

Konrad NITA
Stefan F. FILIPOWICZ

PORÓWNANIE WIELOKANAŁOWYCH UKŁADÓW POMIAROWYCH W TOMOGRAFII IMPEDANCYJNEJ^{*)}

STRESZCZENIE *W artykule przedstawiono budowę tomografów impedancyjnych bazujących na wielokanałowych układach pomiarowych. Zostały sprecyzowane wymagania stawiane tym układom pomiarowym, oraz opisano wybrane sposoby pozyskiwania informacji i pobudzenia badanych obiektów. Pokazano występujące problemy przy budowie wielokanałowych układów pomiarowych oraz metody ich eliminacji. Zaprezentowane zostały układy tomografów impedancyjnych, zbudowanych w Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno Pomiarowych Politechniki Warszawskiej oraz Instytucie Elektrotechniki w ramach grantu Ministerstwa Nauki i Informatyzacji (nr 4 T07E 045 29) „Nowa tomograficzna metoda oceny stopnia zawilgocenia budynków”, koordynowanego przez Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej.*

Na koniec przedstawione zostały wyniki uzyskane w trakcie badań nad tomografią impedancyjną w wyżej wymienionych ośrodkach.

Słowa kluczowe: *wielopunktowe układy pomiarowe, tomografia impedancyjna*

^{*)} Praca wykonana w ramach grantu 4 T07E 045 29

mgr inż. Konrad NITA,
e-mail: k.nita@iel.waw.pl

dr hab. inż. Stefan F. FILIPOWICZ
e-mail: 2xf@nov.iem.pw.edu.pl

Zakład Metrologii i Badań Nieniszczących
Instytut Elektrotechniki

1. WSTĘP

Tomografia impedancyjna bywa stosowana w zagadnieniach geofizyki, do badania struktury sedymentacyjnej gleby. W badaniach geologicznych często spotyka się materiały porowate, których konduktywność znacznie wzrasta wraz z występowaniem w nich wilgoci. Materiały porowate spotyka się również w budownictwie [1]. Często występują problemy związane z przedostawaniem się wilgoci do obiektów budowlanych. Podciągana kapilarnie z gruntu wilgoć jest problemem w budynkach, szczególnie starszych, z niewystarczającą izolacją poziomą i pionową ścian fundamentowych. Wilgoć jest podciągana z miejsc bezpośredniego styku między murem a gleba. Materiały budowlane, zarówno naturalne, jak i produkowane (np. cegła czy beton), są z reguły porowate i podobnie jak w gąbce wilgoć może być podciągana wbrew grawitacji nawet na wysokość 3 metrów. Dodatkowo, niszczące działanie wilgoci szkodliwe dla murów, wzmagają zawarte w wodzie gruntowej, zanieczyszczenia: roztwory soli, zasad czy kwasów organicznych. Wytrzymałość muru zmniejsza się, jeżeli zawarta w nim woda zamarzając zimą i zwiększając swoją objętość może prowadzić do pękania murów, podobnie jak krystalizująca się sól. Wilgoć stwarza niebezpieczeństwo nie tylko dla murów, ale również dla zdrowia ludzi. Po pierwsze sprzyja ona powstawaniu schorzeń reumatycznych, po drugie — tworzące się na powierzchni wilgotnej ściany grzyby — mogą wywoływać alergię oraz wiele innych chorób. Niezależnie od stosowanej metody bardzo ważne jest ciągłe kontrolowanie stanu zawilgocenia muru w trakcie procesu osuszania. Można je przeprowadzić stosując metody elektryczne, ponieważ konduktywność muru zmienia się wraz z jego wilgotnością [13].

Do kontroli stanu zawilgocenia murów można zastosować tomografię impedancyjną wykorzystującą wielopunktowe układy pomiarowe. Budowane układy muszą cechować się dużą ilością kanałów pomiarowych o odpowiedniej dokładności. W tomografii impedancyjnej jednym z problemów jest uzyskanie dostatecznej ilości informacji, do stworzenia mapy rozkładu konduktywności badanego obiektu. W tym celu stosuje się wielokrotne projekcje pobudzenia w trakcie których wykonywane są pomiary.

2. TOMOGRAFIA IMPEDANCYJNA

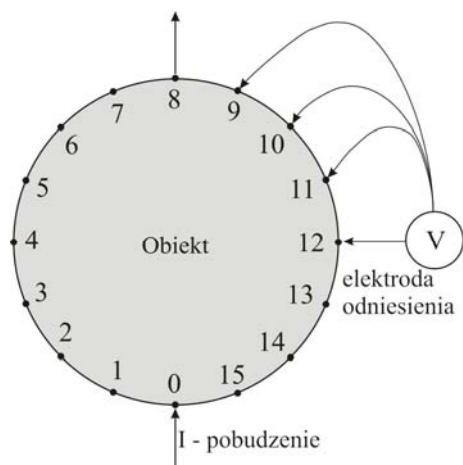
W tomografii impedancyjnej nośnikiem informacji jest prąd elektryczny, a wielkością poszukiwaną jest rozkład konduktywności wewnątrz badanego

obszaru [10]. Aby uzyskać wiedzę na ten temat należy w odpowiedni sposób przyłożyć sygnał pobudzający do badanego obiektu i dokonać pomiaru (w zależności od zastosowanego pobudzenia) potencjałów lub prądów. Jako pobudzenie można wykorzystać sygnał prądowy bądź napięciowy. Dodatkowo w zależności od badanego obiektu i poszukiwanego zaburzenia, można zastosować różne schematy pobudzeń. Najbardziej rozpowszechnione są dwa typy wymuszania przepływu prądu. Sygnał pobudzający można przyłożyć do [3]:

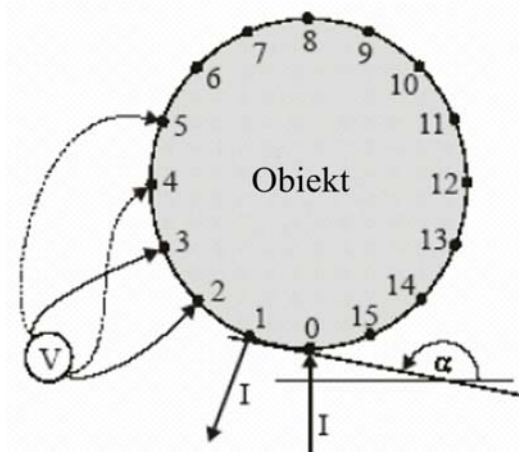
- elektrod naprzeciwległych (rys.1a),
- elektrod sąsiadujących (rys.1b).

Stosując pierwszy sposób pobudzenia, prąd przepływa przez cały obiekt, dzięki czemu uzyskuje się równomierny rozkład informacji. Drugi sposób pobudzenia jest o wiele bardziej praktyczny dla poszukiwania zaburzeń znajdujących się przy powierzchni badanego obiektu. Pobudzając elektrody sąsiadujące możemy uzyskać rozptyw prądów skupiony w pobliżu powierzchni obiektu, co spowoduje większe różnice sygnałów mierzonych, a tym samym uzyskamy dokładniejsze pomiary dla wybranego obszaru. Wadą tego pobudzenia jest mała czułość układu na zmiany konduktywności w środku obiektu.

a)



b)



Rys. 1. Stosowane sposoby pobudzenia w tomografii impedancyjnej:
a) pobudzenie elektrod naprzeciwległych, b) elektrod sąsiadujących

Dla obu przypadków pobudzenia, dane pomiarowe można uzyskać względem jednego ustalonego punktu odniesienia, bądź też między kolejnymi sąsiednimi elektrodami.

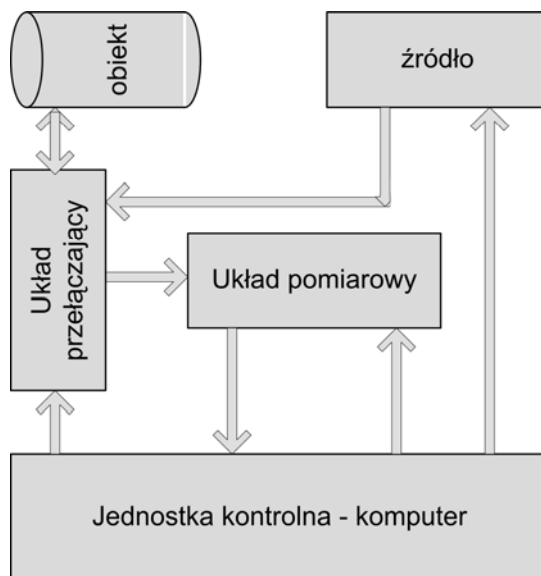
Istotną informacją w tomografii impedancyjnej, jest wstępna znajomość konduktywności badanego obiektu oraz impedancji styku elektrod, pozwalająca na dokładniejszą analizę rozpatrywanego problemu [12].

3. UKŁADY POMIAROWE TOMOGRAFÓW IMPEDANCYJNYCH

Tomograf impedancyjny powinien być wyposażony w:

- źródło pobudzenia,
- układ pomiarowy,
- układ przełączający pobudzenie.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy tomografu impedancyjnego wraz z podziałem na podstawowe bloki funkcjonalne.



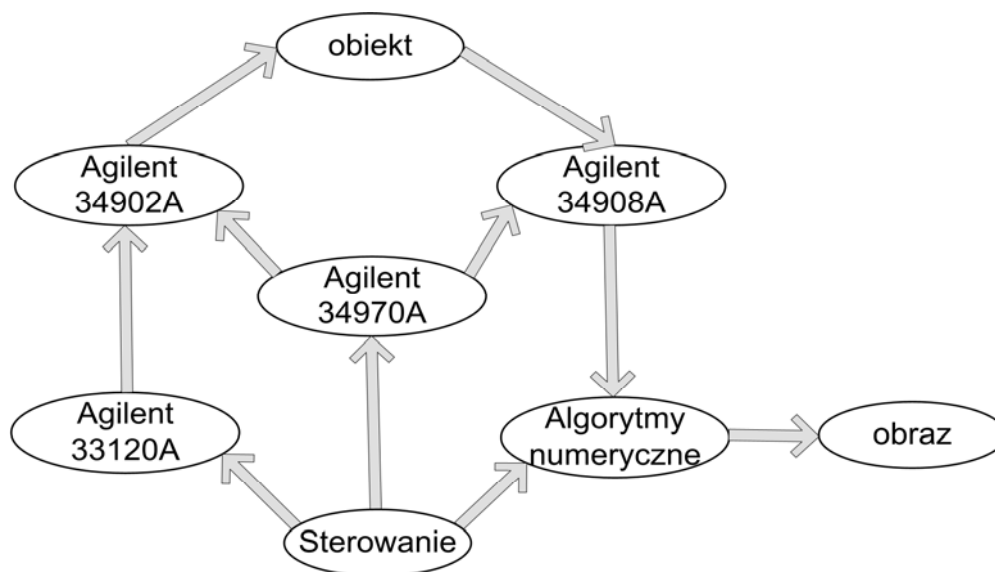
Rys. 2. Schemat blokowy tomografu impedancyjnego

Jako źródło pobudzenia stosuje się generator sygnałów o regulowanej amplitudzie i częstotliwości, pozwalający wygenerować pobudzenie odpowiednie do badanego obiektu. W zależności od potrzeb można tworzyć wyspecjalizowane wielopunktowe układy pomiarowe, mierzące wartość skuteczną syg-

nału bądź też układy próbkujące zbierające pełną informację o mierzonym sygnale. Jako układy przełączające stosowane są różnego rodzaju klucze lub multiplexery, pozwalające ustalać kolejne projekcje pobudzające.

3.1. Tomograf impedancyjny zbudowany w oparciu o urządzenia Agilent

Jeden z układów pomiarowych stosowany w tomografii impedancyjnej został skonstruowany w Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno Pomiarowych [4]. Układ ten zbudowany w oparciu o urządzenia firmy Agilent [6] mierzy wartość skuteczną napięcia na elektrodach. Główne podzespoły tego tomografu to: generator funkcyjny Agilent 33120A, układ zbierania danych i jednostka przełączająca (ang. *Data Acquisition & Switch Unit*) Agilent 34970A wraz z wymiennymi modułami Agilent 34902A i 34908A. Schemat blokowy tego tomografu przedstawiono na rysunku 3.



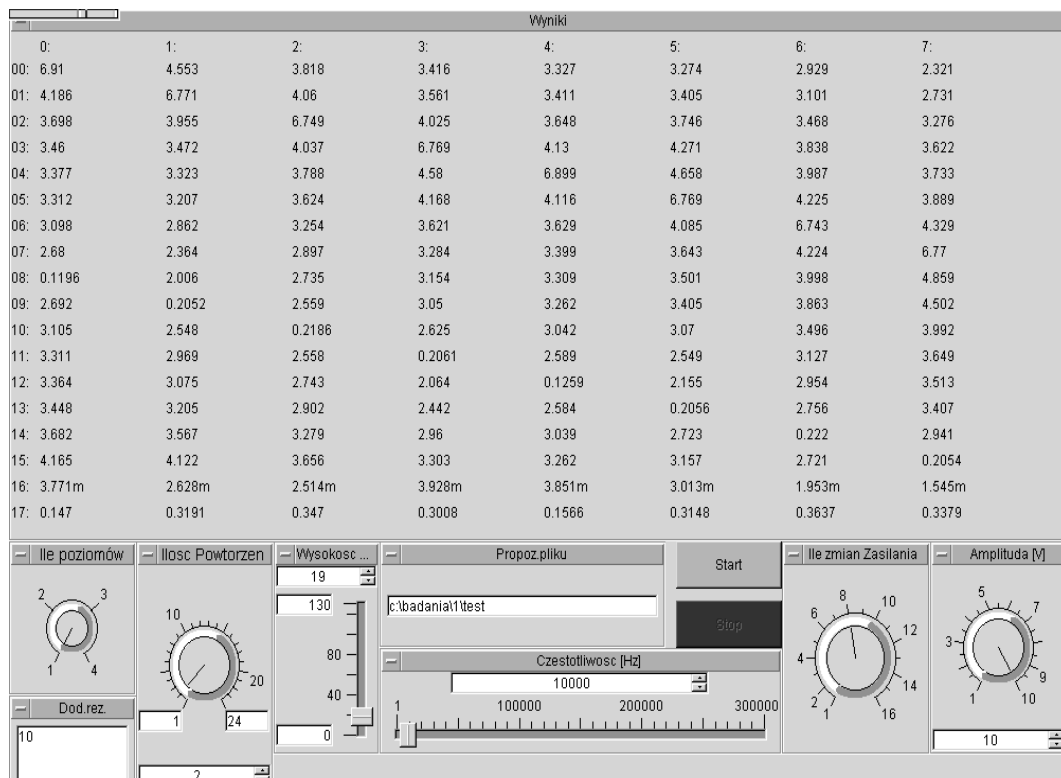
Rys. 3. Schemat blokowy tomografu impedancyjnego zbudowanego w oparciu o urządzenia firmy Agilent

Do pobudzenia układu zastosowano sygnał sinusoidalny o regulowanej amplitudzie i częstotliwości, uzyskany z generatora Agilent 33120A. Amplitudę sygnału można regulować w zakresie $0 \div 10$ V, co pozwala dopasować wymuszenie do badanego obiektu. Częstotliwość sygnału pobudzającego używana do badań jest nie większa niż 10 kHz.

Zastosowanie układu Agilent 34970A wyposażonego w odpowiednie moduły pozwoliło na pomiar potencjałów z dużą precyzją do 6 ½ cyfr znaczących oraz na zmianę projekcji zasilania według zadanego schematu pobudzenia. Wydzielony moduł Agilent 34908A umożliwił pomiar potencjałów z 40 elektrod względem wspólnego punktu odniesienia, natomiast moduł 34902A będący układem multiplexera wykorzystany został jako układ przełączający sygnał pobudzający.

Do sterowania pracą wielokanałowego układu pomiarowego został napisany program w języku VEE [5]. Pozwala on na odpowiednie wysterowanie pobudzenia i zsynchronizowanie pomiarów z wszystkich elektrod. Umożliwiał on również wyznaczenie konduktywności obszarów prostokątnych [11].

Panel sterujący pracą tego wielokanałowego układu pomiarowego przedstawiono na rys. 4. Korzystając z panelu sterującego możemy zadawać amplitudę oraz częstotliwość sygnału oraz ustalić ilość elektrod pomiarowych (jako wielokrotność 16) lub też ustawić ilość projekcji pobudzenia, którego sekwencja jest zadeklarowana na stałe w programie. Wadą tego rozwiązania jest brak możliwości wysterowania dowolnego pobudzenia, gdyż wiązałoby się to z przebudową układu. Do zalet należy zaliczyć możliwość wielokrotnego pomiaru wielkości mierzonej a następnie jej uśrednianie, co prowadzi do podwyższenia dokładności pomiaru.

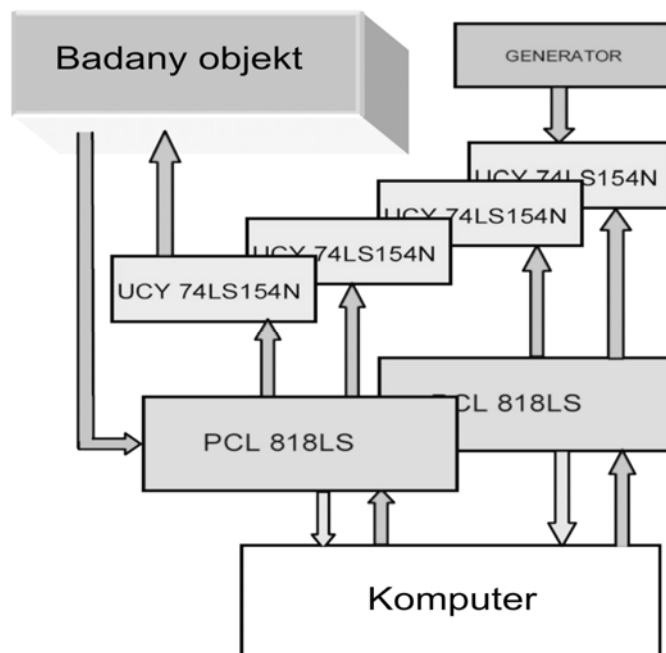


Rys. 4. Panel sterowania programu akwizycji danych dla tomografu impedancyjnego

3.2. Tomograf impedancyjny zbudowany w oparciu o urządzenia Advantech

Kolejny układ tomografu został zbudowany w Instytucie Elektrotechniki. Wielokanałowy układ pomiarowy tego urządzenia oparty został na kartach Advantecha PCL 818LS [7, 9]. Zastosowanie kart przetworników analogowo-cyfrowych pozwoliło na dokładną analizę badanego sygnału oraz prawidłowe wysterowanie sygnałów pobudzających.

Do sterowania pracą tomografu zastosowano przemysłowy komputer klasy PC z odpowiednim oprogramowaniem. Umieszczono w nim dwie karty PCL 818LS, pozwalające na pomiary za pomocą 32 kanałów (względem jednego punktu odniesienia). Karty te wyposażone są w dwunasto-bitowy przetwornik A/C pozwalający uzyskać dobrą precyzję mierzonej wielkości. Maksymalna częstotliwość próbkowania sygnału z jednego kanału wynosi 48 kHz. W przypadku wykorzystywania wszystkich 32 kanałów pomiarowych rzeczywista częstotliwość próbkowania zmniejsza się do około 500 Hz. Schemat blokowy opisywanego tomografu impedancyjnego przedstawiono na rys. 5.



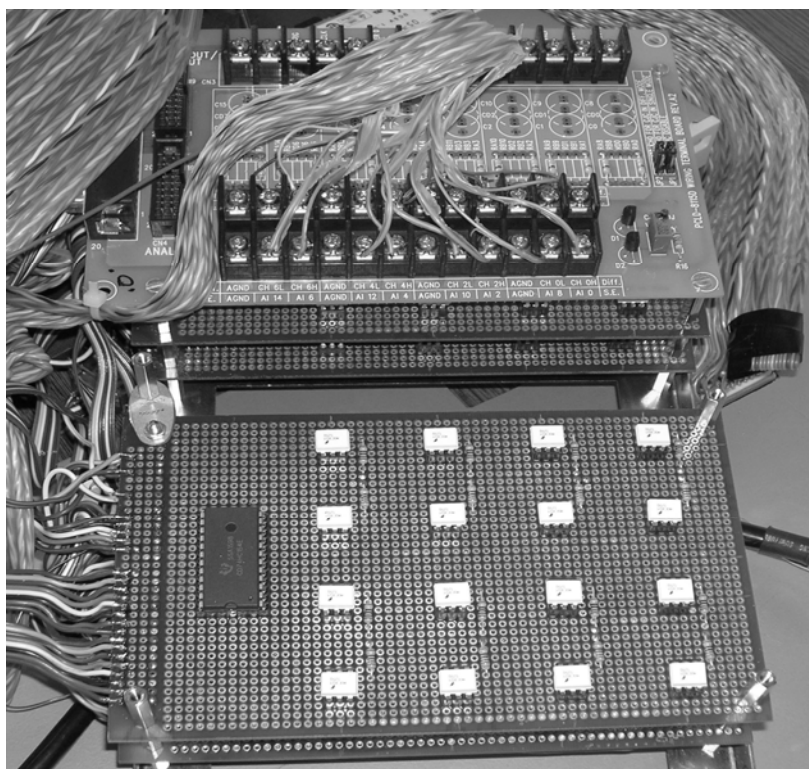
Rys. 5. Schemat blokowy tomografu impedancyjnego zbudowanego w oparciu o karty firmy Advantech

Jako układ pobudzający zastosowany został programowany generator sygnału prostokątnego. Amplituda sygnału pobudzającego ustawiona jest na

stałe na poziomie 20 V. Częstotliwość można regulować programowo w zakresie od 0 do 500 Hz. W związku ze stosunkowo małą częstotliwością próbkowania układ ten dedykowany jest do badania sygnałów wolnozmiennych.

Do sterowania pobudzeniem został zbudowany specjalny układ w oparciu o cztery multiplexery z serii UCY 74154 oraz 64 optotriaki MOC3021. Zaprojektowany układ pozwala na dowolną konfigurację pobudzenia w zależności od ilości wykorzystywanych elektrod. Sekwencja wymuszeń odczytywana jest z wcześniej utworzonego pliku tekstowego, w którym zapisane są pary zasilanych elektrod.

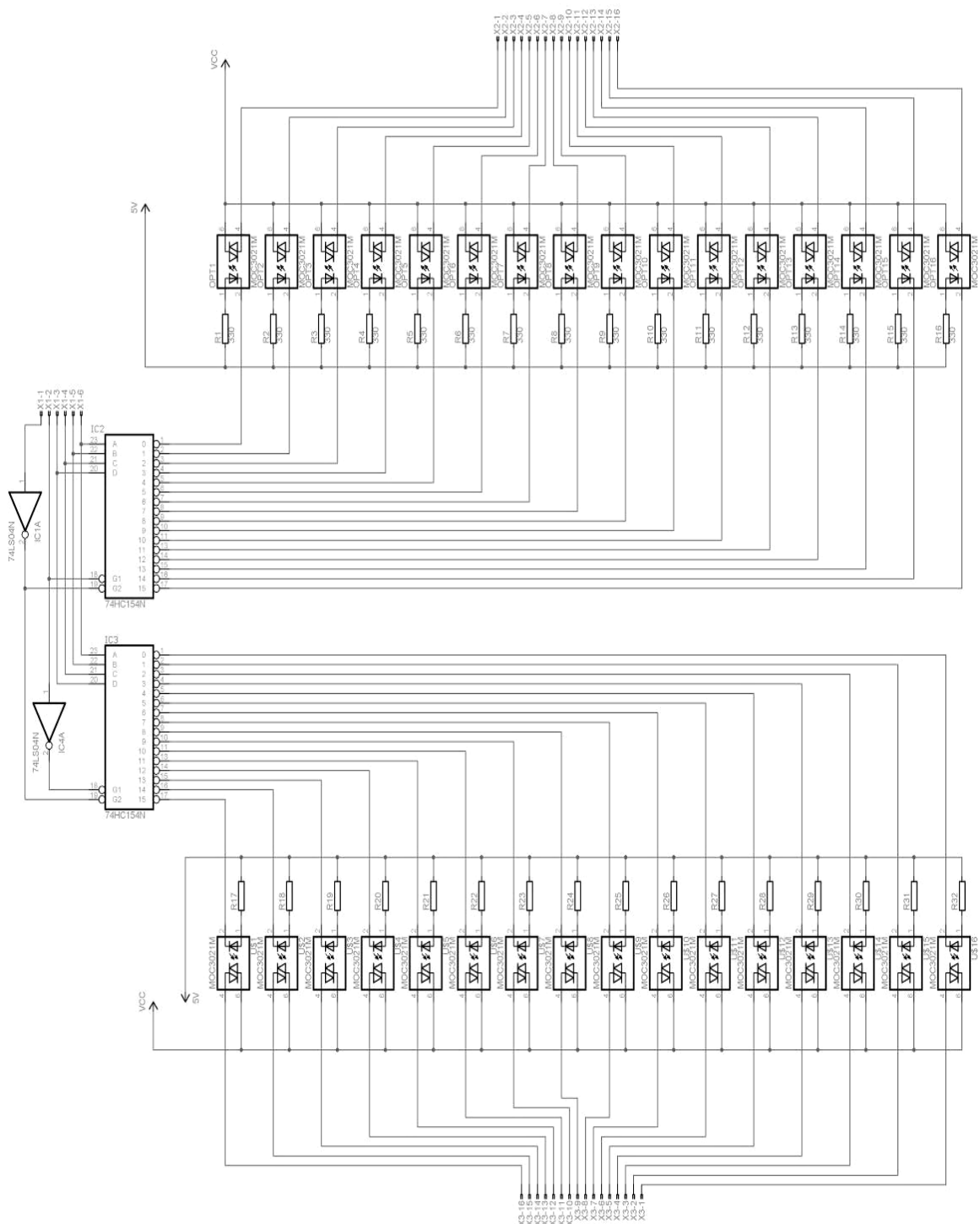
Zdjęcie tego układu (na wierzchniej płytce widoczny jest jeden multiplexer sterujący 16 optotriakami) pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Układ przełączający pobudzenie w tomografii impedancyjnej zbudowany w oparciu o multiplexery i optotriaki

Wielokanałowy układ pomiarowy sterowany jest przez program napisany w języku C, przy wykorzystaniu oryginalnych bibliotek dostarczonych przez producenta kart. Zebrane wielkości pomiarowe zapisywane są do pliku jako macierz trójwymiarowa \mathbf{P} , gdzie element macierzy p_{ijk} jest napięciem na elektrodzie j -tej, przy i -tej projekcji pobudzenia. Indeks k oznacza numer próbki napięcia.

Fragment schematu zbudowanego układu przełączania pobudzenia, został przedstawiony na rys. 7.



Rys. 7. Fragment schematu układu do przełączania elektrod pobudzających

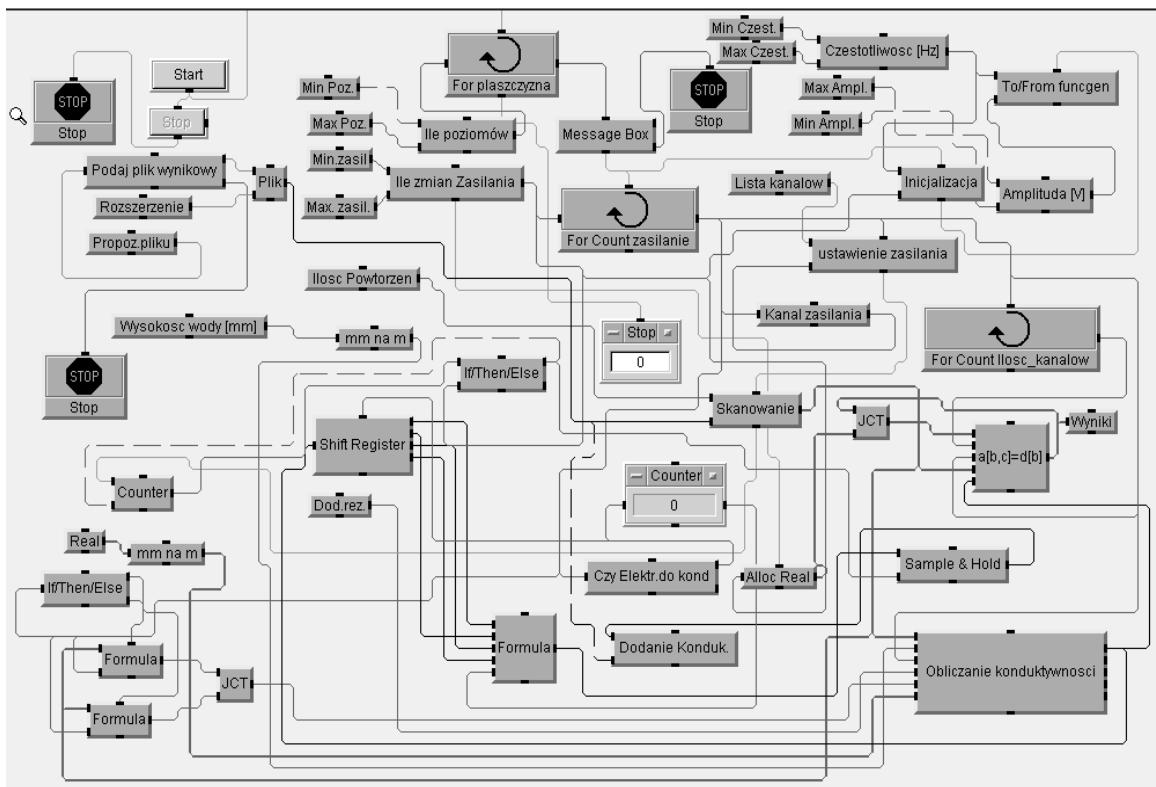
Na podstawie analizy schematu możemy stwierdzić, w jaki sposób wybierane są poszczególne elektrody pobudzające, uwzględniając, że złącze X1 służy do zaadresowania wyjścia multiplexerów, a złącza X2 oraz X3 dołączane są do elektrod na badanym obiekcie.

Tomograf zbudowany w oparciu o karty Advantech'a testowany jest obecnie przy badaniu zawilgocenia murów.

4. OPROGRAMOWANIE UKŁADÓW POMIAROWYCH TI

Zastosowanie komputera jako jednostki sterującej wielokanałowymi układami pomiarowymi, spowodowało konieczność pisania programów kontrolujących pracę całego systemu.

Na rysunku 8 przedstawiony został program sterujący pracą wielokanałowego układu pomiarowego stosowanego w tomografii impedancyjnej wykorzystujący urządzenia Agilent.



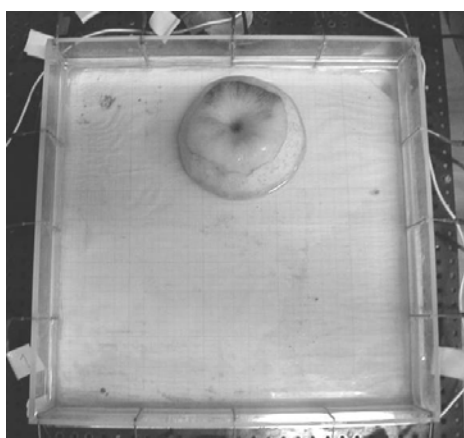
Rys. 8. Program sterujący pracą tomografu impedancyjnego zbudowanego w oparciu o urządzenia firmy Agilent

Obecnie do zaprogramowania urządzeń, dostępnych jest wiele języków programistycznych, zaczynając od tekstowych takich jak język Pascal, C czy też C++, Java, do „intuicyjnych w obsłudze” języków graficznych takich jak VEE bądź LabView [8]. Stosując języki tekstowe całe oprogramowanie tworzy się od podstaw wykorzystując biblioteki i sterowniki dostarczone przez producenta. Jeżeli zastosujemy języki graficzne, to wysłanie komendy sterującej, czy odczytanie z urządzenia, wiąże się ze wstawieniem do swojego programu odpowiedniego bloku odpowiadającego za tą komendę. W celu zapewnienia prawidłowej pracy poszczególne bloki programu łączy się ze sobą według kolejności wykonywania.

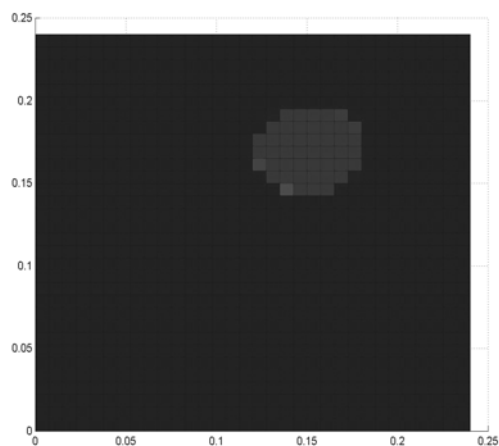
5. PREZENTACJA WYBRANYCH WYNIKÓW

Przy wykorzystaniu zbudowanych układów pomiarowych tomografów impedancyjnych wykonano serie badań potwierdzających ich prawidłowe działanie. Jednym z badań wykonanych przy pomocy tomografu impedancyjnego opartego o urządzenia Agilent, było zlokalizowanie obiektu organicznego w obszarze zamkniętym. Na rysunku 9 przedstawiono wynik lokalizacji położenia jabłka w wannie kwadratowej o wymiarach 240 na 240mm, wypełnionej solanką o konduktywności 0.045 S/m. Można zauważyć, że szukany obiekt został znaleziony prawidłowo. Rozmiary zaburzenia zostały odwzorowane z większą dokładnością niż jego położenie.

a)

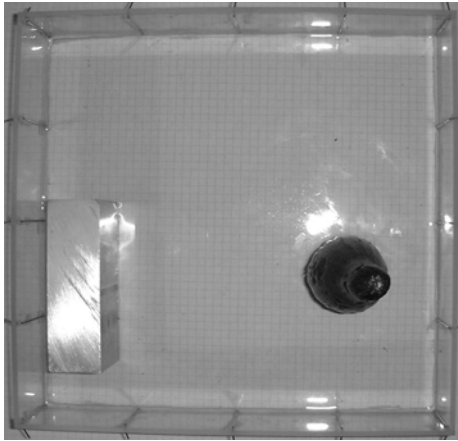


b)

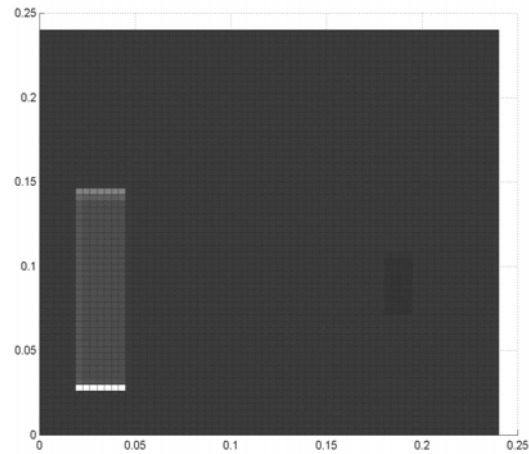


Rys. 9. Przykładowe wyniki odwzorowania obrazu badanego obiektu organicznego uzyskane przy pomocy tomografu zbudowanego w oparciu o urządzenia firmy Agilent a) zdjęcie badanego modelu, b) lokalizacja obiektu organicznego w obszarze zamkniętym

a)



b)

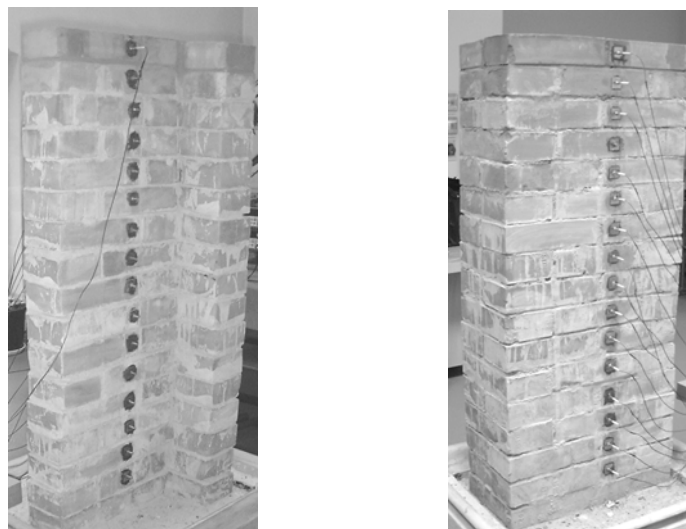


Rys. 10. Przykładowe wyniki lokalizacji obiektów w obszarze zamkniętym

a) zdjęcie lokalizowanych obiektów, b) lokalizacja dwóch obiektów

Podobne wyniki uzyskano dla lokalizacji dwóch obiektów, co zostało przedstawione na rys. 10. Obydwa obiekty zostały zlokalizowane prawidłowo, wraz z zachowaniem proporcji między rozmiarami szukanych zaburzeń. Jeden z obiektów będących wtrąceniem wykonany był z aluminium o wymiarach 20 mm x 100 mm, natomiast drugim obiektem była połowa ogórka o konduktywności zbliżonej do konduktywności roztworu solnego wypełniającego wannę pomiarową.

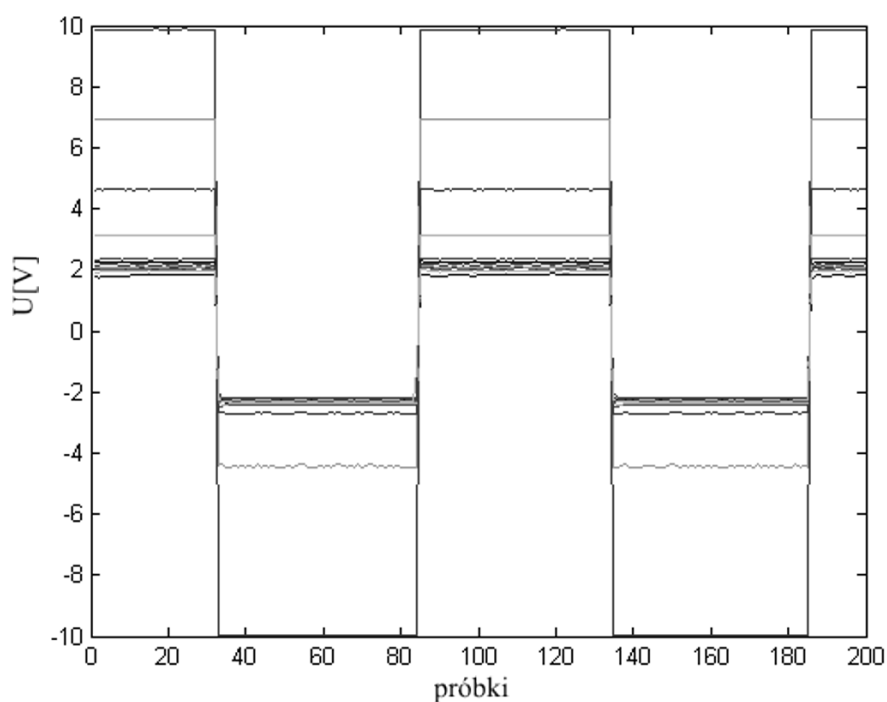
Do badania stopnia zawilgocenia murów został użyty tomograf zbudowany w oparciu o karty pomiarowe Advantech. Badany obiekt został przedstawiony na rys. 11.



Rys. 11. Widok badanego muru wraz z okablowaniem

W celu przeprowadzenia badania wykonane zostały odpowiednie elektrody wraz z okablowaniem, które dołączono do muru. Opracowany został odpowiedni system mocujący elektrody do muru, bazujący na specjalnie zmodyfikowanym kleju.

Na rysunku 12 przedstawiony został rozkład potencjałów na badanym obiekcie dla jednej z projekcji pobudzających. Można zaobserwować równomierny rozkład potencjałów na całej badanej powierzchni, w części suchej muru różnice między potencjałami są znacznie większe niż dla muru zawilgoconego.



Rys. 12. Rozkład potencjałów na badanym murze dla jednej projekcji pobudzającej

Zbudowany tomograf impedancyjny jest dopiero w fazie testowania w związku z czym, pełna analiza wyników dla muru zawilgoconego będzie mogła być opublikowana po badaniach zawilgoconego muru.

6. PODSUMOWANIE

Przy podejmowaniu decyzji o konfiguracji systemu oraz doborze przyrządów pomiarowych wskazana jest wstępna ocena metody pomiarowej i mierzonych wielkości na zbliżonym obiekcie o znanych parametrach.

Pierwszy tomograf impedancyjny (wykorzystujący urządzenia firmy Agilent) pozwala na użycie większej liczby kanałów pomiarowych [2]. W układzie tym programowa zmiana schematu pobudzenia wiąże się ze zmianami połączeń w układzie badawczym.

Zaletą tomografu, zbudowanego w oparciu o urządzenia firmy Advantech, jest możliwość uzyskania większej informacji o mierzonym sygnale, nie tylko o amplitudzie, ale też o przesunięciu fazowym pomiędzy poszczególnymi kanałami pomiarowymi, zatem można realizować nie tylko tomografię rezystancyjną ale „stricte” impedancyjną. Dodatkową zaletą tego tomografu jest możliwość zadania dowolnej strategii pobudzenia i pomiarów.

Obydwa omawiane tomografy cechują się dużą dokładnością pomiarową (tomograf na bazie urządzeń Agilent – 6 ½ cyfry, a tomograf na bazie kart pomiarowych Advantech – 12 bitów), pozwalającą na poprawną analizę otrzymanych wyników.

LITERATURA

1. Berowski P., Filipowicz S.F., Sikora J., Wójtowicz S.: Dehumidification of the wall process monitoring using 3D EIT system, 15th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields COMPUMAG 2005, 2, Shenyang, 2005.
2. Filipowicz S.F., Nita K., Sikora R., Sikora J.: Scanner application to fully automated measurements in Electrical Impedance Tomography, *Przegląd Elektrotechniczny*, 10/2003, s. 687-689, 2003.
3. Filipowicz S.F.: *Aspekty praktyczne pola elektromagnetycznego zagadnienia tomografii i encefalografii*, BEL Studio, Warszawa, 2006.
4. Filipowicz S.F., Rymarczyk T.: *Tomografia impedancyjna, pomiary, konstrukcje i metody tworzenia obrazu*, BEL Studio, Warszawa, 2003.
5. Helsel R.: *Visual Programming with HP VEE*, Prentice-Hall, Inc. 1998
6. <http://www.advantech.com/>
7. <http://www.agilent.com/>
8. <http://www.ni.com/>
9. Nita K., Wójtowicz S., Filipowicz Z., Filipowicz S. F.: Multichannel measuring setups in applying to impedanc tomography, 29-th International Conference on Fundamentals of Electrotechnics and Circuit Theory, Gliwice-Ustroń, May 24-27, pp. 459-462, 2006.
10. Sikora J.: *Algorytmy numeryczne w tomografii impedancyjnej i wiropądowej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000
11. Sikora J., Skoczyła J., Sroka J., Wincenciak S.: *Zbiór zadań z teorii pola elektromagnetycznego*, OWPW, Warszawa 2004.

12. Vauhkonen M., Electrical Impedance Tomography and Prior Information, PhD thesis, University of Kuopio, Kuopio, Finland, 1997
13. Whiting D.A., Nagi M.A., Electrical Resistivity of Concrete—A Literature Review, R&D Serial No. 2457, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA 2003.

Rękopis dostarczono, dnia 20.02.2007 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Antoni Cieśla

MULTICHANNEL MEASUREMENT SYSTEM
IN ELECTRICAL IMPEDANCE
TOMOGRAPHY – COMPARISON

Konrad NITA
Stefan F. FILIPOWICZ

ABSTRACT *Two multichannel measuring setups applied to impedance tomography were presented in this paper. First of them is based on Agilent hardware and the second one is based on Advantech devices. The first tomograph takes advantage of Data Acquisition and Switch Unit Agilent 34970A. Advantech adapter card with A/C and C/A converter is used in the second tomograph. Mechanical structure and possible applications of these tomographs were presented too.*