

Mariusz R. RZAŚAPOLITECHNIKA OPOLSKA KATEDRA TECHNIKI CIEPLNEJ I APARATURY PRZEMYSŁOWEJ
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole**Korekcja funkcji przetwarzania czujnika stosowanego w tomografii pojemnościowej**

Dr inż. Marusz R. RZAŚA

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Opolskiej o specjalności Automatyka i metrologia elektryczna. Zatrudniony na w Katedrze Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej Politechniki Opolskiej oraz w Zespole Szkół Elektrycznych w Opolu. Doktorat obronił z specjalności Budowa i Eksploatacja Maszyn. Prace naukowe prowadzi z zakresu pomiaru przepływów dwufazowych z wykorzystaniem tomografii optycznej i pojemnościowej.

e-mail: m.rzasa@po.opole.pl

**Streszczenie**

Tomografia procesowa coraz częściej znajduje zastosowanie w badaniach eksperymentalnych różnych procesów przemysłowych. Jednym z rozwiązań jest tomograf pojemnościowy. Niejednokrotnie jest on wykorzystywany do badania przepływów dwufazowych. Początkowo tomografy były stosowane do wyznaczania obrazu struktury przepływu. Obecnie tomograf może być przyrządem pomiarowym który poza wyświetleniem obrazu struktury może wyznaczyć podstawowe parametry opisujące proces. Aby było możliwe dokonanie pomiarów konieczne jest odpowiednie wzorcowanie urządzenia. Na wynik pomiaru ma wpływ szereg pojemności, pochodzących od elementów znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie elektrod pomiarowych. Ze względu na budowę tomografu pewne błędy są nieuniknione. W celu zredukowania ich wpływu zaproponowano metodę korekcji funkcji przetwarzania dla typowego czujnika tomografu pojemnościowego. W pracy przedstawiono podstawy teoretyczne i wyniki badań eksperymentalnych. Niniejsze opracowanie może mieć również zastosowanie w innych urządzeniach pomiarowych, których zasada działania oparta jest na pomiarze małych zmian pojemności.

Słowa kluczowe: tomograf pojemnościowy, korekcja błędu, pomiar pojemności, pomiar przepływu.

Systematic error correction in capacitance tomography**Abstract**

Processing tomography is more and more often applied to tests of various industrial processes. The capacitance tomograph is one of measuring systems often used for tests of two-phase flows. Tomographs were previously used for determination of the flow structure images. At present they can be measuring devices which not only express the structure image but can be used for calculations of the basic parameters describing the process. In order to take measurements, it is necessary to calibrate the tomograph. Capacitances of elements being close to the measurement electrodes influence the measurement results. Some errors cannot be avoided. Thus, the correction method was proposed for measurements with the capacitance tomograph. The paper presents the theoretical basis and the test results obtained with this method. This method can also be used in other measuring devices for measurements of small capacitance changes.

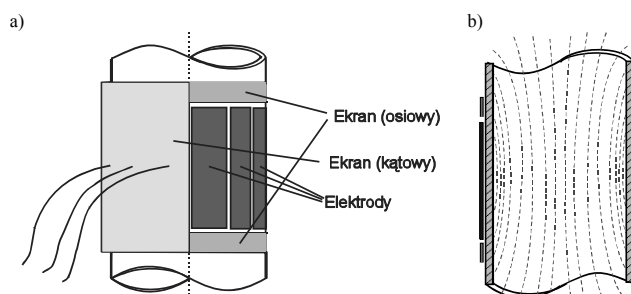
Keywords: Capacitance tomograph, error correction, measurement of capacitance, measurement of flow.

1. Wstęp

Tomografia procesowa znajduje coraz większe zastosowanie w badaniu procesów zachodzących w urządzeniach przemysłowych. Obecnie wynikiem otrzymywanym z tomografu nie jest jedynie obraz struktury badanej, ale coraz częściej na jego podstawie wyznacza się wartości parametrów opisujących dany proces [1, 2]. Aby tomograf mógł być przyrządem pomiarowym to poza standardową kalibracją należy przeprowadzić wzorcowanie takiego urządzenia. Tomograf powinien zachowywać niezmi-

ność parametrów pomiarowych w różnych warunkach, co nie jest łatwe do zrealizowania. Niejednokrotnie jest to jednak możliwe dzięki zastosowaniu metod korekcji błędów pomiarowych. W niniejszej pracy opisano metodę korekcji błędów systematycznego powstającego podczas pomiaru tomografem pojemnościowym.

Typowy czujnik stosowany w tomografii pojemnościowej przedstawiono na rysunku 1. Składa się on z prostokątnych elektrod rozmieszczonych wokół przekroju pomiarowego. Aby zmniejszyć wpływ zewnętrznego pola elektrycznego zastosowano dwa ekrany. Pomiar polega na pomiarze pojemności pomiędzy wszystkimi możliwymi kombinacjami elektrod, w ten sposób uzyskuje się obraz rozkładu przenikalności elektrycznej, który odpowiada rozkładowi materiału znajdującego się w czujniku pomiarowym. Rozkład pola elektrycznego na długości elektrody nie jest jednorodny, ale w przypadku gdy wysokość elektrody jest wielokrotnie większa od jej szerokości nieliniowości pola można pominąć (rys. 1b).



Rys. 1. Czujnik pojemnościowy: a) budowa czujnika, b) rozkład pola elektrycznego w obrębie elektrody

Fig. 1. Capacitance sensor: a) sensor structure, b) distribution of the electric field within the electrode

Niesymetryczny układ elektrod oraz niejednorodna struktura wewnątrz czujnika powoduje powstawanie niejednorodnego pola elektrycznego oraz pojawianie się różnego rodzaju impedancji i pojemności niepożądanych. Wszystko to sprawia, że poza błędami przypadkowymi powstaje błąd systematyczny który można skorygować. Całkowita mierzona impedancja składa się z trzech części:

- stałej impedancji czujnika
- impedancji pasozytniczej
- impedancji materiału w środku czujnika

Impedancja stała i pasozytnicza może być wyznaczona indywidualnie dla każdego czujnika z uwzględnieniem impedancji przetwornika wraz z przewodami.

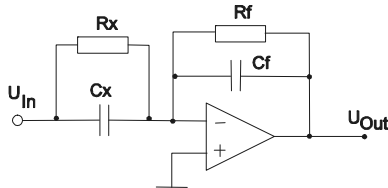
Obecnie jest stosowanych wiele rozwiązań przetworników zamieniających pojemność na napięcie [3]. Każdy z tych układów wprowadza pewne błędy pomiarowe, które można skorygować na drodze numerycznej.

2. Zasada pomiaru

Materiały badane takie jak ciecz niejednokrotnie są przewodnikami i podczas pomiaru tomografem pojemnościowym elektroda pomiarowa ma kontakt z materiałem wewnątrz czujnika poprzez odpowiedni izolator, którym najczęściej jest ścianka rurociągu. W takim przypadku bez względu na zastosowane rozwiązanie przetwornika, zawsze mierzy się składową pojemności i rezystancji. Na rysunku 2 przedstawiono schemat zastępczy układu w którym występuje równoległy model pojemności i rezystancji.

W praktyce rezystancja izolacji jest bardzo duża rzędu kilkudziesięciu megaomów. W przypadku pomiaru dużych pojemności można ją pominąć, jednak gdy mierzone pojemności są małe rzędu pF rezystancja dielektryka ma wpływ na wynik pomiaru.

Wartości rezystancji R_X oraz pojemności C_X zależą zarówno od rodzaju i wymiarów czujnika, jak i materiału z którego jest wykonany czujnik. Materiał znajdujący się wewnątrz czujnika nie tylko wpływa na pojemność mierzoną lecz również na rezystancję, które z kolei wpływają na wartość sygnału na wyjściu przetwornika.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego z równoległym modelem R_x i C_x
Fig. 2. Scheme of the measuring system with the parallel model of R_x i C_x

Wartość napięcia na wyjściu przetwornika zależy od wzmocnienia układu. Przykładowo dla układu z rysunku 2 zależność pomiędzy napięciem wyjściowym a wejściowym opisuje zależność:

$$U_{out} = -\frac{R_f}{R_x} \frac{1 + j\omega C_x R_x}{1 + j\omega C_f R_f} U_{in}, \quad (1)$$

Zmiana pojemności spowodowana zmianą struktury wynika ze zmiany stałej dielektrycznej ϵ_r materiału jaki znajduje się w środku czujnika. Przyjmując punkt odniesienia próżnię dla której stała dielektryczna $\epsilon_0 = 1$ pojemność mierzona przyjmie postać:

$$C_x = \epsilon_r C_o, \quad (2)$$

gdzie:

C_o – pojemność kondensatora próżniowego

$$C_o = k\epsilon_0 \frac{S_e}{s}, \quad (3)$$

gdzie:

ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni,
 S_e – pole powierzchni elektrody,
 s – odległość między elektrodami,
 k – współczynnik zależny od geometrycznej konfiguracji elektrod.

W praktyce nie istnieją materiały które byłyby idealnymi dielektrykami. Powoduje to, że wraz ze zmianą pojemności zmienia się również rezystancja pomiędzy elektrodami pomiarowymi. W pracy [4] zaproponowano przedstawienie stałej dielektrycznej w postaci zespolonej.

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'', \quad (4)$$

Z uwagi na zespolony charakter stałej dielektrycznej, która ulega zmianie wraz ze zmianami medium przepływającego przez czujnik, podczas pomiaru zmienia się zarówno amplituda jak i faza sygnału na wyjściu z przetwornika. Stąd do poprawnego określenia zmian pojemności konieczne jest wyznaczenia wartości R_X jak i C_X .

W celu wyznaczenia wartości rezystancji R_X stosuje się kilka różnych metod pomiaru wartości napięcia wyjściowego. Poniżej zostaną przedstawione trzy podstawowe metody pomiaru.

2.1. Pomiar amplitud dla dwóch sygnałów przesuniętych w fazie

Metodę tę jako pierwszy zaproponował Yang [5]. Polega ona na zmierzeniu dwóch napięć dla sygnału z modulacją fazy. W ten sposób otrzymuje się dwa różne napięcia wyjściowe, dla demodulacji fazy 0° oraz 90° :

$$U_{out \phi=0^\circ} = -\frac{R_f}{R_x} \frac{1 + \omega^2 C_x R_x C_f R_f}{1 + \omega^2 C_f^2 R_f^2} U_{in}, \quad (5)$$

$$U_{out \phi=90^\circ} = -\frac{R_f}{R_x} \frac{\omega(C_x R_x - C_f R_f)}{1 + \omega^2 C_f^2 R_f^2} U_{in}, \quad (6)$$

Rozwiązując układ równań (5) i (6) otrzymuje się wartości rezystancji R_X i pojemności C_X :

$$R_x = \frac{R_f U_{in}}{\omega C_f R_f U_{out \phi=90^\circ} - U_{out \phi=0^\circ}}, \quad (7)$$

$$C_x = \frac{\omega C_f R_f U_{out \phi=0^\circ} + U_{out \phi=90^\circ}}{\omega R_f U_{in}}, \quad (8)$$

2.2. Pomiar amplitudy i fazy

Jest to rozwiązanie zaproponowane przez Hartov-a [6]. Polega ono na wyznaczeniu modułu wzmocnienia na podstawie zależności:

$$\left| \frac{U_{out}}{U_{in}} \right| = \frac{R_f}{R_x} \sqrt{\frac{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2}{1 + \omega^2 C_f^2 R_f^2}}, \quad (9)$$

Kąt przesunięcia fazowego określa zależność:

$$\phi = \arctan(\omega C_x R_x) - \arctan(\omega C_f R_f), \quad (10)$$

Na podstawie zależności (9) i (10) można wyznaczyć wartości rezystancji R_X i pojemności C_X :

$$R_x = \frac{\sqrt{(1 + \omega^2 C_f^2 R_f^2)(1 - 2C_f R_f \tan \phi + \omega^2 \tan^2 \phi + C_f^2 R_f^2 (\tan^2 \phi + \omega^2) + 2\omega^2 C_f R_f \tan \phi)}}{U_{out}(1 + \omega^2 C_f^2 R_f^2)(1 - C_f R_f \tan \phi)} U_{in} R_f$$

$$C_x = \frac{U_{out}(1 + \omega^2 C_f^2 R_f^2)(C_f R_f - \tan \phi)}{\sqrt{(1 + \omega^2 C_f^2 R_f^2)(1 - 2C_f R_f \tan \phi + \omega^2 \tan^2 \phi + C_f^2 R_f^2 (\tan^2 \phi + \omega^2) + 2\omega^2 C_f R_f \tan \phi)} U_{in}}$$

Pomiar fazy odbywa się poprzez porównanie sygnałów z wyjścia przetwornika z sygnałem wejściowym. W większości przypadków zmiana fazy jest bardzo mała (mniejsza od jednego stopnia), z tego względu metoda ta nie jest zalecana.

2.3. Pomiar amplitudy dla dwóch różnych częstotliwości

Metoda ta jest bardzo wygodnym rozwiązaniem do zastosowania w rozwiązaniach technicznych [7]. Polega na tym, że pobudza się układ dwiema znacznie różniącymi się od siebie częstotliwościami f_1 i f_2 , i dla każdej oddzielnie mierzy się wartość napięcia wyjściowego. Wartości napięć wyjściowych są wyrażone wzorami:

$$U_{out f_i} = \sqrt{\frac{R_f^2 + (\omega_i C_x R_x R_f)^2}{R_x^2 + (\omega_i R_x C_f R_f)^2}} U_{in}, \quad (13)$$

$$U_{Out f_2} = \sqrt{\frac{R_f^2 + (\omega_2 C_X R_X R_f)^2}{R_X^2 + (\omega_2 R_X C_f R_f)^2}} U_{in}, \quad (14)$$

Rozwiązując układ równań (13) i (14) otrzymuje się wartości rezystancji R_X i pojemności C_X :

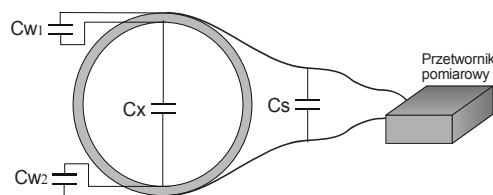
$$R_X = \frac{U_{in} R_f \sqrt{\omega_2^2 - \omega_1^2}}{\sqrt{(\omega_2 U_{Out f_1})^2 - (\omega_1 U_{Out f_2})^2} + (\omega_1 \omega_2 C_f R_f)^2 (U_{Out f_1}^2 - U_{Out f_2}^2)}, \quad (15)$$

$$C_X = \frac{\sqrt{U_{Out f_2}^2 (1 + \omega_2^2 C_f^2 R_f^2) - U_{Out f_2} (1 + \omega_1^2 C_f^2 R_f^2)}}{U_{in} R_f \sqrt{\omega_2^2 - \omega_1^2}}, \quad (16)$$

Zaletą przedstawionego rozwiązania jest to że nie wymaga ono generowania sygnałów zsynchronizowanych w fazie. Pomiar można przeprowadzić przy zastosowaniu jednego demodulatora i generatora z przestrajaną częstotliwością.

3. Wpływ pojemności układowych na funkcję przetwarzania

Na rysunku 3 przedstawiono układ pomiarowy dla typowego czujnika pojemnościowego z zaznaczonymi pojemnościami układowymi. Pojemność C_s jest sumą pojemności przewodów doprowadzających oraz pojemności wejściowej przetwornika. Pojemności C_{w1} i C_{w2} występują pomiędzy elektrodą pomiarową a wnętrzem czujnika pomiarowego.



Rys. 3. Układu pomiarowy z zaznaczonymi pojemnościami układowymi
Fig. 3. The measuring system with marked system capacitances

Ze względu na to, że w większości przypadków grubość ścianki rury jest niezmienna i jednorodna na całym obwodzie, stąd pojemność $C_{w1} = C_{w2}$. Zastępczą pojemność pochodzącą od ścianki rury można wyrazić następująco:

$$C_w = \frac{C_{w1} \cdot C_{w2}}{C_{w1} + C_{w2}} = \frac{C_{w1}}{2}, \quad (17)$$

Całkowita pojemność mierzona C_m przez układ pomiarowy składa się z pojemności medium znajdującego się wewnątrz czujnika pomiarowego C_x dołączonej do niej szeregowo pojemności ścianek czujnika C_w oraz dołączonej równolegle pojemności systemu pomiarowego C_s . Wartość pojemności C_x po uwzględnieniu powyższych pojemności wyraża następująca zależność:

$$C_x = \frac{(C_m - C_s) \cdot C_w}{C_w - C_m + C_s}, \quad (18)$$

W celu wyznaczenia wartości pojemności C_s i C_w , które są stałe i charakterystyczne dla danego układu pomiarowego, wykonano pomiary pojemności dla jednorodnego wypełnienia czujnika trzema różnymi materiałami o różnym i znanym współczynniku przenikalności elektrycznej. Na tej podstawie otrzymano układ równań z trzema niewiadomymi:

$$\begin{cases} C_{m1} = \frac{C_w \cdot \epsilon_{r1} C_0}{C_w + \epsilon_{r1} C_0} + C_s \\ C_{m2} = \frac{C_w \cdot \epsilon_{r2} C_0}{C_w + \epsilon_{r2} C_0} + C_s \\ C_{m3} = \frac{C_w \cdot \epsilon_{r3} C_0}{C_w + \epsilon_{r3} C_0} + C_s \end{cases} \quad (21)$$

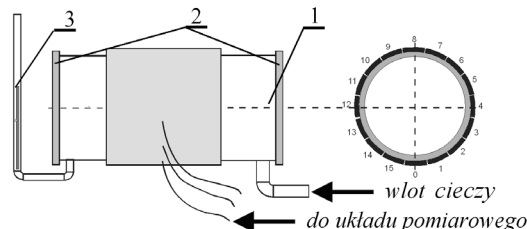
gdzie:

C_{m1} , C_{m2} , C_{m3} – oznaczają pojemności zmierzone odpowiednio dla wypełnienia czujnika materiałem o przenikalności elektrycznej ϵ_{r1} , ϵ_{r2} , ϵ_{r3} .

Rozwiązując ten układ równań uzyskano wartości pojemności C_0 , C_w i C_s .

4. Wyniki badań testowych

W celu wyznaczenia wartości pojemności układowych przeprowadzono pomiary pojemności dla różnego napełnienia czujnika (rys. 4). Badania eksperymentalne były prowadzone na czujniku 1 o średnicy wewnętrznej 80mm, a długość elektrod wynosiła 150mm, Czujnik został wypoziomowany. Carga czujnika jest zakończona kołnierzami 2 z zamontowanymi króćcami do napełniania. Na jednym z kołnierzy zamontowano szklany wziernik 3, z którego odczytywany jest poziom napełnienia czujnika. Elektrody pomiarowe wraz z elektronicznym układem pomiarowym są osłonięte metalowym ekranem.



Rys. 4. Czujnik badany
Fig. 4. The tested sensor

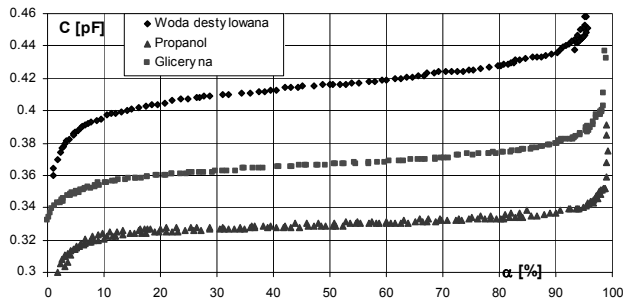
Wartość impedancji równoległej do pojemności R_x wyznaczono za pomocą mostka RLC typ MT4090 firmy MO-Tech. Zastosowana metoda wyznaczania rezystancji polega na pomiarze amplitudy i fazy sygnału dla częstotliwości 200kHz. Badania przeprowadzono dla czujnika całkowicie wypełnionego wodą, gliceryną, propanolem i powietrzem. Wyniki badań zamieszczono w tabeli 1.

Tab. 1. Wyniki pomiaru rezystancji i pojemności czujnika
Tab. 1. Results of measuring the sensor resistance and capacitance

Substancja	ϵ_r	C_m	R_x
		[pF]	[kΩ]
Woda (20°C)	80,2	1,643	27,32
Gliceryna	42,5	1,063	36,39
Propanol	19,9	0,56	36,39
Powietrze	1,000544	0,287	219,5

Przeprowadzono badania polegające na zmierzeniu wartości pojemności dla stopniowo napełnianego czujnika pomiarowego. Zastosowano czujnik o średnicy wewnętrznej 76mm, który stopniowo napełniano trzema rodzajami cieczy (wodą, gliceryną i propanolem). Na rysunku 5 przedstawiono zmiany pojemności dla różnego napełnienia czujnika cieczą. Charakterystyka czujnika jest nieliniowa, wynika to z specyfiki budowy czujnika. Dla bar-

dzo małego i bardzo dużego wypełnienia powietrze bądź ciecz pokrywa tylko pewną część powierzchni elektrody.



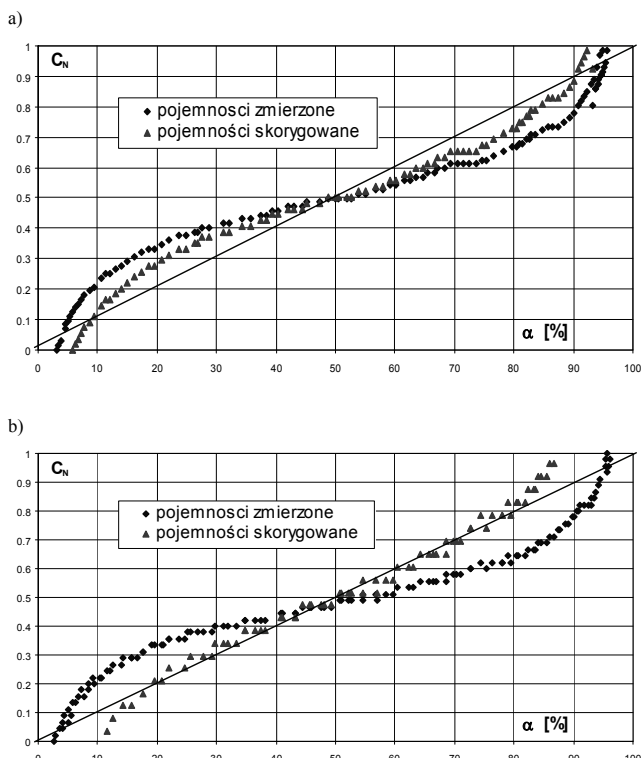
Rys. 5. Wyniki pomiaru zmian pojemności dla różnego wypełnienia czujnika cieczą

Fig. 5. Results of measuring the capacitance changes for different filling of the sensor

Dla tak zmierzonych pojemności C_m obliczono wartości pojemności wchodzących w skład czujnika pomiarowego C_w , C_0 i C_s . Wartości pojemności obliczono rozwiązując układ równań (21), a wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Obliczone wartości pojemności systemu pomiarowego
Tab. 2. Calculated measurement system capacitances

C_0	0,0296	pF
C_w	1,6	pF
C_s	0,142	pF



Rys. 6. Wyniki pomiaru pojemności po korekcie: a) dla wody destylowanej, b) dla gliceryny

Fig. 6. Results of measurements after correction: a) for distilled water, b) for glycerine

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki pomiaru zmian pojemności po dokonaniu korekty na podstawie wzoru (18). W celu umożliwienia porównania jaki wpływ ma omówiona korekta na wyniki pomiaru wartości pojemności zostały unormowane.

$$C_N = \frac{C_m - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}, \quad (22)$$

gdzie:

C_m – pojemność zmierzona [pF],
 C_{\min} – minimalna zmierzona pojemność [pF],
 C_{\max} – maksymalna zmierzona pojemność [pF]

5. Podsumowanie

Jak wynika z przedstawionych charakterystyk korekta pojemności układowych nie powoduje całkowitej linearyzacji wybranej funkcji przetwarzania czujnika pomiarowego. Jest to spowodowane nieliniowym rozkładem pola elektrycznego wewnątrz czujnika pomiarowego. Pojemności układowe należy uwzględnić indywidualnie dla każdego czujnika. Nie wymagają one korygowania podczas standardowej kalibracji czujnika. W praktyce korektę taką można zaprogramować w systemie pomiarowym, który najczęściej posiada komputer. Można uwzględnić powyższą metodę również podczas generowania mapy czułości, a co z tym się wiąże uzyskanie lepszych wyników w procesie rekonstrukcji obrazu.

6. Literatura

- [1] Dyakowski T., Jaenmeure L.F.C., Jaworski A.J.: Application of electrical tomography for gas-solids and liquid-solids flows – a review, Powder Technology, 2000, 112, 174-192J.
- [2] Ibrahim L.: Application of an Industrial Embedded Virtual Instrument System to Electrical Capacitance Tomographic Imaging, 4th International Symposium on Process Tomography, Warsaw, Poland 2006.
- [3] Rząsa M.R.: A New Transducer of Double Processing for Capacitive Tomography, Metrology and Measurement Systems, vol. XIV 2007, nr.2, 291-305.
- [4] Scaife B.K.P.: Principles of Dielectrics, Oxford Sciences Publications, Oxford 1998.
- [5] Yang W.Q.: Hardware design of electrical capacitance tomography system, Measurement Science and Technology, 7/1996 no 3, 225-232.
- [6] Hartov A., Mazzaresse R.A., Reiss F.R., Kerner T.E., Osterman K.S., Williams D.B., Paulson K.D.: A multichannel continuously selectable multifrequency electrical impedance spectroscopy measurement system, IEEE Trans. Biom. Eng., 2000 no 47, 49-57.
- [7] Georgakopoulos D., Yang W.Q., Waterfall R.C.: Best Value Design of Electrical Tomography Systems, 3rd World Congress on Industrial Process Tomography, Banff, Canada 2003.

otrzymano / received: 30.12.2009

przyjęto do druku / accepted: 02.07.2010

artykuł recenzowany