

**JACEK NOWAKOWSKI, DOMINIK SANKOWSKI,
ROBERT BANASIAK, RADOSŁAW WAJMAN**

Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki
Politechnika Łódzka

OPRACOWANIE WIELOMODALNEGO SYSTEMU TOMOGRAFICZNEGO (GAMMA, ECT, ERT) DO WIZUALIZACJI WIELOFAZOWYCH PROCESÓW PRZEPIYWOWYCH

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 ostatnich latach zostały opracowane różne typy urządzeń tomografii procesowej do badań i monitorowania przepływów wielofazowych typu gaz – ciało stałe, gaz – ciecz. Do najszerzej rozpowszechnionych możemy zaliczyć tomografię elektryczną (pojemnościową oraz rezystancyjną), tomografię optyczną, promieniowania gamma oraz rentgenowską. Stosowanie jednego

rodzaju tomografii pozwala w zadawalający sposób zobrazować przepływy dwufazowe. W przypadku przepływów wielofazowych zastosowanie jednego typu czujnika tomograficznego daje ograniczone możliwości. Jest to następstwem specyfiki i charakterystycznych własności stosowanego rodzaju sygnału pomiarowego w odniesieniu do materiału znajdującego się wewnątrz instalacji [1].

Zalety i wady poszczególnych rodzajów tomografii przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zalety i wady poszczególnych rodzajów tomografii

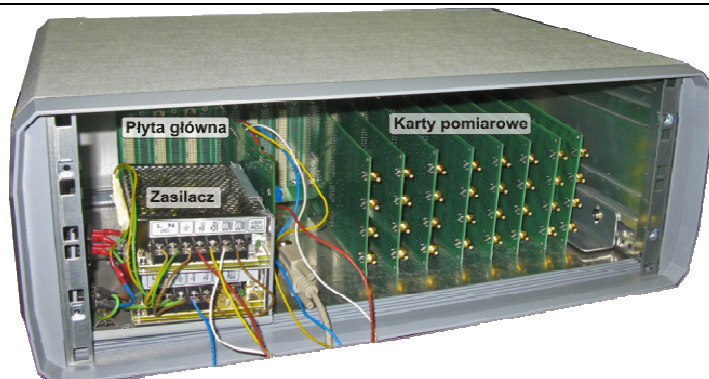
Rodzaj tomografii	Zalety	Wady
Tomografia elektryczna - pojemnościowa	niska cena czujnika, brak szkodliwego promieniowania, wysoka rozdzielczość czasowa, przydatność do procesów szybkozmiennych	uzyskany obraz jest rozmyty, niska rozdzielczość w przypadku kilku obiektów, złożoność obliczeniowa algorytmów konstrukcji obrazów
Tomografia optyczna	wysoka rozdzielczość przestrzenna, brak promieniowania radioaktywnego, niska koszt czujnika	ograniczenia w przypadku materiałów częściowo przezroczystych oraz nieprzezroczystych
Tomografia promieni gamma	wysoka rozdzielczość przestrzenna	niska prędkość obrazowania, szkodliwe promieniowanie
Tomografia rentgenowska	wysoka rozdzielczość przestrzenna trójwymiarowa, rekonstrukcja danych	złożoność obliczeniowa algorytmów konstrukcji obrazów, niska prędkość obrazowania, szkodliwe promieniowanie

Główną zaletą dualnego systemu tomografii procesowej łączącego tomografię pojemnościową oraz tomografię gamma jest wysoka rozdzielczość przestrzenno-czasowa. Oprócz tego możliwe jest badanie przepływów gaz-ciecz zawierających ponad dwa komponenty. Taki przepływ ma miejsce przy wydobyciu ropy ze złóż podmorskich, kiedy razem z ropą rurociągiem płynie woda morska oraz gaz. Tomografia pojemnościowa służy do zobrazowania przepływu wody i pozostałych komponentów (gaz, ropa), ponieważ przenikalność dielektryczna gazu i ropy jest podobna. Natomiast tomografia gamma dobrze zobrazowuje gaz oraz pozostałe komponenty (ropa i woda). Otrzymując dane z dwóch rodzajów tomografów i dokonując fuzji obrazów otrzymujemy obrazy przekrojów przedstawiające trzy komponenty.

2. TOMOGRAF ELEKTRYCZNY

W Katerze Informatyki Stosowanej został zaprojektowany i zbudowany system 32-kanałowego tomografu elektrycznego. Główną cechą tomografu jest jego uniwersalność (pod względem dowolnej konfiguracji - liczby i rozmieszczenia – elektrod pomiarowych) i zdolność dostosowania swoich nastaw (wzmocnień pomiarowych) dla dowolnej konfiguracji czujnika trójwymiarowego. Dodatkowo, funkcjonalność urządzenia pozwala w kontrolowany sposób zarządzać strategią pomiarową (wzbudzanie, uziemianie i odłączanie poszczególnych elektrod). Wiele istniejących na rynku systemów pomiarowych elektrycznej tomografii pojemnościowej nie udostępnia dokumentacji ze specyfikacją techniczną protokołu komunikacyjnego z komputerem PC, która umożliwiałaby konfigurować urządzenie według potrzeb. Możliwość konfiguracji systemu pomiarowego jest ważna z punktu widzenia specyfiki wielu procesów przemysłowych i możliwości dowolnego dostosowania konfiguracji pomiarów do charakteru procesu. Uwzględniając wymagania dotyczące uniwersalności tomografu i wykorzystania go w nowoczesnych technikach monitorowania procesów przemysłowych, zespół pracowników Katedry Informatyki Stosowanej nazwany TomoKIS podjął się prac nad budową nowego urządzenia pomiarowego ECT z możliwością dowolnego regulowania jego nastaw. Warto tu zaznaczyć, że zbudowany tomograf jest urządzeniem unikalnym w skali światowej. Z przeglądu literatury przedmiotu wynika, że na świecie zaledwie kilka ośrodków naukowych dysponuje 32 kanałowym tomografem pojemnościowym.

Zasada pomiarowa tomografu *DenidiaECT* oparta jest na technologii znanej jako AC-based. Prezentowany system udostępnia 32 niezależne kanały pomiarowe. Do budowy urządzenia zostały użyte przetworniki: 16-to bitowy ADC (analogowo-cyfrowy), 12-to bitowy DAC (cyfowo-analogowy) oraz 16-to bitowy mikroprocesor. Dodatkowo użyto 8 drukowanych płytek (ang. Printed Circuit Boards – PCB), z których każda zawiera 4 kanały oraz mikrokontroler PCB. Rysunek 1 przedstawia położenie komponentów tomografu.



Rys. 1. Fotografia tomografu pojemnościowego DenidiaECT

Elektryczna tomografia rezystancyjna (ang. *Electrical Resistance Tomography* - ERT) jest techniką przeznaczoną do nieinwazyjnej wizualizacji rozkładu konduktywności w obszarze czujnika pomiarowego. Pomiar rezystancji dokonywany jest pomiędzy elektrodami rozmieszczonymi w obiekcie, w którym zachodzi badany proces. Przykładem medium powszechnie występującego w procesach przemysłowych jest woda. Z uwagi na jej wysoką wartość względnej przenikalności elektrycznej oraz konduktywność stanowi pewne utrudnienie dla zastosowania tylko samej techniki ECT. Obecność wody w procesie przemysłowym wymusza zastosowanie niskich wartości wzmocnień kanałów pomiarowych w urządzeniach tomograficznych ECT albo elektrod o małej powierzchni zaprojektowanych jako czujnik wewnętrzny. To z kolei wpływa niekorzystnie na czułość pomiarową tomografów i obarcza pomiary znaczącym błędem w przypadku, gdy oprócz wody w procesie znajduje się np. gaz i olej. Wówczas stosując tomografię ECT trudno jest rozróżnić od siebie gaz i olej.

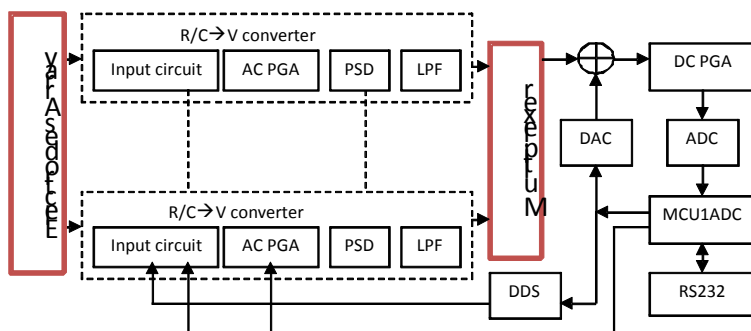
Prace badawcze nad rozwojem urządzenia tomograficznego doprowadziły do modyfikacji jego torów pomiarowych i do rozszerzenia jego możliwości pomiarowych o moduł rezystancyjny. Tomograf charakteryzuje się dodatkowo możliwością realizacji pomiarów pojemnościowych i rezystancyjnych jednocześnie. Opracowane rozwiązanie samo automatycznie dostosowuje się do zaistniałych warunków cały czas nieprzerwanie monitorując wnętrze rurociągu. Urządzenie jest zaprojektowane do wizualizacji procesów przepływowych gaz/olej/woda.

W celu rozbudowy tomografu o moduł pomiaru konduktywności opracowane zostały dodatkowe konwertery rezystancji na napięcie. Mierzona rezystancja międzyelektrodowa R_{ij} między elektrodami i oraz j oparta jest na obwodzie wymuszania sygnałem AC i pomiarze przepływającego prądu pomiędzy tymi

elektrodami. Mierzony prąd jest proporcjonalny do konduktancji G_{ij} materiału znajdującego się między elektrodami (ij), a rezystancja jest obliczona jako stosunek napięcia wymuszającego U_{Ex} i zmierzonego prądu I_m :

$$R_{ij} = \frac{U_{Ex}}{I_m} = \frac{1}{G_{ij}} \quad (1)$$

Na rysunku 2 zamieszczono tor pomiarowy realizujący pomiar rezystancji. Z uwagi na nową funkcję tomografu, obecnie zwany jest on tomografem *DenidiaERCT*.



Rys. 2. Schemat pomiaru rezystancji w tomografie DenidiaERCT

Obecnie system tomograficzny umożliwia pomiar rezystancji pomiędzy 32 elektrodami. Każdy kanał pomiarowy składa się z obwodu wejścia, programowalnych wzmacniaczy (ACPGA), detektora fazoczułego (PSD) oraz filtra dolnoprzepustowego (LPF). Struktura obwodu wejścia oparta jest o wzmacniacze ładunku dzięki czemu układ odporny jest na rezystancje pasożytnicze. Efekt ten jest przydatny w przypadku procesów z mieszaninami o wysokiej rezystywności. Programowalne wzmacniacze konfiguruje poziom wzmocnienia sygnału w zależności od czujnika. Detektor fazoczuły jest zoptymalizowany na pomiar rezystancji dzięki czemu pozostała impedancja nie ma wpływu na jakość pomiaru. Jako filtr dolnoprzepustowy został zastosowany 4-rzędowy filtr Butterworth'a z czasem ustalania ok. 60μs. Częstotliwość sygnału wymuszającego w module ERT wynosi 100kHz, a z kolei w ECT 500kHz.

W obwodzie pomiarowym zastosowany jest dodatkowo konwerter cyfrowo-analogowy (DAC), którego zadaniem jest kompensacja rezystancji pasożytniczych, a w celu dostosowania tomografu do dowolnej struktury czujnika wprowadzone zostały programowalne wzmacniacze DC (DCPGA).

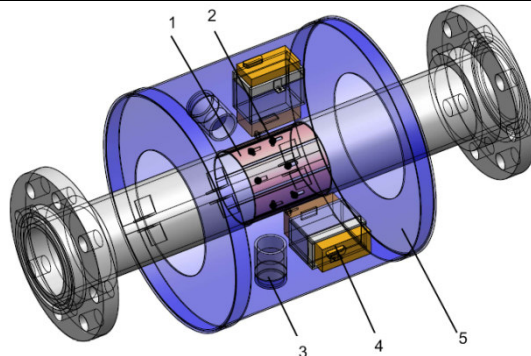
W trakcie prac nad modyfikacją tomografu zmianie uległ również algorytm auto-kalibracji wzmocnień systemu zarówno dla moduły rezystancyjnego jak i dla

pojemnościowego. Zmiana, o której mowa, polega na realizacji dodatkowego etapu kalibracji wzmacnień AC. Połączenie funkcji auto-kalibracji oraz kompensacji sygnałów pasożytniczych sprawia, że dwu-modalny system tomograficzny *DenidiaERCT* jest systemem bardzo uniwersalnym potrafiącym mierzyć szeroki zakres sygnałów i dostosować swoją czułość pomiarową do badanego procesu (medium) oraz czujnika pomiarowego.

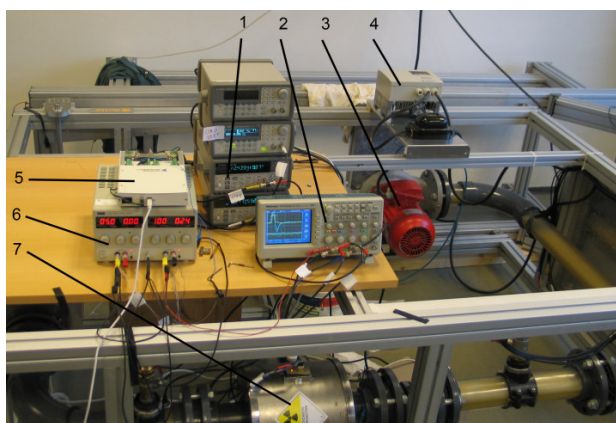
3. TOMOGRAFICZNY CZUJNIK WIELOMODALNY (GAMMA, ECT, ERT)

Przedstawiony w poprzednim rozdziale tomograf rezystancyjno – pojemnościowy pozwolił na zastosowanie go w systemie, którego zadaniem jest pomiar udziału trzech faz w przepływie wielofazowym wody, ropy i gazu. W tym celu został zaprojektowany i wykonany w Katedrze Informatyki Stosowanej czujnik rezystancyjno – pojemnościowy rozbudowany o system pomiaru promieniowania gamma. Podczas realizacji prac badawczych w Bergen został zbudowany i przebadany multimodalny tomograf do badania przepływów trójfazowych. Urządzenie to łączy w sobie możliwości pomiarów tomograficznych realizowanych przy wykorzystaniu tomografii pojemnościowej, rezystancyjnej oraz tomografii promieniowania gamma. Schemat tego tomografu jest przedstawiony na rysunku 3. Na rurze PCV o średnicy 90 mm umieszczony został czujnik pojemnościowy składający się z 8 miedzianych elektrod (1) o szerokości 25mm, pomiędzy którymi rozmieszczono szpilkowe elektrody rezystancyjne (2) o średnicy 3mm wykonane ze stali kwasoodpornej. W stalowej obudowie (5) zapewniającej ochronę przed promieniowaniem gamma, w ołowianych uchwytach (3) z kolimatorami zostały umieszczone źródła promieniowania ^{241}Am . Po przeciwległych stronach uchwytów są umieszczone sensory promieniowania gamma (4) Evaluator eV1000 firmy Evproducts. Widok czujnika zamontowanego w instalacji pomiaru przepływu przedstawiony jest na rysunku 4.

Badania tomografu multimodalnego zostały przeprowadzone na instalacji do przepływów wielofazowych wykonanej w układzie poziomym. Instalacja o pojemności 35,6l jest wykonana z rur PCV o średnicy 90 mm. Jeden z segmentów jest wykonany ze stali w celu odprowadzenia ładunków elektrostatycznych z instalacji PCV.



Rys. 3. Schemat czujnika multimodalnego. 1 - Elektrody pojemnościowe, 2 - szpilkowe elektrody rezystancyjne, 3 – źródło promieniowania gamma w obudowie, 4 - Czujnik eV1000, 5 - Stalowa obudowa chroniąca przed promieniowaniem

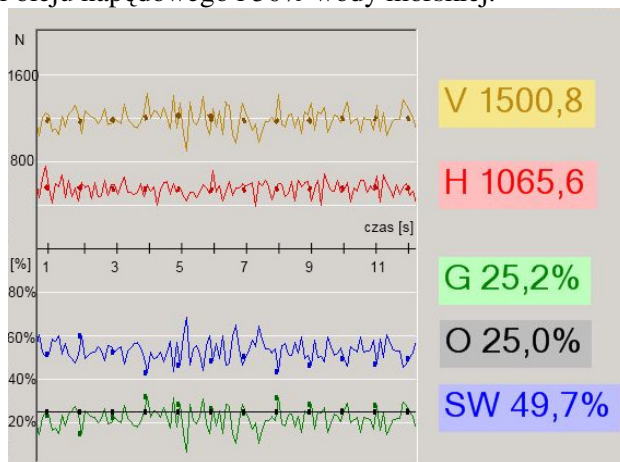


Rys. 4. Widok stanowiska pomiarowego. 1 – liczniki impulsów, 2 – Oscyloskop kontrolny, 3 – Napęd pompy odśrodkowej, 4 – Falownik napędu pompy, 5 –karta pomiarowa National Instruments, 6 – Zasilacz do czujników eV1000, 7 - Multimodalny czujnik tomograficzny

Pomiar promieniowania gamma jest realizowany poprzez zliczanie impulsów generowanych przez eV1000 za pomocą karty wielofunkcyjnej NI6259 a czujnik rezystancyjno-pojemnościowy został podłączony do tomografu DenidiaERCT.

System pomiarowy wykonany w ten sposób umożliwia przeprowadzenie pomiarów udziału faz w przepływach wielofazowych: gazu, wody morskiej i oleju. Taki rodzaj przepływu występuje w przemyśle wydobywczym ropy naftowej i przewiduje się możliwość praktycznego zastosowania opracowanego rozwiązania. Badania doświadczalne na instalacji wielofazowej potwierdziły przydatność systemu do takich zastosowań. Opracowany program pozwalał na

bieżąco przeprowadzać pomiary i wizualizować bieżący skład fazowy przepływu. Pomiary były przeprowadzane co 0,1 s, wyświetlano uśrednione wyniki obliczeń co 1 s. Przykładowe wyniki pomiaru są przedstawione na rysunku 5. W górnej części wykresu są przedstawione wyniki pomiarów promieniowania gamma (stopnia jego pochłaniania) przedstawione jako liczby impulsów zliczonych przez czujniki eV1000 (poziomy oznaczony H i pionowy oznaczony V) w czasie 100 ms. Dolna część wykresu przedstawia obliczony udział procentowy faz w przepływie: gazu(G), oleju napędowego (O) i wody morskiej (SW). Wykres przedstawia wyniki pomiaru przepływu zawierającego po 25% gazu i oleju napędowego i 50% wody morskiej.



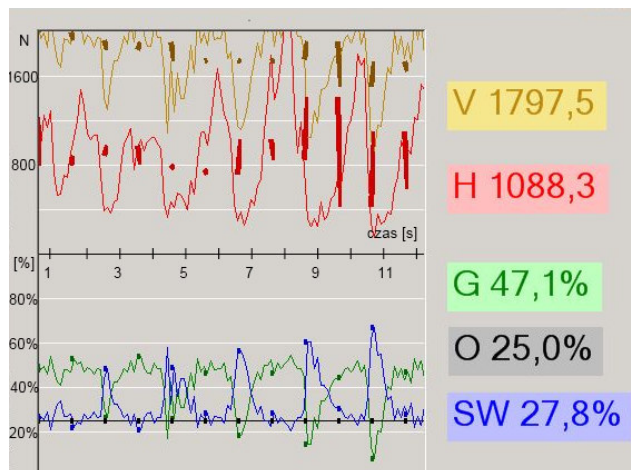
Rys. 5. Wyniki pomiarów i obliczeń udziału poszczególnych faz w przepływie stabilnym

Inny rodzaj przepływu występujący podczas powolnego rozruchu pompy przedstawia rysunek 6. Do rurociągu zostało nalane po 25% oleju napędowego (O) i wody morskiej (SW). Wyniki pomiarów dopowiadające temu typowi przepływu przedstawia rysunek 7.

Uśrednione wyniki obliczeń pokazują zawartość 25% oleju napędowego (O) i 27,8% wody morskiej (SW) oraz pulsacyjny charakter przepływu uwidoczniiony na rysunku 7.



Rys. 6. Przykład przepływu występującego podczas powolnego rozruchu pompy



Rys. 7. Wyniki pomiarów i obliczeń udziału poszczególnych faz w przepływie podczas rozruchu pompy

W celu rejestracji pomiarów i przeprowadzania obliczeń udziału faz w przepływie została opracowana aplikacja, której zadaniem jest rejestracja i wizualizacja pomiarów, a także archiwizacja pomiarów na dysku. Program umożliwia na bieżąco (on-line) wyświetlanie wyników pomiarów i obliczeń, jak również zapisywanie danych na dysku w celu ich późniejszego przetwarzania. Zapisane dane mogą być wczytane do aplikacji i przetwarzane off-line bez konieczności korzystania z czujnika z zamontowanymi źródłami promieniowania gamma i jego detektorami. Przykładowa kopia ekranu działającej aplikacji jest przedstawiona na rys. 8 [2], [3].

Podczas prac badawczych przeprowadzanych na instalacji w Bergen wykonano szereg pomiarów udziału poszczególnych faz w przepływie wielofazowym. Wykazały one w szerokim zakresie składu mieszaniny wielofazowej, że błąd pomiaru zawierał się w granicach 6 – 12%. Przedstawione rozwiązanie systemu pomiaru przepływu wielofazowego zostało zgłoszone do opatentowania w Europejskim Biurze Patentowym [4].

PODZIĘKOWANIA

Prace badawcze zostały zrealizowane w ramach projektu Unii Europejskiej Maria Curie Transfery of Knowledge DENIDIA. Autorzy dziękują za wsparcie badań poprzez projekt naukowo-badawczy pt. „Uzyskanie doskonałości w badaniach naukowych i przemysłowych zastosowaniach bezinwazyjnych systemów diagnostycznych” nr 167/6, PR UE/2007/7. Projekt finansowany jest

przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego RP i wspomaga realizację projektu DENIDIA.

LITERATURA

- [1] Johansen G.A., Jackson P, *Salinity independent measurement of gas volume fraction in oil/gas/water pipe flow*, Applied Radiation and Isotopes, 2000, Vol. 53, pp. 595-601.
- [2] Nowakowski J, Hammer E. et al. “*Application of multimodality tomography for multi phase flow measurements*” 6 World Congress on Process Tomography, Beijing 2010
- [3] Nowakowski J, Hammer E. et al. “*Application of ECT/ERT/gamma ray image reconstruction algorithm for multi phase flow measurements*” 6 World Congress on Process Tomography, Beijing 2010
- [4] EP10461526.5 A method and a device for measuring component fractions in a multi-phase flow. European Patent Application.

DESIGN OF MULTIMODALITY TOMOGRAPHY SYSTEM (GAMMA, ECT, ERT) FOR MULTI PHASE FLOW VISUALISATION

Abstract

The multi phase flow measurements are very important tasks in many areas of industrial processes applications. One of them is undersea exploration of oil in the petroleum industry. The submitted paper presents application of multi modality: capacitance, impedance and gamma ray tomography for performing measurements of a flow composed of sea water, oil and gas flow. The paper presents design of the system and results of experiments performed in University of Bergen. The experiments were done using ECRT tomograph designed and built in Technical University of Lodz and combined measurements of signals acquired from all measuring modalities. Applied algorithm allowed to speed up on-line measurements and presented results in a form required in industrial applications.

Politechnika Łódzka
Katedra Informatyki Stosowanej