

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

System akwizycji danych i model wzorca do weryfikacji dokładności rezystancyjnego systemu tomograficznego

Mgr inż. Paweł POTYRAŃSKI

Asystent w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych. Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Rzeszowskiej w roku 1996, uzyskując dyplom w zakresie metrologii i systemów pomiarowych. Współtwórca Laboratorium Badań i Kalibracji „LABBiKAL” Politechniki Rzeszowskiej. W pracy naukowo - badawczej zajmuje się weryfikacją dokładności elektroimpedancyjnych systemów tomograficznych.

e-mail: ppot@prz.edu.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 praktyczne rozwiązanie i wyniki badań systemu akwizycji danych i metody metrologicznej weryfikacji dokładności rezystancyjnego systemu tomograficznego. Metoda weryfikacji oparta jest na zastosowaniu wzorca (symulującego rozkład rezystywności) złożonego z sieci elementów dyskretnych – rezystorów i kondensatorów. Proponowana metoda pozwala na weryfikację dokładności, selektywną lub sumaryczną, elementów systemu tomograficznego.

Słowa kluczowe: system tomografii elektroimpedancyjnej, weryfikacja, wzorzec, źródła błędów.

Data Acquisition System and Reference Model Used for Investigation of Resistance Tomography System Verification Method

Abstract

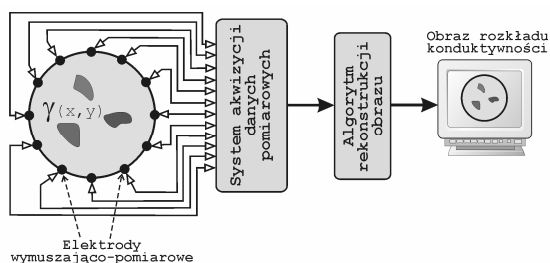
In this paper the accuracy verification technique and the data acquisition system are proposed and investigated. The verification method is based on the reference model of conductivity distribution. The reference model is constructed as a network of the discrete resistors and capacitors. Proposed technique permits to verify (jointly or separately) the data acquisition system, reconstruction algorithm and approximation effects. The reference network parameters and the stages of the verification are described.

Keywords: electroimpedance tomography system, verification, reference model, error sources.

1. System tomografii elektroimpedancyjnej

Tomografia elektroimpedancyjna (TEI) może być stosowana w medycynie i przemyśle do rekonstrukcji obrazu przestrzennego rozkładu konduktywności (konduktywności zespolonej lub przenikalności elektrycznej) oraz innych wielkości od niej zależnych [1-4].

Typową strukturę systemu TEI złożoną z systemu akwizycji danych (DASY) współpracującego z elektrodami pomiarowymi oraz z komputerowej jednostki centralnej przedstawiono na rysunku 1.



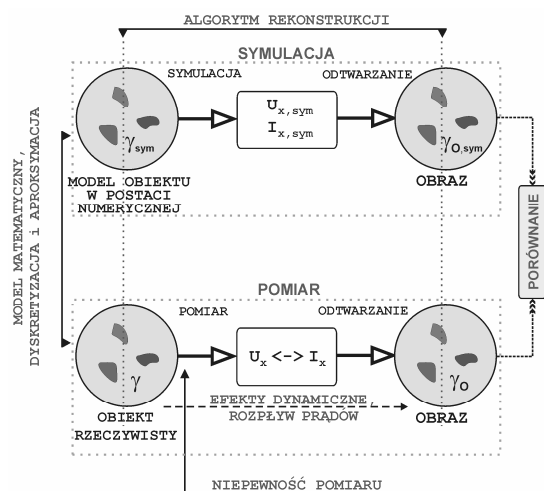
Rys. 1. Główne elementy systemu TEI
Fig. 1. Main components of the TEI system

Elektrody pomiarowe rozmieszczone na brzegu badanego obiektu są wykorzystywane zarówno do doprowadzenia do obiektu sygnału wymuszającego prądowego (lub napięciowego), jak i rejestracji jego odpowiedzi w postaci różnicy potencjałów międzyelektrodowych (lub prądów elektrodowych).

Zarejestrowane wyniki pomiarów przetworzone przez algorytm rekonstrukcji obrazu pozwalają uzyskać obraz rozkładu konduktywności badanego obiektu. Algorytm rekonstrukcji jest zazwyczaj algorytmem iteracyjnym.

W ogólnym przypadku rozwiązanie zagadnienia odwrotnego połowego rozkładu konduktywności w TEI przeprowadza się po wcześniejszej dyskretyzacji i aproksymacji obiektu elementami dyskretnymi na przykład metodą elementów skończonych (MES).

Na rysunku 2 przedstawiono źródła niedokładności systemu TEI z uwzględnieniem miejsca ich oddziaływania. Jakość obrazu rozkładu konduktywności zależy głównie od: błędów pomiarowych (wnoszonych przez elementy toru pomiarowego), błędów algorytmu rekonstrukcji, błędów dyskretyzacji i aproksymacji badanego obiektu. Proponowana nowa metoda weryfikacji dokładności systemu TEI, oparta na wykorzystaniu wzorca, pozwala na wyznaczenie błędów całkowitego systemu i jego składowych związanych z wymienionymi oddziaływaniami.



Rys. 2. Źródła błędów w STE

Fig. 2. Error sources of STE

2. Fizyczny model referencyjny rozkładu rezystywności (wzorzec)

Zmiany rezystywności (konduktywności) wewnątrz badanego obszaru nie są mierzone bezpośrednio, dlatego weryfikacja syste-

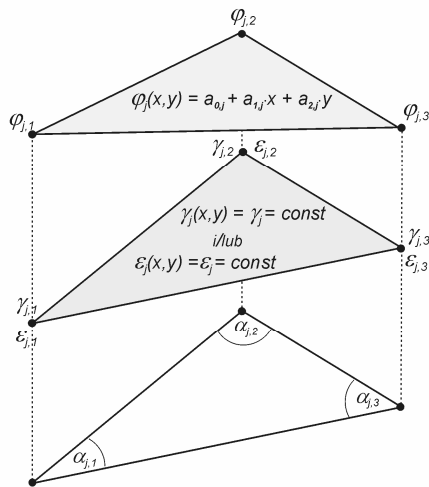
mu TEI wymaga fizycznego modelu (wzorca) rozkładu rezystywności (perspektywicznie również przenikalności elektrycznej – stąd składowa pojemnościowa).

Struktura wewnętrzna wzorca powinna odpowiadać przyjętej dla rozwiązania równania Poisson'a (1) (model matematyczny obiektu w postaci ciągłej) metodzie dyskretyzacji i aproksymacji.

$$\nabla \cdot [\gamma(x, y) + j\omega\varepsilon(x, y)\nabla\varphi(x, y)] = 0, \quad (1)$$

gdzie: $\gamma(x, y)$ – konduktancja, $\varepsilon(x, y)$ – przenikalność elektryczna, $\varphi(x, y)$ – wewnętrzny rozkład potencjału, ω – pulsacja elektrycznego sygnału wymuszającego.

Badania pokazują, że najbardziej efektywną metodą rozwiązania równania (1) jest Metoda Elementów Skończonych (MES) [3-6].



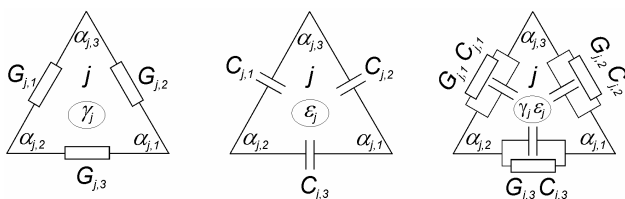
Rys. 3. Pojedynczy, trójkątny element skończony
Fig. 3. Single, triangle finite element

Projektując strukturę wzorca zastosowano schemat zastępczy obiektu złożony z elementów o kształcie trójkątnym (rys. 3) o liniowej aproksymacji potencjału, stałej konduktywności $\gamma_j=1/\rho_j$ i przenikalności elektrycznej ε_j . Wartości parametrów elementów dyskretnych układu (konduktancja $G_{j,n}$ lub rezystancja $R_{j,n}$ oraz pojemność $C_{j,n}$), dla praktycznej realizacji w postaci elektrycznej (rys. 4), są zależne tylko od kształtu elementu trójkątnego (kąty $\alpha_{j,1}$, $\alpha_{j,2}$, $\alpha_{j,3}$), grubości warstwy przewodzącej d , konduktywności γ_j i przenikalności elektrycznej ε_j :

$$\begin{aligned} G_{j,n} &= d \cdot \gamma_j \cdot \text{ctg}(\alpha_{j,n}), \\ R_{j,n} &= \frac{1}{G_{j,n}} = \rho_j \cdot \frac{\text{tg}(\alpha_{j,n})}{d}, \\ C_{j,n} &= d \cdot \varepsilon_j \cdot \text{ctg}(\alpha_{j,n}), \end{aligned} \quad (2)$$

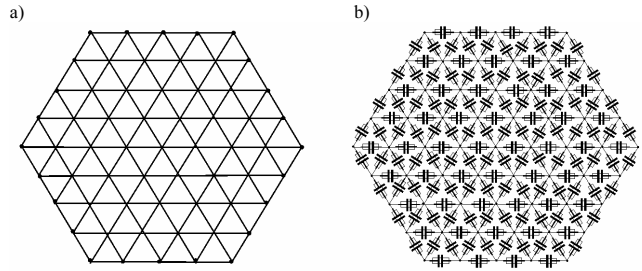
gdzie: j – numer elementu skończonego, $n=\{1,2,3\}$.

Jeżeli kąty trójkąta są ostre struktura zastępcza może być zrealizowana z wykorzystaniem elementów pasywnych.



Rys. 4. Elektryczny układ zastępczy trójkątnego elementu skończonego
Fig. 4. Equivalent electrical network of triangle finite element

Dla takiej dyskretyzacji i aproksymacji badany obszar pokryto siatką elementów trójkątnych (rys. 5a), której odpowiada struktura dyskretnych rezystorów i kondensatorów (rys. 5b). Konfiguracja dyskretnej struktury i numeracja dyskretnych elementów zależy od numeracji i rozmieszczenia trójkątnych elementów skończonych.



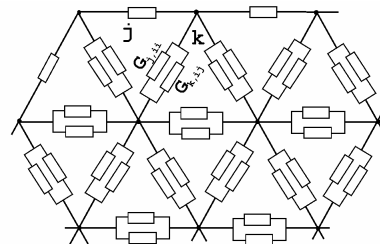
Rys. 5. Struktura elementów skończonych złożona z 96 elementów trójkątnych (a) i jej układ zastępczy złożony ze 156 elementów dyskretnych - rezystorów i kondensatorów (b)
Fig. 5. Finite element mesh from 96 triangle elements (a) and equivalent network constructed of 156 resistors and capacitors (b)

Zaprezentowana na rysunku 5a struktura może być opisana parametrami takimi jak liczba: warstw n_{wr} ; elementów trójkątnych n_{el} ; elektrod (węzłów zewnętrznych) n_{ez} ; oczek n_o ; węzłów n_{wz} ; gałęzi n_g , pomiędzy którymi zachodzą zależności:

$$\begin{aligned} n_{ez} &= 6 \cdot n_{wr}, \\ n_o &= n_{el} = 6 \cdot n_{wr}^2, \\ n_{wz} &= 3 \cdot n_{wr} \cdot (n_{wr} + 1) + 1, \\ n_g &= 3 \cdot n_{wr} \cdot (3 \cdot n_{wr} + 1). \end{aligned} \quad (4)$$

Dla struktury pokazanej na rys. 5a wartości wymienionych parametrów wynoszą: $n_{wr}=4$, $n_{el}=96$, $n_{ez}=24$, $n_o=96$, $n_{wz}=61$, $n_g=156$.

W strukturze elementów skończonych wewnętrzne, sąsiadujące elementy położone są blisko siebie, stąd odpowiadająca im struktura elementów dyskretnych realizowana jest przez równoległe połączenie rezystorów (rys. 6).



Rys. 6. Fragment struktury obrazujący równoległe połączenie par rezystorów odpowiadające sąsiadującym elementom skończonym
Fig. 6. Fragment of the parallel connection of resistor pairs equivalents of adjacent finite elements

Wewnątrz struktury zastępczej rezystancja R_i (lub konduktancja G_i) i pojemność C_i wzdłuż wspólnej przekątnej gałęzi dla sąsiadujących j oraz k elementów trójkątnych jest określona, przez składowe rezystancje $R_{j,ii}$ i $R_{k,ij}$ (konduktancje $G_{j,ii}$ i $G_{k,ij}$) i odpowiednie pojemności $C_{j,ii}$ i $C_{k,ij}$, zależnościami:

$$\begin{aligned} R_i &= \frac{R_{j,ii} R_{k,ij}}{R_{j,ii} + R_{k,ij}}, \\ G_i &= \frac{1}{R_i} = G_{j,ii} + G_{k,ij}, \\ C_i &= C_{j,ii} + C_{k,ij}, \end{aligned} \quad (3)$$

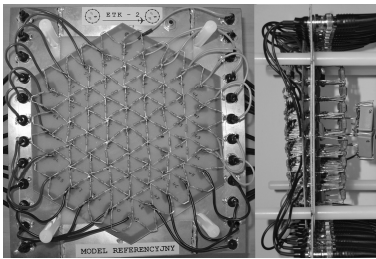
gdzie: i – jest wartością z przedziału $[1, \dots, n_{el} - n_{ez}]$, a ii, ij - wartościami z szeregu $\{1, 2, 3\}$.

Rezystancja (konduktancja) i pojemność zewnętrznych gałęzi zależy tylko od rezystancji (konduktancji) i pojemności odpowiednich, zewnętrznych elementów skończonych.

Na rysunku 7 przedstawiono widok zrealizowanego modelu wzorca złożonego z sieci, równolegle połączonych, 156 rezystorów (wartość rezystancji: $3.3k\Omega$, tolerancja: $\pm 0,1\%$, TC: $\pm 15ppm/K$) i kondensatorów (wartość pojemności: $C=1,8nF$, tolerancja: $\pm 1\%$, stratność: $tg\delta \leq 5 \cdot 10^{-4}$, rezystancja izolacji: $R \geq 10^{11}\Omega$).

Zaburzenia wartości parametrów przedstawionej struktury, odpowiadające zaburzeniom jednostajnego rozkładu rezystywności, mogą być realizowane w sposób manualny lub automatyczny, przez zmianę wartości parametrów elementów dyskretnych.

Szacunkowa wartość względnej rozszerzonej niepewności wyznaczania wartości parametrów wyjściowych, tak zaprojektowanego i wykonanego wzorca, nie przekracza 0,02% na poziomie ufności $P=0,95$, co jest wartością zadowalającą.

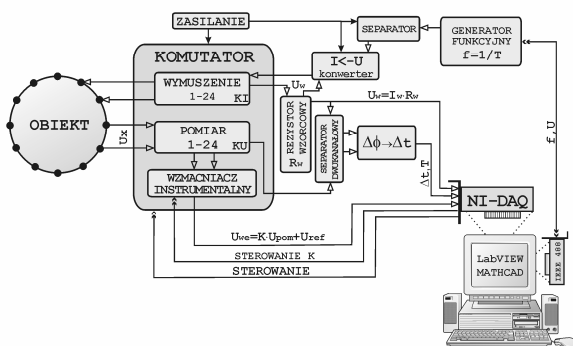


Rys. 7. Fizyczny model wzorca
Fig. 7. Physical reference model

3. System akwizycji danych (DASY)

Schemat blokowy systemu dedykowanego tomografii elektroimpedancyjnej DASY, zaprojektowany i wykonany dla potrzeb badania nowej metody weryfikacji systemów TEI, przedstawiono na rysunku 8. Głównymi jego elementami są:

- dwa 24-kanalowe komutatory: KI (wymuszenie prądowe) i KU (pomiar wartości napięcia metodą różnicową);
- źródło prądowe sygnału wymuszającego (generator i konwerter U/I);
- wzmacniacz instrumentalny o sterownym wzmacnieniu K (cyfrowo) i napięciu referencyjnym U_{ref} ;
- karta akwizycji danych (NI-DAQ – NI-6251) z analogowymi wejściami (16-bit, 1,25 MS/s) i wyjściami (16-bit, 2,86 S/s) oraz wejściami/wyjściami cyfrowymi;
- komputer personalny (z kartami: NI-6251 i NI IEEE-488.2).



Rys. 8. Struktura blokowa DASY
Fig. 8. DASY block diagram

DASY pozwala na poddanie oddziaływaniu prądowego sygnału wymuszającego 12, 16 lub 24 elektrodowego (zewnętrzne węzły) obiektu, we wszystkich możliwych projekcjach międzyelektrodowych, a także na pomiar wartości parametrów sygnału odpowiedzi (wartości różnic potencjałów pomiędzy pozostałymi, wolnymi elektrodami). Dla zwiększenia dokładności pomiarów zastosowano różnicową metodę pomiaru wartości napięć międzyelektrodowych i multiplikatywno-addytywne dopasowanie ich wartości U_{we} do zakresu pomiarowego NI-DAQ (poprzez sterowanie K i U_{ref}).

4. Metoda weryfikacji dokładności systemu TEI

Na rysunku 9 przedstawiono widok rzeczywistego stanowiska badawczego nowej metody weryfikacji dokładności systemu TEI. Stanowisko badawcze, oprócz omówionych DASY i wzorca, wyposażono również w specjalizowane oprogramowanie i przyrządy pomocnicze.

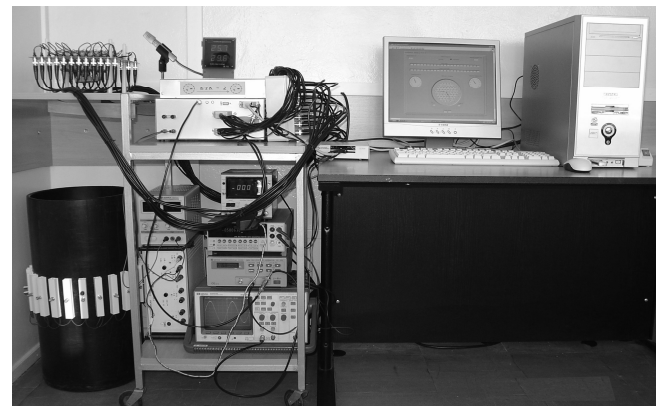
Badania nowej metody opartej o wykorzystanie modelu wzorca przeprowadzono przez sprawdzenie możliwości wyznaczenia błędu całkowitego i jego składowych, według opisanej dalej metodyki.

Miarą całkowitej niepewności jest zbiór wartości błędów Δ_j systemu TEI, definiowanych w postaci bezwzględnej, jako różnica pomiędzy wartością $\gamma_{Rec(j)}$ odtworzonego, a $\gamma_{Real(j)}$ rzeczywistego obrazu w określonym j -tym punkcie obiektu. Ponieważ wartość rzeczywista prawdziwa $\gamma_{Real(j)}$ nie jest znana, zamiennie wykorzystuje się jej wartość umownie prawdziwą $\gamma_{Ru(j)}$, której standardowa niepewność $u(\gamma_{Ru(j)})$ jest na zadowalającym poziomie, stąd:

$$\Delta_j = \gamma_{Rec(j)} - \gamma_{Ru(j)} \quad (4)$$

Miarą dokładności systemu akwizycji danych pomiarowych jest zbiór odchyleń $\Delta V_{meas(j)}$ pomiędzy wynikami pomiarów wartości wyjściowych wielkości obiektu $V_{meas(j)}$, a ich umownie prawdziwą wartością $V_{Ru(j)}$:

$$\Delta V_{meas(j)} = V_{meas(j)} - V_{Ru(j)} \quad (5)$$



Rys. 9. Rzeczywiste stanowisko badawcze (DASY, model wzorca)
Fig. 9. Physical DASY and reference model

Miarą dokładności dyskretyzacji i aproksymacji jest natomiast zbiór odchyleń $\Delta V_{DA(j)}$ pomiędzy, wyznaczonymi obliczeniowo, wartościami wielkości wyjściowych $V_{calc(j)(n_{el})}$ obiektu dla zadanej liczby n_{el} i kształtu elementów (dyskretyzująco-aproksymujących), a wartościami wielkości wyjściowych $V_{calc(j)(\infty)}$ dla nieskończonej liczby takich elementów $n_{el}(\infty)$. Warunek $n_{el} \rightarrow \infty$ może być spełniony tylko w przypadku szczególnych typów rozkładu konduktywności (np. rozkładu jednorodnego). W ogólnym przypadku, dla dowolnego rozkładu konduktywności, wartość tego odchylenia jest szacowana dla liczby elementów $n_{el}(\infty)$ kilkadziesiąt razy większej od rzeczywistej liczby elementów n_{el} (zazwyczaj wystarczająca wartość wystarczająca wartość $n_{el}(\infty) = (16..64) \cdot n_{el}$).

$$\Delta V_{DA(j)} = V_{calc(j)(n_{cl})} - V_{calc(j)(16..64)n_{cl}} \quad (6)$$

Miarą dokładności i zbieżności algorytmu rekonstrukcji obrazu jest z kolei zbiór odchyleń pomiędzy wyznaczonymi w sposób obliczeniowy, za pomocą algorytmu rekonstrukcji, wartościami konduktywności $\gamma_{Rec(j)}(V_{calc(j)})$ (na podstawie wyliczonych dla testowego rozkładu konduktywności napięć międzyelektrodowych $V_{calc(j)}(\gamma_{zad(j)})$), a wartościami konduktywności testowego rozkładu $\gamma_{zad(j)}$.

$$\Delta_{AlgRec(j)} = \gamma_{Rec(j)}(V_{calc(j)}) - \gamma_{zad(j)} \quad (7)$$

5. Podsumowanie

Proponowana metoda weryfikacji dokładności jest metodą hybrydową, ponieważ tak jak dla metody bezpośredniej źródłem odniesienia wielkości mierzonej jest wzorzec, natomiast tak jak w metodzie pośredniej przeprowadzana jest weryfikacja dokładności całego systemu i jego składowych.

Przeprowadzone badania nowej metody weryfikacji dokładności systemu TEI potwierdziły możliwość wyznaczenia:

- błędu instrumentalnego (systemu akwizycji pomiarowych sygnałów odpowiedzi i sygnałów wymuszających),
 - wpływu zastosowanej metody aproksymacji i dyskretyzacji obiektu,
 - błędów algorytmu odtwarzania obrazu
- oraz możliwość oszacowanie błędu systemu TEI w całości.

6. Literatura

- [1] F.J. Dickin, X.J. Zhao, M.Z. Abdulach 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.
- [2] F.J. Lidgley, Q.S. Zhu, C.N. McLeod, W.R. Breckon: Electrode current determination from programmable voltage sources. Electrical Impedance Tomography. Clinical Physics and Physiological Measurement. Volume 13, Supplement A, 1992.-pp. 43-46.
- [3] M. Dorozowec: Modele dyskretne zagadnień tomografii elektrycznej. Pomiar. Automatyka. Kontrola. N 7-8/2003. Warszawa. s. 21-25.
- [4] M. Dorozhovets, I. Basarab-Horwath: Using Equivalent Electrical Networks for Sensitivity Maps Calculation in Electrical Tomography. 3rd International Symposium on Process Tomography in Poland 2002. Proceedings. 9-10 September 2004, Łódź, Poland. s. 44-47.
- [5] S.H. Khan, F. Abdullah: Validation of Finite Element Modelling of Multielectrode Capacitive System for Process Tomography Flow Imaging. Tomographic techniques, 1993, p. 63-73.
- [6] M.Z. Abdulach, S.V. Quick, F.J. Dickin: Quantitative algorithm and computer architecture for real -time image reconstruction in process tomography. Tomographic techniques, 1993, p. 179-192.

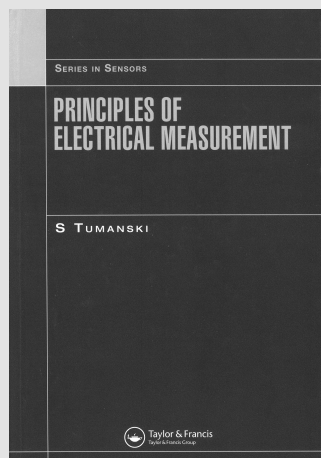
Artykuł recenzowany

RECENZJE

PRINCIPLES OF ELECTRICAL MEASUREMENTS

(Podstawy pomiarów elektrycznych) S. Tumanski

Taylor & Francis, New York London 2006, ISBN 0-7503-1038-3, stron 472, książka w języku angielskim



Jest to już druga książka profesora Politechniki Warszawskiej Sławomira Tumańskiego w serii Sensors pod redakcją prof. B. E Jonesa z Wielkiej Brytanii. Nie była poprzedzona pozycją polską i została opracowana od razu w języku angielskim. Natomiast jej treść stanowi podstawę bardziej obszernego dwutomowego polskiego podręcznika elektrycznej techniki pomiarowej, dostosowanego do potrzeb krajowego Czytelnika, który Autor obecnie kończy opracowywać. Więcej

miejsca zamierza w nim poświęcić szczegółowemu rozwinięciu metod pomiarowych różnych wielkości. Proces wydawniczy w Polsce jest jeszcze jednak ciągle znacznie dłuższy niż w USA i na tę nową polską pozycję trzeba będzie jeszcze poczekać. Dlatego, ze względu na zawartość, jak i z tego to powodu warto jest omówić bliżej powyższą pozycję angielską.

Książka ta kładzie się z przedmowy, 6-ciu rozdziałów, bibliografii, wykazów symboli i skrótów oraz indeksu terminów. Nazwy rozdziałów i podrozdziałów.

1. Wprowadzenie w pomiary.
2. Fundamenty pomiarów elektrycznych.
3. Klasyczne pomiary elektryczne.
4. Przetwarzanie analogowych sygnałów pomiarowych.
5. Cyfrowe przetwarzanie sygnałów pomiarowych.
6. Komputerowe systemy pomiarowe.

Każdy rozdział ma własną, głównie anglojęzyczną bibliografię. We wstępie podano też zestaw wydanych w ostatnich latach podstawowych anglojęzycznych podręczników i monografii z dziedziny techniki pomiarowej.

Książka jest najbardziej aktualnym ze znanych mi krajowych i zagranicznych podręczników akademickich współczesnej elektrycznej techniki pomiarowej. Mogą skorzystać z niego też i nasi studenci posługujący się w coraz to większym stopniu dość swobodnie językiem angielskim. Ponieważ nie jest ona ponad miarę zmatematyzowana, to może też ponadto służyć z powodzeniem do zdobywania, pogłębiania i aktualizacji wiedzy o współczesnym stanie tej techniki dla wszystkich nią zainteresowanych, w tym badaczy i inżynierów przemysłowych różnych specjalności oraz metrologów.

Doc. dr inż. Zygmunt Lech Warsza
Polskie Towarzystwo Metrologiczne
Warszawa