

Mariusz R. Rząsa*, Radosław Wajman**

Nowa koncepcja czujnika tomografu pojemnościowego do badania przeciwprądowych przepływów gaz-ciecz***

1. Wprowadzenie

W pracy przedstawiono rozwiązanie tomografu pojemnościowego w zastosowaniu do badania przepływu dwufazowego gaz-ciecz w rurociągu pionowym i poziomym. Zagadnienie zostało ograniczone do przepływów przeciwprądowych, to znaczy, gdy gaz i ciecz poruszają się w przeciwnych kierunkach. Przepływy takie występują w urządzeniach, w których zachodzi wymiana ciepła i masy. W przepływie przeciwprądowym w rurociągu pionowym występuje struktura pierścieniowa (rys. 1a). Ze względu na niewielką grubość warstwy przyściennej w stosunku do średnicy rurociągu konieczne jest zastosowanie czujnika o dużej czułości, a tym samym odpowiedniego przetwornika pomiarowego. W rurociągu poziomym w przepływie przeciwprądowym występuje struktura rozwarstwiona (rys. 1b), a zatem system pomiarowy powinien uwzględniać poprawne mierzenie również tego typu struktur.

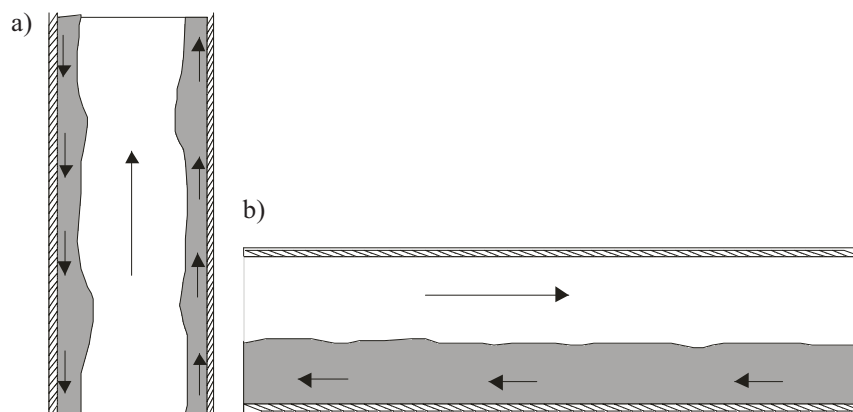
Tomografia pojemnościowa polega na pomiarze zmian pojemności pomiędzy kombinacją połączeń elektrod w czujniku pomiarowym. Metoda pojemnościowa jest często stosowana ze względu na prostotę konstrukcji i dużą uniwersalność. Dobre rezultaty uzyskuje się w zastosowaniu powyższej metody do obiektów o rozmiarach rzędu kilku do kilkudziesięciu centymetrów. W przypadku pomiaru małych zmian pojemności pojawia się problem odpowiedniego wywzorcowania czujnika pomiarowego. Wpływ na czułość ma zarówno budowa czujnika pomiarowego, jak i budowa przetwornika pomiarowego.

Tomografia pojemnościowa polega na pomiarze zmian pojemności pomiędzy kombinacją połączeń elektrod w czujniku pomiarowym (rys. 2). Pojemność ta zależy od przenikalności elektrycznej wewnątrz czujnika. Przenikalność elektryczna dla cieczy i gazu jest różna, dlatego może ona służyć jako identyfikator obecności pęcherzyków. Pojawienie się pęcherzyka gazu w przekroju pomiarowym powoduje zmianę przenikalności elektrycznej ϵ , będącej wartością wypadkową przenikalności gazu i cieczy, co z kolei pociąga za sobą zmianę pojemności (Dyakowski *et al.* 1998, Kühn 1998).

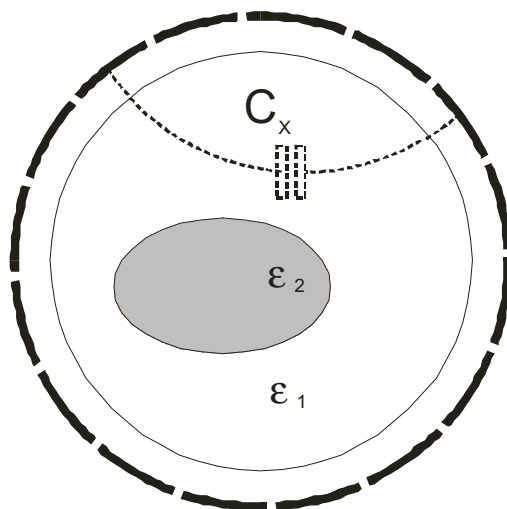
* Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej, Politechnika Opolska; mrz@po.opole.pl

** Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka; rwajman@kis.p.lodz.pl

*** Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005/2006 jako projekt badawczy 3 T10C 014 28



Rys. 1. Struktury przepływu w przeciwnieprądowym przepływie gaz-ciecz:
a) przepływ pionowy; b) przepływ poziomy

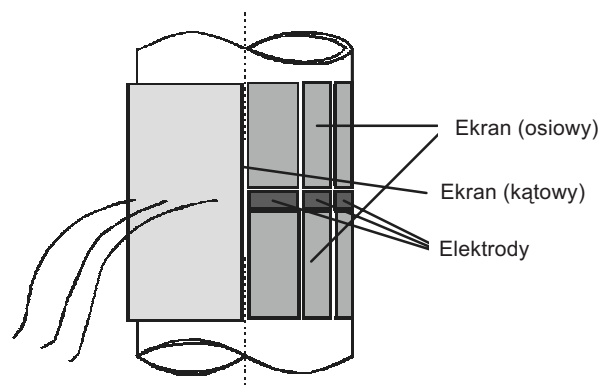


Rys. 2. Idea tomografu pojemnościowego

2. Czujnik pomiarowy

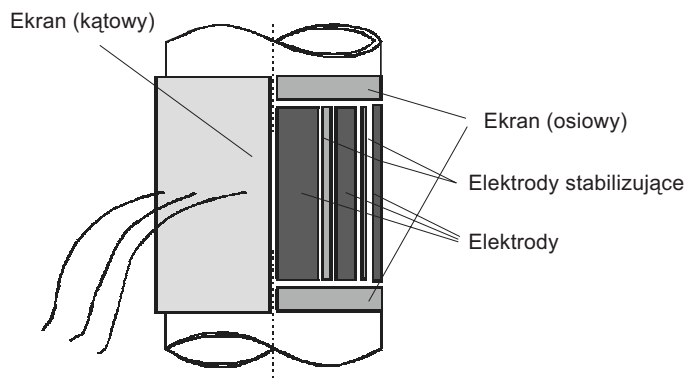
Typowe rozwiązanie czujnika pomiarowego przedstawiono na rysunku 3 (Xie *et al.* 1992). W przedstawionym rozwiązaniu elektrody pomiarowe są wielokrotnie mniejsze od średnicy czujnika. Biorąc pod uwagę, że pole elektrostatyczne jest trójwymiarowe, powodowałyby to niejednorodności pola w obrębie górnej i dolnej krawędzi elektrody. W celu wyeliminowania tego zjawiska, wprowadza się ekrany osiowe, które swoim rozmiarem na

obwodzie odpowiadają elektrodom pomiarowym, lecz są znacznie dłuższe od elektrod pomiarowych. Dzięki temu w obrębie elektrod pomiarowych redukuje się efekt zaginania linii pola w kierunku osiowym, co powoduje zgodność z założeniem, że pole pomiędzy elektrodami można traktować jak dwuwymiarowe.



Rys. 3. Budowa typowego czujnika pojemnościowego

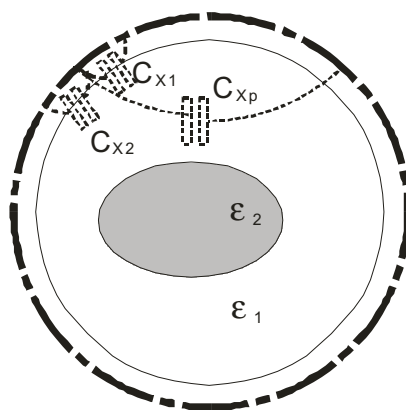
Biorąc pod uwagę, że dla przepływów dwufazowych gaz-ciecz w przepływie przeciwprądowym, bardzo istotne jest uzyskanie dużej czułości przy ścianie, opracowano odmienny czujnik, który umożliwia wykrywanie cienkiej warstwy cieczy przy ścianie rurociągu oraz zapewnia poprawne pomiary dla struktur rozwarstwionych (rys. 1b). Budowę tego czujnika przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Budowa czujnika pojemnościowego o dużej czułości przy ścianie rury

Czujnik składa się z dużej liczby elektrod pomiarowych (w modelowym czujniku zastosowano 16 elektrod przy średnicy wewnętrznej rurociągu 150 mm). Zastosowanie dużej liczby elektrod wpływa na zwiększenie rozdzielczości czujnika, jednakże powoduje, że zwiększa się kąt, pod którym zwrócone są do siebie sąsiadujące elektrody, co zmniejsza czu-

łość czujnika. Ponadto zwiększenie liczby elektrod powoduje zmniejszenie ich powierzchni, co powoduje przesunięcie zakresu pomiarowego w kierunku małych pojemności. Czynniki te spowodowały, że konieczne było zwiększenie długości elektrod (przyjęto elektrody równe jednej średnicy rurociągu). Przy tak długich elektrodach zrezygnowano z elektrod wyrównujących pole, jak to jest często stosowane w typowych czujnikach pojemnościowych. Nierównomierność pola na końcach elektrod nie wpływa znacząco na wyniki pomiaru.



Rys. 5. Rozkład pojemności w czujniku o dużej czułości przy ścianie

Aby dodatkowo poprawić czułość pomiarową, przy ścianie czujnika, w celu wykrywania cienkiej warstwy cieczy w przepływie pierścieniowym i jednocześnie poprawić stabilność pomiaru, zastosowano elektrody stabilizujące. Elektrody te znajdują się pomiędzy elektrodami pomiarowymi, a ich szerokość jest wielokrotnie mniejsza od elektrod pomiarowych. Eksperymentalnie stwierdzono, że dobre rezultaty uzyskuje się dla elektrod rzędu 15–20 razy węższych od elektrod pomiarowych. Podczas pomiaru elektrody stabilizujące sąsiadujące z elektrodą pomiarową posiadają potencjał dziesięciokrotnie mniejszy niż przeciwna elektroda pomiarowa. W związku z tym pojemność mierzona jest równa wartości zastępczej trzech pojemności składowych C_{Xp} , C_{X1} , C_{X2} (rys. 5).

$$C_X = C_{X1} + C_{X2} + C_{Xp} \quad (1)$$

3. Numeryczna analiza pola elektrycznego

W procesie iteracyjnego tworzenia obrazu na podstawie danych pomiarowych konieczne jest określenie zdolności zbieżności uzyskiwanych obrazów, w poszczególnych krokach iteracyjnych, do rzeczywistego rozkładu parametrów materiału wewnątrz procesu. W każdym kroku iteracyjnym następuje ocena poprzedniego rozwiązania i na tej podstawie dobierane są parametry algorytmu tworzenia obrazu. Taki schemat działania prowadzi do znacznego polepszenia końcowych wyników. Ponieważ nie można bezpośrednio porównać rzeczywistego rozkładu obrazowanych parametrów procesu z utworzonym obrazem, na jego podstawie wylicza się, za pomocą zagadnienia prostego, wektor wartości pomiarowych, któ-

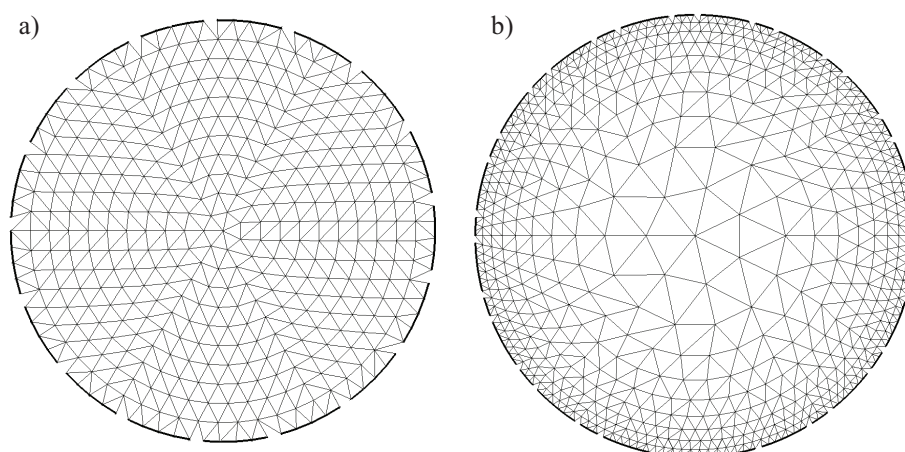
ry to jest porównywany z rzeczywistymi wartościami pomiarowymi. Rozwiązanie zadania dla elektrycznej tomografii pojemnościowej polega zatem na określeniu wektora pojemności na podstawie danego rozkładu przenikalności – jest to symulacja pomiaru. Dodatkowo utrudnia to zadanie fakt, że problem pola elektrycznego jest zagadnieniem trójwymiarowym (Wajman *et al.* 2005) i nie powinien być sprowadzany do płaszczyzny, jeżeli badany materiał nie jest jednorodny. W czujnikach cylindrycznych, przy dostatecznie długich elektrodach, wprowadza się dwuwymiarową aproksymację. Jest ona ważna tylko przy założeniu, że rozkład materiału na pewnej wysokości (równej długości elektrod) jest niezmienny.

3.1. Siatka elementów skończonych

Autorzy artykułu zaimplementowali metodę elementów skończonych oraz własny algorytm generowania siatki do podziału powierzchni czujnika. Decyzja o wyborze właściwej siatki powinna być poprzedzona rozważeniem poniższych założeń.

- Prezentowany czujnik tomografu pojemnościowego charakteryzuje się zwiększoną czułością przy jego krawędziach. To właśnie tam oczekiwane są najistotniejsze zmiany w badanym procesie. Siatka powinna być zatem zagęszczona w sąsiedztwie elektrod.
- Potrzebna jest jak najlepsza aproksymacja specyficznej geometrii elektrod.
- Proces tworzenia obrazu jest obciążony błędem rozwiązania ściśle podokreślonego układu liniowych równań. Zwiększanie liczby elementów obrazu znacząco pogorszy jego końcową jakość.
- W trakcie trwania procesu pomiarowego w środku układu czujnika nie zachodzą praktycznie żadne zmiany. Tutaj siatka może być znacznie rzadsza.

Na rysunku 6b przedstawiono zastosowaną do badań siatkę elementów skończonych. Siatka ta w znaczący sposób umożliwia realizację przedstawionych problemów.



Rys. 6. Siatki elementów skończonych zastosowana w obliczeniach dla czujnika:
a) z rysunku 3; b) z rysunku 4

3.2. Rozkład pola elektrycznego wewnątrz czujnika

Pole elektryczne wewnątrz układu czujnika tomografu pojemnościowego rozwiązywane jest w oparciu o równanie Laplace'a (Sikora 2000).

$$\nabla^2 \varphi = \nabla \cdot (\epsilon(\vec{x}) \nabla \varphi(\vec{x}, t)) = 0 \quad (2)$$

gdzie:

- ∇^2 – operator Laplace'a,
- $\varphi(\vec{x}, t)$ – rozkład potencjału elektrycznego,
- $\epsilon(\vec{x})$ – rozkład stałych dielektrycznych.

Wektor $\vec{x}$ jednoznacznie określa punkt na rozpatrywanej płaszczyźnie przekroju poprzecznego czujnika. Standardowo systemy tomografii pojemnościowej są zasilane prądem przemiennym o stałej częstotliwości. Ponieważ częstotliwość prądu jest dostatecznie mała, problem pola elektrycznego może być rozważany jako quasi-statyczny, a istniejące pole magnetyczne może zostać pominięte. Jeżeli potencjał elektryczny $\varphi(\vec{x})$ jest znany, wyindukowany ładunek Q_R na elektrodzie odbiorczej R można wyznaczyć, stosując prawo Gaussa

$$Q_R = \oiint_{S_R} \epsilon \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (3)$$

gdzie:

- S – powierzchnia elektrody,
- $\vec{E}$ – wektor pola elektrycznego.

Proces obliczania pojemności jest wynikiem przeprowadzenia trzykrotnej symulacji dla różnych warunków granicznych. Raz na elektrodzie pomiarowej definiowany jest warunek graniczny jako $\phi = V/10$, a następnie w kolejnych przypadkach warunek graniczny jako $\phi = V$ na elektrodach stabilizujących przy elektrodzie odbiorczej. Reszta elektrod jest uziemiona. Ostateczna pojemność danej pary pomiarowej elektrod jest dana zależnością

$$C_X = \frac{Q_{XpR}}{U_{XpR}} + \frac{Q_{X1R}}{U_{X1R}} + \frac{Q_{X2R}}{U_{X2R}} \quad (4)$$

Napięcia elektryczne U_{XpR} , U_{X1R} i U_{X2R} oznaczają potencjał pomiędzy elektrodami odbiorczą R i odpowiednio elektrodami pomiarową Xp i stabilizującymi $X1$ i $X2$, na których wygenerowały się ładunki odpowiednio U_{XpR} , U_{X1R} oraz U_{X2R} . Mieszany warunek graniczny, gdzie ustawiana jest wartość potencjału na danej elektrodzie, nazywa się warunkiem Dirichleta. Dodatkowo na zewnątrz obszaru ograniczonego powierzchnią elektrod ustanawia się warunki Neumanna jako $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$, gdzie n jest wektorem normalnym skierowanym na zewnątrz.

Ze względu na występowanie w czujniku pomiarowym dodatkowych elektrod stabilizujących, zagadnienie rozkładu pola należy rozwiązać trzykrotnie (dla dwóch elektrod stabilizujących i jednej pomiarowej). Wartość potencjału w każdym węźle siatki jest sumą wartości wyliczonych dla każdej z elektrod.

4. Zagadnienie odwrotne – tworzenie obrazu

Rozwiązanie zagadnienia odwrotnego (Lionheart 2001, Yang *et al.* 2003) polega na odnalezieniu obrazu rozkładu wartości przenikalności elektrycznej $\hat{\epsilon}$ wewnątrz czujnika mając do dyspozycji wektor pomiarowy pojemności C_M , zgodnie z zależnością

$$g : C \mapsto \hat{\epsilon} \quad (5)$$

Rozwiązanie zagadnienia odwrotnego sprowadza się do rozwiązania poniższej zależności

$$\hat{\epsilon} = S^+ \cdot C_M \quad (6)$$

gdzie S – macierz czułości.

Jest to zadanie trudne, gdyż macierz S nie jest kwadratowa, a układ równań (6) jest układem podokreślonym i zamiast macierzy odwrotnej S^{-1} , **która nie istnieje**, szuka się macierzy pseudoodwrotnej S^+ . Związane jest to z tym, że liczba niewiadomych N (liczba punktów obrazu – pikseli) jest zazwyczaj dużo większa od liczby równań M (liczby pomiarów), przez co istnieje więcej niż jedno rozwiązanie.

4.1. Macierz czułości

Podstawowym zadaniem stawianym macierzy czułości w procesie tworzenia obrazu jest działanie w kierunku zmniejszania błędu końcowego obrazu (Isaksen 1995, Sikora 2000). Macierz S zawiera M wektorów zwanych mapami czułości. Każda taka mapa definiuje czułość określonego punktu przestrzeni pomiarowej (N -punktowego obrazu) jako ścisłą zależność zmiany pojemności (ładunku wydzielonego na elektrodzie) powstałej w wyniku zmiany rozkładu przenikalności w rozważanym punkcie. W wyniku jej zastosowania, nieliniowy proces tworzenia obrazów zastępowany jest układem M liniowych równań z N niewiadomymi. Dla potrzeb artykułu autorzy wybrali metodę wyznaczania macierzy czułości opartą na analizie wektora pola elektrycznego. Dla klasycznej geometrii czujnika tomografu pojemnościowego, mając wyznaczony rozkład potencjałów wewnątrz układu czujnika, kolejne wartości czułości można znaleźć według poniższego wzoru

$$S_{i(sr)j} = - \int_{A_j} \frac{E_{s,j}}{V_s} \frac{E_{r,j}}{V_r} dj \quad (7)$$

gdzie:

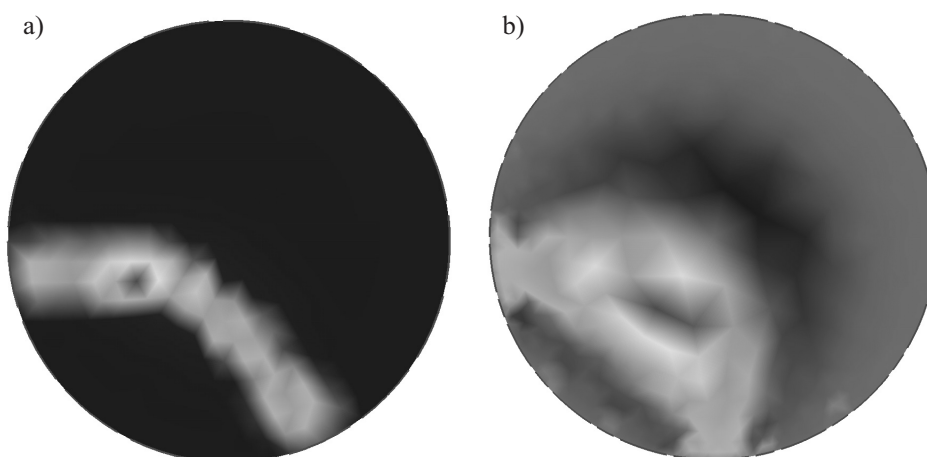
- $E_{s,j}$ $E_{r,j}$ – wartości natężenia pola elektrycznego w punkcie j , gdy na elektrodach s i r były ustawione wartości potencjałów odpowiednio V_s i V_r ;
- A_j – obszar punktu j ; para elektrod s i r dostarcza wartość pomiarową oznaczaną symbolem i .

Należy zaznaczyć, że w przypadku rozważanym na potrzeby niniejszego artykułu, na mierzoną pojemność składają się dodatkowo dwie wartości pojemności liczone dla dodatkowych cienkich elektrod umieszczonych przy każdej elektrodzie uziemionej. Zatem w tym przypadku wynikowa czułość układu powinna być wyznaczana jako suma trzech rozkładów czułości traktowanych dla każdej składowej pojemności oddzielnie zgodnie ze wzorem

$$S_X = S_{X1} + S_{X2} + S_{Xp} \quad (8)$$

gdzie indeksy $X1$, $X2$ i Xp są zgodne ze wzorem (2).

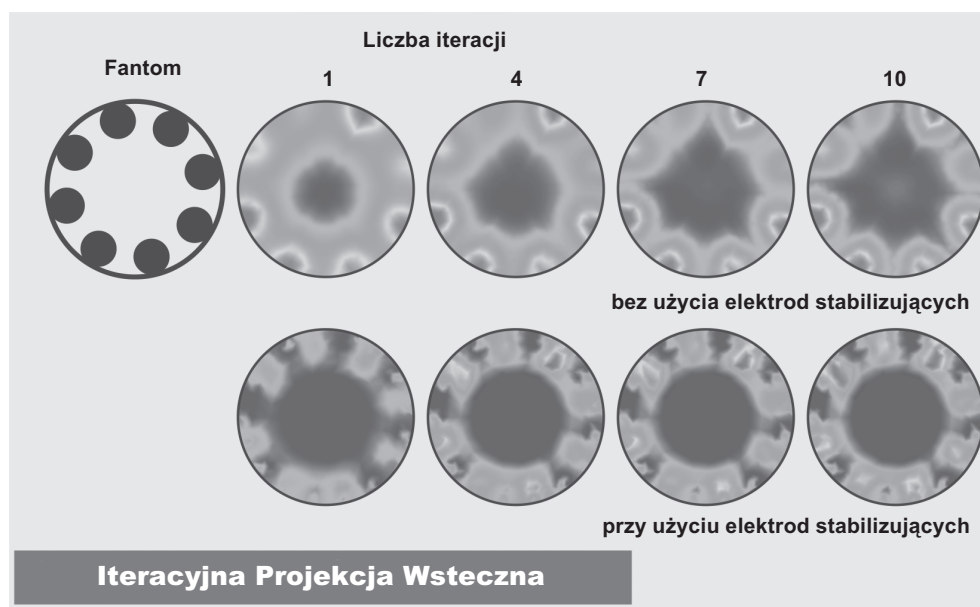
Na rysunku 7 przedstawiono wyniki obliczeń macierzy czułości dla czujnika w układzie klasycznym (rys. 3) oraz z elektrodami stabilizującymi (rys. 4). Jak wynika z przeprowadzonej analizy, dla czujnika z elektrodami stabilizującymi obserwuje się zwiększenie czułości w obrębie elektrody nadawczej, co zwiększa czułość układu przy ścianie rurociągu.



Rys. 7. Mapa czułości dla czujnika: a) z rysunku 3; b) z rysunku 4

4.2. Wyniki

W celu sprawdzenia poprawności przyjętej koncepcji przeprowadzono badania testowe. Jako model testowy użyty został fantom rozkładu przenikalności elektrycznej przedstawiony na rysunku 8. Do konstrukcji obrazu użyta została popularna metoda iteracyjnej projekcji wstecznej (Lionheart 2001, Yang *et al.* 2003). Proces konstrukcji obrazów został przeprowadzony dla dwóch różnych koncepcji zasilania elektrod układu czujnika ECT. W pierwszym przypadku nie były używane elektrody stabilizujące. W drugim przypadku na elektrodach stabilizujących przy elektrodzie odbiorczej dla danej pary pomiarowej ustawiany był potencjał dodatni. Rysunek 8 przedstawia wyniki przeprowadzonego eksperymentu. Są to obrazy uzyskane po 1, 4, 7 i 10 iteracjach dla dwóch przedstawionych koncepcji pomiarowych.



Rys. 8. Wyniki badań testowych

5. Podsumowanie

Przeprowadzając badania z nowym rozwiązaniem czujnika pomiarowego, stwierdzono wzrost czułości w obrębie ścianek rurociągu. Poprawia to w znacznym stopniu jakość rekonstrukcji obrazu dla obiektów umieszczonych przy ścianie. Uwzględniając fizykę zjawisk związanych z przepływami dwufazowymi gaz-ciecz, jest to bardzo pożądaný efekt.

Literatura

- [1] Dyakowski T., Mann R., Williams R.A.: *Application of Electrical Tomography for Multi-phase Flow Measurements*. Third International Conference on Multiphase Flow, Lyon France, 8–12 June 1998
- [2] Hartevelde W.K., van Halderen P.A., Mudde R.F., van den Bleek C.M., van den Akker H.E.A., Scarlett B.: *A Fast Active Differentiator Capacitance Transducer for Electrical Capacitance Tomography*. 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, Greater Manchester, 14–17 April 1999, 564–417
- [3] Isaksen R. 1996: *A review of reconstruction techniques for capacitance tomography*; Meas. Sci. Technol., Vol. 7, str. 325–337.
- [4] Kühn F.T., Schouten J.C., Mudde R.F., van den Bleek C.M., Scarlett B.: *Analysis of chaos in fluidization using electrical capacitance tomography*. Measurement Science and Technology, Vol. 7, 1996, 361–368
- [5] Kühn F.T.: *Electrical Capacitance Tomography*. Hamburg, 1998
- [6] Lionheart W.R.B.: *Reconstruction algorithms for permittivity and conductivity imaging*. 2nd World Congress on Industrial Process Tomography” Hannover, Germany, 2001, 4–11

- [7] Loser T, Petritsch G., Mewes D.: *Investigation of the Two-Phase Countercurrent Flow In Structured Packings Using Capacitance Tomography*. 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, Greater Manchester, 1999, 354–361
- [8] Płaskowski A., Beck M.S., Thorn R., Dyakowski T.: *Imaging Industrial Flows Application of Electrical Process Tomography*. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, Bristol, 1995
- [9] Sikora J.: *Algorytmy numeryczne w tomografii impedancyjnej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2000
- [10] Rząsa M.R.: *Application of the capacity-to-frequency converter in the capacitance tomography*. 4th World Congress on Industrial Process Tomography, Aizu, Japan, 2005, 75–81
- [10] Wajman R., Mazurkiewicz Ł., Banasiak R., Sankowski D.: *Numerical Calculation of Forward Problem for 3D Capacitance Tomography*. 4th World Congress on Industrial Process Tomography, Aizu, Japan, 2005, 588–593
- [12] Wang B., Huang Z., Li H.: *A Novel Capacitance Measurement Circuit for Electrical Capacitance Tomography*. 2nd World Congress on Industrial Process Tomography, Hannover, Germany, 29–31 August 2001, 580–585
- [13] Williams R.A., Beck M.S.: *Process Tomography Principles, Techniques and Applications*. Butterworth-Heinemann, Manchester, 1995
- [14] Xie C.G., Huang S.M., Hoyle B.S., Thorn R., Lenn C., Snowden D., Beck M.S.: *Electrical Capacitance Tomography for Flow Imaging*. System model for development of image reconstruction algorithms and primary sensors; IEE Proceedings-G, No 139, February 1992, 89–98
- [15] Yang W.Q.: *Advance in AC-based Capacitance Tomography System*. 2nd World Congress on Industrial Process Tomography, Hannover, Germany, 29–31 August 2001, 557–564
- [16] Yang W.Q., Peng L.: *Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography*. Meas. Sci. Technol., Vol. 14, No. 1, 2003, R1–R13