

Robert Banasiak*, Radosław Wajman*, Łukasz Mazurkiewicz*

Rozwój czujników w trójwymiarowej tomografii pojemnościowej

1. Wprowadzenie

W pracy przedstawione jest zagadnienie trójwymiarowej elektrycznej tomografii pojemnościowej. Większość procesów przemysłowych przebiega w przestrzeni trójwymiarowej i naturalnym dążeniem w tomografii procesowej powinno być przejście z dwu- do trójwymiarowej wizualizacji procesu. W klasycznych dwuwymiarowych rozwiązaniach, konstrukcja czujnika tomografii pojemnościowej z reguły oparta jest na elektrodach umieszczonych regularnie dookoła badanego procesu. Gama możliwości i pomysłów konstrukcji trójwymiarowych czujników jest znacznie szersza. W artykule przedstawiono kilka pomysłów różnych geometrii czujnika i koncepcji elektrod.

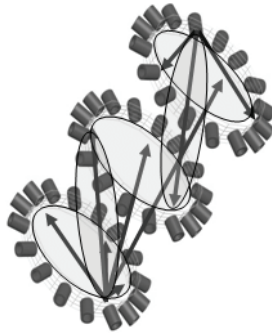
Zjawisko występowania pola elektrycznego, będące jednym z najpopularniejszych zjawisk fizycznych wykorzystywanych w tomografii procesowej, ma przestrzenny charakter. Cecha ta, uznawana w klasycznej dwuwymiarowej tomografii pojemnościowej ECT (*Electrical Capacitance Tomography*) za wadę, w przypadku rozwiązań trójwymiarowych jest zaletą, którą należy odpowiednio uwypuklić poprzez konstrukcję czujników, a konkretnie poprzez odpowiednią lokalizację i różną geometrię elektrod pomiarowych. Przeprowadzone badania jednoznacznie wykazują, że zastosowane różne koncepcje czujników, lepiej bądź gorzej nadają się do różnych zastosowań przemysłowych. Zaproponowane rozwiązania skupiły moc pola elektrycznego w najbardziej strategicznych obszarach badanego procesu lepiej uwidaczniając specyfikę tego procesu [3].

2. Idea trójwymiarowej tomografii pojemnościowej

Klasyczna koncepcja tomografii oparta jest na otrzymywaniu serii pomiarów z czujników, które są rozmieszczone na wybranej płaszczyźnie pomiarowej, a następnie na utworzeniu obrazu, który reprezentuje rozkład danego materiału na tej płaszczyźnie. Ta sama koncepcja pomiarowa może być wykorzystana w celu bezpośredniego otrzymania rozkładu

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

danego materiału w przestrzeni. Na jednej elektrodzie ustawiany jest dodatni potencjał (elektroda nadawcza), podczas gdy reszta elektrod jest uziemiana (elektrody odbiorcze). Wszystkie elektrody są sukcesywnie przełączane jako elektrody nadawcze. Dlatego dla n -elektrodowego czujnika uzyskuje się $M = n(n-1)/2$ niezależnych pomiarów (rys. 1).



Rys. 1. Koncepcja pomiarowa trójwymiarowej tomografii pojemnościowej

Pole elektryczne wewnątrz czujnika jest opisane równaniem Laplace'a (przy założeniu braku ładunków przestrzennych) [4, 2, 5]

$$\nabla \cdot [\varepsilon(x, y, z) \nabla \phi(x, y, z)] = 0 \quad (1)$$

gdzie:

$\varepsilon(x, y, z)$ – przenikalność elektryczna,

$\phi(x, y, z)$ – potencjał elektryczny,

(x, y, z) – współrzędne określające jednoznacznie punkt w przestrzeni 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 $\phi(x, y, z)$ jest znany, wyindukowany ładunek Q na elektrodzie odbiorczej r może zostać wyznaczony przy wykorzystaniu prawa Gaussa

$$Q_{sr} = \oint_{S_r} \varepsilon \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (2)$$

gdzie:

S – powierzchnia elektrody,

$\vec{E}$ – wektor pola elektrycznego.

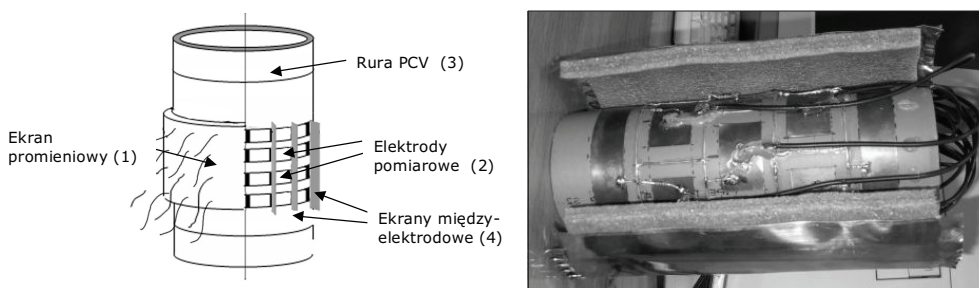
Na każdej elektrodzie zdefiniowane zostały warunki graniczne jako $\phi = V$. Tylko elektroda nadawcza uzyskuje dodatnią wartość potencjału. Reszta elektrod jest uziemiona. Pojemność danej pary elektrod jest dana zależnością

$$C_{sr} = \frac{Q_{sr}}{U_{sr}} \quad (3)$$

gdzie U_{sr} – wartość napięcia elektrycznego pomiędzy elektrodami nadawczą s i odbiorczą r .

2.1. Budowa czujnika ECT 2D i 3D

Podstawowa struktura czujnika w przypadku trójwymiarowej tomografii pojemnościowej jest analogiczna do przypadku klasycznej tomografii pojemnościowej – czujnik zbudowany jest z zestawu elektrod cechujących się relatywnie dużym obszarem aktywnym. Różnica tkwi tylko w ich rozłożeniu względem przestrzeni czujnika. Zazwyczaj czujnik pomiarowy (rys. 2) wykonywany jest z rury aluminiowej (1), do której wnętrza wklejane są na piance montażowej elektrody (2), które dodatkowo zabezpieczane są przed wpływem cieczy dielektrykiem (3) wykonanym z rury PCV. Zewnętrzna rura aluminiowa stanowi jednocześnie ekran dla elektrod i jest połączona z masą układu. Ekran ten zabezpiecza czujnik przed wpływem zmieniających się warunków na zewnątrz kolumny. Środkowy rząd elektrod stanowi właściwy czujnik pomiarowy. Montowane są również elektrody oddzielające elektrody pomiarowe (4), które stanowią ekran dla zakłóceń od strony przepływu. Pozwalają na prowadzenie pomiarów w jednakowych warunkach elektrycznych. Powłoka dielektryczna zabezpiecza elektrody przed wpływem korozyjnym cieczy i zapewnia utrzymanie stałych warunków pracy tomografu.



Rys. 2. Budowa czujnika tomografu pojemnościowego

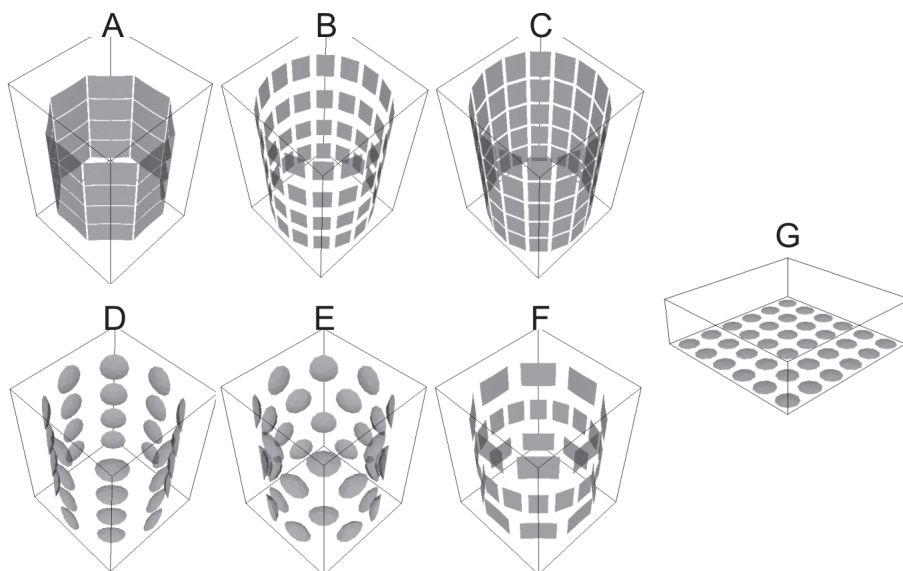
3. Przegląd geometrii czujników 3D ECT

Warunkiem zbudowania prawidłowej geometrii czujnika jest to, by identyczny obiekt lub niejednorodność materiału wewnątrz każdego woksela – elementu przestrzeni 3D – generowały unikalny rozkład informacji pomiarowej w znormalizowanym (o długości jednostkowej) wektorze pomiarów. Oznacza to, że dla każdego położenia przestrzennego obiektu lub niejednorodności materiału musi istnieć inny wektor pomiarowy. Warunek ten można spełnić poprzez dokładne otoczenie interesującej nas przestrzeni elektrodami po-

miarowymi. Jako ocenę czujników w kontekście ich zdolności do rozpoznawania lokalizacji obiektu lub niejednorodności materiału Autorzy zaproponowali „współczynnik niepowtarzalności” zdefiniowany w [3].

Autorzy artykułu, mając na uwadze wszystkie wspomniane aspekty, zaproponowali różne koncepcje konstrukcji czujników trójwymiarowej tomografii pojemnościowej (rys. 3).

Zaprezentowane na rysunku 3 czujniki różnią się rozkładem elektrod wokół badanego procesu oraz liczbą elektrod. W pierwszych trzech przypadkach (A, B, i C) elektrody rozmieszczone są regularnie. Każda z płaszczyzn zawiera tę samą liczbę elektrod pomiarowych. Czujniki te różnią się ilością elektrod. Ponadto w trzecim czujniku (C) dodana została piąta płaszczyzna z elektrodami. Zastosowano tu elektrody o kształcie prostokątów. Czwarty i piąty czujnik (D i E) to elektrody o kształcie okręgów. Cechą charakterystyczną tych czujników jest umieszczenie elektrod na powierzchni sfer wnikających do wnętrza cylindrycznej powierzchni czujnika. Uzyskuje się wtedy większą dokładność pomiarową elektrod sąsiadujących, które w klasycznych rozwiązaniach tworzą kondensator o okładkach „prawie” leżących na tej samej płaszczyźnie. Łatwo również zauważyć, że w czujniku (E) wprowadzone jest przesunięcie środkowej płaszczyzny względem pozostałych. Szósty czujnik F charakteryzuje się różną liczbą elektrod w płaszczyznach. Obszar środka czujnika jest skanowany tutaj przez większą liczbą pomiarów. Ostatni z prezentowanych czujników (G) całkowicie odbiega swoją geometrią od poprzednich rozwiązań. Tutaj wszystkie elektrody umieszczone są tylko na jednej płaszczyźnie. Celem takiego rozwiązania ma być umożliwienie zastosowania czujnika do powierzchniowej penetracji dowolnego procesu. Jak się okaże, czujnik ten ma dużą zdolność wnikańia polem elektrycznym w głąb badanego procesu i odwzorowywania zachodzących tam zmian.



Rys. 3. Różne koncepcje konstrukcji czujników 3D ECT
Objaśnienia w tekście

4. Proces tworzenia obrazu dla 3D ECT

Rozwiązanie zagadnienia procesu tworzenia obrazów [1, 2, 6] polega na odnalezieniu obrazu rozkładu wartości przenikalności elektrycznej $\hat{\epsilon}$ wewnątrz czujnika, mając do dyspozycji wektor pomiarowy pojemności C_M (zgodnie z zależnością)

$$g : C \mapsto \hat{\epsilon} \quad (4)$$

Sprowadza się to do rozwiązania poniższej zależności

$$\hat{\epsilon} = S^+ \cdot C_M \quad (5)$$

gdzie S – macierz czułości.

Jest to zadanie trudne, gdyż macierz S nie jest kwadratowa, a układ równań (5) jest układem pod-określonym i zamiast macierzy odwrotnej S^{-1} , **która nie istnieje**, szuka się macierzy pseudoodwrotnej S^+ . Związane jest to z tym, że liczba niewiadomych N (liczba elementów obrazu) jest zazwyczaj dużo większa od liczby równań M (liczby pomiarów), przez co istnieje więcej niż jedno rozwiązanie.

Nowym rozwiązaniem w prezentowanym artykule jest podejście do samych elementów obrazu. Autorzy artykułu, jako podstawowy element obrazu wykorzystali nie woksel, czyli najczęściej spotykany element czworościenny, ale wierzchołek tego elementu. Ten sposób jest o tyle ważny, iż liczba czworościanów dyskretyzujących badaną przestrzeń jest zawsze czterokrotnie większa niż liczbą węzłów je tworzących. Dzięki temu równanie (5) jest obciążone mniejszym błędem. Układ równań jest „mniej” podokreślony. Dodatkowym atutem takiego postępowania jest to, że wykorzystana biblioteka VTK do wizualizacji wyników procesu tworzenia obrazów pracuje właśnie na wierzchołkach.

4.1. Macierz czułości

Podstawowym zadaniem stawianym macierzy czułości w procesie tworzenia obrazu jest działanie w kierunku zmniejszania błędu końcowego obrazu [1, 5]. 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. Na potrzeby 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 wzoru (6).

$$S_{i(sr)j} = - \int_{A_j} \frac{E_{s,j}}{V_s} \frac{E_{r,j}}{V_r} dj \quad (6)$$

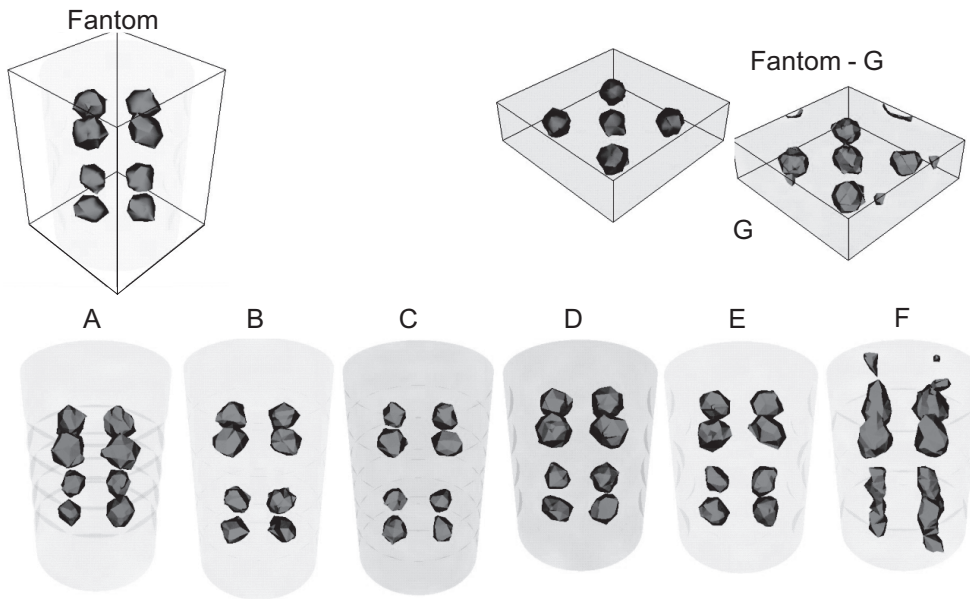
gdzie:

$E_{s,j}, E_{r,j}$ – 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 .

4.2. Wyniki

W celu weryfikacji przydatności omawianych koncepcji czujników trójwymiarowej tomografii pojemnościowej przeprowadzony został proces tworzenia obrazu. Wykorzystana została metoda iteracji Landwebera o współczynniku relaksacji równym 0,5.

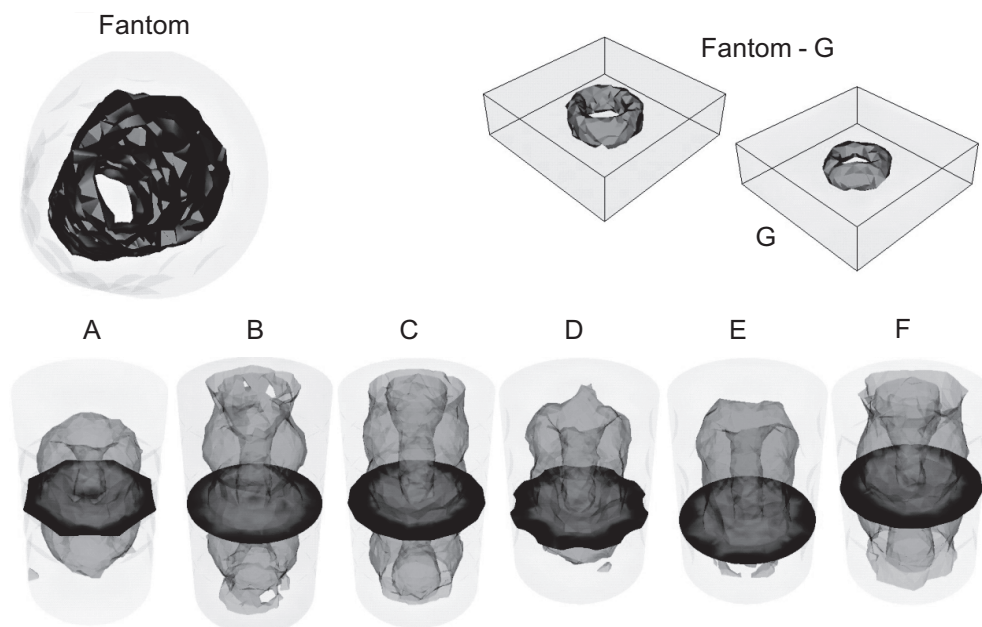


Rys. 4. Utworzone obrazy dla fantomu rozkładu przenikalności – 8 kropli

Rysunki 4 i 5 przedstawiają wyniki po 30 iteracjach dla dwóch różnych fantomów rozkładu przenikalności elektrycznej:

- 1) ośmiu plastikowych kulek zawieszonych w powietrzu w dwóch płaszczyznach,
- 2) plastikowej rurki umieszczonej centralnie w czujniku.

Drobnej modyfikacji uległ fantom dla czujnika G.



Rys. 5. Utworzone obrazy dla fantomu rozkładu przenikalności – plastikowa rurka

5. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych symulacji wykazują jednoznacznie poprawność prezentowanych koncepcji czujników trójwymiarowej tomografii pojemnościowej. Wszystkie czujniki umożliwiły poprawną wizualizację zadanych fantomów rozkładu przenikalności elektrycznej. Potwierdziło się, że wprowadzenie większej liczby elektrod, a przez to zwiększenie liczby płaszczyzn pomiarowych, polepsza jakość końcowych obrazów. Taka sytuacja ma miejsce tylko w przypadku tomografii trójwymiarowej. W tomografii dwuwymiarowej zwiększenie liczby elektrod powoduje jednoznacznie zmniejszenie ich rozmiaru, a to z kolei zmniejszenie wartości użytecznego sygnału pomiarowego w stosunku do istniejącego szumu i w efekcie pogorszenie jakości końcowych obrazów. Wprowadzenie elektrod kulistych i ich wypukłość w kierunku badanego procesu również poprawia końcowy efekt. Dużą ciekawostką z pewnością jest koncepcja czujnika powierzchniowego (G). Jego zdolność odtwarzania zmian koncentracji materiału badanego procesu przy jego ściankach jest nadzwyczaj wysoka. Materiał umieszczony blisko elektrod jest dobrze obrazowany. Autorzy artykułu uważają, że właśnie takie czujniki powinny znaleźć zastosowanie w przemyśle. Często przecież w rzeczywistych warunkach dużo trudu nastręcza umieszczenie elektrod czujnika dookoła badanego procesu. Proponowany czujnik poszerza możliwości zastosowania trójwymiarowej tomografii pojemnościowej w wielu gałęziach przemysłu.

Literatura

- [1] Isaksen Ø.: *A review of reconstruction techniques for capacitance tomography*. Meas. Sci. Technol., Vol. 7, 1996, 325–337
- [2] Lionheart W.R.B.: *Reconstruction algorithms for permittivity and conductivity imaging*. 2nd World Congress on Industrial Process Tomography” Hannover, Germany, 2001, 4–11
- [3] Mazurkiewicz Ł., Banasiak R., Wajman R., Dyakowski T., Sankowski D.: *Towards 3D Capacitance Tomography*. Aizu, Japan, 2005, 546–552
- [4] Sikora J.: *Algorytmy numeryczne w tomografii impedancyjnej*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2000
- [5] 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
- [6] Yang W.Q., Peng L.: *Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography*. Meas. Sci. Technol. Vol. 14, No. 1, 2003, R1–R13