

**ROBERT BANASIAK, TOMASZ JAWORSKI
RADOSŁAW WAJMAN**

Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki
Politechniki Łódzkiej

APLIKACJA DLA POTRZEB KOMPLEKSOWEGO PRZETWARZANIA TOMOGRAFICZNYCH DANYCH POMIAROWYCH – TOMOKIS STUDIO

Recenzent: **dr inż. Mariusz Rząsa**

Maszynopis dostarczono: 1. 10. 2010

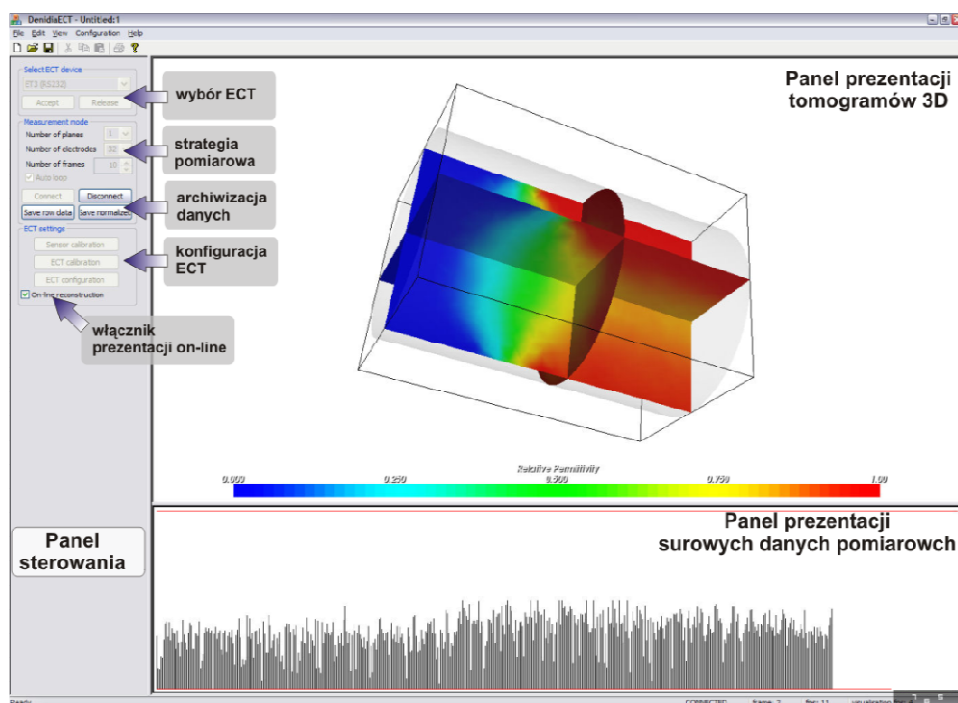
W artykule autorzy przedstawiają opracowane narzędzie do kompleksowego przetwarzania i wizualizacji dwu- i trójwymiarowych tomograficznych danych pomiarowych. Aplikacja o nazwie TomoKIS Studio powstała w Katedrze Informatyki Stosowanej w ramach projektu DENIDIA. Architektura aplikacji oparta jest na zestawie modułów, które pozwalają na w pełni dwukierunkową komunikację, konfigurację oraz kalibrację dowolnego urządzenia tomografii elektrycznej znajdującego się w laboratorium Katedry, akwizycję oraz przetwarzanie danych pomiarowych, liniową oraz nieliniową rekonstrukcję obrazów 2D i 3D w czasie rzeczywistym oraz wizualizację danych surowych i tomogramów.

1. WPROWADZENIE

W wyniku prac badawczych w Katedrze Informatyki Stosowanej zbudowana została aplikacja dla potrzeb trójwymiarowej tomograficznej wizualizacji w czasie rzeczywistym o nazwie *TomoKIS Studio*. Zaimplementowane zostały moduły komunikacji ze wszystkimi urządzeniami tomograficznymi znajdującymi się na wyposażeniu Katedry oraz opracowany został moduł rekonstrukcji i wizualizacji trójwymiarowych obrazów tomograficznych. Architektura aplikacji zbudowana jest w oparciu o szereg modułów, które sprawiają, że oprogramowanie pozwala na kompleksową analizę i obróbkę danych tomograficznych:

- dwukierunkowa komunikacja z systemem ECT – konfiguracja urządzenia,
- kalibracja urządzenia,
- akwizycja i przetwarzanie danych pomiarowych,
- wizualizacja surowych danych pomiarowych,
- liniowa bezpośrednia i iteracyjna rekonstrukcja obrazu z zaimplementowanymi procedurami obliczeń równoległych Microsoft OpenMP,
- prezentacja graficzna trójwymiarowych obrazów w trybie on-line.

Aplikacja ma strukturę wielowątkową; poszczególne funkcje aplikacji zostały zrealizowane w osobnych wątkach. Dodatkowo, implementacja mechanizmów algebry liniowej dla procesu konstrukcji obrazów została zrealizowana z użyciem techniki obliczeń równoległych OpenMP (<http://www.openmp.org>) wspieranej przez środowisko Microsoft Visual Studio C++ 2008. Dzięki zastosowaniu specjalnych dyrektyw podziału pracy (ang. *work sharing constructs*), możliwe jest rozdzielanie realizowania poleceń na poszczególne procesory.



Rys. 1. Interfejs graficzny aplikacji TomoKIS Studio

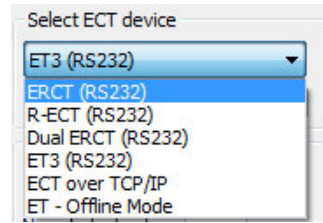
Aplikacja umożliwia komunikację z trzema urządzeniami tomograficznymi. Zaimplementowano moduł komunikacji w trybie ECT, ERT oraz dualnym ERCT. We wszystkich przypadkach możliwa jest praca z modułem tomografii rotacyjnej [3]. Komunikacja z tomografem (ET3) wzbogacona została o moduł automatycznego doboru wzmacnień kanałów pomiarowych. Aby umożliwić zdalne wykonywanie pomiarów,

zaimplementowany został protokół TCP/IP do transferu danych pomiarowych poprzez sieć komputerową. Dodatkowo do oprogramowania zostały dodane dwie aplikacje (wtyczki) rozszerzające możliwości oprogramowania o elementy konstrukcji siatek dwu- i trójwymiarowych.

W celu umożliwienia zrekonstruowania w trybie off-line zarchiwizowanych danych pomiarowych opracowany został model odtwarzania pracy urządzenia tomograficznego. Rysunek 2 przedstawia możliwość wyboru dowolnego z opisanych modułów komunikacji z urządzeniem tomograficznym.

Dzięki modularnej architekturze aplikacji możliwa jest jej ciągła rozbudowa.

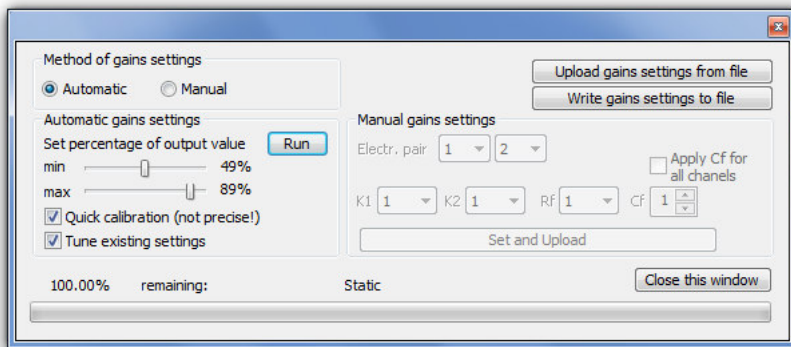
Prezentacja obrazów trójwymiarowych została zrealizowana przy pomocy silnika graficznego tj. bibliotekę VTK (ang. *The Visualization ToolKit* - <http://www.vtk.org>). Aplikacja umożliwia prezentację obrazów z wykorzystaniem płaszczyzn przekrojów poprzecznych i/lub izopowierzchni. Dodatkowo możliwy jest bieżący podgląd surowych (ang. *raw data*) oraz znormalizowanych wartości pomiarowych.



Rys. 2. Funkcja wyboru modułu komunikacji z urządzeniem tomograficznym

2. MODUŁ AUTOMATYCZNEGO DOBORU WZMOCNIEŃ KANAŁÓW POMIAROWYCH TOMOGRAFÓW

W Katedrze Informatyki Stosowanej do badań nad trójwymiarowa tomografią pojemnościową wykorzystywany jest tomograf *ET3* zbudowany przez naukowców Instytutu Radioelektroniki Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem dr R. Szabatina [4]. Cechą charakterystyczną tego urządzenia jest możliwość doboru wartości wzmacnień wzmacniaczy toru pomiarowego dla poszczególnych par pomiarowych elektrod. Dla trybu pracy 32 elektrody jest 496 torów pomiarowych, a każdy z nich zawiera 4 elementy. Konfigurowaniu podlegają dwa wzmacniacze w tym dla każdego po 4 wartości nastaw oraz rezystor i kondensator sprzężenia zwrotnego tj. razem 12 wartości nastaw. Taka różnorodność konfiguracji sprawia, że ręczne dostrajanie tomografu jest bardzo czasochłonne. Jednocześnie z punktu widzenia specyfiki trójwymiarowych czujników pojemnościowych bardzo ważna jest precyzyjna konfiguracja tomografu w taki sposób, aby pomimo dużych odległości pomiędzy elektrodami oraz różnorodnej geometrii czujników wartości pomiarowe oscylowały w zakresach pomiarowych urządzenia i dawały znaczącą różnicę pomiędzy pomiarami dla pustego i wypełnionego czujnika. Z uwagi na te aspekty zaimplementowany został moduł, który w oparciu o zadane wartości początkowe automatycznie dobiera parametry wzmacnień dla wszystkich kanałów pomiarowych dostosowując tym samym urządzenie do dowolnej geometrii czujnika. Na poniższym rysunku przedstawiono okno dialogowe realizujące proces autokalibracji tomografu *ET3*.



Rys. 3. Okno dialogowe modułu automatycznego doboru wzmacnień kanałów pomiarowych

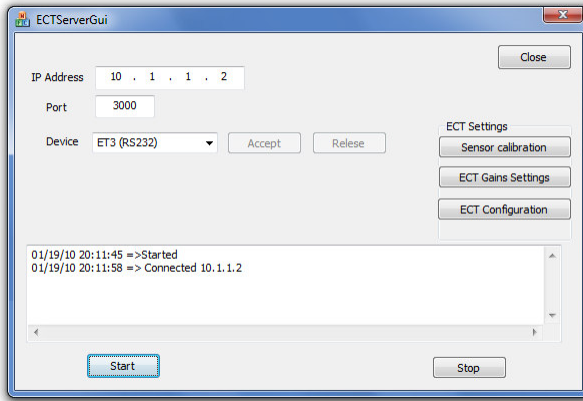
Na rysunku widać również, że moduł zaprojektowany jest także w taki sposób, aby możliwy był ręczny dobór poszczególnych parametrów kanałów pomiarowych. W celu umożliwienia selekcji kanałów pomiarowych zaimplementowana została funkcja wyboru numeru pomiaru poprzez kliknięcie w oknie wizualizacji danych pomiarowych. Użytkownik w szybki sposób może zdiagnozować niewłaściwą konfigurację dowolnego toru pomiarowego i ją skorygować.

3. MODUŁ KOMUNIKACJI Z TOMOGRAFEM POPRZECZ SIĘĆ KOMPUTEROWĄ

W tomografii pojemnościowej z uwagi na bardzo małe wartości danych pomiarowych poważnym problemem jest szum pomiarowy. Jednym ze sposobów jego minimalizacji jest stosowanie krótkich przewodów łączących czujnik z tomografem. Dodatkowym ograniczeniem jest długość przewodu interfejsu szeregowego RS232, z użyciem którego połączone są tomografy z komputerem. Te ograniczenia skutkują tym, że w normalnych warunkach przemysłowych nie byłoby możliwe zrealizowanie pomiarów np. w dwóch różnych sekcjach pomiarowych jednocześnie. Dotyczy to np. dwóch półprzemysłowych instalacji procesów przepływowych zbudowanych w laboratorium Katedry Informatyki Stosowanej. Sekcje te (pozioma i pionowa) oddalone są od siebie o ponad 20 metrów.

W tym celu zaprojektowany został moduł transferu danych pomiarowych z użyciem sieci komputerowej i protokołu Ethernet. Architektura modułu opiera się o protokół TCP/IP i o model pracy typu klient – serwer. Moduł osadzony w aplikacji *TomoKIS Studio* pracuje jako klient. Natomiast część serwerowa przewidziana jest do pracy na komputerze z podłączonym tomografem – patrz rysunek 4.

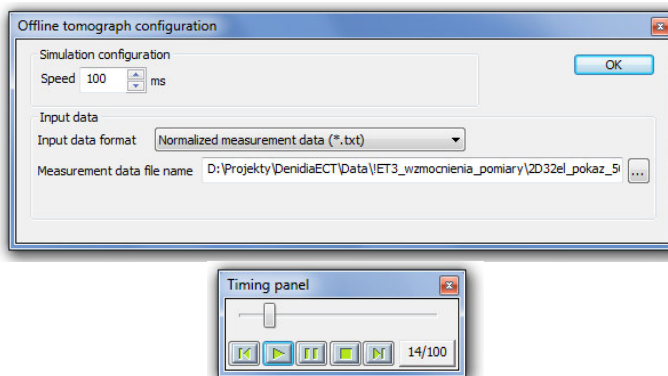
Do modułu serwera przełożona została kalibracja czujnika oraz konfiguracja urządzenia tomograficznego. Pozostałe elementy realizowane są nadal w module klienta, a więc wybór liczby płaszczyzn oraz liczby elektrod.



Rys. 4. Okno dialogowe modułu komunikacji poprzez TCP/IP – aplikacja serwera

4. MODUŁ ODTWARZANIA PRACY TOMOGRAFU

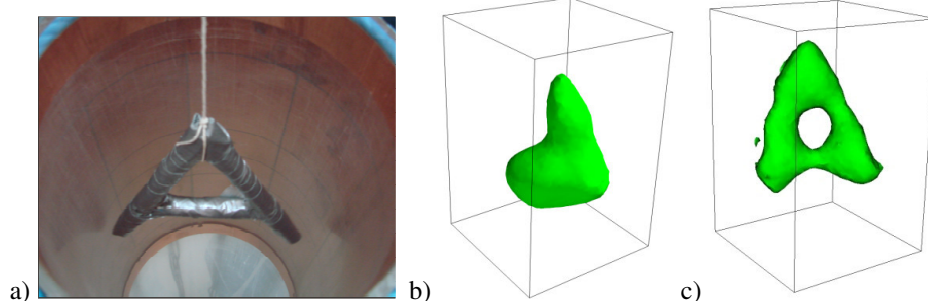
Oprócz pracy w czasie rzeczywistym z urządzeniem tomograficznym nader ważna jest również możliwość odtworzenia zarchiwizowanych wcześniej danych pomiarowych oraz możliwość ich dokładnego ale za to czasochłonnego zrekonstruowania już po zakończonym eksperymencie. W tym celu opracowany został moduł odtwarzania pracy tomografu. Praca z modułem polega na podaniu nazwy i ścieżki dostępu do pliku ze zarchiwizowanymi danymi pomiarowymi, a następnie określa się częstotliwość i sposób odtwarzania pomiarów analogicznie do pracy chociażby zwykłego odtwarzacza DVD – (Rys. 5).



Rys. 5. Okna dialogowe konfiguracji pracy symulatora tomograficznych danych pomiarowych

Wówczas możliwe jest wykorzystanie zaawansowanych technik rekonstrukcji obrazów takich jak metody iteracyjne oraz nieliniowe wsparte obliczeniami symulacji pola elektrostatycznego oraz aktualizowaniem macierzy czułości. Techniki te, z uwagi na swoją złożoność obliczeniową, nierzadko potrzebują godzin do zrekonstruowania

jednego obrazu trójwymiarowego oferując w zamian za to znacząco lepszą jakość potrzebną do dalszego przetwarzania. Na rysunku 6 przedstawiono obrazy zrekonstruowane przy wykorzystaniu odmiennych metod rozwiązujących problem odwrotny. Technika LBP (w przypadku czujnika 32 elektrodowego do 100 obrazów na sekundę zależnie od szybkości tomografu) oraz technika nieliniowej iteracyjnej rekonstrukcji obrazów z aktualizowaniem macierzy czułości (do 2h na obraz).

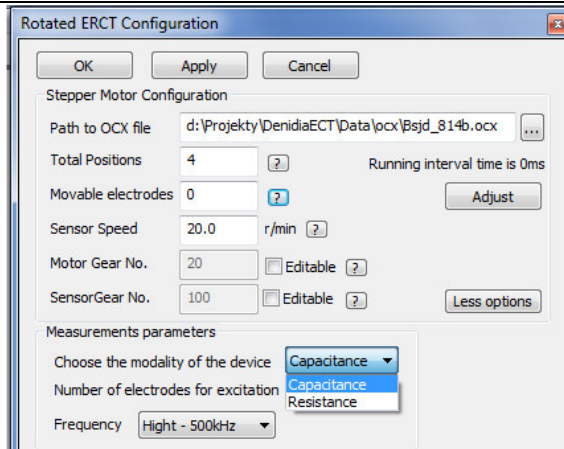


Rys. 6. Porównanie jakości dwóch metod rekonstrukcji obrazów dla ECT;
 a) obiekt wzorcowy, b) zrekonstruowany obraz 3D metodą LBP,
 c) zrekonstruowany obraz 3D metodą iteracyjną nieliniową [1]

5. MODUŁ STEROWNIKA DO SYNCHRONIZACJI TOMOGRAFU Z CZUJNIKIEM OBROTOWYM R-ECT ORAZ REKONSTRUKCJI ON-LINE

W laboratorium tomografii procesowej Katedry Informatyki Stosowanej prowadzone są prace badawcze nad techniką obrotowego czujnika pojemnościowego [3]. Dlatego też w oprogramowaniu *TomoKIS Studio* utworzony został dodatkowy moduł realizujący całkowitą konfigurację pracy silnika krokowego oraz synchronizacji tego silnika z tomografem *DenidiaERCT*. Komunikacja z silnikiem odbywa się za pomocą zarejestrowanej w systemie kontrolki ActiveX. Parametry pracy silnika, które można konfigurować to: liczba pozycji pomiarowych, liczba obracanych elektrod oraz szybkość pracy silnika.

W ramach tych badań do modułu rekonstrukcji i wizualizacji dodana została funkcja realizująca rekonstrukcję oraz wizualizację obrazów uzyskanych z danych pomiarowych z czujnika obrotowego w czasie rzeczywistym. Należy tutaj wspomnieć, że czas potrzebny na zebranie jednej ramki pomiarowej (kilka pozycji pomiarowych oraz czas potrzebny na obrót czujnika) jest znacznie dłuższy niż czas pomiaru w tradycyjnej technice tomograficznej i w tym przypadku dla czujnika 12 elektrodowego oraz 4 pozycjach obrotu wyniósł 2 ramki na sekundę. To znacząco utrudnia realizację pomiarów dynamicznych procesów przepływowch, ale rokuje duże nadzieje na dokładną nieinwazyjną wizualizację procesów statycznych.



Rys. 7. Okno konfiguracji pracy tomografu z czujnikiem obrotowym

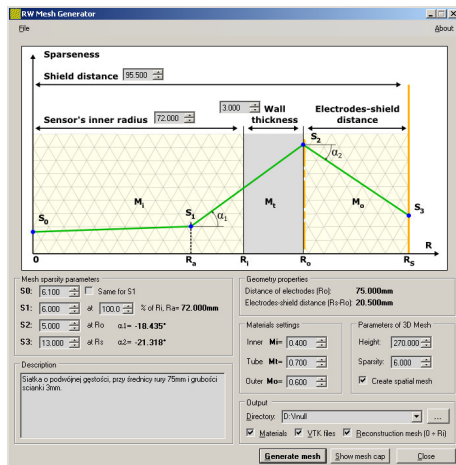
6. GENERATOR SIATEK MODELU KOMPUTEROWEGO ECT

Ważnym etapem w trakcie pracy nad projektowaniem czujników pojemnościowych jest opracowanie komputerowego modelu czujnika opartego na trójwymiarowej siatce przestrzennej. Do tej pory siatka generowana była z wykorzystaniem zewnętrznego oprogramowania np. NETGEN, które nie pozwalało, ze względu na swoją architekturę i najczęściej ogólne przeznaczenie, na realizację wszystkich pomysłów konstrukcyjnych. Z tego powodu opracowany został moduł *ERCT Mesh Generator* przeznaczony do generowania siatek płaskich i przestrzennych stosowanych w tomografii pojemnościowej oraz impedancyjnej.

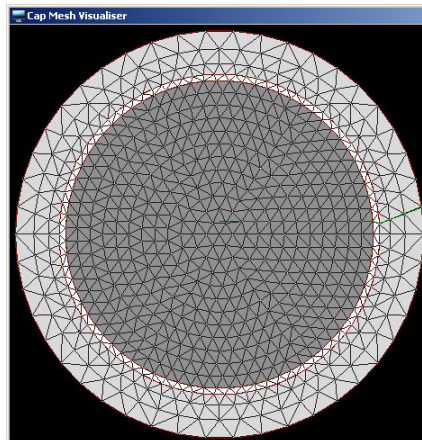
Oprogramowanie to charakteryzuje się następującymi cechami i funkcjonalnością:

- Moduł tworzony z myślą o okrągłych czujnikach pojemnościowych i impedancyjnych,
- Generowanie siatki dla Modelu Kompletnego czujnika (ang. *Complete Model*) z uwzględnieniem elementów izolacyjnych oraz ekranujących. Siatka taka składa się z części wewnętrznej (oznaczonej jako M_i na rysunku 8), przeznaczonej do rekonstrukcji obrazu, oraz części zewnętrznej, w skład której wchodzi materiał rury czujnika oraz izolacja i ekran zewnętrzny (odpowiednio M_t , M_o i S_3 na rysunku 8),
- Możliwość określenia rzadkości siatki w każdym jej punkcie, w funkcji promienia. Parametry charakteryzujące funkcję rzadkości mogą być dowolnie określane przez projektanta,
- Możliwość dowolnego określenia geometrycznych parametrów siatki czujnika, np. grubości rury czy średnicy obszaru zewnętrznej izolacji,
- Możliwość dowolnego określenia parametrów materiału (dla czujnika pojemnościowego – przenikalności elektrycznej, dla czujnika impedancyjnego – rezystywności) w poszczególnych obszarach siatki,
- Możliwość bezpośredniego generowania plików, z danymi numerycznymi modelu, przeznaczonych do pracy w środowiskach numerycznych, np. Matlab,

- Możliwość generowania plików danych gotowych do wizualizacji w pakiecie VTK
- Możliwość generowania siatki w postaci płaskiej, dla tomografii 2D.



Rys. 8. ERCT Mesh Generator – aplikacja generująca siatki modeli czujników



Rys. 9. Widok aplikacji z wygenerowaną z przykładową siatką

Opracowane oprogramowanie pozwala również na podgląd (rysunek 9), w czasie rzeczywistym siatki w postaci widoku z góry. Na rysunku widać trzy obszary oznaczone różnymi kolorami. Są to obszary odpowiadające szkicowi poglądowemu, prezentowanemu w oknie aplikacji (rysunek 8).

Dodatkowo prezentowane są dane odnośnie wewnętrznych elementów siatki:

- promienie poszczególnych pierścieni,
- wartość gęstości dla tych pierścieni,
- ilość węzłów na poszczególnych pierścieniach,
- oraz informacje istotne z punktu widzenia czasu trwania symulacji pola elektrycznego, tj. ilość węzłów i elementów skończonych w docelowej siatce przestrzennej lub płaskiej modelu.

Opracowanie prezentowanego narzędzia jest również uzasadnione, oprócz konkretyzacją zastosowania dla czujników okrągłych w tomografii, możliwością szybkiej rozbudowy oraz dopasowania do nowych pomysłów i zastosowań. Gotowe, istniejące programy (np. *Netgen*), pozwalają tylko na taką elastyczność, jaka jest dopuszczalna z punktu widzenia ich konfiguracji i wewnętrznych języków skryptowych. Własna aplikacja pozwala natomiast na pełną ingerencję w każdy element jej algorytmu oraz na wprowadzanie dowolnych modyfikacji. W tym przypadku pozwala ona na przyspieszenie badań nad tomografią elektryczną, m.in. nad Modelem Kompletnym trójwymiarowego czujnika pojemnościowego lub rezystancyjnego poprzez natychmiastowe generowanie siatek o różnych konfiguracjach wewnętrznych.

7. MODUŁ PROJEKTOWANIA ROZKŁADU PRZESTRZENNEGO ELEKTROD CZUJNIKÓW W TOMOGRAFII ELEKTRYCZNEJ

Projektowanie i budowa czujnika pojemnościowego dla tomografu trójwymiarowego jest jednym z kluczowych zadań realizowanych w trakcie procesu budowy urządzenia pomiarowego 3D ECT. Na jakość i precyzję wykonywanych pomiarów składa się wiele czynników natury fizycznej (np. zastosowane materiały, precyzja montażu i połączeń elektrycznych) oraz teoretycznej (np. rozkład elektrod, wielkość i gęstość siatki).

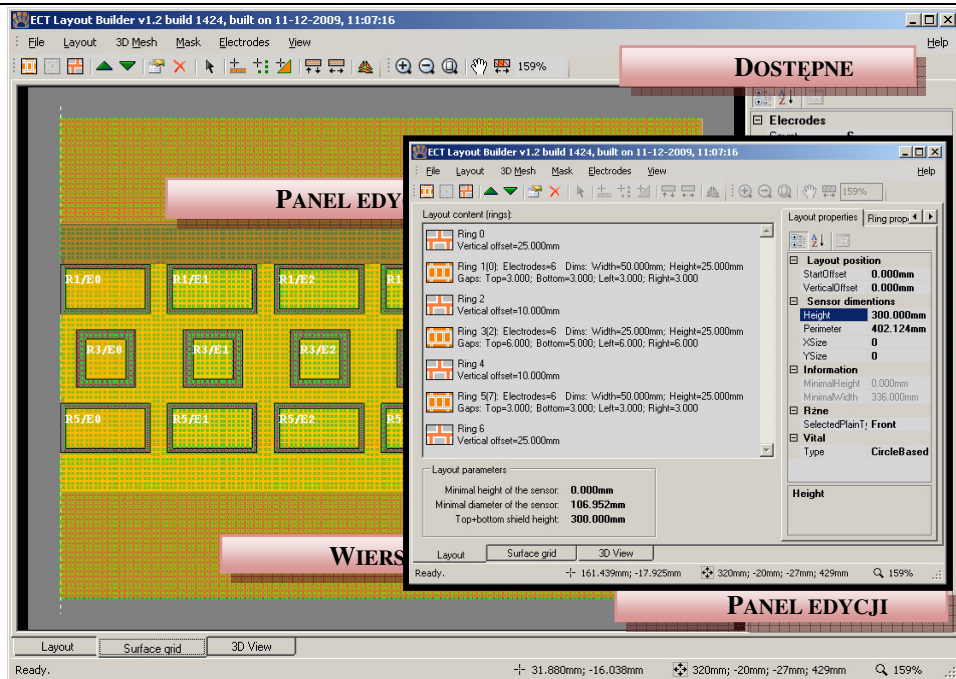
W ramach badań poświęconych budowaniu nowych typów czujników pojemnościowych został opracowany i zaimplementowany specjalistyczny moduł (rysunek 10) wspomagający proces modelowania i projektowania. Moduł ten o nazwie *Layout Builder* [2] realizuje następujące funkcje:

- wykorzystanie i przetwarzanie czworosiecznych siatek przestrzennych
- definiowanie geometrycznego rozkładu elektrod na powierzchniach czujnika
- tworzenie modeli czujników okrągłych i prostokątnych
- generowanie plików danych modelu do późniejszego wykorzystania w procesach symulacji i rekonstrukcji
- generowanie obrazu-szablonu wspomagającego mechaniczne wykonanie warstwy elektrod w czujnikach pojemnościowych.

Opracowane oprogramowanie posiada również możliwość wizualizacji zaprojektowanego rozkładu (moduł *3D View*) oraz generacje plików do wykorzystania przez silnik graficznej wizualizacji, bibliotekę VTK.

Praca z modułem *Layout Builder* odbywa się w trzech krokach:

- Pierwszym krokiem jest opracowanie powierzchniowego rozkładu elektrod na powierzchni czujnika. W tym celu opracowane zostały narzędzia pozwalające na grupowanie elektrod w pierścienie (wiersze elektrod) i precyzyjne pozycjonowanie ich na ścianie czujnika. Edycja taka może być wykonywana zgrubnie, z wykorzystaniem narzędzi wizualnych bądź precyzyjnie, poprzez podanie odpowiednich wartości liczbowych.



Rys. 10. Interfejs graficzny aplikacji ECT Layout Builder

- Drugim krokiem jest wczytanie siatki przestrzennej będącej bazą geometrii czujnika oraz późniejszych algorytmów rekonstrukcji i wizualizacji. Wczytaną siatkę należy dopasować do opracowanego wcześniej geometrycznego rozkładu elektrod poprzez modyfikację współrzędnych i dodawanie nowych węzłów. Odbywa się to w panelu edycji elektrod i istnieje możliwość, podobnie jak dla pierwszego kroku, wykorzystania zgrubej edycji wizualnej jak i dokładnego określania współrzędnych węzłów.
- Trzecim krokiem jest wygenerowanie danych do wyznaczenia macierzy czułości, rekonstrukcji i wizualizacji. Funkcje te wykonywane są przez aplikację w sposób w pełni zautomatyzowany.

Wykonanie czujnika odpowiadającego założeniom projektowym jest procesem z natury iteracyjnym. Polega on na stworzeniu modelu numerycznego, określeniu jego jakości poprzez ocenę wyników symulacji, korektę tego modelu i ponowną symulację. Ocenie podlega m.in. jakość zamodelowanego rozkładu pola wewnątrz czujnika oraz wiarygodność wyników rekonstrukcji. Na tej podstawie dokonywane są korekty siatki elementów skończonych czujnika oraz modyfikowane są parametry geometryczne elektrod – ich rozmieszczenie, liczba oraz wymiary.

Do tej pory takie modyfikacje wykonywane były ręcznie, np. poprzez tworzenie kodów źródłowych programów modyfikujących siatki elementów skończonych czy

ręczne rysowanie rozkładu elektrod w programach graficznych. Było to spowodowane **brakiem specjalistycznych narzędzi** do modelowania czujników.

Narzędzie *Layout Builder* w pełni automatyzuje powyższy proces przez dostarczenie narzędzi umożliwiających jednoczesne projektowanie rozkładu elektrod, dopasowywanie go do siatki i generowanie danych do kolejnych symulacji. Powoduje to znaczne skrócenie czasu potrzebnego na wykonanie serii modeli numerycznych niezbędnych do otrzymania czujnika o najlepszych parametrach. Należy również dodać, że opracowane oprogramowanie umożliwia zachowanie spójności między siatką modelu, rozkładem elektrod a czujnikiem poprzez wyeliminowanie możliwości zaistnienia błędu człowieka w wielu etapach procesu modelowania.

8. ANALIZATOR WRAŻLIWOŚCI

Zagadnienie rekonstrukcji obrazu w trójwymiarowej tomografii pojemnościowej jest kluczowym problemem rozważanym w wizualizacji tomograficznej. Obraz trójwymiarowy budowany jest przy pomocy odpowiednio sformułowanego algorytmu, w oparciu o siatkę metody elementów skończonych reprezentującą przestrzeń pomiarową komputerowego modelu trójwymiarowego czujnika pojemnościowego. Celem procesu budowania obrazu 3D na podstawie danych pomiarowych jest możliwie jak najlepsze skonstruowanie obrazu przestrzeni wnętrza badanego obiektu.

Ze względu na podobieństwa i analogie w trójwymiarowej tomografii elektrycznej, w porównaniu do zagadnień dwuwymiarowych (płaskich), wizualizacja 3D wnętrza obrazowanego obiektu możliwa jest poprzez zastosowanie deterministycznych algorytmów konstrukcji obrazu. Wśród deterministycznych algorytmów nieinwazyjnej wizualizacji 3D można wyróżnić metody konstrukcji obrazu wykorzystujące projekcję wsteczną, w tym algorytmy jednokrokowe i iteracyjne w tym nieliniowe [5,6,7].

Głównym celem wspomnianych metod jest linearyzacja zagadnienia odwrotnego. Linearyzacja opiera się na założeniu, iż całkowita wartość zmiany pojemności zmierzona pomiędzy dowolną kombinacją pary elektrod rozmieszczonych przestrzeni w tej samej, bądź różnych płaszczyznach, jest równa sumie cząstkowych zmian pojemności proporcjonalnych do zmian energii w obszarze danego elementu spowodowanych zmianą wartości przenikalności materiału w tym elemencie. Elementem linearyzującym proces rekonstrukcji obrazów jest macierz wrażliwości.

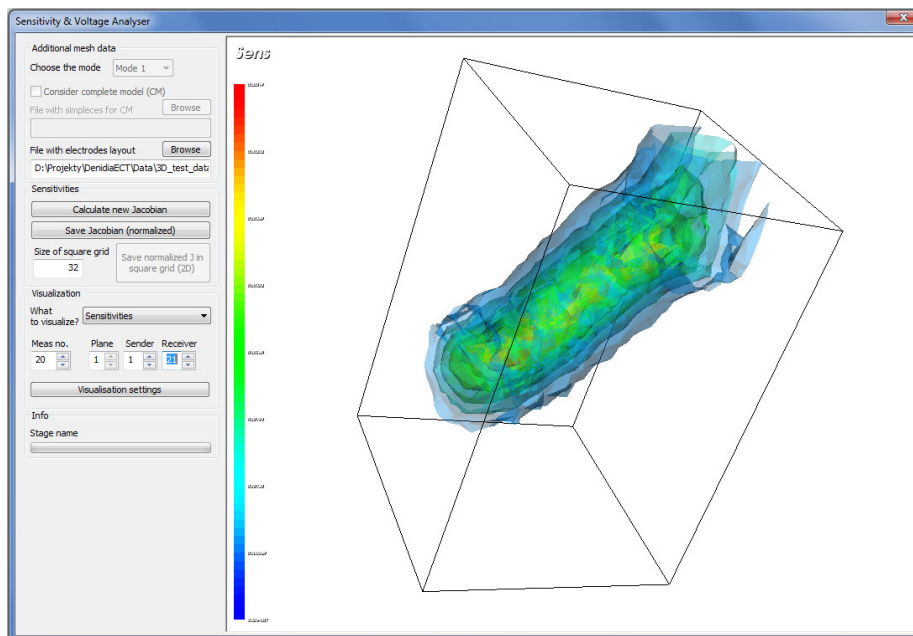
Warto również wspomnieć, że proces budowania obrazu 3D, którego elementami są woksele, jest zadaniem czasochłonnym z uwagi na ilości obliczeń. Problem ten wynika bezpośrednio z liczności elementów obrazu, które są wielokrotnie przetwarzane przez algorytmy tworzenia obrazu. Techniki konstrukcji obrazów operują najczęściej na operacjach macierzowych, w których liczba elementów w wierszach i kolumnach tych macierzy znacząco wpływa na czas obliczeń. Klasyczne „wokselowe” macierze biorące udział w procesie konstrukcji obrazu znacząco pochłaniają pamięć operacyjną.

Rozwiązaniem powyższego zagadnienia jest zastosowanie w procesie konstrukcji obrazu macierzy wrażliwości, której elementy są powiązane z obrazem zdefiniowanym dla węzłów siatki [1]. Macierz wrażliwości wyznaczona bezpośrednio dla węzłów pozwala w praktyce istotnie zredukować czas konstrukcji obrazu 3D a uzyskany stopień

redukcji tego czasu w jednym kroku iteracji jest wprost proporcjonalny do stosunku ilości wokseli do węzłów siatki. Dodatkową zaletą jest to, iż końcowy obraz trójwymiarowy jest już wyznaczony dla węzłów a zatem nie ma konieczności stosowania żadnych algorytmów uśredniania w procesie jego przetwarzania w silnikach graficznych przed wizualizacją.

W celu rozwiązania tego zagadnienia został opracowany i zaimplementowany specjalistyczny moduł realizujący proces analizy wrażliwościowej trójwymiarowego układu czujnika pojemnościowego lub rezystancyjnego dla geometrii zbudowanej w oparciu o moduły opisane w poprzednich rozdziałach. Moduł o nazwie *Sensitivity Analyser* (rys. 11) realizuje następujące funkcje:

- wyznaczenie rozkładu potencjałów dla każdej elektrody z uwzględnieniem dowolnego rozkładu dielektryka,
- wyznaczenie macierzy wrażliwości dla zadanej geometrii czujnika w oparciu o wyliczony rozkład pola elektrycznego,
- obliczenia dla przestrzeni dwu- i trójwymiarowej,
- uwzględnienie typu Modelu Kompletnego czujnika,
- trójwymiarowa wizualizacja poszczególnych map wrażliwości oraz pól elektrycznych,
- konfigurowanie różnych efektów wizualizacji.



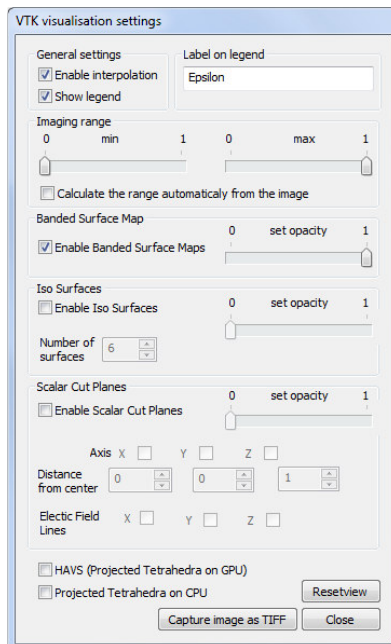
Rys. 11. Interfejs graficzny modułu *Sensitivity Analyser*

9. EFEKTY WIZUALIZACJI

Dzięki realizacji wizualizacji obrazów trójwymiarowych (tomogramów, macierzy wrażliwości, rozkładów pola elektrycznego) przy pomocy silnika graficznego tj. biblioteki VTK aplikacja umożliwia prezentację obrazów z wykorzystaniem wielu ciekawych efektów.

Należą do nich:

- interpolacja wyświetlania barw pomiędzy punktami węzłowymi,
- płaszczyzny trzech przekrojów poprzecznych dowolnie definiowalnych wzdłuż trzech osi,
- izopowierzchni definiowalnych poprzez ich liczbę oraz poziom progowania,
- wizualizacja w oparciu o algorytm HAVS,
- powierzchnie graniczne,
- linie ekwipotencjalne,
- dowolnie konfigurowalne poziomy przezroczystości dla wszystkich efektów,
- wyświetlanie legendy obrazu,
- możliwość eksportu bieżącego obrazu do pliku w formacie TIFF.



Rys. 12. Konfiguracja ustawień wizualizacji

LITERATURA

- [1] Banasiak R., Wajman R., Soleimani M.: An efficient nodal Jacobian method for 3D electrical capacitance image reconstruction; *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol. 51, No.1 2009, str. 36-38.
- [2] Jaworski T., Wajman R.: Graphical User Interface for building the spatial definition of the electrodes in 3D Electrical Capacitance Tomography. *Zeszyty naukowe Automatyka 3/2009*, AGH, Kraków.
- [3] Liu Z., Babout L., Banasiak R., Sankowski D.: Image reconstruction based on rotatable ECT sensor. *Zeszyty naukowe Automatyka 3/2008*, rocznik 12, nr 3, s. 911-917.
- [4] Olszewski, T., Brzeski P., Mirkowski J., Plaskowski A., Smolik W., and Szabatin R.: Modular capacitance tomograph. *Proc. of 4th International Symposium on Process Tomography*, Warsaw, 2006.
- [5] Soleimani, M. Three-dimensional electrical capacitance tomography imaging. *Insight Non-destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol. 48, No. 10, 613-617, 2006.

- [6] Wajman, R., Banasiak R., Mazurkiewicz L., Dyakowski T., and Sankowski D.. Spatial imaging with 3D capacitance measurements. *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, No. 8, 2113-2118, August 2006.
- [7] Warsito, W. and L. S. Fan. Development of 3-dimensional electrical capacitance tomography based on neural network multi-criterion optimization image reconstruction. *Proc. of 3rd World Congress on Industrial Process Tomography*, pp. 942-947, Banf, 2003.

TOMOKIS STUDIO – APPLICATION FOR TOMOGRAPHIC DATA PROCESSING

Abstract

This paper presents the software tool for comprehensive processing and visualization of two- and three-dimensional tomographic data. The software named as “TomoKIS Studio” was developed in Computer Engineering Department at the Technical University of Lodz in the frame of DENIDIA ToK European Project. The main architecture is based on set of modules that enable e.g. full duplex PC-any capacitance tomography system (ECT) communication, any ECT system measurement calibration, data acquisition and processing, both: linear and nonlinear 2D/3D image reconstruction in realtime and raw data graphical presentation

Politechnika Łódzka
Katedra Informatyki Stosowanej