

Radosław Wajman\*, Henryk Fidos\*\*, Tomasz Jaworski\*, Robert Banasiak\*

## **Trójwymiarowy czujnik pojemnościowy dla systemu pomiarowego tomografii elektrycznej z elektrodami wewnętrznymi**

### **1. Wprowadzenie**

Przepływy dwufazowe typu gaz-ciecz stanowią istotną część wielu procesów przemysłowych [3, 5]. Powszechnym przykładem są procesy aeracji, które zachodzą w takich aplikacjach przemysłowych, jak reaktory chemiczne, procesy flotacji oraz urządzenia do napowietrzania wody i ścieków. Przykładem napowietrzania wody i ścieków są biologiczne oczyszczalnie ścieków. Istotną rolę w tych procesach odgrywają bakterie tlenowe (aerobowe), które rozwijają się tylko w obecności wolnego tlenu z powietrza atmosferycznego lub rozpuszczonego w wodzie, a stopień napowietrzania musi zawierać się w określonym przedziale, który zależy od temperatury wody.

Dwufazowe procesy przepływowe występują również w kolumnach barbotażowych. Ich przeznaczeniem jest realizacja procesów fizykochemicznych. Oddzielną grupę stanowią procesy, w których pęcherzyki gazu mogą powstawać w cieczy w wyniku reakcji chemicznych. Ma to miejsce np. w reaktorach chemicznych czy w procesach elektrolizy, w których faza gazowa jest produktem (często ubocznym) reakcji chemicznej. Wówczas pojawianie się pęcherzyków świadczy o jakości zachodzących przemian, a pomiar wielkości pęcherzyków stanowi informację o procesie. Istnieją też procesy, w których pojawienie się pęcherzyków jest niepożądane, np. wymienniki ciepła lub urządzenia grzewcze, gdzie pojawienie się gazu świadczy o niepożądanym wrzeniu cieczy i wymusza sygnalizację stanu awaryjnego.

Omówione powyżej rosnące potrzeby przemysłu inspirują do szukania nieskomplikowanej, relatywnie taniej, nieinwazyjnej i szybkiej metody diagnozowania procesów przepływów dwufazowych w rurociągach poziomych i pionowych. Znajomość charakterystyki oraz rodzaju przepływu gaz-ciecz jest bardzo istotna podczas projektowania instalacji przemysłowych oraz w procesie badań numerycznych w celu weryfikacji wyników. Stałe

---

\* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka, Łódź

\* Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

monitorowanie i diagnozowanie ewentualnych nieprawidłowości może dostarczyć istotnych informacji o ich przebiegu oraz pozwolić na ich ciągłe i automatyczne kontrolowanie i sterowanie. Obecnie nie dysponuje się prostą i taną w implementacji metodą pomiarową, która pozwalałaby w sposób zadowalający sklasyfikować rodzaj przepływu w całym jego zakresie w pewnej określonej objętości.

Jedną z możliwości diagnostycznych może być zastosowanie komputerowych technik tomograficznych w pomiarach wielkości nieelektrycznych [8, 9]. Wyznaczają one dziś nowe standardy w pomiarach dynamicznych. Proponowane rozwiązanie zakłada możliwość zastosowania systemu tomograficznego do pomiaru rozkładu koncentracji w takich obszarach przepływu jak przewężenia czy kolana, co do tej pory nie było realizowane za pomocą tomografii komputerowej, i stanowi całkowicie nowatorskie podejście.

Elektryczna tomografia pojemnościowa (*Electrical Capacitance Tomography* – ECT) jest techniką, która odnotowała już swoje sukcesy w badaniach mieszanin dwufazowych, w których każda z faz różni się przenikalnością dielektryczną [4]. Stan wiedzy dotyczący użycia technik tomograficznych do wizualizacji przepływów dwufazowych gaz-ciecz można znaleźć w materiałach konferencyjnych Światowych Kongresów Przemysłowej Tomografii Procesowej odbywających się nieprzerwanie co 2 lata, poczynając od Buxton w Anglii w 1999 (World Congress on Industrial Process Tomography). Dzięki znajomości relacji pomiędzy koncentracją  $\rho$  a przenikalnością dielektryczną  $\epsilon$  możliwe jest określenie przestrzennego rozkładu faz cieczy  $\rho_c(x, y, z)$  i gazu  $\rho_g(x, y, z)$ . To z kolei umożliwi identyfikację rodzaju przepływu oraz pomiar udziału poszczególnych faz w przepływie. Ten rodzaj techniki pomiarowej wydaje się z tego względu jak najbardziej słuszny w zastosowaniu do przepływów głównie z uwagi na jego szybkość i nieinwazyjność.

Typowy system pomiarowy ECT składa się z czujnika pojemnościowego, systemu pomiarowego oraz komputera PC. W dotychczasowych pracach [6, 11] dotyczących zastosowania techniki pojemnościowej do badania przepływów dwufazowych gaz-ciecz generowane były obrazy dwuwymiarowe struktur przepływów oraz udziału faz. Obraz dwuwymiarowy nie oddaje w pełni informacji o rozkładzie faz oraz o strukturze przepływu w obszarze pomiarowym. Powstaje on poprzez uśrednienie sygnału z całej elektrody pomiarowej, tworząc obraz przekroju poprzecznego zbiornika, w którym odbywa się badany proces. Zaniedbywany jest tu rozkład pola elektromagnetycznego w przestrzeni trójwymiarowej, a dodatkowo w przypadku długich elektrod uśrednienie to uniemożliwia dokonania dokładnego pomiaru. Dlatego stało się konieczne rozwinięcie tomografii pojemnościowej do wizualizacji trójwymiarowej obszaru czujnika pomiarowego [10]. Informacja o całej strukturze przepływu otrzymana poprzez wizualizację rozkładu materiału w postaci obrazu 3D oddaje w całości możliwości zastosowania techniki tomografii pojemnościowej. Ten rodzaj obrazowania wymaga odpowiedniego rozmieszczenia elektrod pomiarowych jak również stosownej procedury pomiarowej [1, 7, 9].

Zasada działania ECT opiera się na pomiarze zmiany pojemności elektrycznej pomiędzy okładzinami kondensatora w wyniku zmiany dielektryka znajdującego się pomiędzy

tymi okładzinami [4]. Dielektrykiem w tym przypadku jest ciecz wraz z pęcherzykami gazu. Koncepcja pomiarowa polega na zadaniu dodatniej wartości potencjału dla jednej z elektrod (elektroda nasycona), podczas gdy pozostałe są uziemiane. Wówczas następuje cykl zbierania wartości pomiarowych.

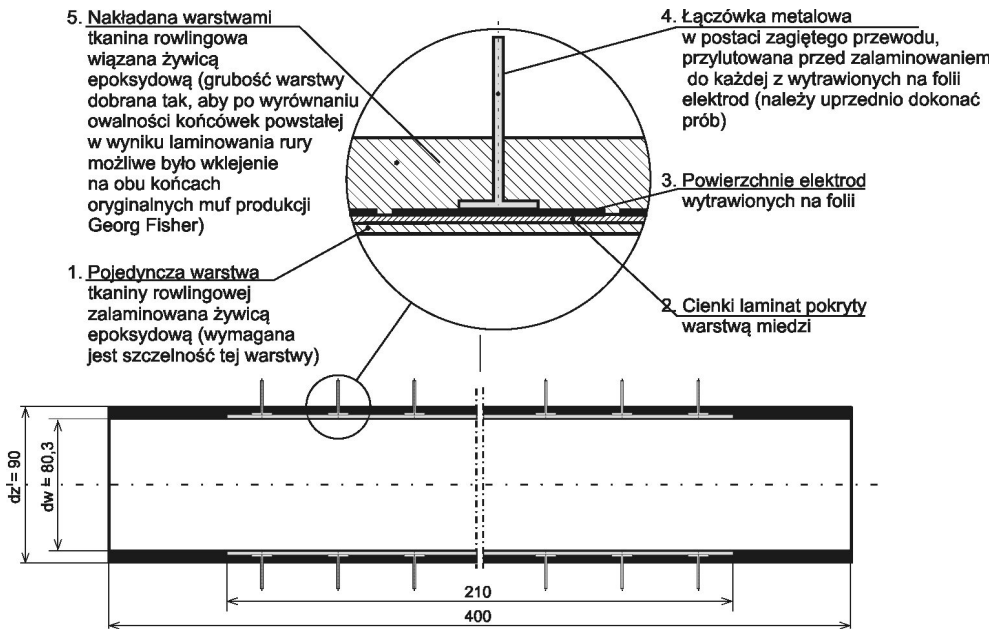
## 2. Budowa klasycznego czujnika pojemnościowego

Istotnym elementem tomograficznego stanowiska diagnostycznego ECT 3D jest czujnik pojemnościowy. Zbudowanie poprawnej struktury mechaniczno-elektrycznej czujnika pojemnościowego 3D jest zagadnieniem złożonym. Najczęściej rozkład elektrod, ich kształt i wymiary geometryczne są określane względem użytecznego zakresu czułości pomiarowego tomografu pojemnościowego oraz względem oczekiwanego zakresu stałych dielektrycznych badanego medium. Liczba elektrod w tomografii pojemnościowej 3D waha się na ogół od kilkunastu do kilkudziesięciu. Oczywiście większa liczba elektrod, oznaczająca więcej niezależnych pomiarów, jest korzystna ze względu na jakość rekonstruowanego obrazu. Liczba elektrod jest jednak ograniczona ze względu na określoną czułość urządzeń pomiarowych, która wymaga, aby mierzone wielkości i zmiany pojemności miały określoną minimalną wartość, co wymusza stosowanie elektrod z odpowiednio dużą powierzchnią. Dodatkowo pojemności między elektrodami są redukowane przez stosowanie elektrod ekranujących układ przed czynnikami zewnętrznymi i kształtujących pole elektryczne w pożądanym sposób. Wskutek tych ograniczeń pojemności między elektrodami są bardzo małe, na ogół znacznie mniejsze od 1 pF. Bardzo małe pojemności między elektrodami oraz istniejące pojemności pasożytnicze, wnoszone przykładowo przez okablowanie, sprawiają, że bezpośredni pomiar pojemności międzyelektrodowych jest bardzo trudny, obarczony dużym błędem i niepraktyczny. Zamiast tego rozwiązania powszechnie stosowaną metodą jest pomiar zmian pojemności, w którym bezwzględna wartość zmierzona pojemności  $C$  jest obarczona dużym błędem, ale różnice w mierzonych pojemnościach są mierzone z dużą dokładnością.

Czujnik ECT 3D jest strukturą mechaniczno-elektryczną zbudowaną najczęściej przy wykorzystaniu walcowego profilu zamkniętego. Kluczowymi elementami czujnika pojemnościowego mającymi wpływ na generowane w nim pole elektryczne są: układ elektrod pomiarowych oraz system ekranów. Najczęściej stosuje się ekranowanie zewnętrzne w postaci płaszcza miedzianego, uziemionego i odizolowanego od systemu elektrod, obejmującego swoim obszarem całą strefę pomiarową czujnika: elektrody i ekrany brzegowe. Zastosowanie ekranu zewnętrznego umożliwia skuteczne odseparowanie układu pomiarowego czujnika od zakłóceń zewnętrznych oraz ograniczenie obszaru występowania pola elektrycznego i zdolności detekcyjnych czujnika do obszaru profilu zamkniętego oraz jego bliskiego sąsiedztwa.

### 3. Konstrukcja czujnika wewnętrznego

W ramach przeprowadzonych badań autorzy opracowali trójwymiarowe czujniki nowego typu, w których okładki elektrod są zlokalizowane wewnątrz rurociągu i odizolowane elektrycznie od mieszaniny faz gaz-ciecz i są przeznaczone do badania cieczy o wysokiej wartości względnej przenikalności elektrycznej. Zaproponowana struktura wewnętrzna sensora pozwoliła na uzyskanie efektu głębszego wnikania pola elektrycznego w przestrzeń procesu, w którym występuje mieszanina substancji o właściwościach przewodzących i dielektrycznych. Efekt głębszego wnikania pola wpłynął korzystnie również na jednorodność przestrzennego rozkładu wrażliwości sondy.

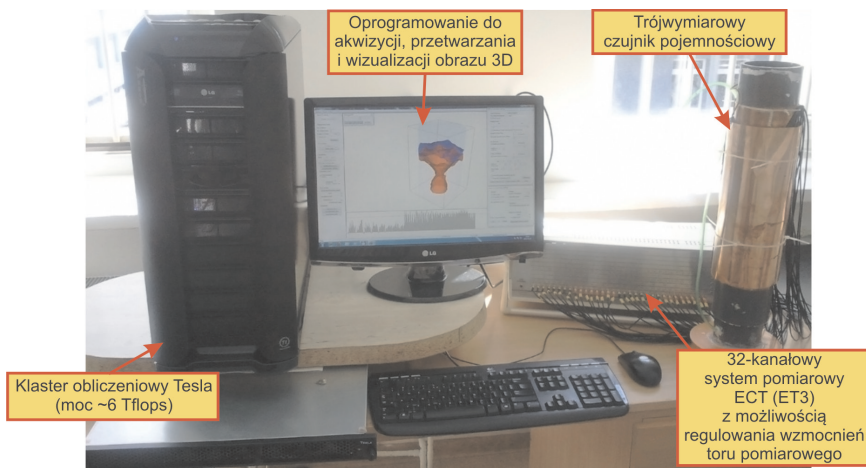


Rys. 1. Przekrój czujnika wzdłuż jego osi

Czujnik został wykonany z wykorzystaniem techniki wielokrotnego nawijania tkaniny rowlingowej laminowanej żywicą epoksydową. Pierwsza warstwa laminatu, złożona z pojedynczej warstwy tkaniny rowlingowej została nasączona żywicą epoksydową i nałożona na wykonane uprzednio „kopyto”, którym jest wałek z tworzywa. Świeżo położona pierwsza warstwa została owinięta laminatem foliowanym miedzią z wytrawionymi na powierzchni elektrodami. W dalszej kolejności zostały przylutowane wyprowadzenia elektrod i następnie kolejne warstwy tkaniny z żywicą zostały nałożone, aż do uzyskania średnicy zewnętrznej większej od 90 mm. W trakcie owijania w tkaninie wykonane zostały nacięcia dla wystających wyprowadzeń. Na rysunku 1 widoczny jest przekrój wzdłuż osi czujnika. Autorzy artykułu zdają sobie sprawę, że zaproponowana przez nich technika budowania czujnika jest dość skomplikowana, ale brane były pod uwagę dwa aspekty. Po pierwsze

czujnik będzie umieszczany na instalacji przepływu dwufazowego, gdzie w czasie pracy występują na tyle duże ciśnienia, że technika polegająca na przecięciu wzdłużnym rury, zamontowaniu w niej elektrod i zamknięciu (sklejeniu) wcześniej nie sprawdziła się. Dodatkowo autorzy dysponują instalacją badawczą posiadającą trzy różne średnice rurociągów 90, 63 i 40 mm. Wypracowana metoda jest uniwersalna dla wszystkich podanych średnic.

Poniżej na rysunku 2 prezentujemy stanowisko badawcze, które zostało wykorzystane do przeprowadzenia eksperymentów opisanych w dalszej części artykułu. Stanowisko składa się z czujnika pomiarowego, systemu tomografii pojemnościowej oraz komputera PC wyposażonego w 64 bitowy, czterordzeniowy mikroprocesor Intel Core i7, 2.8 GHz, 12 GB pamięci RAM wspieranego przez klaster obliczeniowy NVidia Tesla S1070 oraz NVidia Tesla C2070 (22 GB pamięci RAM).



Rys. 2. Fotografia stanowiska badawczego

#### 4. Analiza wrażliwościowa i rekonstrukcja obrazów

Technika rekonstrukcji trójwymiarowych obrazów tomograficznych [2, 12] realizowana jest w dwóch niezależnych etapach. Jest to przetwarzanie proste i odwrotne. To pierwsze związane jest z modelowaniem 3D pola elektrycznego np. metodą elementów skończonych. Podstawowym celem tego etapu jest wyznaczenie map wrażliwości czujnika ECT. Wartość wrażliwości w określonym obszarze czujnika definiowana jest jako zmiana wartości pojemności międzyelektrodowej w odpowiedzi na zmianę rozkładu przenikalności w tym konkretnym obszarze. Ta właściwość pola elektrycznego decyduje o tym, że przetwarzanie odwrotne jest źle postawione. Powstała macierz wrażliwości  $S$  jest najważniejszym elementem w deterministycznym przetwarzaniu odwrotnym. Jej zadaniem jest linearyzacja pola elektrycznego i wyznaczenie obrazu rozkładu przenikalności  $\hat{\epsilon}$  na podstawie wartości pomiarowych  $C$ .

$$\hat{\epsilon} = S^+ \cdot C \quad (1)$$

Z macierzą wrażliwości związanych jest wiele problemów numerycznych. Macierz ta nie jest macierzą kwadratową. Jej wymiary zależą od liczby niezależnych pomiarów oraz od znacząco większej liczby punktów obrazu. Stąd niemożliwe jest wyliczenie odwrotności  $\mathbf{S}^{-1}$  i w różnych znanych metodach rekonstrukcji obrazów stosowana jest jej pseudoodwrotność  $\mathbf{S}^+$ , a rozważany problem jest źle podokreślony.

W literaturze światowej [13] prezentowanych jest wiele deterministycznych metod rekonstrukcji obrazów dla ECT. Jedną z nich, najczęściej stosowaną jest liniowa projekcja wsteczna (*Linear Back-Projection* – LBP). Metoda jest zdecydowanie najszybsza, ale jednocześnie najmniej dokładna. Pseudoodwrotność macierzy wrażliwości wyznaczana jest poprzez jej transpozycję. Metoda ta ma też swoją implementację jako iteracyjna metoda Landwebera, która jest również szybka, a przez minimalizowanie błędu rekonstrukcji w trakcie licznych iteracji dokładniejsza. Metoda ta, do uzyskania końcowego obrazu, rozwiązuje następujące równanie:

$$\hat{\mathbf{e}}_{k+1} = \hat{\mathbf{e}}_k - \alpha \mathbf{S}^T (\mathbf{S} \hat{\mathbf{e}}_k - \mathbf{C}) \quad (2)$$

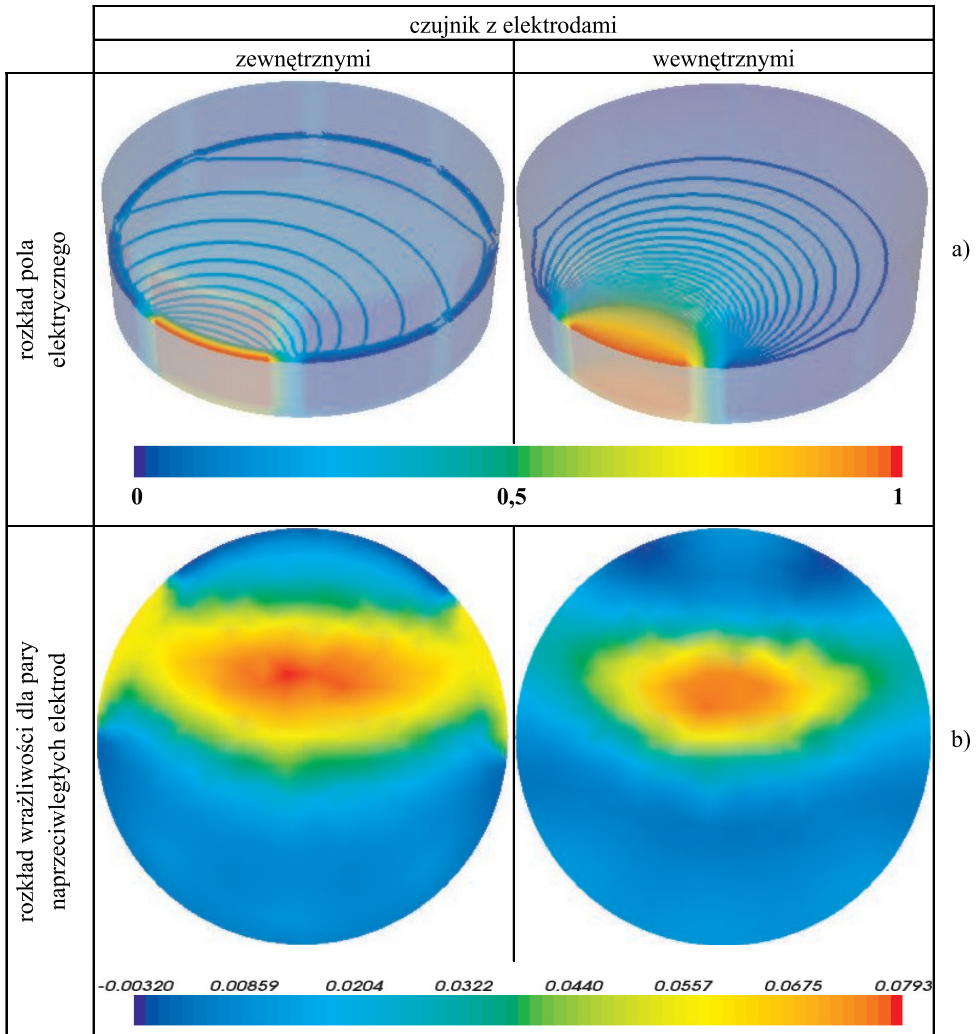
gdzie  $k$  jest numerem kolejnej iteracji,  $\alpha$  jest parametrem relaksacji sterującym prędkością zbieżności metody i obecnie jest powszechnie stosowana do wizualizacji dynamicznych procesów przepływowych.

## 5. Przykłady uzyskanych wyników dla czujników z elektrodami zewnętrznymi i wewnętrznymi

W ramach analizy wrażliwościowej trójwymiarowych czujników pojemnościowych z elektrodami wewnętrznymi i zewnętrznymi oraz analizy ich przydatności dla potrzeb badań dwufazowych przepływów typu gaz – ciecz przeprowadzony został szereg eksperymentów i symulacji. Należy tu podkreślić duże znaczenie procesu symulacji, zwłaszcza jeśli chodzi o dwa aspekty. Po pierwsze symulacja pozwoliła optymalnie dobrać geometrię oraz przestrzenny rozkład elektrod czujnika dedykowanego do badań cieczy o wysokiej wartości względnej przenikalności elektrycznej, np. wody. Na podstawie wyników symulacji opracowany został projekt czujnika. W następstwie tego model komputerowy czujnika posłużył w procesie symulacji do wyznaczenia macierzy wrażliwości. W ramach tego etapu poniżej prezentujemy wyniki rozkładów pól elektrycznych w zestawieniu dla obu czujników z elektrodami wewnętrznymi oraz zewnętrznymi (rys. 3a).

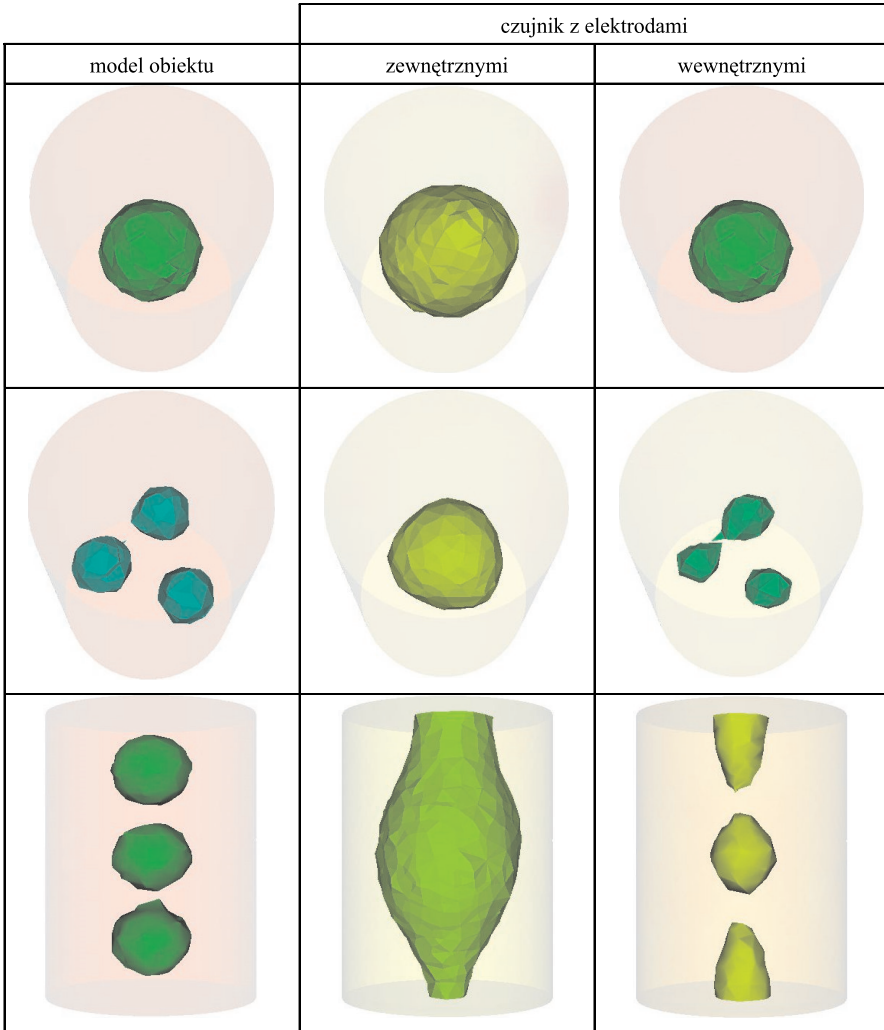
Prezentowane obrazy rozkładu potencjałów pola elektrycznego to przekroje poprzeczne prowadzone przez środek czujnika, a konkretnie przekroje przez jedną z ich środkowych pierścieni elektrod wykadrowane w taki sposób, aby szczególnie dobrze prezentowały rozkład pola elektrycznego przy ściankach czujników. W przypadku czujnika z elektrodami zewnętrznymi warto zwrócić uwagę na znikome wnikanie pola w środek czujnika. Pole elektryczne skupione jest głównie na obrzeżach rury wewnętrznej wykonanej z PCV o przenikalności znacznie mniejszej niż medium wypełniające przestrzeń czujnika, np. woda. Tego zjawiska w ogóle nie obserwujemy w przypadku czujnika z elektrodami wewnętrznymi również wypełnionego wodą. Pole elektryczne równomiernie rozkłada się w całej przestrzeni czujnika. Macierze wrażliwości dla czujników pojemnościowych wyli-

czane są bezpośrednio z energii pola. To sprawia, że opisane powyżej zjawisko znikomego wnikania pola elektrycznego charakterystycznego dla czujnika z elektrodami zewnętrznymi przedkłada się nie tylko na macierze wrażliwości, i w konsekwencji na proces rekonstrukcji obrazów, ale również i na same pomiary. Na rysunku 3b prezentujemy podobne przekroje poprzeczne wybranego rozkładu znormalizowanych wartości wrażliwości dla pary naprzeciwległych elektrod zlokalizowanych w środku czujnika. Tutaj również obserwujemy, że wrażliwość czujnika z elektrodami zewnętrznymi jest podwyższona przy jego ściankach, co w konsekwencji wpływa na obniżoną zdolność diagnostyczną w centrum przestrzeni czujnika.



**Rys. 3.** Przekroje poprzeczne z rozkładem pola elektrycznego (a) oraz ze znormalizowanym rozkładem wrażliwości dla pary naprzeciwległych elektrod (b)

Skala kolorów na wszystkich rysunkach (tj. 3a i 3b) oznacza wartości znormalizowane z zakresu 0 ~ 1.



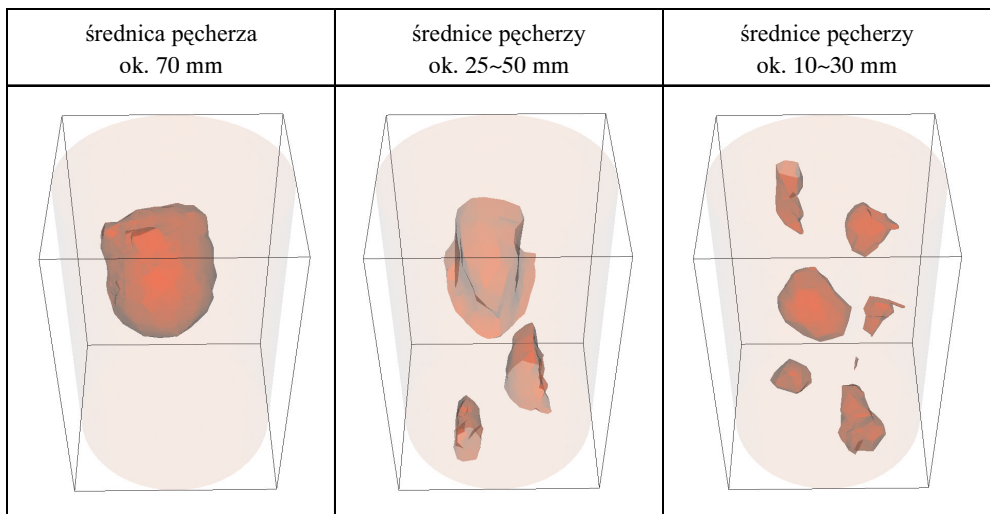
**Rys. 4.** Wybrany przykłady zrekonstruowanych trójwymiarowych obrazów tomograficznych dla czujników z elektrodami zewnętrznymi i wewnętrznymi przedstawiających pęcherze powietrza w wodzie

W dalszej części rozdziału zaprezentujemy uzyskane wyniki rekonstrukcji obrazów (rys. 4). Prezentowane obrazy zostały wyznaczone dla trzech różnych obiektów z użyciem obu czujników. W procesie rekonstrukcji obrazów zastosowana została technika iteracji Landwebera bez progowania. W każdym przypadku zrealizowanych zostało 100 iteracji ze



stałym parametrem relaksacji równym 0,1. Warto nadmienić, że dla każdego z czujników macierz wrażliwości oraz zagadnienie proste wyznaczane było za pomocą modelu komputerowego zgodnego z konstrukcją danego czujnikiem.

Na potrzeby kolejnych eksperymentów czujniki z elektrodami zewnętrznymi zostały wypełnione wodą, a w środku puszczane były pęcherze powietrza z różną intensywnością. Z uzyskanych pomiarów tomograficznych zostały zrekonstruowane trójwymiarowe obrazy podobnie techniką iteracji Landwebera bez progowania i zamieszczone na rysunku 5. W każdym przypadku zrealizowanych zostało 100 iteracji ze stałym parametrem relaksacji równym 0,1. Przedstawione wyniki zapewniają o poprawnym doborze czujników do zaistniałych warunków pomiarowych.



Rys. 5. Zrekonstruowane trójwymiarowe obrazy rzeczywistych pomiarów tomograficznych fragmentu przepływu pionowego gaz-ciecz

## 6. Podsumowanie

W ramach opisanych prac badawczych autorzy artykułu opracowali nową trójwymiarową tomograficzną technikę pomiarową dedykowaną do diagnozowania dwufazowych przepływów typu gaz-ciecz. Zaproponowana została nowatorska technologia wykonania trójwymiarowego czujnika pojemnościowego z elektrodami wewnętrznymi. W artykule wykazano, że czujnik charakteryzuje się zwiększoną zdolnością do rozróżniania faz w medium o dużej różnicy wartości względnej przenikalności elektrycznej, np. powietrze – woda, co w przypadku klasycznych rozwiązań z elektrodami umieszczanymi na zewnątrz było niemożliwe. W artykule przedstawione zostały wyniki badań przeprowadzonych z użyciem dwóch czujników: klasycznego z elektrodami zewnętrznymi oraz nowego z elektrodami

wewnętrzny. Uzyskane obrazy jednoznacznie wykazały poprawność zastosowanych rozwiązań. Tylko na obrazach zrekonstruowanych z danych pomiarowych pochodzących od sondy z elektrodami wewnętrznymi możliwa jest poprawna lokalizacja oraz wyodrębnienie pęcherzy powietrza w rurociągu wypełnionym wodą.

Dodatkowo, przeprowadzona została również szczegółowa analiza wrażliwości obu czujników. Prezentacja obrazów rozkładu pola elektrycznego oraz rozkładu wartości wrażliwości uwiarygodniła pożądane cechy charakterystyczne nowego czujnika oraz wykazała wady klasycznego rozwiązania w zastosowaniu do procesów przepływowych z medium o dużej różnicy względnej wartości przenikalności elektrycznej faz. Na obrazach pokazana została zwiększona wrażliwość nowego czujnika właśnie w jego centrum, co w następstwie zaowocowało jakościowo lepszymi tomogramami 3D. W przypadku klasycznych czujników, w których pomiędzy powierzchnią elektrod a cieczą jest rura PCV pole elektryczne zamiast wnikać w głąb czujnika rozchodzi się po ściankach rury dostarczając bezwartościowe pomiary pojemności elektrycznych.

## Podziękowania

*Prace opisane w ramach niniejszego artykułu są finansowane z rządowego projektu badawczego nr 4664/B/T02/2010/38.*

*Autorzy niniejszego artykułu dziękują również Panu mgr. Jakubowi Betiukowi za pomoc i cenne wskazówki przy projektowaniu i budowaniu czujników.*

## Literatura

- [1] Banasiak R., Wajman R., Soleimani M., *System tomografu pojemnościowego do nieinwazyjnej trójwymiarowej wizualizacji czasu rzeczywistego*. Zeszyty naukowe Automatyka (półrocznik AGH), 3, 2008, 871–878.
- [2] Banasiak R., Wajman R., Betiuk J., Soleimani M., *Feasibility study of dielectric permittivity inspection using a 3D capacitance CT method*. NDT&E International; 42 (4), 2009, 316–322.
- [3] Fidos H., *Hydrodynamika przepływu mieszanin wielofazowych ciecz nienewtonowska-gaz-cząstki ciała stałego w przewodach pionowych*. Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, 2001.
- [4] Olszewski T., Brzeski P., Mirkowski J., Plaskowski A., Smolik W., Szabatin R., *Modular Capacitance Tomograph*. Proc. 4th International Symposium on Process Tomography in Warsaw, 2006.
- [5] Płaskowski A., Beck M.S., Thorn R., Dyakowski T., *Imaging Industrial Flows – Applications of Electrical Process Tomography*. Institute of Physics Publishing, 1995.
- [6] Romankow P.G., Raszewska N.B., Frołow W.F., *Procesy wymiany masy w technologii chemicznej*. WNT, Warszawa 1980.
- [7] Rząsa M.R., *Problematyka wyznaczania podstawowych parametrów przepływów dwufazowych gaz-ciecz*. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej 2005.
- [8] Rząsa M.R., Błaszak-Gawlik A., Wajman R., *Pojemnościowe metody wyznaczania udziału objętościowego w badaniu przepływów dwufazowych gaz-ciecz*. Automatyka (półrocznik AGH), 3, 2008, 891–902.

- 
- [9] Soleimani M., Wang H., Li Y., Yang W., *A Comparative Study Of Three Dimensional Electrical Capacitance Tomography*. International Journal for Information Systems Sciences, vol. 3, No. 2, 2007.
- [10] Soleimani M., Mitchell C.N., Banasiak R., Wajman R., Adler A., *Four-dimensional electrical capacitance tomography imaging using experimental data*. Progress in Electromagnetics Research PIER, 90, 2009, 171–186.
- [11] Suschka J., Zieliński J., Głajcar E., *Urządzenia do natleniania ścieków*. Arkady, Warszawa 1979.
- [12] Wajman R., Banasiak R., Mazurkiewicz Ł., Dyakowski T., Sankowski D., *Spatial imaging with 3D capacitance measurements*. Meas. Sci. Technol., 17, 2006, 2113–2118.
- [13] Yang W.Q., Peng L.H., *Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography*. Meas. Sci. Technol., 14, 2003, R1–R13.