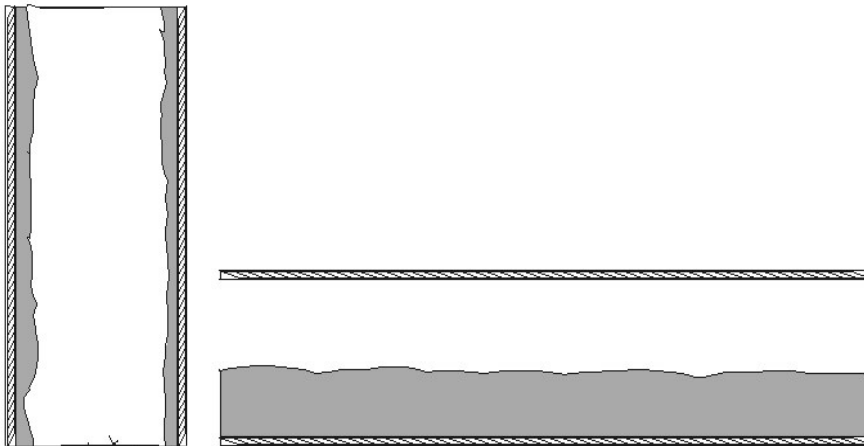


Mariusz R. Rząsa*, Radosław Wajman**

Dobór metody wyznaczania mapy czułości dla tomografu pojemnościowego o zwiększonej czułości przy ścianie

1. Wstęp

Obecny rozwój tomografii procesowej powoduje, że między innymi znajduje ona szerokie zastosowanie w badaniu przepływów dwufazowych. Różnorodności struktur występujących w tych przepływach [1] sprawiają, że trudno jest opracować metodę pomiarową umożliwiającą ich poprawną identyfikację w pełnym zakresie. W przypadku struktur rozwarstwionych dobre rezultaty uzyskuje się poprzez zastosowanie tomografii pojemnościowej. Na rysunku 1 przedstawiono dwie skrajnie różniące się od siebie struktury występujące w przepływie dwufazowym gaz-ciecz.

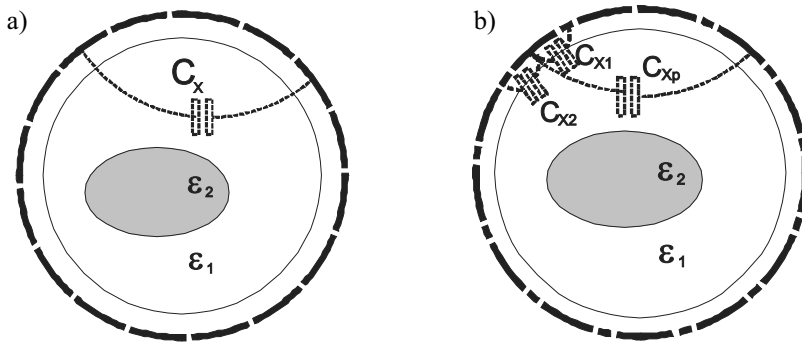


Rys. 1. Wybrane struktury przepływu gaz-ciecz w przepływie poziomym

* Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej, Politechnika Opolska

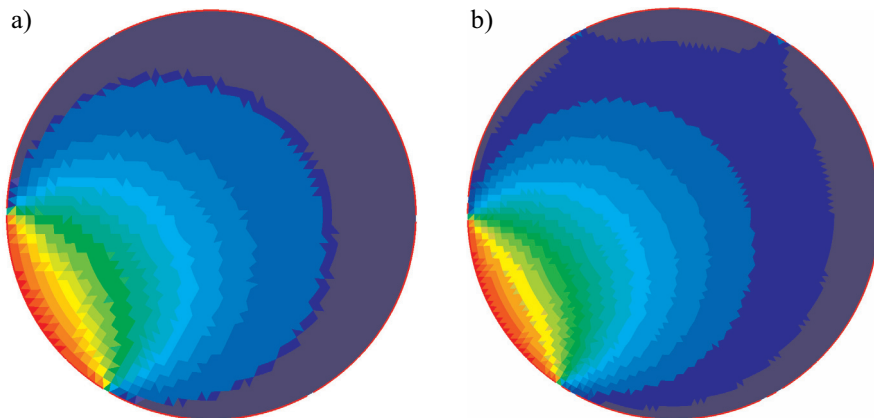
** Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

Ze względu na występowanie konieczności pomiaru cienkiej warstwy cieczy spływającej po ścianie konieczne było opracowanie czujnika o zwiększonej czułości przy ścianie [2]. Zwiększenie czułości przy ścianie uzyskano przez zastosowanie elektrod pomocniczych (rys. 2b). Elektrody te znajdują się pomiędzy elektrodami pomiarowymi, a ich szerokość jest wielokrotnie mniejsza od elektrod pomiarowych. Podczas pomiaru elektrody stabilizujące sąsiadujące z elektrodą pomiarową posiadają potencjał równy przeciwległej elektrodzie pomiarowej.



Rys. 2. Idea pomiaru pojemności: a) dla czujnika klasycznego;
b) dla czujnika o zwiększonej czułości przy ścianie

Ponieważ elektrody pomocnicze i pomiarowe znajdują się blisko siebie, to z rozkładu pola wynika że najwyższa czułość takiego układu jest blisko ścianki rurociągu, a to dodatkowo zwiększa czułość czujnika w tym regionie (rys. 3). Dobierając odpowiednią szerokość elektrody dodatkowej można uzyskać odpowiednią proporcję czułości w środku i na ścianie rurociągu.



Rys. 3. Rozkład pola: a) dla czujnika klasycznego;
b) dla czujnika o zwiększonej czułości przy ścianie

Nietypowe rozwiązanie czujnika pomiarowego spowodowało, że konieczne było przeprowadzenie badań eksperymentalnych mających na celu dobranie optymalnej metody wyznaczania map czułości w zastosowaniu do czujnika o zwiększonej czułości przy ścianie. W pracy przedstawiono autorską metodę, która została dostosowana do tego typu czujnika.

2. Metody wyznaczania mapy czułości

Znajomość mapy czułości jest kluczowym zagadnieniem w procesie rekonstrukcji obrazu. Wyznaczenie mapy czułości następuje na zasadzie znajomości własności fizycznych czujnika pomiarowego. Najdokładniejszymi metodami są metody oparte na danych pomiarowych, jednak wymagają one dużej precyzji i są bardzo czasochłonne. Z tego względu przeprowadzono badania nad metodą generowania map czułości na podstawie rozwiązywania równania rozkładu przenikalności elektrycznej. Równanie opisujące rozkład potencjału wewnątrz czujnika jest określane prawem Gaussa, a przy założeniu, że materiał wewnątrz czujnika pomiarowego jest jednorodny, upraszcza się ono do postaci płaskiej.

$$C = \frac{Q_{ex}}{V} = -\frac{1}{V} \oint_{\Gamma} \epsilon_r(x, y) \nabla \varphi(x, y) d\Gamma \quad (1)$$

gdzie:

- $\varphi(x, y)$ – rozkład potencjału elektrycznego w czujniku ECT,
- V – potencjał na elektrodzie nadawczej,
- Γ – powierzchnia tej elektrody.

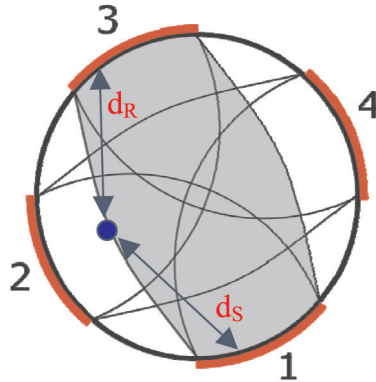
2.1. Wyznaczanie z zależności geometrycznych czujnika

Metoda ta opiera się na założeniu, że wartości czułości układu są stałe w całym obszarze oraz wartości te są takie same dla różnych obszarów czułości [3]. Na rysunku 4 przedstawiono uproszczoną wersję czteroelektrodowego czujnika ECT. Linie prowadzone pomiędzy elektrodami wyznaczają granice obszarów czułości dla różnych par elektrod. Kolorem ciemniejszym zaznaczono obszar pomiędzy elektrodami 1 i 3. Wartości czułości przyznawane są z zależności geometrycznych zależnie od odległości od elektrod stanowiących nadajnik i odbiornik. Wówczas czułość w danym punkcie może być wyznaczona za pomocą jednego z podanych poniżej równań [4].

$$\forall_{j \in \langle 1, N \rangle} w_{i,j} = \left(\frac{1}{d_S} + \frac{1}{d_R} \right)^2 \quad (2)$$

$$\forall_{j \in \langle 1, N \rangle} w_{i,j} = \frac{1}{(d_S + d_R)^2} \quad (3)$$

gdzie d_S , d_R to odległości punktu oznaczonego jako (i, j) odpowiednio od elektrody nadawczej i odbiorczej.



Rys. 4. Geometryczne granice obszarów czułości

Zaletą omawianej metody jest jej prostota i duża szybkość obliczeń. Aby uzyskać macierz czułości z zależności geometrycznych, nie trzeba stosować żadnych numerycznych metod analizy pola elektrycznego. Jednakże wadą jest tutaj nie najlepsza jakość rekonstruowanych obrazów.

2.2. Wyznaczanie za pomocą równania Poissona dla pola elektrycznego

Macierze czułości można również wyznaczyć rozwiązując równanie Poissona dla pola elektrycznego przy użyciu metod numerycznych [3, 5, 6]. Mając wyznaczony rozkład potencjałów wewnątrz układu czujnika, kolejne wartości czułości można wyliczyć według wzoru:

$$\forall_{i \in \langle 1, M \rangle} \quad \forall_{j \in \langle 1, N \rangle} \quad w_{i,j} = -\oint_{A_j} \frac{E_{S,i}}{V_S} \frac{E_{R,i}}{V_R} dA \quad (4)$$

gdzie $E_{S,i}$, $E_{R,i}$ to wartości natężenia pola elektrycznego w dla elementu j odpowiednio dla potencjału V_S , V_R na parze elektrod pomiarowych i .

2.3. Wyznaczanie za pomocą algorytmu śledzenia linii pola elektrycznego (EFL)

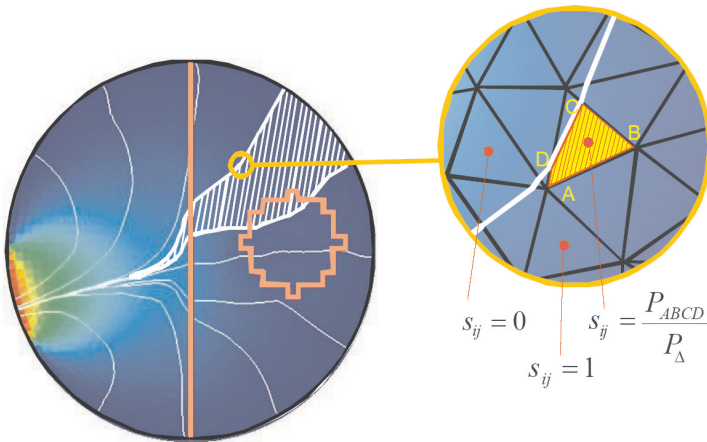
Ideę metody wyznaczania mapy czułości wzdłuż linii pola elektrycznego (EFL – *Electrical Field Lines*) przedstawiono na rysunku 5 [5]. Dla danej pary elektrod określone są dwie linie pola elektrycznego w obrębie krawędzi jednej z elektrod. Obszar ograniczony tymi liniami stanowi podstawę do wyznaczenia poszczególnych elementów mapy czułości.

Pole elektryczne wewnątrz czujnika opisane jest równaniem Laplace'a wynikającym z przekształcenia równania Poissona przy założeniu, że prawa strona równania jest równa zero. Przedstawione na rysunku 5 linie pola wyznaczono numerycznie, korzystając z meto-

dy elementów skończonych. Zaznaczone linie pola elektrycznego są wynikiem wyznaczenia całki po polu elektrycznym (tu $\sigma(l)$ oznacza ścieżkę linii pola elektrycznego, która jest zdefiniowana następującym równaniem):

$$\frac{d}{dl} \sigma(l) = -\frac{E}{|E|} = -\frac{\nabla\varphi(x, y)}{|\nabla\varphi(x, y)|} \quad (5)$$

gdzie l oznacza długość łuku $\sigma(l)$.



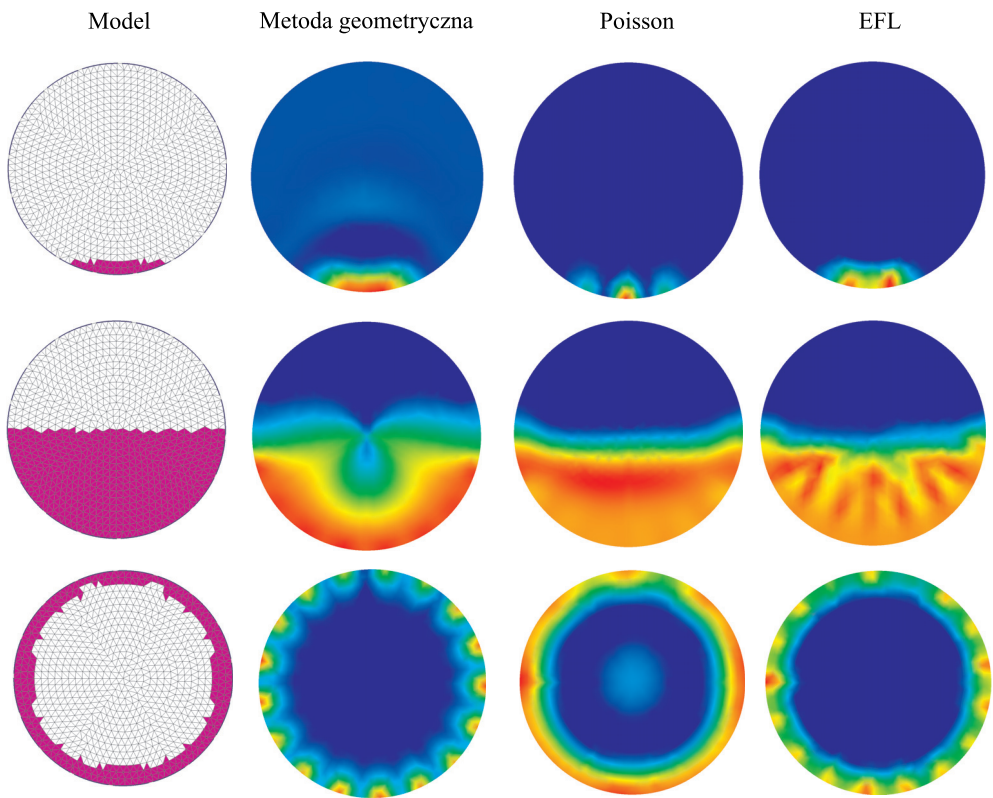
Rys. 5. Idea metody opartej na algorytmie śledzenia wzdłuż linii pola

Pochodna wyznacza kierunek gradientu potencjału. Dla n elektrod wyznaczonych jest $(2 - n)$ linii pola elektrycznego. Każda z linii zaczyna się od szczeliny międzyelektrodowych przy danej elektrodzie uziemionej i prowadzi aż do środka elektrody nadawczej. Zatem cały obszar jest podzielony na $(1 - n)$ różnych podobszarów. Dla tak wyznaczonych obszarów, wyznacza się mapę czułości dla każdego obszaru oddzielnie. Należy tu zaznaczyć, że bieg linii zazwyczaj jest zakłócany poprzez rozkład materiału, a ich kształt jest funkcją rozkładu przenikalności.

3. Rekonstrukcja obrazów

Uwzględniając różnorodności metod wyznaczania map czułości, przeprowadzono badania testowe, mające na celu określenie optymalnej metody wyznaczania map czułości dla typowych struktur występujących podczas przepływu dwufazowych. Najbardziej istotnymi strukturami, dla których ma zastosowanie tomografia pojemnościowa, to przepływy korkowe i struktury rozwarstwione, struktury pęcherzykowe ze względu na uśrednianie wartości pojemności na długości elektrody są strukturami źle wykrywalnymi. Niejednokrotnie

wielkość pęcherzyków jest mniejsza od wielkości elektrody, co powoduje niewykrywalność pojedynczych pęcherzyków. Badania przeprowadzono za pomocą trzech modeli przybliżających struktury rozwarstwione oraz za pomocą różnych metod rekonstrukcji obrazu celem wybrania optymalnego rozwiązania do badania przepływów dwufazowych gaz-ciecz. Testy przeprowadzono dla dwóch typowych metod rekonstrukcji obrazu, metody LBP i iteracyjnej metody IBP przy 20 iteracjach dla każdego z obrazów. Rekonstrukcji obrazu dokonano z wykorzystaniem map czułości wygenerowanych z wykorzystaniem algorytmów: opartych na zależnościach geometrycznych, rozwiązaniu równania Poissona oraz algorytmu opartego na analizie wzdłuż linii pola EFL.



Rys. 6. Obrazy po rekonstrukcji metodą IBP (20 iteracji) dla różnych metod generowania map czułości

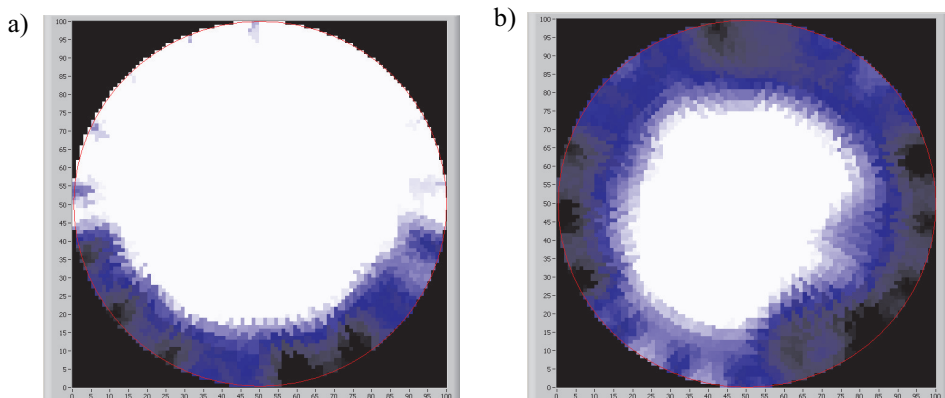
Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono na rysunku 6. Struktury rozwarstwione są poprawnie rekonstruowane z zastosowaniem wszystkich omawianych metod generowania map czułości. W przypadku wypełnienia pół na pół w metodzie geometrycznej dostrzegalna jest pewna nadmiarowość, z kolei w dwóch pozostałych jest niedomiar.

Większe rozbieżności w jakości obrazu obserwuje się dla struktury pierścieniowej. W metodzie opartej na rozwiązaniu równania Poissona dostrzegalny jest wyraźny brak granicy faz.

Z uwagi na znacznie krótszy czas rekonstrukcji obrazu przy zastosowaniu nieiteracyjnych metod rekonstrukcji, np. LBP, najbardziej optymalnym rozwiązaniem jest generowanie map czułości za pomocą metody EFL. Pozwala ona na uzyskiwanie poprawnych wyników rekonstrukcji bez konieczności stosowania metod iteracyjnych. W kolejnych rozważaniach to właśnie ta metoda będzie brana pod uwagę. Natomiast w przypadku konieczności bardzo dokładnego określenia struktury przepływu zasadne jest zastosowanie mapy czułości generowanej za pomocą równania Poissona z zastosowaniem już iteracyjnych metod rekonstrukcji.

4. Implementacja przy badaniu procesów przepływowych

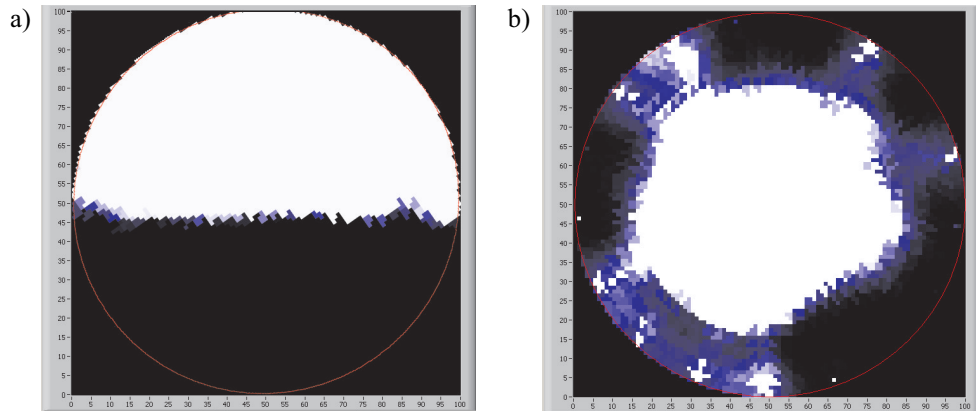
W celu porównania wpływu rodzaju czujnika na jakość rekonstruowanego obrazu przeprowadzono badania testowe polegające na zmierzeniu dwóch struktur występujących podczas przepływu dwufazowego. Zmierzono przepływ poziomy rozwarstwiony oraz przepływ pierścieniowy w ruchu mieszaniny w dół. Wyniki rekonstrukcji przy zastosowaniu nie-iteracyjnej metody LBP przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Przykłady rekonstrukcji obrazu dla dwóch struktur z wykorzystaniem metody LBP dla czujnika o zwiększonej czułości przy ścianie

W rekonstruowanym obrazie dla przepływu rozwarstwowanego widać wyraźne nadmier powietrza w środku czujnika. Dla struktury pierścieniowej obraz jest jak najbardziej poprawny.

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki rekonstrukcji z zastosowaniem iteracyjnej metody IBP dla 20 iteracji. Spowodowało to znaczną poprawę obrazu dla przepływu rozwarstwowanego.



Rys. 8. Przykłady rekonstrukcji obrazu dla dwóch struktur z wykorzystaniem metody IBP dla czujnika o zwiększonej czułości przy ścianie

5. Podsumowanie

Przeprowadzając badania z nowym rozwiązaniem czujnika pomiarowego, stwierdzono wzrost czułości w obrębie ścianek rurociągu. Wyznaczona została skuteczna metoda wyliczania map czułości dla czujnika. Metoda bazująca na liniach sił pola elektrycznego dostarcza dobrych obrazów przy wykorzystaniu nawet nieskomplikowanych nie-iteracyjnych metod rekonstrukcji. Przeprowadzone badania poprawiają w znacznym stopniu jakość rekonstrukcji obrazów dla obiektów umieszczonych przy ścianie zachowując ciągły charakter pracy aplikacji. Uwzględniając fizykę zjawisk związanych z przepływami dwufazowymi gaz-ciecz jest to bardzo pożądanym efektem.

Literatura

- [1] Orzechowski Z., *Przepływy dwufazowe jednowymiarowe ustalone adiabaticznie*. PWN, Warszawa, 1990.
- [2] Rzaśa M.R., Wajman R., Grudzien K., Romanowski A., *The Capacitive Tomograph of Higher Sensitivity Near the Sensor Wall*. 5th World Congress on Industrial Process Tomography, Bergen Norway, 2007.
- [3] Isaksen Ø., *A review of reconstruction techniques for capacitance tomography*. Measurement Science and Technology, Institute of Physics Publishing, 7, 1996, 325–337.
- [4] Reinecke N., Mewes D., *Recent developments and industrial/research applications capacitance tomography*. Measurement Science and Technology, Institute of Physics Publishing, 7, No 3, 1996, 233–46, ISSN 0957-0233.
- [5] Wajman R., Mazurkiewicz Ł., Sankowski D., *The Sensitivity Map in the Image Reconstruction Process for Electrical Capacitance Tomography*. 3th International Symposium on Process Tomography in Poland 2004, Łódź, 9th–10th September 2004.
- [6] Banasiak R., *Algorytmy wizualizacji 3D w przemysłowych systemach elektrycznej tomografii procesowej*. Politechnika Łódzka, Łódź, 2007 (Rozprawa doktorska).