

Tomasz PIETRUSEWICZ

WYKRYWANIE I OBRAZOWANIE OBIEKTÓW SŁABOPRZEWODZĄCYCH W MAGNETYCZNEJ TOMOGRAFII INDUKCYJNEJ – MODELOWANIE NUMERYCZNE I BADANIA EKSPERYMENTALNE

STRESZCZENIE *W pracy przedstawiono wyniki badań nad wykrywaniem struktury obiektów słaboprzewodzących za pomocą magnetycznej tomografii indukcyjnej. Zaprezentowano pierwsze uzyskane dwuwymiarowe obrazy badanych obiektów. Przeanalizowano obiekty z wtrąceniami różne pod względem konduktywności oraz kształtu. Zamieszczono również wyniki obliczeń numerycznych. Przeanalizowano wybrane problemy występujące w czasie badań.*

Słowa kluczowe: *magnetyczna tomografia indukcyjna, modelowanie numeryczne, obrazowanie struktur słaboprzewodzących*

1. WSTĘP

Istnieją różne metody nieinwazyjnego badania struktury obiektów cechujących się niską konduktywnością elektryczną. Jedną z najnowszych oraz

mgr inż. Tomasz PIETRUSEWICZ

e-mail: tp@zut.edu.pl

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

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 248, 2010

najmniej zbadanych jest magnetyczna tomografia indukcyjna (Magnetic Induction Tomography, MIT). Polega ona na wzbudzeniu pola magnetycznego w pobliżu badanego obiektu tak, aby wytworzone w nim niewielkie prądy wirowe powodowały zmianę pola magnetycznego mierzonego w bliskiej odległości od niego. W ramach badań prowadzonych na Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie są analizowane różne układy pomiarowe MIT, co zaprezentowano m. in. w pracach [4, 5]. Zawarte tam wyniki badań oraz symulacji dowodzą, iż MIT pozwala na wykrywanie różnic konduktywności obiektów słaboprzewodzących. W niniejszej pracy przedstawiono kontynuację opisywanych w nich badań. Zaprezentowano nowy układ pomiarowy stworzony na bazie opisywanych w [4, 5] przetworników. Za jego pomocą przebadane zostały różne obiekty słaboprzewodzące o niejednorodnej strukturze.

W literaturze światowej jako zastosowanie MIT najczęściej podaje się tomografię medyczną [1, 3]. Potrzeba nowego rodzaju badania w medycynie jest oczywista, chociażby ze względu na trudności i przeciwwskazania spotykane przy tomografii rezonansu magnetycznego. Istnieje duża szansa, że wiele z tych problemów można znacząco ograniczyć poprzez zastosowanie MIT. Problem stanowi jednak rozdzielczość otrzymywanych obrazów, która jest mała z powodu stosowania w MIT niskich częstotliwości. Przedstawione w dalszej części pracy wyniki pomiarów ukazują jednak, że przy stosunkowo dużych różnicach konduktywności oraz przy zastosowaniu odpowiednio precyzyjnego przesuwu przetwornika wzdłuż obiektu można osiągnąć bardzo dobre rezultaty. Niektóre choroby mogą być łatwo zlokalizowane już przy rozdzielczości obserwowalnej na rysunkach 7 – 8 (np. pewne rodzaje marskości wątroby).

MIT może być jednak stosowana również w bardzo szerokim spektrum badań przemysłowych. Istnieje wiele dziedzin techniki posiadających zapotrzebowanie na wykrywanie niejednorodności materiałów słaboprzewodzących lub poszukiwanie fragmentów o niewielkiej przewodności elektrycznej w nieprzewodzących strukturach. W niniejszej pracy przedstawiono m. in. wybrane wyniki pomiaru wilgotności gleby umieszczonej w naczyniu.

Praca zawiera również wybrane wyniki obliczeń numerycznych pozwalających na poprawną interpretację otrzymanych wyników doświadczalnych. Dokonano także analizy niektórych z występujących w czasie badań problemów pod kątem zastosowań MIT w medycynie i badaniach technicznych.

2. UKŁAD POMIAROWY

Na rysunku 1 przedstawiono układ pomiarowy przystosowany do badania wilgotności zbiornika z glebą. Pole magnetyczne jest generowane przez

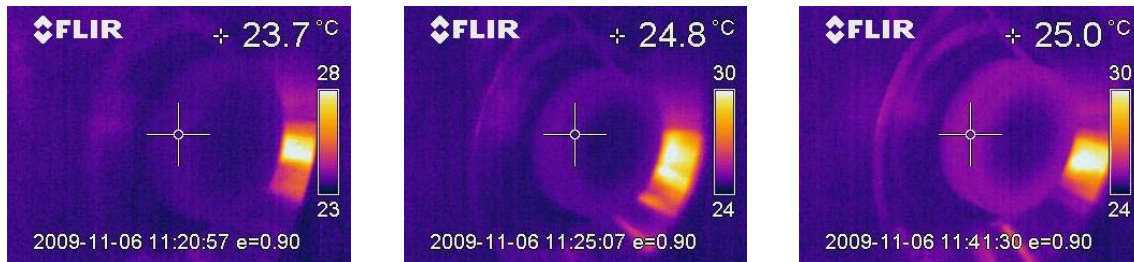
cewkę z rdzeniem ferrytowym osłoniętą częściowo aluminiowym ekranem. Zmiany pola wtórnego odczytywane są poprzez pomiar napięcia na dwóch różnicowo połączonych cewkach położonych po przeciwnej stronie obiektu, w osi wzbudnika. Szczegółowy opis wzbudnika oraz czujnika można znaleźć w pracach [4, 5, 6]. Układ pozycjonujący pozwala na uzyskanie obrazu dwuwymiarowego dzięki możliwości przesuwu wzbudnika wraz z czujnikiem. Ten sam układ może posłużyć również do szczegółowego badania zbiorników wypełnionych cieczą oraz wtrąceniami stanowiącymi zaburzenie jednorodnego rozkładu konduktywności w obiekcie.



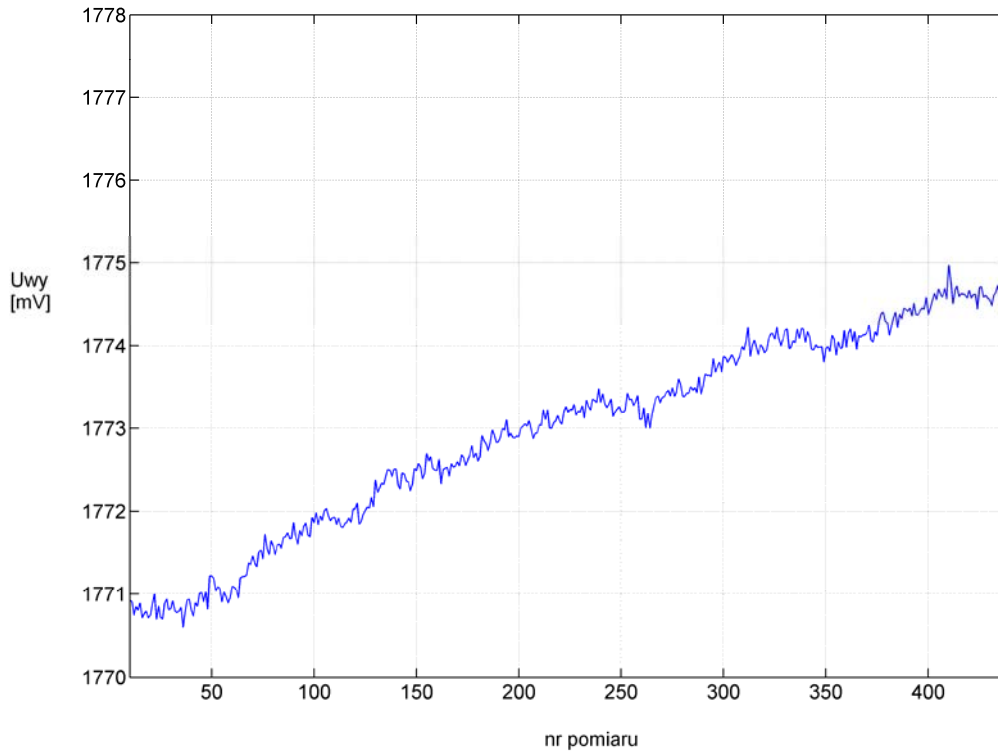
Rys. 1. Widok systemu pomiarowego MIT oraz badanego zbiornika wypełnionego wilgotną glebą

Ze względu na bardzo niskie wartości otrzymywanych sygnałów niezwykle istotne jest utrzymanie stałych warunków pracy przetwornika. W praktyce bardzo niewielkie zmiany parametrów geometrycznych układu mogą spowodować utratę czułości pomiarowej. Na wynik wpływa też w sposób bardzo wyraźny temperatura elementów układu oraz obiektu badanego (ze względu na istotne zmiany jego przewodności elektrycznej). Rysunek 2 prezentuje zmianę rozkładu temperatury wzbudnika (cewki) zarejestrowaną za pomocą kamery termowizyjnej. Nagrzewanie się cewki wzbudzającej jest jedną z głównych przyczyn zmian sygnału niespowodowanych zmianami obiektu umieszczonego pomiędzy wzbudnikiem a czujnikiem. Rysunki 3 i 4 pokazują zmiany napięcia wyjściowego omawianego przetwornika MIT, jakie zachodzą w czasie jednej godziny bez poruszania przetwor-

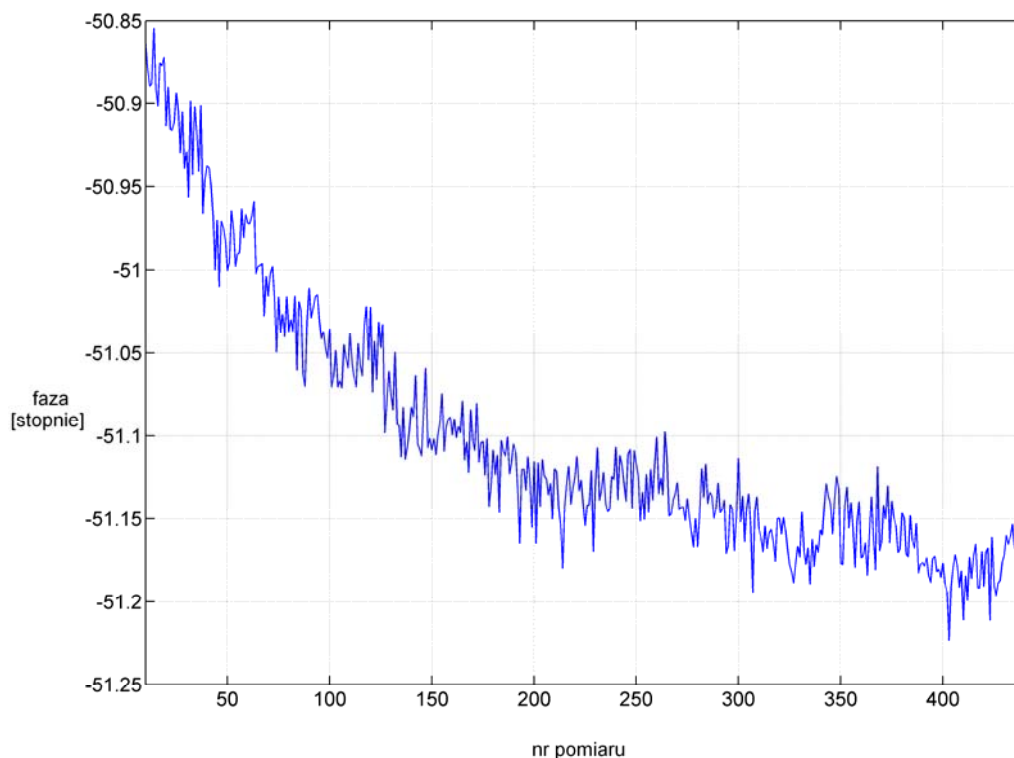
nikiem oraz bez obecności obiektu badanego. Podobne zmiany sygnału obserwowano po umieszczeniu układu wewnątrz komory zaizolowanej magnetycznie oraz termicznie.



Rys. 2. Rozkłady temperatury wzbudnika zarejestrowane kamerą termowizyjną (zasilanie wzbudnika włączono tuż przed wykonaniem pierwszego zdjęcia; na rysunkach widoczna godzina wykonywania poszczególnych zdjęć)



Rys. 3. Zmiana amplitudy sygnału wyjściowego przetwornika w czasie 1 h bez zmiany warunków zewnętrznych (pomiar wykonywany co 8 sekund)



Rys. 4. Zmiana fazy sygnału wyjściowego przetwornika w czasie 1 h bez zmiany warunków zewnętrznych (pomiar wykonywany co 8 sekund)

3. OBLICZENIA NUMERYCZNE

Przyjmując $\varepsilon_r = 1$, $\mu_r = 1$, przy stacjonarnym układzie możemy zapisać równanie dla pierwotnego magnetycznego potencjału wektorowego A :

$$(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon_0)A + \nabla \cdot (\mu_0^{-1}\nabla \cdot A) = J_s, \quad (1)$$

gdzie:

- J_s – prąd źródłowy,
- σ – konduktywność ośrodka.

Symulacji komputerowych w programie Comsol dokonano przy wykorzystaniu równania (1). Dla granic całego obszaru, oddalonych od interesującego nas regionu, przyjęto zerowy warunek brzegowy Dirichleta:

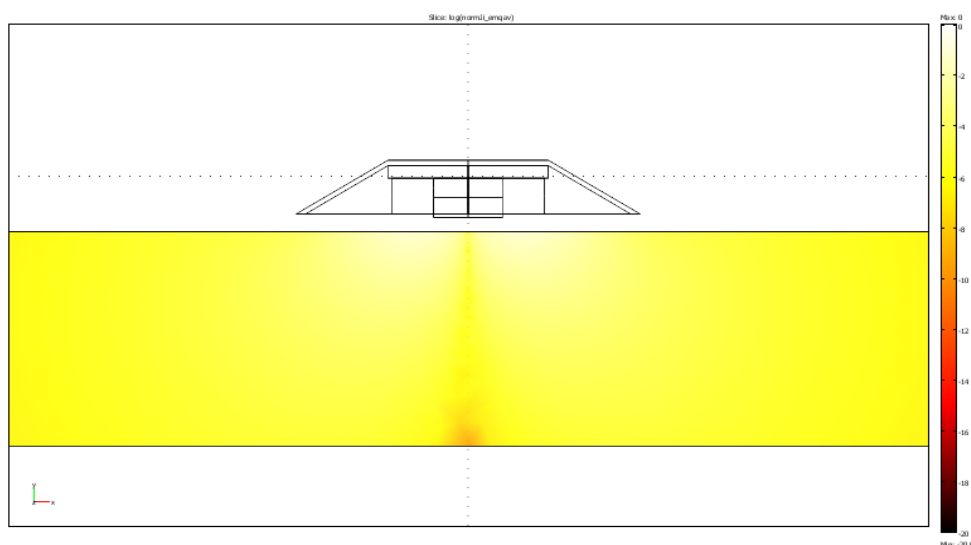
$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0. \quad (2)$$

W pozostałych przypadkach warunki brzegowe są odpowiednie dla właściwości materiałów, które dany brzeg rozgranicza.

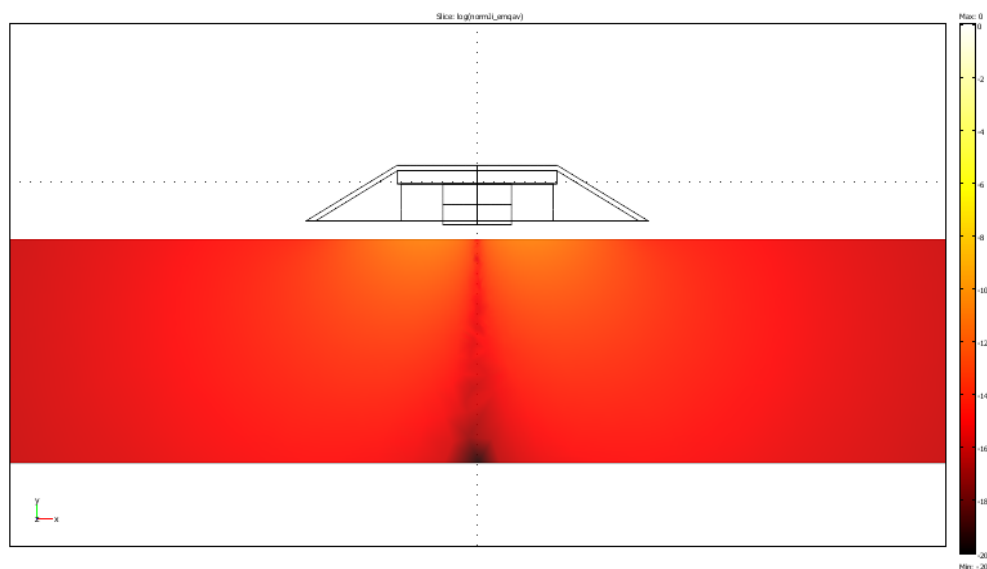
Przedstawiony model w przybliżeniu odpowiada układowi rzeczywistemu. Z uwagi na dużą liczbę węzłów siatki metody elementów skończonych dla obiektów trójwymiarowych, siatka omawianego modelu nie jest na tyle gęsta, by można było precyzyjnie porównać wynik symulacji z wynikiem obliczonym analitycznie. Liczba stopni swobody w prezentowanym modelu jest równa około 2 600 000. Model został dostosowany do możliwości obliczeniowych komputera z procesorem AMD Athlon™ 64 X2 Dual Core 6000+ 3,02 GHz i 8 GB pamięci RAM. Precyzyjny model wymaga użycia znacznie większej pamięci RAM i zostanie wykonany w dalszym etapie prac autora. Niemniej jednak zaprezentowany model dobrze odwzorowuje w sposób jakościowy zjawiska obserwowane podczas badań jak również różnice pomiędzy wynikami dla obiektów o znacząco różnych wartościach konduktywności elektrycznej.

Użycie elementów nieskończonych znacznie ogranicza błędy obliczeń [2], zatem w dalszych etapach prac przewidziana jest zmiana modelu numerycznego również pod względem warunków brzegowych ograniczających rozważany obszar.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono rozkład gęstości prądu indukowanego w obiektach badanych o konduktywności odpowiednio: 14 S/m i $1 \cdot 10^{-3}$ S/m dla tej samej barwnej skali logarytmicznej. Wynika z nich, że gęstość prądu w obiekcie o słabszej przewodności (odpowiadającej konduktywności wody destylowanej) jest co najmniej sześć rzędów mniejsza, niż dla lepiej przewodzącego obiektu (konduktywność odpowiadająca dziesięcio-procentowemu wodnemu roztworowi NaCl). Zatem prądy wirowe wytworzone w czystej wodzie generują znacznie mniejsze wtórne pole magnetyczne, niż w przypadku badania roztworu soli – wyników prezentowanych w pracach [4, 5]). Może to powodować istotne trudności w próbie odtworzenia parametrów wrażeń dla obiektu o tak niskiej konduktywności.



Rys. 5. Rozkład gęstości prądu indukowanego w obiekcie o konduktywności 14 S/m (skala logarytmiczna) – wynik uzyskany w programie Comsol

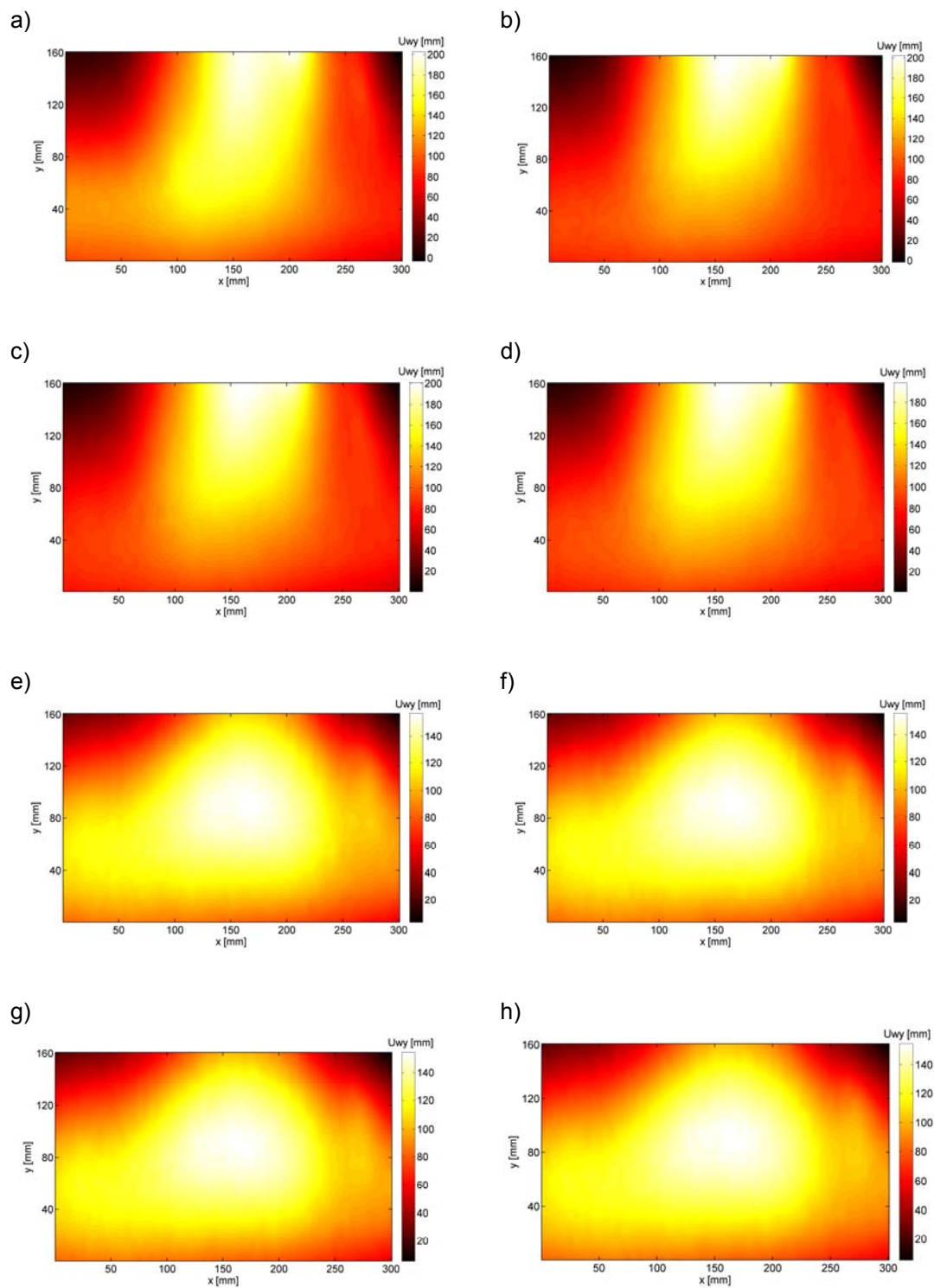


Rys. 6. Rozkład gęstości prądu indukowanego w obiekcie o konduktywności 1 mS/m (skala logarytmiczna) – wynik uzyskany w programie Comsol

4. WYBRANE WYNIKI BADAŃ

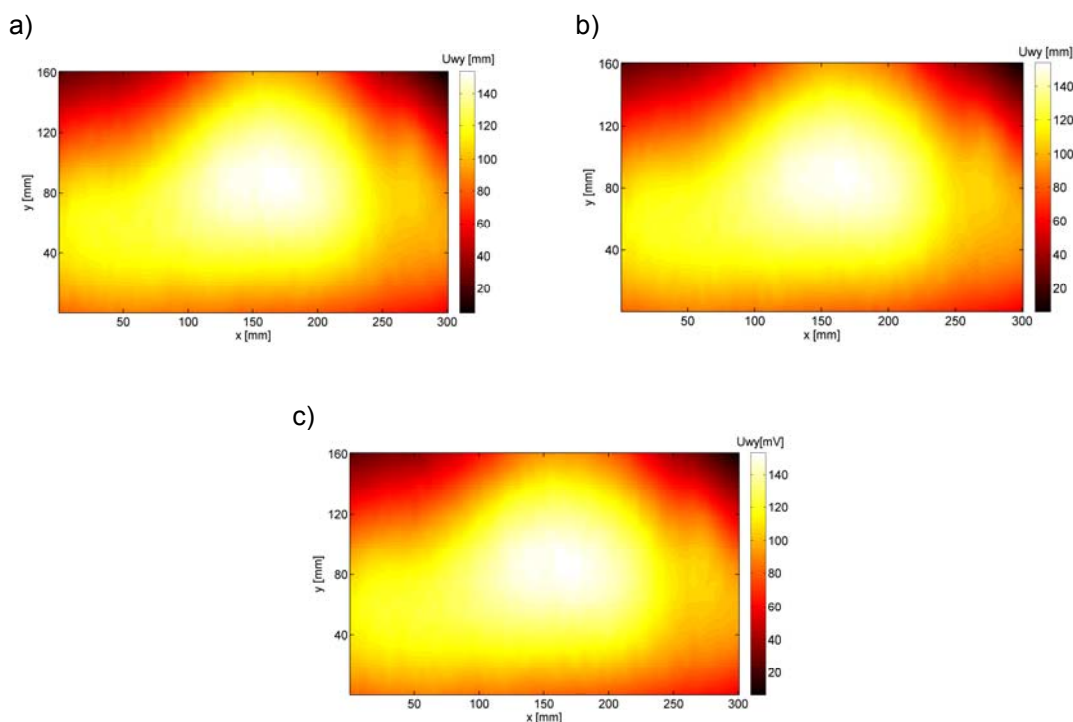
Rysunki 7 i 8 przedstawiają wstępne wyniki badania wilgotności gleby umieszczonej w widocznym na rysunku 1 zbiorniku. Do objętości 10 l gleby ogrodowej nalano 0,5 l wody, kierując jej strumień na środek powierzchni gleby. Pomiaru napięcia na cewkach dokonano przesuwając wzbudnik wraz z czujnikiem na szerokości 300 mm (oś x) oraz wysokości 160 mm (poziom gleby w zbiorniku, oś y). Wynik jest interpolacją punktów pomiarowych rozmieszczonych co 5 mm. Czas trwania jednego pomiaru (pełnego skanowania) był równy ok. 40 minut.

Pełne obrazowanie wyniku i identyfikacja niejednorodności badanej struktury wymaga rozwiązania zadania odwrotnego. Zadanie proste polega na obliczeniu rozkładu prądów wirowych powstałych na skutek działania wzbudnika oraz rozkładu pola wtórnego w obszarze, w którym znajduje się czujnik. Zadanie odwrotne dotyczy obliczenia rozkładu prądów wirowych na podstawie znanego rozkładu pola wtórnego oraz obliczenia rozkładu konduktywności na podstawie wartości prądów wirowych w badanym obiekcie. To ostatnie jest zadaniem równie skomplikowanym, jak obliczanie rozkładu prądów [7]. Na wartość napięcia na cewce odbiorczej ma wpływ głównie konduktywność fragmentu obiektu znajdującego się w okolicy osi przetwornika. Jednak istotna jest również konduktywność obszarów położonych w dalszej odległości, co powodowane jest kształtem linii pola generowanego przez wzbudnik. W dużym uproszczeniu oraz przy pominięciu wpływu tego efektu można przyjąć, że rozkład konduktywności w obiekcie jest



Rys. 7. Wyniki pomiarów napięcia wyjściowego czujnika w płaszczyźnie przylegającej do obiektu z rysunku 1 (przy wzmacnieniu na wyjściu $k = 10$): a) wynik po kilkunastu minutach od dodania wody do gleby, b) wynik po 1 h od dodania wody do gleby, c) wynik po 2 h, d) wynik po 3 h, e) wynik po 19 h, f) wynik po 20 h, g) wynik po 21 h, h) wynik po 22 h

proporcjonalny do rozkładu zaindukowanych prądów, który z kolei jest proporcjonalny do wartości napięć odczytanych na czujniku. Można zatem przyjąć, że rozkład tych napięć obrazuje w przybliżeniu rozkład konduktywności w dwóch wymiarach, w których porusza się omawiany przetwornik.

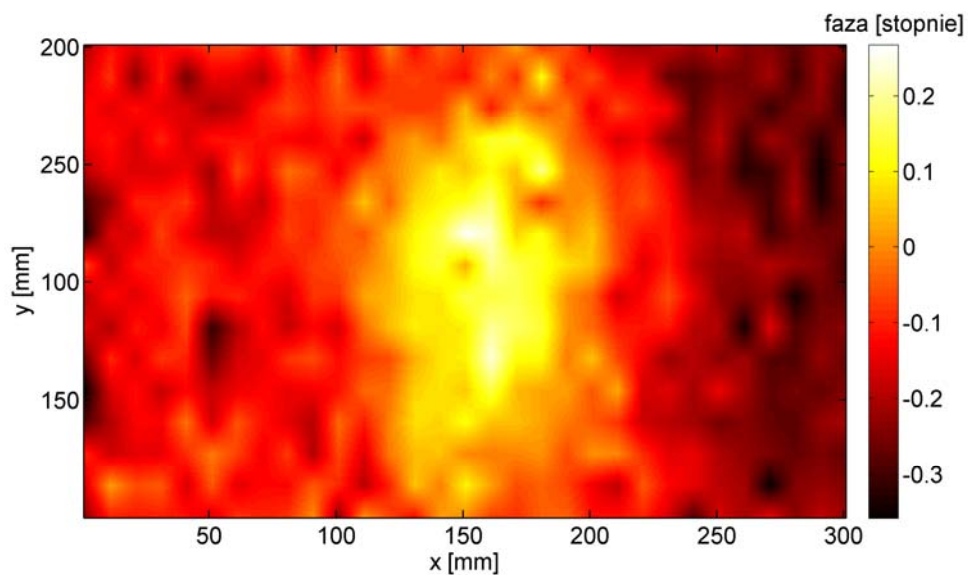


Rys. 8. Wyniki pomiarów napięcia wyjściowego czujnika w płaszczyźnie przylegającej do obiektu z rysunku 1 (przy wzmacnieniu na wyjściu $k = 10$): a) wynik po 23 h od dodania wody do gleby, b) wynik po 24 h, c) wynik po 25 h, U_{wy} – wartości zinterpolowanego sygnału wyjściowego przetwornika.

Na rysunku 9 przedstawiony jest układ pomiarowy z obiektem o konduktywności 1 mS/m (zbiornik z wodą destylowaną) i wymiarach: (1200 × 200 × 130) mm. Wtrąceniem była półlitrowa butelka plastikowa wypełniona dziesięcioprocentowym wodnym roztworem NaCl (konduktywność 14 S/m) lub kostki pleksi o podobnej objętości i gabarytach (konduktywność 1×10^{-12} S/m). Wyniki pomiarów fazy dla tych wtrąceń przedstawiono odpowiednio na rysunkach 10 – 11a oraz 11b. Wartość kąta przesunięcia fazowego oznacza różnicę faz pomiędzy sygnałem zasilającym wzbudnik a sygnałem mierzonym. Rysunek 10 przedstawia interpolowany wynik, podobnie jak w poprzednio opisanym przypadku. Rysunek 11 prezentuje wynik zmierzony wzdłuż obiektu, na wysokości 100 mm od jego podstawy. Pomiar amplitudy sygnału dla obiektu o tak niskiej konduktywności ze słaboprzewodzącymi wtrąceniami za pomocą omawianego przetwornika nie przyniosły zadowalającego rezultatu.

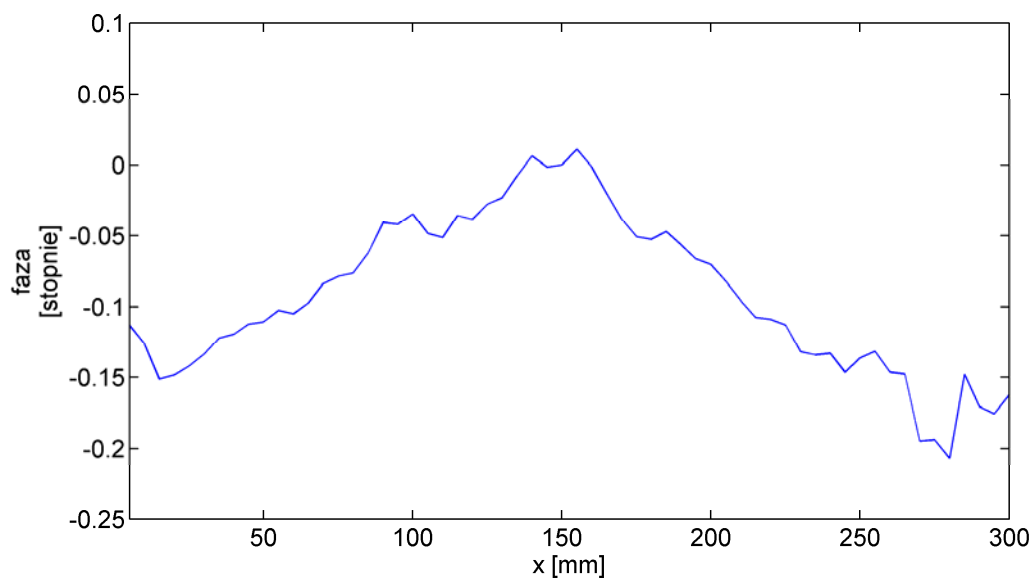


Rys. 9. Widok systemu pomiarowego MIT oraz badanego zbiornika wypełnionego wodą destylowaną z wtrąceniem z pleksi

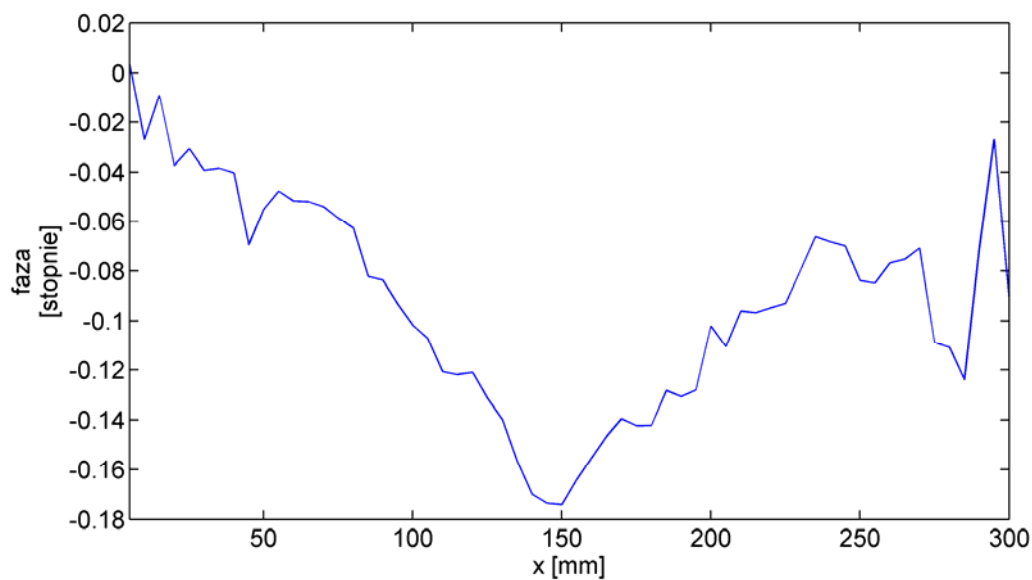


Rys. 10. Wstępne wyniki pomiarów fazy napięcia wyjściowego czujnika w płaszczyźnie przylegającej do obiektu z rysunku 9 (konduktywność obiektu: 1 mS/m, wzmocnienie na wyjściu $k = 10$, wtrącenie o większej przewodności elektrycznej, niż obiekt)

a)



b)



Rys. 11. Wyniki pomiarów fazy napięcia wyjściowego czujnika w płaszczyźnie przylegającej do obiektu z rysunku 9 (konduktywność obiektu: 1 mS/m, wzmocnienie na wyjściu $k = 10$): a) wtrącenie o konduktywności większej, niż obiekt, b) wtrącenie o konduktywności mniejszej, niż obiekt

6. PODSUMOWANIE

W czasie badań opisanych w [4, 5] zaobserwowano zjawisko polegające na „zapamiętywaniu” przez obiekt położenia wtrącenia. Dokonując pomiaru dla obiektu będącego wodnym roztworem NaCl tuż po wyjęciu z niego wtrącenia z pleksi, otrzymano wynik podobny do rezultatu dla obiektu z umieszczonym w nim wtrąceniem. „Ślad” po wtrąceniu znikał po zamieszaniu roztworu. Może to budzić wątpliwości co do bezinwazyjności metody, co jest szczególnie istotne przy rozpatrywaniu zastosowań medycznych MIT. Jednak zjawiska takiego nie udało się zaobserwować dla obiektu wypełnionego wodą destylowaną. Prawdopodobnie zjawisko powstawania „śladu” ma związek z właściwościami krystalicznymi roztworu NaCl i może być niezależne od stosowania pola magnetycznego w czasie pomiaru. Niemniej jednak ewentualny wpływ samego badania na właściwości obiektu wymaga dalszych obserwacji.

Zaprezentowane w pracy wyniki pozwalają na ocenę działania przetwornika oraz na wstępne określenie jego zastosowania w przemyśle i medycynie. Budowa nowego systemu pomiarowego pozwala na stosunkowo precyzyjne wyznaczenie rozdzielczości oraz czułości przetworników stosowanych w MIT. Zastosowanie opisanego układu pomiarowego do badania wtrąceń w substancjach słaboprzewodzących umożliwi łatwiejszą interpretację wyników pomiarowych, niż w przypadku wyników prezentowanych w pracach [4 – 6] oraz bardziej precyzyjną identyfikację lokalizacji i kształtu wtrącenia.

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), 237248.
2. Gratkowski S.: Elementy specjalne w metodzie elementów skończonych stosowanej do obliczeń elektromagnetycznych.
3. Griffiths H.: Magnetic induction tomography. IoP Publishing, Measurement Science and Technology 12 (2001), 1126-1131
4. Pietruszewicz T.: Badanie struktur słaboprzewodzących metodą magnetycznej tomografii indukcyjnej. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 236, str. 117-128, 2008.
5. Pietruszewicz T., Komorowski M., Gratkowski S.: Analiza wybranych układów magnetycznej tomografii indukcyjnej. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 241, str. 97-112, 2009.

6. Pietrusewicz T., Komorowski M., Gratkowski S.: Magnetic Induction Tomography Inspection of Low Conductivity Non-Homogeneous Cylinders. 32th International Conference of Fundamentals of Electrotechnics and Circuit Theory, 2009, 15-16
7. Xing L.: Rapid calculation of eddy current field Green's function using the matrix pencil method. NDT&E International 42 (2009) 85–91

Rękopis dostarczono dnia 19.10.2010 r.

DETECTING AND IMAGING OBJECTS
OF LOW CONDUCTIVITY BY MAGNETIC INDUCTION
TOMOGRAPHY – NUMERICAL MODELLING
AND EXPERIMENTS

Tomasz PIETRUSEWICZ

ABSTRACT *In this work the experimental results of low-conductivity materials structure detection are presented. The new construction of Magnetic Induction Tomography system is described. In the paper preliminary images of tested objects are shown. The numerical simulations are presented. Chosen unexpected problems occurred during researches are analyzed.*

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



