

Robert Banasiak*

Walidacja modelu numerycznego czujnika pojemnościowego 3D

1. Wprowadzenie

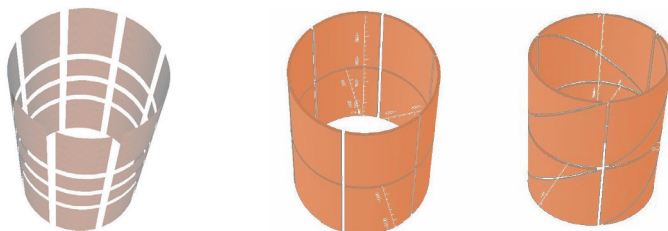
Elektryczna tomografia pojemnościowa ECT (*electrical capacitance tomography*) jest nieinwazyjną przemysłową techniką pomiarową, w której do zbudowania obrazu wnętrza badanego procesu wykorzystuje się właściwości pola elektrycznego [12]. Jedną z relatywnie nowych odmian elektrycznej tomografii pojemnościowej jest trójwymiarowa tomografia pojemnościowa 3D ECT [1, 2, 3]. W ostatnich latach nastąpił znaczący postęp w dziedzinie trójwymiarowej wizualizacji przemysłowej przy zastosowaniu elektrycznych metod tomograficznych zarówno w trybie trójwymiarowym [1, 2], jak i w układzie *on-line* 4D [4]. Wiele prowadzonych obecnie prac nad rozwojem trójwymiarowej tomografii pojemnościowej [1, 2, 3] sprawia, iż ma ona szansę stać się ważnym narzędziem przemysłowej wizualizacji i monitorowania procesów. W ramach badań naukowych nad 3D ECT tworzy się nowe metody rozwiązywania zagadnienia prostego [5, 6] i odwrotnego [7, 8], projektuje się również nowe konstrukcje trójwymiarowych czujników pojemnościowych [9, 10]. Nowe konstrukcje czujników pojemnościowych wymagają zaprojektowania nowych modeli numerycznych tych czujników oraz ich weryfikacji. Poprawna konstrukcja numerycznego modelu czujnika 3D ECT jest konieczna do uzyskania możliwie jak najdokładniejszego rozwiązania zagadnienia prostego. Dokładność rozwiązania zagadnienia prostego istotnie wpływa na szybkość zbieżności procesu iteracyjnego rozwiązania zagadnienia odwrotnego. Dotychczas w literaturze rozważane były numeryczne modele czujników pojemnościowych, które są silnie uproszczone w stosunku do rzeczywistego modelu eksperymentalnego [1, 2, 3, 9, 10]. W niniejszym artykule autor podjął próbę opracowania kompletnego, numerycznego modelu czujnika 3D ECT, który pozwala uwzględnić w trakcie rozwiązywania zagadnienia prostego metodą elementów skończonych zarówno system ekranowania jak i inne elementy konstrukcyjne czujnika (np. rura montażowa) występujące w modelach eksperymentalnych.

2. Czujniki pojemnościowe dla 3D ECT

Pierwsze eksperymentalne konfiguracje systemu ECT 3D zostały przedstawione na przestrzeni ostatnich lat przez kilka ośrodków naukowych [1, 2, 3, 10]. System pomiarowy

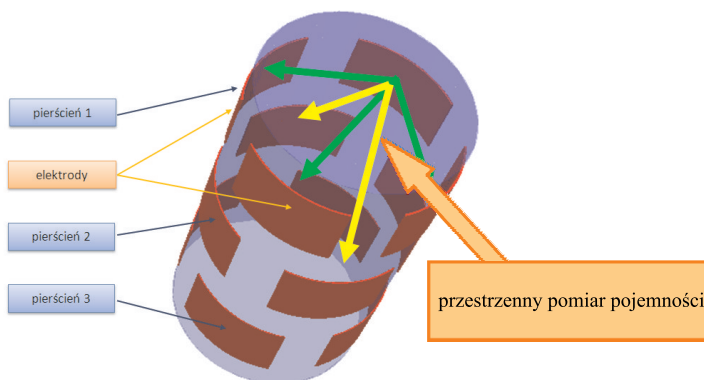
* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

trójwymiarowej elektrycznej tomografii pojemnościowej zbudowany jest przede wszystkim z czujnika pojemnościowego 3D, systemu pomiarowego ECT oraz komputera PC realizującego zadania akwizycji i przetwarzania danych na potrzeby rekonstrukcji trójwymiarowego obrazu 3D. Czujniki pomiarowe w trójwymiarowej tomografii pojemnościowej odpowiadają za wykrywanie zmian pojemności międzyelektrodowych powodowanych przez zmiany przenikalności elektrycznej w przestrzeni pomiarowej. Znane w literaturze rozwiązania w zakresie czujników 3D ECT bazują na zachowaniu prostokątnego kształtu elektrod i na regularnym bądź nieregularnym ich rozmieszczeniu na powierzchni profilu walcowego [1, 2]. Podobne koncepcje przedstawiono w kilku innych pracach [3, 10]. Przykłady struktur czujników 3D ECT rozważanych w literaturze przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Znane w literaturze proste struktury czujników pojemnościowych

Fizyczna struktura czujników mierzących pojemność składa się najczęściej z profilu zamkniętego, stanowiącego przestrzeń skanowania. Wokół tej przestrzeni rozmieszczone są elektrody pomiarowe. Dodatkowo w rzeczywistym modelu eksperymentalnym stosuje się system ekranów redukujących niekorzystny wpływ zakłóceń zewnętrznych na pomiar pojemności. W celu maksymalizacji jakości obrazu trójwymiarowego korzystne jest uzyskanie z obszaru badań jak największej liczby pomiarów pojemności międzyelektrodowych. Założenie to może zostać zrealizowane poprzez przestrzenne rozmieszczenie elektrod pomiarowych, z uwzględnieniem ich przestrzennej lokalizacji w osi Z. Koncepcję zastosowania filozofii trójwymiarowego pomiaru w czujniku pojemnościowym przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Koncepcja trójwymiarowego pomiaru pojemności

Fundamentem działania wszystkich systemów elektrycznej tomografii pojemnościowej 3D jest pomiar zmian pojemności pomiędzy wszystkimi kombinacjami elektrod znajdujących się w tej samej płaszczyźnie bądź różnych płaszczyznach (rys. 2). W trakcie pomiaru jedna z elektrod jest wzbudzana określoną wartością potencjału elektrycznego ($5\div 15$ V), podczas gdy pozostałe elektrody są uziemione. Zmiany pojemności powodowane są poprzez zmiany rozkładu przenikalności elektrycznej zaburzające układ pola elektrycznego w badanej przestrzeni zgodnie z równaniem Laplace'a [1]:

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

gdzie $\varepsilon(x, y, z)$ jest wartością przenikalności elektrycznej w punkcie (x, y, z) , a $\varphi(x, y, z)$ jest wartością potencjału elektrycznego w tym punkcie. Wartości pojemności, na podstawie których buduje się obraz tomograficzny, są bardzo małe ($10^{-12}\div 10^{-15}$ F.). Tak małe wartości pomiarowe są szczególnie narażone na wpływ zakłóceń zewnętrznych. W związku z powyższym struktura czujnika pojemnościowego wymaga implementacji szeregu mechanizmów chroniących pole elektryczne pomiędzy elektrodami przed wpływem zewnętrznych pól elektrostatycznych. W strukturze czujnika pojemnościowego uwzględnia się również elementy modelujące rozkład wewnętrznego pola elektrycznego. Modelowanie rozkładu pola elektrycznego w istotny sposób wpływa na poprawę zdolności detekcyjnych czujnika zarówno w obszarach sąsiadujących z pierścieniami elektrod, jak i w centrum czujnika, natężenie pola elektrycznego jest najniższe.

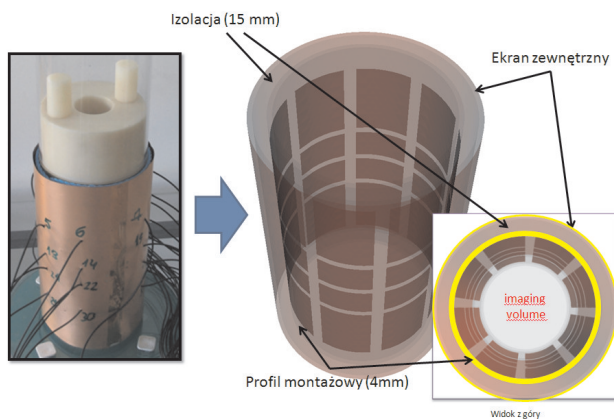
3. Eksperymentalny model czujnika pojemnościowego 3D

Czujnik ECT 3D jest strukturą mechaniczno-elektryczną zbudowaną najczęściej z wykorzystaniem walcowego profilu zamkniętego. Kluczowymi elementami czujnika pojemnościowego mającymi wpływ na generowane w nim pole elektryczne, jak wspomniano w poprzednim rozdziale, mają: 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. Brak ograniczenia obszaru aktywności pola elektrycznego poprzez pominięcie ekranu zewnętrznego powoduje, iż czujnik może reagować na źródła pola elektrycznego występujące w pobliżu elektrod w odległości równej średnicy pierścienia pomiarowego (dobrze znanym problemem wynikającym z niewłaściwego ekranowania zewnętrznego może być reakcja czujnika pojemnościowego na bliską obecność ciała ludzkiego, np. dłoni). Dodatkowym elementem modelującym rozkład pola elektrycznego są ekrany brzegowe, które w postaci jednolitych pierścieni miedzianych zamontowane są w sąsiedztwie pierwszego i ostatniego pierścienia pomiarowego. Ekrany te kształtują rozkład pola elektrycznego w sąsiedztwie brzegowych pierścieni elektrod,

poprawiając zdolności detekcyjne w tym obszarze czujnika. System ekranowania, wspomniany wcześniej, został zastosowany do budowy eksperymentalnego modelu czujnika 3D ECT, który umożliwił przeprowadzenie szeregu eksperymentów pomiarowych na potrzeby niniejszego artykułu. Jego najważniejsze cechy to:

- profil walcowy o długości 2000 mm wykonany z materiału PMMA (polimetakrylan metylu), o względnej przenikalności elektrycznej $\epsilon_{profil} \approx 3$ (1 KHz), średnica zewnętrzna/wewnętrzna profilu czujnika 150/142 mm, grubość ściany 4 mm;
- 32 elektrody pomiarowe w układzie 4 pierścieni i 8 elektrod w każdym pierścieniu, szerokość każdej z 32 elektrod wynosi 50 mm, a wysokość odpowiednio dla pierwszej i czwartej warstwy: 70 mm, a dla drugiej i trzeciej: 30 mm, elektrody wykonane z taśmy miedzianej o grubości 0,2 mm, układ elektrod zamontowany na zewnętrznej ścianie profilu zamkniętego;
- ekran zewnętrzny zbudowany z blachy miedzianej o grubości 0,5 mm połączony z uziemieniem systemu pomiarowego;
- izolacja ekranu zewnętrznego wykonana z pianki poliuretanowej o stałej dielektrycznej $\epsilon_{profil} \approx 1,6$ (1 KHz);
- dwa ekrany wewnętrzne, brzegowe o wysokości 25 mm każdy, wykonane z taśmy miedzianej o grubości 0,2 mm.

Przykładowa struktura czujnika 3D ECT została zaprezentowana na rysunku 3.



Rys. 3. Struktura wewnętrzna czujnika 3D ECT oraz fotografia modelu eksperymentalnego

4. Modelowanie czujników pomiarowych w trójwymiarowej tomografii pojemnościowej

Kompletny model numeryczny czujnika pojemnościowego wymaga zamodelowania wszystkich wymienionych w poprzednim rozdziale elementów struktury modelu eksperymentalnego. Modelowanie kompletnego modelu czujnika 3D ECT opisanego w niniejszym

artykule przeprowadzono przy zastosowaniu metody elementów skończonych. W tym celu została zbudowana siatka tetrahedronów o proporcjach odpowiadających rzeczywistym proporcjom modelu eksperymentalnego. Przy wykorzystaniu opracowanej siatki dokonano jej przetworzenia w celu wyodrębnienia głównych struktur czujnika, takich jak strefa pomiarowa, strefa profilu montażowego, strefa izolacji pomiędzy ekranem zewnętrznym a układem elektrod. Wyodrębnione strefy cechują się różną gęstością elementów siatki. Dobór gęstości siatki dla poszczególnych stref modelu numerycznego czujnika związany był z maksymalizacją dokładności rozwiązania zagadnienia prostego przy jednoczesnej minimalizacji czasu jego wyznaczenia. Stąd strefa pomiarowa została pokryta siatką o dużej gęstości elementów malejącej w kierunku centrum czujnika. Strefa profilu montażowego oraz strefa izolacji wewnętrznej zostały pokryte siatką o niewielkiej gęstości elementów, gdyż w tych obszarach nie jest wymagane dokładne zamodelowanie rozkładu pola elektrycznego. Ważnym etapem tworzenia kompletnego modelu numerycznego czujnika 3D ECT jest selekcja węzłów, które będą odzwierciedlały układ elektrod pomiarowych, oraz selekcja węzłów, które będą modelowały ekran zewnętrzny oraz ekrany brzegowe. Rozkład elementów zastosowanej w trakcie eksperymentów siatki metody elementów skończonych przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Siatka 3D kompletnego modelu numerycznego czujnika pojemnościowego

Rozwiązanie problemu prostego w trójwymiarowej tomografii pojemnościowej polega na numerycznym wyznaczeniu rozkładu potencjału elektrycznego w przestrzeni pomiarowej (węzłach siatki) czujnika pojemnościowego na podstawie symulowanego rozkładu przenikalności elektrycznej oraz zadanych warunków brzegowych. W przypadku elektrycznej tomografii pojemnościowej stosuje się warunek brzegowy pierwszego rodzaju (zagadnienie Dirichleta) określony zależnością:

$$\Phi_{(v)} = V_{(v)} \quad (2)$$

gdzie $V_{(v)}$ jest znaną funkcją w punkcie węzłowym v na brzegu rozważanego obszaru.

W punkcie tym poszukuje się rozwiązania równania różniczkowego (1). Rozkład potencjału wyznaczony dla wszystkich węzłów siatki stanowi dane wejściowe do dalszej kalkulacji

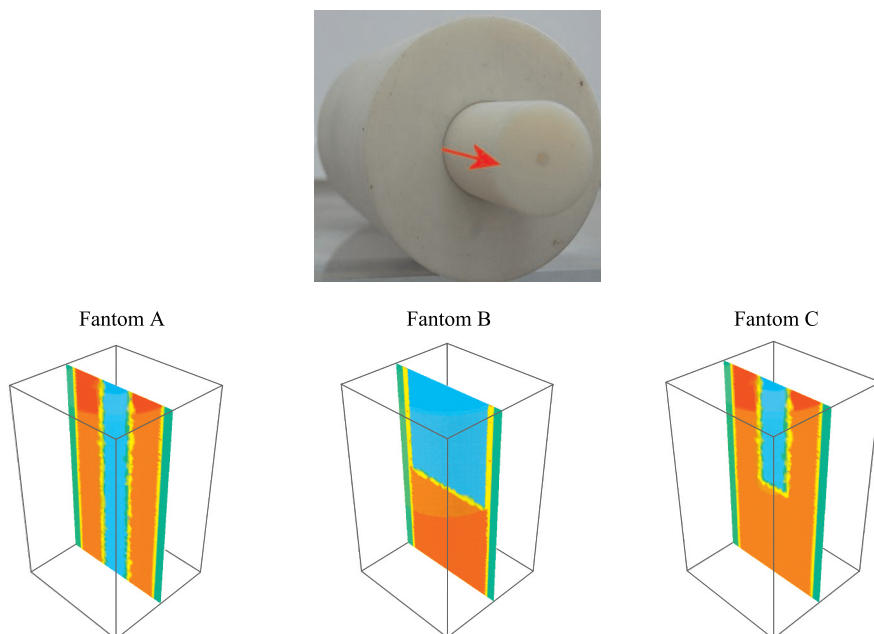
innych poszukiwanych wielkości, takich jak: wektor pomiarowy czy rozkład wrażliwości czujnika pomiarowego. Jednym z wielu algorytmów stosowanych na potrzeby elektrycznej tomografii pojemnościowej w celu rozwiązania problemu prostego jest metoda elementów skończonych [11]. W algorytmie tym wykorzystuje się podział przestrzeni, dla której wyznaczamy rozkład pola elektrycznego, na siatkę skończonych elementów. Metoda elementów skończonych wymaga przypisania wartości przenikalności elektrycznej dla każdego elementu siatki. Przestrzenny rozkład pola elektrostatycznego jest określony poprzez rozkład potencjałów elektrycznych w węzłach wokseli siatki. Przy wykorzystaniu elementów siatki modelu numerycznego czujnika zdefiniowano pierścienie elektrod zgodnie z ich rozkładem geometrycznym oraz wzajemnym położeniem zgodnym z rzeczywistym modelem eksperymentalnym. Ważnym elementem, jaki należy uwzględnić w trakcie definiowania obszarów elektrod, jest odstęp pomiędzy elektrodami. Odstęp ten, w przypadku czujników trójwymiarowych, decyduje o zdolnościach detekcyjnych czujnika w pobliżu elektrod pomiarowych. Istotnym problemem, jaki może się pojawić w trakcie definiowania obszarów elektrod, jest związany z koniecznością zachowania jak największej liczby węzłów w obszarach odstępów międzyelektrodowych. Liczba węzłów w tych obszarach decyduje o gradientzie pola elektrycznego i ma istotny wpływ na dokładność rozwiązania problemu prostego. Dobór liczby węzłów w obszarach odstępów międzyelektrodowych jest w praktyce dokonywany na zasadzie kompromisu pomiędzy czasem obliczeń a dokładnością rozwiązania problemu prostego. Najczęściej dąży się do tego, by pomiędzy elektrodami w obszarach odstępów znalazły się przynajmniej 3–4 węzły siatki nienależące do elektrod.

5. Walidacja symulowanego pomiaru pojemności

Model numeryczny czujnika pojemnościowego 3D ECT, który poddano walidacji w niniejszym artykule, został zbudowany z 72 232 węzłów i 447 385 czworościanów (tetraedronów). Siatkę zamodelowano w oparciu o skryptowy język programu NetGen. Użytkana siatka metody elementów skończonych cechuje się nieregularnym kształtem i rozkładem elementów. Następnie dokonano selekcji istotnych, opisanych w rozdziale 4, stref czujnika. Każda z 32 elektrod została zdefiniowana za pomocą liczby od 460 do 480 węzłów, ekran zewnętrzny zawiera 12 684 węzły, ekran brzegowy górny 14 325 węzłów, a ekran brzegowy dolny 13 398 węzłów. Model numeryczny opracowano w trzech wariantach:

- 1) **model prosty** – model numeryczny uwzględniający jedynie definicję pierścieni elektrod pomiarowych bez systemu ekranowania oraz uwzględniania pełnej struktury czujnika (rura montażowa i izolacja ekranu zewnętrznego);
- 2) **model z ekranem** – model numeryczny uwzględniający definicję pierścieni elektrod pomiarowych oraz definicję ekranu zewnętrznego bez uwzględnienia pełnej struktury czujnika (ekrany brzegowe, rura montażowa oraz izolacja ekranu zewnętrznego);
- 3) **model kompletny** – model numeryczny uwzględniający pełną definicję struktury czujnika (kompletny system ekranowania, rura montażowa oraz izolacja ekranu zewnętrznego).

Walidację modelu numerycznego przeprowadzono na zestawie trzech fantomów rozkładu przenikalności dielektrycznej. Jako bazę do zdefiniowania fantomów eksperymentalnych wybrano cylindryczny obiekt (walec) zbudowany z ertalonu ($\epsilon_r \approx 3,2$ przy 1 KHz) o średnicy 142 mm i długości 500 mm z wydrążonym centralnie otworem o średnicy 50 mm oraz dopasowanym do tego otworu prętem wykonanym z tego samego materiału. Na podstawie tego obiektu wykonano i zasymulowane w zbudowanej siatce trzy różne przestrzenne fantomy, których modele numeryczne przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Eksperymentalny, cylindryczny model fantomu oraz odpowiadające mu numeryczne modele fantomów zastosowane w trakcie rozwiązywania zagadnienia prostego

Fantom A uzyskano poprzez usunięcie pręta z wnętrza walca, fantom B uzyskano poprzez umieszczenie jednolitego walca w połowie wysokości przestrzeni pomiarowej czujnika 3D ECT, a fantom C powstał poprzez częściowe usunięcie (połowa wysokości przestrzeni pomiarowej czujnika) pręta z wnętrza walca bazowego. Tak zdefiniowane fantomy poddano pomiarowi pojemności znormalizowanej stosując standardową metodę kalibracji systemu pomiarowego ECT [13], według równania:

$$C_{norm} = \frac{(C_m - C_{min})}{(C_{maks} - C_{min})} \quad (3)$$

gdzie C_{maks} jest pojemnością uzyskaną poprzez wypełnienie czujnika jednolitym walcem z rdzeniem a C_{min} jest pojemnością uzyskaną dla czujnika wypełnionego powietrzem.

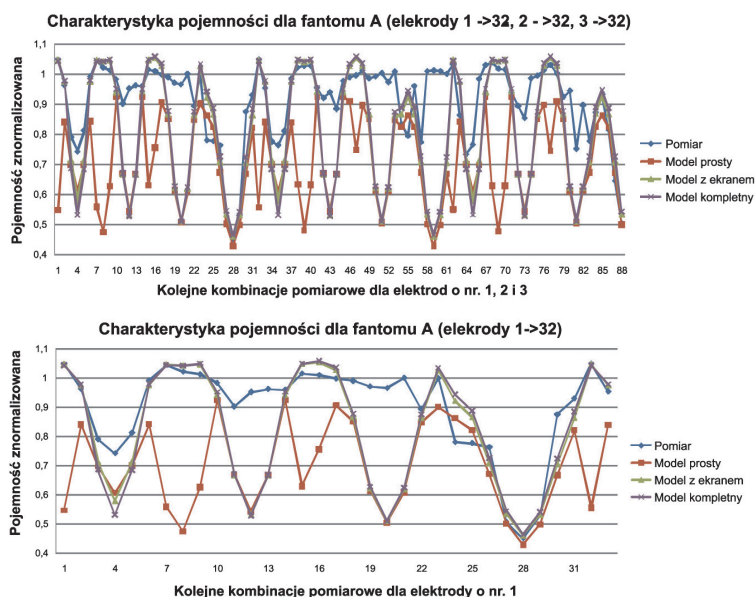
Jednocześnie każdy z rzeczywistych fantomów został zasymulowany w opracowanej siatce modelu numerycznego czujnika z dokładnością, na jaką pozwalała lokalna, w strefach granicy faz ciało stałe – gaz, gęstość rozkładu elementów siatki. Dodatkowo zdefiniowano dwa numeryczne modele rozkładu przenikalności elektrycznej na potrzeby symulowanego procesu kalibracji czujnika. Następnie dla tych modeli rozkładów wyznaczono rozwiązanie zagadnienia prostego 3D metodą elementów skończonych i obliczono symulowane wektory pojemności dla minimalnej i maksymalnej wartości przenikalności oraz dla symulowanych fantomów stosując analogicznie równanie (3). Dla tak uzyskanych zestawów pojemności eksperymentalnych oraz symulowanych wyznaczono względną rezydualną wartość pojemności Δrc zdefiniowaną jako:

$$\Delta rc = \frac{|C_{\text{exp}} - C_{\text{sym}}|}{|C_{\text{sym}}|} \quad (4)$$

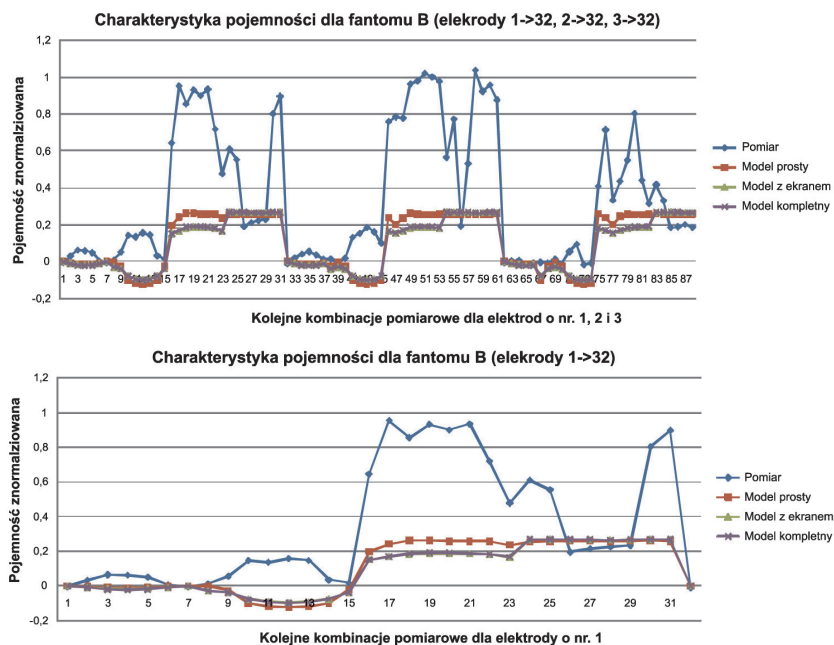
gdzie: C_{exp} jest zestawem pojemności zmierzonych, a C_{sym} jest zestawem pojemności wyznaczonych z rozwiązania zagadnienia prostego.

Względna rezydualna wartość pojemności pozwala ocenić rozbieżność pomiędzy wektorem zmierzonym a wektorem otrzymywanym na drodze symulacji w procesie iteracyjnej optymalizacji obrazu w procesie jego rekonstrukcji. Należy mieć świadomość, że niska względna rezydualna wartość pojemności nie musi oznaczać całkowitej poprawności rekonstrukcji obrazu. Tezę tę udowodnił w swoich pracach Yang [14]. Jednakże zmieniająca się w trakcie kolejnych iteracji wartość tej miary błędu w przypadku obrazowania trójwymiarowego informuje o kierunku, w którym postępuje optymalizacja obrazu. Rezydualna wartość pojemności w przypadku elektrycznej tomografii pojemnościowej służy również do określenia podobieństwa modelu numerycznego czujnika ECT do jego modelu eksperymentalnego. W tym przypadku symulowany zestaw pojemności wyznacza się w oparciu o „idealny obraz” – fantom rozkładu przenikalności, do którego powinna dążyć iteracyjnie rekonstrukcja obrazu w procesie optymalizacyjnym. Im niższy błąd walidacji, tym większa dokładność struktury numerycznego modelu czujnika 3D ECT.

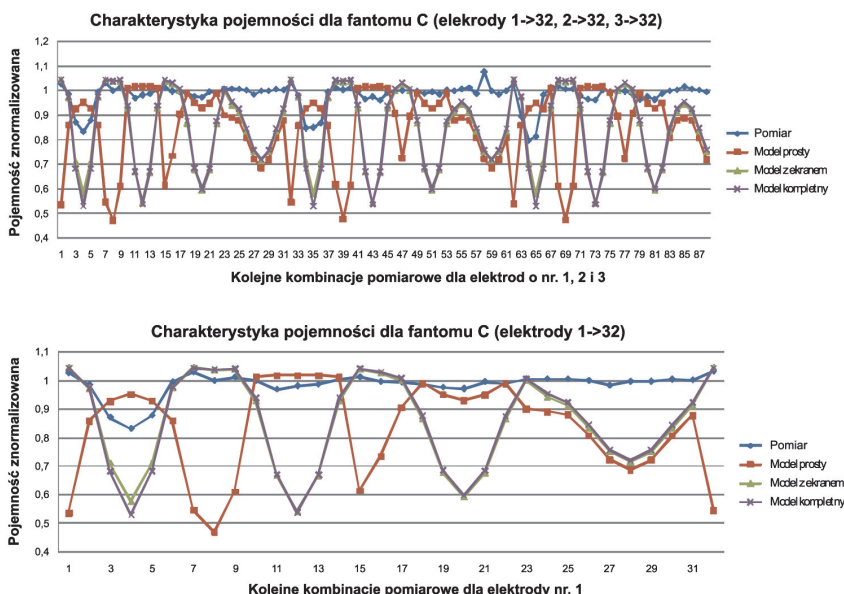
Wyniki walidacji opracowanego modelu numerycznego przedstawiono na wykresach (rys. 6–8), odpowiednio dla fantomów A, B i C. Na wykresach tych wykreślono zbiorczą charakterystykę pojemności dla 1, 2 i 3 elektrody w pełnym cyklu pomiarowym oraz powiększenie tej charakterystyki dla elektrody nr 1. Obliczenia wykonano dla trzech wariantów modeli numerycznych czujnika 3D ECT. Rozwiązanie problemu prostego dla jednego zestawu danych wejściowych było procesem czasochłonnym ze względu na relatywnie dużą gęstość opracowanej siatki modelu czujnika (447 385 elementów) i zajęło około 1 godziny na komputerze wyposażonym w dwa 4-rdzeniowe procesory Intel Xeon 2,33 GHz oraz 16 GB pamięci RAM. Obliczenia wykonano w środowisku MATLAB-a 2007 z wykorzystaniem algorytmów przetwarzania równoległego na 8-rdzeniach.



Rys. 6. Charakterystyki pojemności znormalizowanych dla modelu eksperymentalnego (pomiar) oraz trzech wariantów modelu numerycznego, wyznaczone dla fantomu A



Rys. 7. Charakterystyki pojemności znormalizowanych dla modelu eksperymentalnego (pomiar) oraz trzech wariantów modelu numerycznego, wyznaczone dla fantomu B



Rys. 8. Charakterystyki pojemności znormalizowanych dla modelu eksperymentalnego (pomiar) oraz trzech wariantów modelu numerycznego, wyznaczone dla fantomu C

W przypadku wszystkich trzech fantomów (A, B i C) można dostrzec pewne wspólne cechy wyników przeprowadzonej walidacji. Dla każdego z zestawów danych walidacja pokazała, iż złożone modele numeryczne czujnika 3D ECT pozwalają na lepsze dopasowanie rozkładu wartości znormalizowanych pojemności w stosunku do modelu prostego. Niemniej walidacja pokazała, iż opracowany kompletny model czujnika pojemnościowego nie oddaje w pełni zjawisk zachodzących w strukturze czujnika pojemnościowego 3D. Świadczą o tym lokalne obszary niedopasowania wartości pojemności zmierzonych i symulowanych zwłaszcza dla sekwencji pomiarowych, w których biorą udział elektrody od siebie znacznie oddalone. Przykładem takiego niedopasowania są sekwencje pomiarowe od numeru 11 do numeru 14 dla fantomu C (rys. 8). W tym samym przykładzie widać jednak znaczącą przewagę modeli złożonych (w szczególności modelu kompletnego) dla kombinacji pomiarowych elektrod z tego samego pierścienia pomiarowego np. sekwencje pomiarowe od numeru 1 do numeru 8. Dla tych sekwencji model prosty wykazuje całkowitą niezgodność z modelem eksperymentalnym. Występujące różnice pomiędzy modelami potwierdzają również wyznaczone wartości rezydualnej wartości pojemności (tab. 1). Relatywnie duże wartości błęd mogą być spowodowane np. błędami numerycznymi zastosowanych metod obliczeniowych, czy też pochodzić z błędów odwzorowania numerycznego struktury czujnika. Duże wartości błęd rezydualnego mogą również pochodzić z danych eksperymentalnych (wzmocnienia sygnałów systemu pomiarowego, ładunki elektrostatyczne przy przemieszczaniu fantomów wewnątrz czujnika, wpływ okablowania czujnika, wpływ środowiska zewnętrznego na pomiar). W obecnej chwili prowadzone są

dalsze prace mające na celu precyzyjną identyfikację źródła dużych wartości rezydualnych pojemności. Niemniej wartości rezydualnej wartości pojemności świadczą o poprawie dokładności rozwiązania zagadnienia prostego przy zastosowaniu kompletnego modelu numerycznego.

Tabela 1

Wartości rezydualnej wartości pojemności wyznaczone dla symulowanych fantomów A, B i C (rys. 5) względem odpowiadających im modeli eksperymentalnych (prostego, z ekranem, kompletnego)

	Model prosty	Model z ekranem	Model kompletny
Δrc_A	0,31	0,21	0,19
Δrc_B	0,61	0,58	0,57
Δrc_C	0,27	0,16	0,14

6. Wnioski

W niniejszym artykule zaprezentowane zostały wstępne rezultaty badań nad możliwością zwiększenia dokładności rozwiązywania zagadnienia prostego poprzez zastosowanie kompletnego modelu numerycznego czujnika pojemnościowego. Wprowadzenie i zaimplementowanie w obliczeniach metody elementów skończonych kompletnej definicji struktury czujnika pojemnościowego tj. systemu ekranowania, rury montażowej i izolacji czujnika 3D ECT oraz uwzględnienie ich w obliczeniach metody elementów skończonych umożliwia dokładniejsze zasymulowanie zjawisk zachodzących w przestrzeni pomiarowej czujnika. W trakcie prowadzonych badań dokonano również weryfikacji zaproponowanego rozwiązania w drodze eksperymentu. Badania wykazały, iż zastosowanie opracowanego usprawnienia modelu numerycznego czujnika poprawia zbieżność wyniku rozwiązania zagadnienia prostego z danymi eksperymentalnymi. Poprawa dokładności rozwiązywania zagadnienia prostego w trójwymiarowej tomografii pojemnościowej jest korzystna w kontekście iteracyjnej, nieliniowej rekonstrukcji obrazu i może przyczynić się do poprawy jakości rekonstruowanych obrazów i zredukowania czasu ich uzyskiwania.

Literatura

- [1] Wajman R., Banasiak R., Mazurkiewicz Ł., Banasiak R., Dyakowski T., Sankowski D., *Spatial imaging with 3D capacitance measurements*. Measurement Science and Technology, vol. 17, No. 8, August 2006, 2113–2118.
- [2] Warsito W., Fan L.-S., *Development of 3-Dimensional Electrical Capacitance Tomography Based on Neural Network Multi-criterion Optimization Image Reconstruction*. Proc. 3rd World Congress on Industrial Process Tomography (Banff), 2003, 942–947.
- [3] Soleimani M., *Three-dimensional electrical capacitance tomography imaging, Insight*. Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, vol. 48, No. 10, 2006, 613–617.

- [4] 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.
- [5] Wajman R., Mazurkiewicz Ł., Banasiak R., *The numerical calculation of the electrical field for Electrical Process Tomography*. Proc. 3rd International Symposium on Process Tomography in Poland 2004 (Łódź), 2004, 161–164.
- [6] Banasiak R., Wajman R., Mazurkiewicz Ł., *Application of Charge Simulation Method for ECT imaging in forward problem and sensitivity matrix simulation*. 5th World Congress on Industrial Process Tomography, Bergen, Norwegia, 2007, 1099–1106.
- [7] Banasiak R., Wajman R., Soleimani M., *An efficient nodal Jacobian method for 3D electrical capacitance image reconstruction*. Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 51 (1), 2009, 36–38.
- [8] Marashdeh Q., Teixeira F.L., *Sensitivity Matrix Calculation for Fast 3-D Electrical. Capacitance Tomography (ECT) of Flow Systems*. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 40, 2004.
- [9] Banasiak R., Wajman R., Mazurkiewicz Ł., *Rozwój czujników pomiarowych dla trójwymiarowej tomografii pojemnościowej*. Automatyka (półrocznik AGH), t. 10, z. 2–3, 2006, 221–228.
- [10] Yang W.Q., *Key issues in designing capacitance tomography sensors*. IEEE Conference on Sensors, 22–25 October 2006, Daegu, Korea, 2006, 497–505.
- [11] Silvester P., Ferrari R.L., *Finite Elements for Electrical Engineers*. Cambridge University Press, 1983.
- [12] Płaskowski A., Beck M.S., Thorn R., Dyakowski T., *Imaging Industrial Flows – Applications of electrical process tomography*. IOP Publishing Ltd. – Taylor & Francis, 1995.
- [13] Byars M., *Developments in Electrical Capacitance Tomography*. Proc. 2nd World Congress on Industrial Process Tomography (Hannover), 2001, 542–549.
- [14] Yang W.Q., Peng L., *Review of image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography, Part 2: Evaluation*. Proc. International Symposium on Process Tomography in Poland (Wrocław), 2002, 133–140.