawania niewielkich zmian właściwości badanego roztworu pod wpływem działania układu pomiarowego. Zmiany te mogą mieć wpływ na interpretację końcowego wyniku. W czasie przeprowadzania opisywanych badań były one w różne sposoby niwelowane. Rodzi się jednak pytanie o nieznaczną inwazyjność stosowanej metody w przypadku badania obiektów zawierających roztwory wodne. Możliwe są także zmiany w obiekcie wywołane chwilowym umieszczeniem wtrącenia w roztworze i poddaniu go działaniu pola wytwarzanego przez wzbudnik. Prowadzone będą dalsze badania z uwzględnieniem zaobserwowanych problemów.

Porównując wyniki przedstawione na rysunkach 3 i 7 można zauważyć, że wraz ze zmianą grubości zbiornika (odległości wzbudnika od czujnika) zmienił się również kształt niektórych krzywych pomiarowych dla takich samych wtrąceń. Zmalała też amplituda, o czym mowa w p. 2.2. Natomiast z powodu identycznego rozkładu konduktywności w zaburzonym fragmencie obiektu rozkład prądów wirowych jest taki sam dla obu przypadków, co ilustrują również wyniki symulacji. Wynika z tego, że zmiana położenia czujnika lub zmiana częstotliwości sygnału zasilającego może mieć istotny wpływ na właściwości pomiarowe układu. Wymaga to przeprowadzenia dalszych, bardziej szczegółowych badań.

5. PODSUMOWANIE

Zaprezentowane wyniki pomiarów oraz symulacji ukazują działanie wybranych systemów MIT dla obiektów słaboprzewodzących. Wyniki numeryczne potwierdzają najważniejsze wnioski z wyników doświadczalnych. Zaobserwowano przy tym kilka nowych problemów wymagających dalszej analizy.

Określenie obszaru zastosowań układów pomiarowych jest ściśle związane z próbami dokonywanymi na obiektach badanych o konkretnych parametrach. Z powyższych badań wynika, iż obiekty o większej objętości niż opisywane stanowią problem dla pracy tego rodzaju przetworników.

Do zastosowania opisanych systemów w praktyce, poza ostatecznym potwierdzeniem prawidłowości działania układów, wymagane jest opracowanie algorytmów identyfikacyjnych, stworzenie systemów pozwalających na uniezależnienie układu od zakłóceń zewnętrznych oraz doskonalenie przetworników pod względem czułości i rozdzielczości. Zaprezentowane wyniki sugerują, iż istnieje również możliwość zastosowania opisywanych układów do badania nawodnienia substancji cechujących się słabym przewodnictwem elektrycznym.

LITERATURA

1. Brunner P., Merwa R., Missner A., Rosell J., Hollaus K., Scharfetter H.: Reconstruction of the shape of conductivity spectra using differential multi-frequency magnetic induction tomography, *IOP Publishing Physiological Measurement* 27 (2006), 237–248.
2. Gratkowski S., Komorowski M., Pietruszewicz T.: Badania modelu płaskiego o powiększonej objętości z wtrąceniami z materii nieorganicznej i organicznej. Sprawozdanie z projektu badawczego KBN Nr 3 T10 033 30, Szczecin, luty 2009.

3. Gratkowski S., Komorowski M., Pietruszewicz T.: Badania modelu płaskiego z wtrąceniami z materii nieożywionej. Sprawozdanie z projektu badawczego KBN Nr 3 T10 033 30, Szczecin, wrzesień 2008.
4. Korjnevsky A., Cherepenin V., Sapetsky S.: Magnetic induction tomography: experimental realization, IOP Publishing Physiological Measurement 21 (2000), 89–94.
5. Merwa R., Scharfetter H.: Magnetic induction tomography: comparison of the image quality using different types of receivers, IOP Publishing Physiological Measurement 29 (2008), 417–429.
6. Pietruszewicz T.: Badanie struktur słaboprzewodzących metodą magnetycznej tomografii indukcyjnej. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 236 (2008), 117-128.
7. Pietruszewicz T., Komorowski M., Gratkowski S.: Magnetic induction tomography inspection of low conductivity non-homogeneous cylinders, Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, XXXII IC – SPETO 2009, 15-16.
8. www.comsol.com.

Rękopis dostarczono dnia 15.09.2009 r.

Opiniował: dr hab. inż. Stefan F. Filipowicz – prof. PW

ANALYSIS OF CHOSEN SYSTEMS OF MAGNETIC INDUCTION TOMOGRAPHY

T. PIETRUSEWICZ, M. KOMOROWSKI,
S. GRATKOWSKI

ABSTRACT *In this paper selected results of magnetic induction tomography (MIT) system researches have been presented. Low-conductivity objects with non-conductivity inclusions are considered. Experimental results have been extended for the results of computational simulations of eddy currents distribution in tested objects. An interpretation of measurements results has been presented.*

The working of chosen measuring systems has been analysed and new problems of MIT researches have been described.



Mgr inż. Tomasz PIETRUSEWICZ urodził się w 1983 r. Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Szczecińskiej, kierunek Elektronika i Telekomunikacja w 2007 r. Obecnie jest uczestnikiem Studiów Doktoranckich na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie i zajmuje się zagadnieniami związanymi z magnetyczną tomografią indukcyjną.



Dr hab. inż. Stanisław GRATKOWSKI, prof. ZUT otrzymał tytuł magistra inżyniera w 1976 r. na Wydziale Elektrycznym Politechniki Szczecińskiej, stopień doktora nauk technicznych w 1980 r. na Politechnice Gdańskiej, stopień doktora habilitowanego w 1997 r. w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie. Obecnie jest profesorem na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, kierownikiem studiów doktoranckich i kierownikiem Katedry Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki. Zajmuje się m. in. teorią pola elektromagnetycznego, metodami numerycznymi oraz badaniami nieniszczącymi.



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Wojewódzki Urząd Pracy
w Szczecinie

