

**Paweł POTYRAŃSKI, Mykhaylo DOROZHOVETS**  
POLITECHNIKA RZESZOWSKA, ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

## Model badawczy elektroimpedancyjnego tomografu komputerowego

Dr inż. Paweł Potyrański

Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Rzeszowskiej w roku 1996, uzyskując dyplom w zakresie metrologii i systemów pomiarowych. W roku 2006 uzyskał tytuł doktora nauk technicznych. Współtwórca Laboratorium Badań i Kalibracji „LABBiKAL” Politechniki Rzeszowskiej. W pracy naukowo - badawczej zajmuje się weryfikacją dokładności elektroimpedancyjnych systemów tomograficznych oraz specjalizowanymi systemami pomiarowymi.

e-mail: ppot@prz.rzeszow.pl



Prof. dr hab. inż. Mykhaylo DOROZHOVETS

Jest absolwentem (1975) Katedry Techniki Informatyczno-Pomiarowej Politechniki Lwowskiej, tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w 1986 r. a w 2001 r. obronił pracę habilitacyjną. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku profesora w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Rzeszowskiej. W pracy naukowo-badawczej zajmuje się zagadnieniami pomiarów tomograficznych, problemami przetwarzania sygnałów pomiarowych oraz analizą i oceną niedokładności wyników pomiarów.

e-mail: michdor@prz.edu.pl



### Streszczenie

W artykule przedstawiono laboratoryjne rozwiązanie badawczego modelu elektroimpedancyjnego tomografu komputerowego. System opracowano dla badania właściwości nowej metody weryfikacji dokładności systemów tomografii elektroimpedancyjnej. Zaprezentowano założenia i budowę systemu oraz sposób szacowania jego dokładności.

**Słowa kluczowe:** system tomografii elektroimpedancyjnej, pomiar, weryfikacja, szacowanie niepewności.

### Researching model of computer electroimpedance tomography system

#### Abstract

In this paper the laboratory application of computer electroimpedance tomography systems researching model are presented. The system is elaborated for new accuracy verification method of electroimpedance tomography systems properties investigation. The system assumptions and construction and its accuracy estimating way are described.

**Keywords:** method electroimpedance tomography system, measurement, verification, uncertainty estimation.

## 1. Wstęp

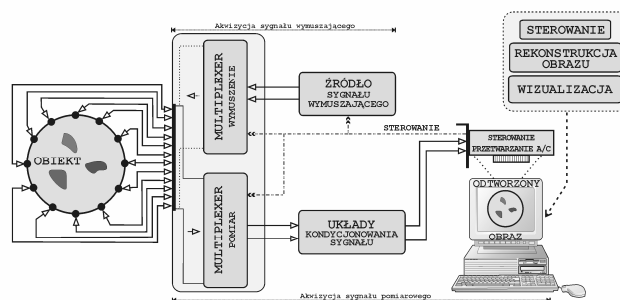
Tomografia elektroimpedancyjna (TEI) jest jedną z nowoczesnych, nieniszczących technologii badań właściwości materiałowych różnego typu obiektów (również tkanek biologicznych), w której wykorzystuje się ich właściwości elektryczne. Obiekt badań poddawany jest działaniu wymuszenia prądowego (lub napięciowego), jednocześnie obserwuje się powstały na jego brzegu rozkład napięć (lub rozptył prądów). Zarejestrowane dane pomiarowe są przetwarzane za pomocą algorytmu rekonstruującego obraz rozkładu przestrzennego właściwości elektrycznych (również ich zmiany) obiektu badanego [2-5].

Odtworzenie dobrej jakości obrazu rozkładu konduktywności (lub konduktywności zespolonej) wewnątrz obiektu wymaga uzyskanie informacji pomiarowej o dużej dokładności w bardzo krótkim czasie, co z kolei wymaga stosowania precyzyjnych specjalizowanych systemów akwizycji sygnałów wymuszających i pomiarowych (rys. 1).

## 2. Problemy pomiarowe

Ponieważ jakość rekonstruowanego obrazu w bardzo dużym stopniu zależy od dokładności pomiarów, bardzo istotny jest dobór dopasowanej do właściwości obiektu, metody pomiarowej oraz zastosowanie odpowiedniej jakości podzespołów systemu akwizycji sygnałów. Należy również wspomnieć, że decydujący wpływ na rozdzielczość obrazu ma liczba elektrod (stosowane liczby elektrod: 12, 16, 24, 32, 64, 128), jednak jej zwiększanie przyczynia się do wydłużenia (wzrost wykładniczy) czasu

miaru i rekonstrukcji obrazu. Powoduje również zmniejszenie poziomu sygnałów pomiarowych, co wymaga stosowania podzespołów o wysokiej dokładności i czułości.



Rys. 1. Przykładowa struktura systemu TEI  
Fig. 1. Exemplary structure of TEI system

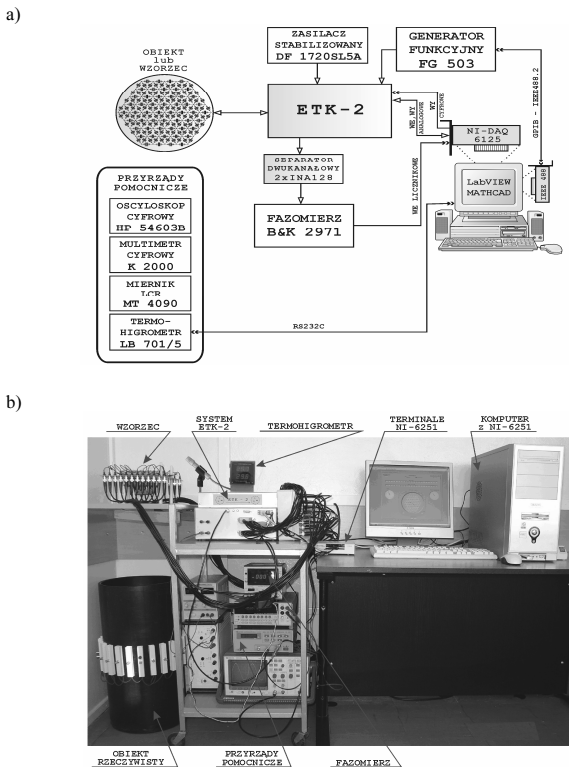
Do głównych problemów pomiarowych w TEI można, zatem zaliczyć:

- pomiar metodą różnicową małych (w porównaniu z amplitudą napięć elektrodowych) sygnałów międzyelektrodowych, które zawierają informację o zmianach obrazu rozkładu konduktywności,
- duże zmiany konduktancji elementów wewnątrz obiektu, powodujące niewielkie zmiany sygnałów na zewnątrz obiektu (np. dla 24 zewnętrznych elektrod, zmiana konduktancji pojedynczego, centralnego elementu zastępczego o 100% powoduje zmianę wartości sygnału o mniej niż 4%),
- konieczność istotnego zmniejszenia wpływu zakłóceń systematycznych i losowych,
- konieczność eliminacji (przez wybór odpowiedniej metody pomiarowej) wpływu rezystancji przewodów i styków,
- rozbudowany system (sterowania) przełączania sygnałów wymuszających i pomiarowych pomiędzy elektrodami,
- wysokie wymagania odnośnie parametrów wszystkich elementów systemu akwizycji.

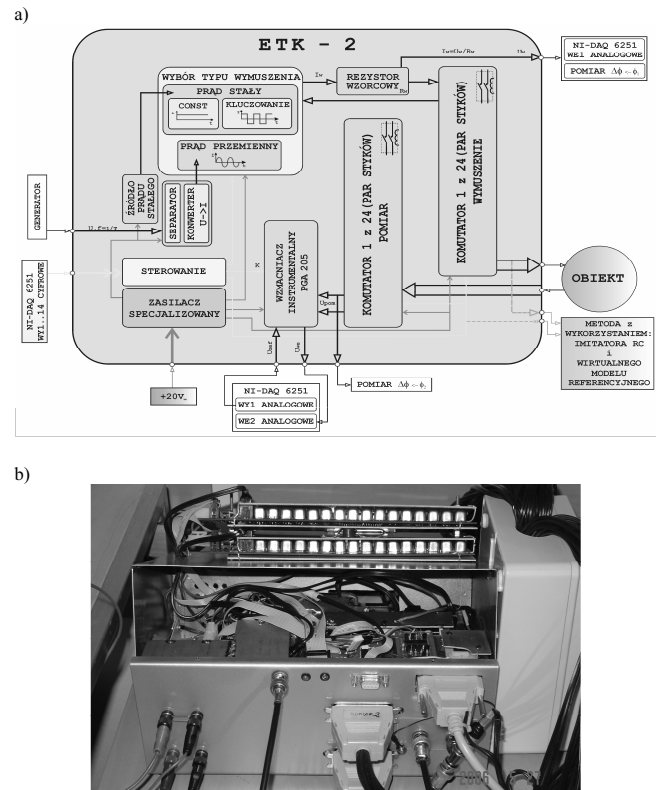
## 3. Stanowisko badawcze

Dla potrzeb badawczych wybranych zagadnień związanych z TEI, zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze (rys. 2) będące modelem elektroimpedancyjnego tomografu komputerowego. Składa się ono z dwóch warstw funkcyjnych:

- sprzętowej - systemu akwizycji danych pomiarowych i sterowania, współpracującego ze wzorcem oraz obiektem rzeczywistym (zbiornik o kształcie walca z elektrodami prądowymi),
- programowej - aplikacji sterującej procesem kontrolno-pomiarowym i realizującej rekonstrukcję oraz wizualizację obrazu.



Rys. 2. Struktura blokowa (a) i rzeczywiste stanowisko badawczego (b)  
Fig. 2. Block diagram (a) and physical researching system (b)



Rys. 3. Struktura blokowa (a) i rzeczywisty moduł ETK-2 (b)  
Fig. 3. Block diagram (a) and physical module ETK-2 (b)

4. Warstwa sprzętowa

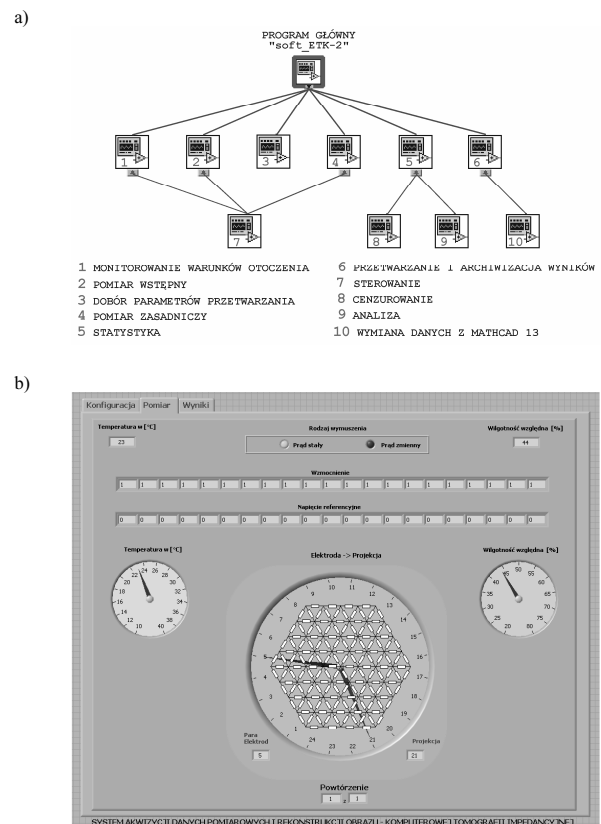
Zaprojektowano i wykonano moduł ETK-2 laboratoryjnego systemu 24 elektrodowego elektroimpedancyjnego tomografu komputerowego (rys. 3) realizujący:

- przełączanie prądowego sygnału wymuszającego na 24 projekcje sygnału wymuszającego (komutator prądowy, 2x24),
- przełączanie wyjściowego napięciowego sygnału pomiarowego (pomiar różnicowy wartości napięć międzyelektrodowych, komutator napięciowy 2x24),
- multiplikatywno – addytywne dopasowanie wartości sygnału napięciowego do zakresu pomiarowego karty pomiarowej, przez zastosowanie programowalnego wzmacniacza instrumentalnego o zadawanej wartości napięcia referencyjnego,
- stabilizowane źródło stałoprądowego sygnału wymuszającego z izolowaną masą.

5. Warstwa programowa

Ponieważ systemy TEI są bardzo specyficzne oraz mając na uwadze badawczy charakter stanowiska pomiarowego z systemem ETK-2, stworzono w środowisku LabVIEW 7.1 specjalizowaną aplikację (rys. 4) realizującą algorytmicznie następujące zadania:

- cyfrowe (C) i analogowe (AO) sterowanie składnikami systemu ETK-2: komutatorami (C): prądowym i napięciowym; wzmacniaczem instrumentalnym (C – wzmacnienie, AO – napięcie referencyjne); wyborem źródła sygnału wymuszającego (C)(prąd stały, kluczkowanie prądu stałego, prąd przemienny),
- sterowanie procesem przetwarzania A/C i C/A i ich parametrami oraz wejściami licznikowo – czasowymi,
- sterowanie i współpraca z przyrządami systemowymi: generatorem funkcyjnym (interfejs IEEE488.2), termohigrometrem (RS232c),
- pomiar wstępny i na jego podstawie dobór parametrów toru przetwarzania A/C dla pomiaru zasadniczego,
- pomiar zasadniczy z wizualizacją i archiwizacją danych oraz przetwarzaniem ich do postaci zgodnej z środowiskiem MATHCAD 13,
- pomiaru wartości kąta przesunięcia fazowego,
- analizy statystycznej i cenzurowania wyników pomiarów.

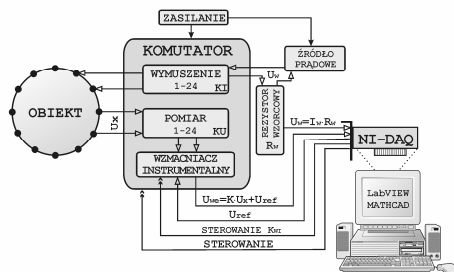


Rys. 4. Struktura hierarchiczna (a) i interfejs użytkownika (b)  
Fig. 4. Hierarchy structure (a) and user interface (b)

Rekonstrukcję obrazu i testy porównawcze przeprowadzono w środowisku MATHCAD 13 (dla potrzeb rekonstrukcji obrazu rozkładu konduktywności zastosowano szeroko rozpowszechniony iteracyjny algorytm Newtona-Raphsona z regularyzacją metodą Lavenberga-Marquarda [1]).

## 6. Szacowanie niepewności

Ponieważ wartości wyników pomiaru napięć międzyelektrodowych sygnału odpowiedzi unormowane są do wartości natężenia prądów wymuszających za wielkość wyjściową obiektów badań przyjęto rezystancję wzajemną  $R_W$ . Na rys. 5 przedstawiono schemat blokowy toru pomiarowego systemu TEI wykorzystany do określenia źródeł niedokładności w budżecie niepewności.



Rys. 5. Schemat blokowy toru pomiarowego systemu TEI  
Fig. 5. Block diagram of measuring channel of TEI system

Przyjęto model wyniku pomiaru rezystancji wzajemnej w postaci zależności

$$R_{W(j)} = \frac{U_{x(j)}}{I_w} = \frac{(N_{Uw(j)} - U_{ref(j)} \cdot K_{2KP}) \cdot K_{1KP}}{N_{Uw} \cdot K_{2KP} \cdot K_{W1(j)}} \cdot R_w \quad (1)$$

oraz model matematyczny niepewności wyznaczania wartości rezystancji wzajemnej standardowej złożonej w postaci zależności

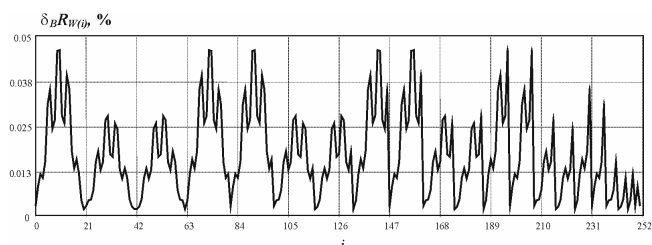
$$\left( \frac{u_c(\overline{R_w})}{\overline{R_w}} \right) = \sqrt{\left( \frac{u_c(\overline{I_w})}{\overline{I_w}} \right)^2 + \left( \frac{u_c(\overline{U_x})}{\overline{U_x}} \right)^2 + 2 \cdot \left( \frac{u_c(\overline{I_w})}{\overline{I_w}} \right) \cdot \left( \frac{u_c(\overline{U_x})}{\overline{U_x}} \right) \cdot r_{I_w, U_x}} \quad (2)$$

i niepewności rozszerzonej w postaci

$$U_p(\overline{R_w}) = k_p \cdot \left( \frac{u_c(\overline{R_w})}{\overline{R_w}} \right) \cdot \overline{R_w} \quad (3)$$

gdzie:  $N_{Uw}$ ,  $N_{Uw(j)}$  – wynik przetwarzania A/C oraz  $K_{1KP}$ ,  $K_{2KP}$  – współczynnik przetwarzania dla karty pomiarowej na zakresie 1 i 2,  $U_{ref}$  – napięcie odniesienia,  $K_{W1}$  – współczynnik przetwarzania wzmacniacza pomiarowego,  $R_w$  – rezystancja rezystora wzorcowego,  $j$  – numer kolejnej pary elektrod na brzegu obiektu,  $I_w$  – natężenia prądu sygnału wymuszającego,  $U_x$  – różnica potencjałów międzyelektrodowych,  $k_p$  – współczynnik rozszerzenia,  $r$  – współczynnik korelacji wielkości pośrednich  $U_x$  i  $I_w$ ,  $R_W$  – rezystancja wzajemna.

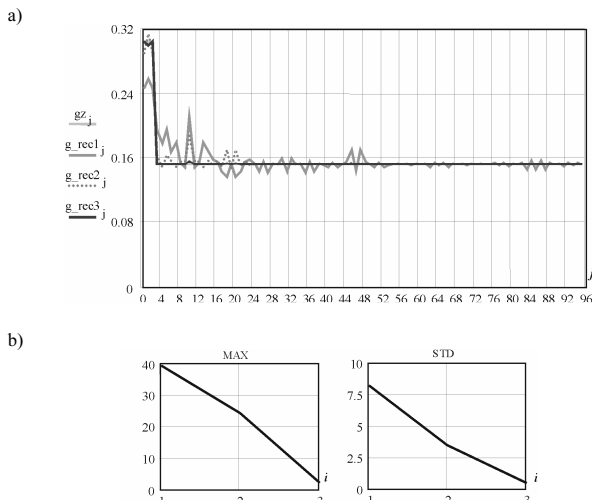
Na rys. 6 zaprezentowano wykres zmienności standardowej względnej niepewności typu B wyniku pomiaru rezystancji wzajemnej dla wszystkich projekcji sygnału wymuszającego i odpowiedzi (oś X).



Rys. 6. Względna niepewność typu B wyników pomiaru (wszystkie projekcje - oś X)  
Fig. 6. Standard relative uncertainty of type B (for all projections - X axis)

Rys. 7 przedstawia przykładowy wynik rekonstrukcji wartości konduktywności 96 elementów uzyskany systemem ETK-2 i odpowiadające mu oszacowane wartości parametrów błędu

względnej (objaśnienia:  $j$  – numer elementu trójkątnego,  $i$  – numer iteracji,  $g$  – konduktywność w mS/m).



Rys. 7. Przykładowy wynik rekonstrukcji (a) i odpowiadający jej błąd względny (b)  
Fig. 7. Exemplary reconstruction result (a) and corresponding its relative error (a)

## 7. Podsumowanie

Rozwój nowych efektywnych metod badawczych właściwości rzeczywistych obiektów powoduje powstawanie specjalizowanych systemów pomiarowych.

Bardzo istotnym problemem jest weryfikacja ich dokładności zarówno na etapie prototypów laboratoryjnych jak i (jeszcze istotniejsze) urządzeń komercyjnych. Należy zauważyć, że większość takich systemów ma unikalny charakter. W związku z tym, koniecznym jest opracowanie nowych uniwersalnych i mobilnych metod, pozwalających na weryfikację dokładności nie tylko w laboratoryjnych, ale również rzeczywistych warunkach pracy.

Tomografia elektroimpedancyjna należy właśnie do tego typu metod. Koniecznym jest, zatem opracowanie bardziej uniwersalnych i efektywnych od istniejących metod sprawdzania dokładności systemu TEI.

Model elektroimpedancyjnego tomografu komputerowego został stworzony właśnie dla potrzeb tworzenia i badania nowych metod weryfikacji dokładności systemów TEI [6].

## 8. Literatura

- [1] Dennis J.E., Shnabel R.B.: „Numerical method for unconstrained Optimisation in Nonlinear Equations”. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs. New Jersey 1983
- [2] Dickin F.J., Zhao X.J., Abdulach M.Z. and others: „Tomographic imaging of industrial process equipment using electrical impedance sensors”. Sensors VI: Technology, Systems and Applications. 1991. Proceedings of the 5 th Conference on Sensors and Their Application. Edited by K.T.V. Grattan. Bristol, Philadelphia and New York: Adam Higler. 1991, pp.215-220.
- [3] Dorozhovets M., Stadnyk B., Zavgorodny V., Kowalczyk A.: „Electrical Impedance Tomography System Based on Equipotential Electrodes”. Proceedings of XV Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits. Sept.1998. Poznań-Liege, Belgium, pp.269-271.
- [4] Dorozhovets M.: „Use of the multi-element resistance strain transducers for measurement of the tension distribution”. Metody i technika Przetwarzania sygnałów w pomiarach fizycznych. Materiały IV międzynarodowego seminarium metrologów, Rzeszów 1997, str.43-49.
- [5] Williams R.A., Beck M.S.: „Process Tomography. Principles, Techniques and Applications”. Butterworth-Heinemann, Great Britain 1995
- [6] Dorozhovets M., Potyrański P.: „The method of the accuracy verification of the electroimpedance tomography system based on the reference model”. PROCTOM2006 4-th International Symposium on Process Tomography in Poland, 14-15 September 2006, Warszawa, pp. 40-43.