

# PRZEMYSŁOWY TOMOGRAF POJEMNOŚCIOWY DO BADANIA PRZEPIYWÓW DWUFAZOWYCH

**Piotr Zaprawa**

Instytut Elektrotechniki, Oddział w Gdańsku

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki pracy, której celem było opracowanie układu tomografu pojemnościowego dedykowanego do zastosowań przemysłowych. Został on zbudowany na metalowej rurze z podłączonym układem kontrolno-pomiarowym, zdolnym do samodzielnej pracy na przewodzie rurowym. Na potrzeby prezentowanego urządzenia zostały zaprojektowane i zbudowane dedykowane układy pomiarowe. W pracy wykazano, że mogą one posłużyć do opracowania nowego, w pełni funkcjonalnego układu, który może znaleźć zastosowanie w przemyśle.

**Słowa kluczowe:** DSP, przetwarzanie sygnałów, tomografia

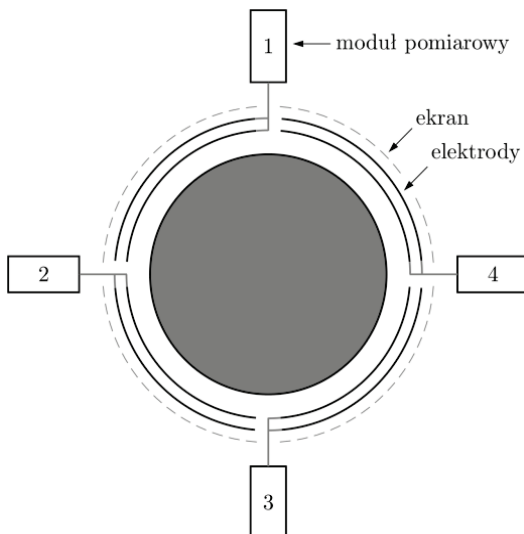
## AN INDUSTRIAL CAPACITANCE TOMOGRAPHY APPLICATION FOR TWO-PHASE FLOWS

**Abstract.** In this paper results of work directed to make an industrial version of a capacitance tomography application was presented. It was build on a metal pipe with a control and measurement unit connected in. This ECT application was prepared for an independent work, without necessity to connect any external personal computer. For the prepared application dedicated measurement modules were build. Presented modules can be used for preparing other applications based on ECT.

**Keywords:** DSP, digital signal processing, tomography

### Wstęp

Tomografia pojemnościowa jest metodą rekonstrukcji obrazu wnętrza badanego obiektu na podstawie szeregu pomiarów elektrycznych. Jest ona realizowana za pośrednictwem tomografu, który składa się z kilku, kilkunastu bądź kilkudziesięciu elektrod podłączonych do układu pomiarowego. Elektrody te są rozmieszczone wokół badanego obiektu w sposób, który wynika głównie z jego kształtu (rys. 1). W zależności od zmian rodzaju oraz ilości medium znajdującego się wewnątrz, zmianie ulega wartość przenikalności dielektrycznej kondensatora każdej pary elektrod w układzie (rys. 2).



Rys. 1. Przekrój poprzeczny czteroelektrodowego tomografu pojemnościowego

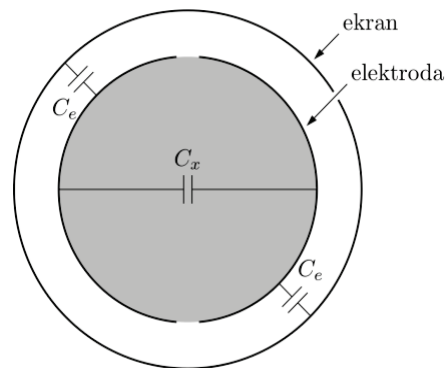
Przy pomocy tomografu realizowany jest proces pomiaru prądu, jaki przepływa przez pojemność  $C_x$ , pod wpływem zmian napięcia na okładkach kondensatora (rys. 2). W układach N-elektrodowych otrzymanych zostaje  $N(N-1)/2$  niezależnych pomiarów. Na ich podstawie realizowana jest rekonstrukcja obrazu [7], która wiąże się z rozwiązaniem równania Poissona:

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

Układy tomografii pojemnościowej składają się z szeregu podzespołów elektronicznych. Na ich podstawie konstruowane są laboratoryjne oraz przemysłowe układy pomiarowe.

W wielu rozwiązaniach budowa układów laboratoryjnych bazuje na wykorzystaniu zewnętrznego komputera osobistego oraz uniwersalnych układów pomiarowych [1, 3, 4, 5]. Zapewnienie w warunkach przemysłowych choćby minimalnych wymogów niezbędnych do ich pracy, może być bardzo trudne. Dodatkowo,

konieczność spełnienia wymogów odnośnie pracy w warunkach zagrożonych wybuchem (europejska dyrektywa ATEX), może w ogóle wykluczyć je z użycia.



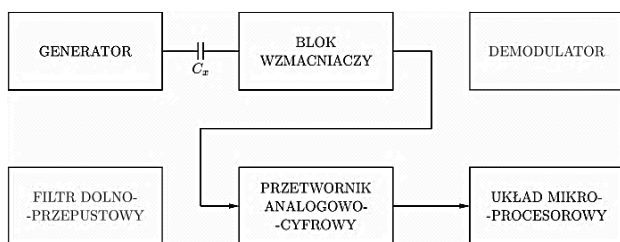
Rys. 2. Rozmieszczenie pojemności w dwuelektrodowym tomografie pojemnościowym

Aby możliwe było sprawne opracowanie nowego układu pomiarowego dla przemysłu, bazującego na tomograficznych technikach pomiarowych, należało przygotować elastyczne zaplecze sprzętowe. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki pracy nad takim układem. W ramach tego zadania wykonana została aplikacja do badania przepływów dwufazowych, która przeznaczona jest do montażu na metalowym przewodzie rurowym.

### 1. Koncepcja budowy toru analogowego

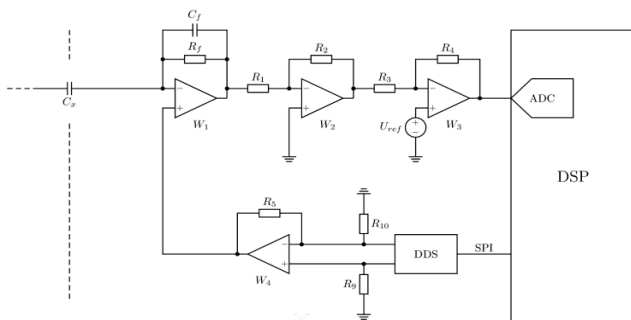
Wśród rozwiązań konstrukcyjnych, jakie znajdują zastosowanie w tomografii pojemnościowej, najczęściej spotykane są układy „ładuj-rozładuj” oraz ze stymulacją sygnałem sinusoidalnym. W pierwszym z nich okładka kondensatora (rys. 2) przełączana jest za pośrednictwem kluczy półprzewodnikowych pomiędzy źródłem napięcia stałego oraz masą układu. W drugim rozwiązaniu zmiany napięcia realizowane są poprzez stymulację elektrody napięciem sinusoidalnym. W każdym z tych rozwiązań druga elektroda badanej pojemności utrzymywana jest na poziomie wirtualnej masy przy pomocy wzmacniacza operacyjnego. Różnica pomiędzy każdym z tych układów jest dość istotna. W rozwiązaniach typu „ładuj-rozładuj” wzmacniacze w torze analogowym pracują jako układy prądu stałego, natomiast dla stymulacji sygnałem sinusoidalnym pracują one jako układy prądu zmiennego.

W aplikacjach tomografii pojemnościowej, które zostały wykonane przez autora, wykorzystana została metoda stymulacji elektrod sygnałem sinusoidalnym. Z tą jednakże różnicą, że tor analogowy został wykonany wg pomysłu autora (rys. 3).



Rys. 3. Schemat blokowy analogowego toru pomiarowego

Najczęściej spotykane rozwiązania toru analogowego ze stymulacją sygnałem sinusoidalnym zawierają generator sygnału, blok wzmacniaczy, detektor fazy lub amplitudy, filtr dolnoprzepustowy oraz przetwornik analogowo-cyfrowy [8, 9, 10, 11]. Częstotliwość sygnału stymulującego na wyjściu generatora wynosi zazwyczaj od kilkuset kHz do kilku MHz. Z tego też względu częstotliwość sygnału mierzonego była ograniczana przed podaniem na wejście przetwornika analogowo-cyfrowego. Autor pracy zaproponował inne rozwiązanie, które sprowadziło się do eliminacji elementów odpowiedzialnych za ograniczanie częstotliwości sygnału (rys. 3). W konsekwencji tego na wejściu przetwornika pojawił się sygnał analogowy o częstotliwości od 500 do 600 kHz.



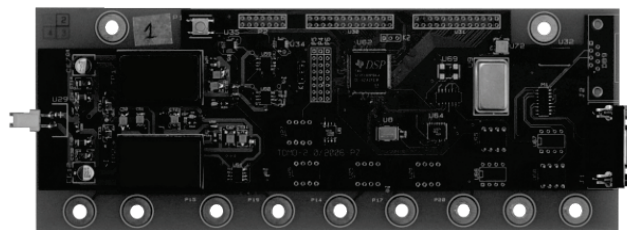
Rys. 4. Uproszczony schemat elektryczny toru analogowego modułu pomiarowego

W celu realizacji pomiaru sygnału zmiennego, należy wykonać serię precyzyjnych pomiarów. Do tego celu wytypowany został procesor sygnałowy serii TMS320F281X z wbudowanym przetwornikiem analogowo-cyfrowym. Charakteryzuje się on 12-bitową rozdzielczością sygnału oraz 16-pozycyjnym sekwenserem. Częstotliwość sygnału generatora została dobrana w taki sposób, aby pierwszy i ostatni pomiar wykonany został dla kąta sinusoidy przesuniętego o  $360^\circ$ . Uproszczony schemat elektryczny analogowego toru pomiarowego przedstawiony został na rys. 4.

## 2. Modele i prototypy

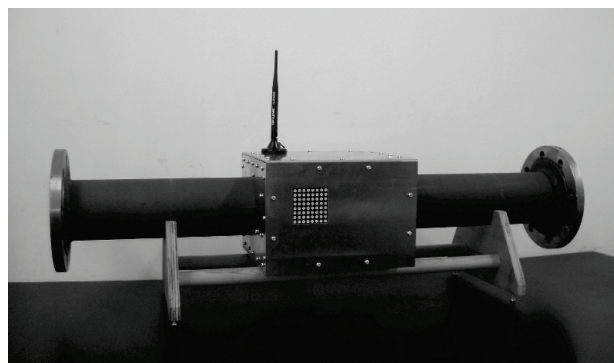
W Instytucie Elektrotechniki w Gdańsku prowadzone są prace zmierzające do opracowania przemysłowej wersji tomografu pojemnościowego. W minionym okresie opracowany został model dwuelektrodowy oraz prototypy czteroelektrodowe, które przeznaczone były do pomiarów przepływów dwufazowych. Każdy z nich był w pełni działającym układem, przewidzianym do pracy na rurze wykonanej z pleksi [12, 13, 14, 15, 16]. Współpracowały one z komputerem osobistym, na którym zainstalowany był program odpowiedzialny za rekonstrukcję obrazu.

Czteroelektrodowy tomograf pojemnościowy był pierwszym układem, który został zbudowany na podstawie dedykowanych modułów pomiarowych. Konstrukcja tych modułów wynikała z doświadczeń zebranych z badania układu dwuelektrodowego. Do podstawowych zalet układu należała możliwość integracji większej ilości układów ze sobą, duża szybkość realizacji pomiarów oraz bardzo niski poziom zakłóceń. Natomiast do wad należy zaliczyć między innymi znaczny rozmiar pojedynczego układu pomiarowego, który dedykowany został do montażu na rurze wykonanej z pleksi.



Rys. 5. Dedykowany moduł pomiarowy TOMO-2

W późniejszym okresie zbudowany został układ tomografu pojemnościowego, który zamontowany został na metalowej rurze. Został on wykonany w oparciu o moduły pomiarowe zaprojektowane do wcześniejszych konstrukcji wykonanych z pleksi. Dopiero ta wersja układu była na tyle zaawansowana, że możliwe stało się uniezależnienie od komputera osobistego (rys. 6).



Rys. 6. Pierwsza wersja tomografu pojemnościowego zainstalowanego na metalowej rurze

W opracowaniu przedstawionym na rys. 6 po raz pierwszy zastosowano rozwiązanie prezentacji wyników rekonstrukcji obrazu w postaci matrycy z diodami LED. Dodatkowo zapewniono możliwość współpracy i komunikacji z zewnętrznymi urządzeniami za pośrednictwem przewodowej i bezprzewodowej sieci ETHERNET.

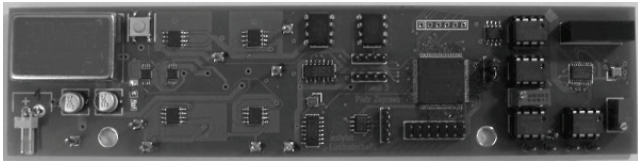
## 3. Układ docelowy

Na podstawie zebranych doświadczeń zaprojektowano oraz wykonano nową, docelową wersję układu tomografu pojemnościowego do zastosowań przemysłowych. W opracowanym układzie wykorzystano nową wersję modułu pomiarowego, która została w znaczny sposób przeprojektowana. Dzięki temu wielkość obwodu drukowanego zmniejszyła się o około 50%. Usunięto także nieprzydatne interfejsy komunikacyjne, w miejsce których wprowadzono nowe, bardziej przydatne rozwiązania. W znaczący sposób przeprojektowano także zasilanie układu oraz zmodyfikowano analogowy tor pomiarowy. Nowa wersja układu pomiarowego przedstawiony została na rys. 7.

Opracowany układ pomiarowy, przewidziany do instalacji w tomografie pojemnościowym, dedykowany jest do współpracy z pojedynczą elektrodą. Zarówno elektrody jak i moduł znajdują się w bezpośredniej bliskości, dzięki czemu wyeliminowano konieczność stosowania długich, ekranowanych przewodów sygnałowych. Elektrody zostały wklejone we wnętrzu rury i przez odpowiednie wyprowadzenia podłączone do modułów pomiarowych.

Na uwagę zasługują także sposoby integracji modułów w ramach jednego urządzenia. Mianowicie każdy z modułów wyposażony został w interfejs sieci CAN. Umożliwia on bezpośrednie połączenie ze sobą do 250 układów pomiarowych wraz z elektrodami. W pośredni sposób możliwe jest zbudowanie tomografu o większej liczbie elektrod. Istnieje także możliwość podłączenia każdego modułu pomiarowego za pośrednictwem

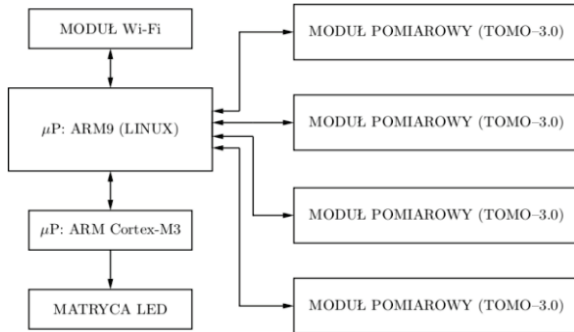
separowanego interfejsu RS232/TTL. Ten rodzaj komunikacji umożliwia transmisję danych z prędkością do 460 kb/s.



Rys. 7. Nowa wersja modułu pomiarowego przeznaczona do montażu na metalowej rurze

W przypadku zmiany konfiguracji w tomografii pojemnościowym, nie jest wymagana modyfikacja oprogramowania modułu pomiarowego. Dodatkowo istnieje możliwość aktualizacji oprogramowania bez konieczności jakiegokolwiek ingerencji w układ.

Nowa wersja tomografu pojemnościowego (rys. 8 i 9) składa się z szeregu modułów pomiarowych (których rzeczywista liczba zależy od konfiguracji) oraz modułów mikroprocesorowych z procesorami o architekturze odpowiednio ARM-9 oraz ARM-7. Dzięki zasilaniu z akumulatora układ jest całkowicie niezależny.

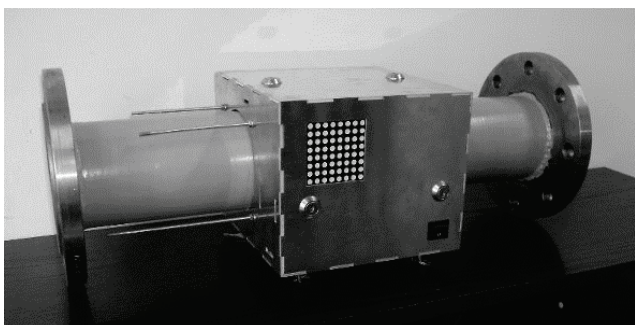


Rys. 8. Schemat blokowy docelowej wersji tomografu pojemnościowego przeznaczonego do montażu na metalowej rurze

Wewnątrz mikroprocesorowego modułu z procesorem ARM-9, zainstalowany został system operacyjny GNU/Linux w wersji wbudowanej. Współpracuje on z użytkownikami, a także realizuje obsługę modułów pomiarowych oraz algorytmu rekonstrukcji obrazu.

Ze względu na swoje przemysłowe przeznaczenie, układ został zamknięty w metalowej obudowie. Umieszczona na obudowie matryca LED pozwala na skuteczną pracę układu w szerokim zakresie temperatur a jednocześnie jest odporna na działanie czynników zewnętrznych.

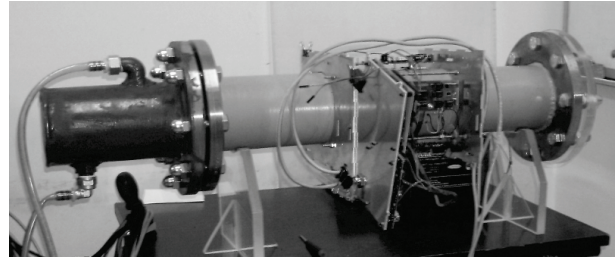
Dostęp do zaawansowanych funkcji układu został zapewniony dzięki przewodowej lub bezprzewodowej możliwości podłączenia urządzeń zewnętrznych za pośrednictwem sieci ETHERNET. Dedykowany, graficzny program komputerowy po połączeniu z oprogramowaniem tomografu pojemnościowego, umożliwia dodatkową konfigurację oraz podgląd bardziej zaawansowanych funkcji.



Rys. 9. Docelowa wersja tomografu pojemnościowego przeznaczona do montażu na metalowych przewodach rurowych

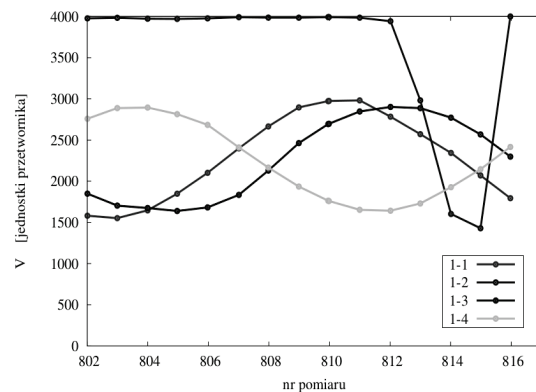
## 4. Wyniki pomiarów

Tomograf pojemnościowy, który został zbudowany na bazie modułów pomiarowych TOMO-3, poddano badaniom eksperymentalnym (rys. 10). Do tomografu został przykręcony zaślepiony fragment metalowej rury. Posiada on dwa króćce, pozwalające na podłączenie za pośrednictwem przewodów z igelitu zbiornika z wodą.



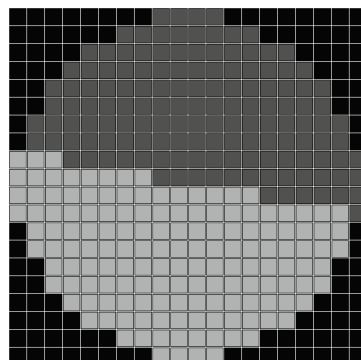
Rys. 10. Docelowa wersja tomografu pojemnościowego podczas badań

Wyniki pomiarów napięcia na wejściu przetwornika ADC (rys. 4), wykonanych przez pojedynczy moduł pomiarowy, zaprezentowano na rys. 11. Zostały one wykonane dla rury całkowicie wypełnionej wodą. Zostały na nim zamieszczone przebiegi dla czterech kolejnych cykli pomiarowych, odpowiednio dla każdego z modułów. Odkształcony przebieg dotyczy pomiaru w stanie nasycenia wzmacniaczy, podczas stymulacji w obrębie tego samego modułu.



Rys. 11. Przebiegi napięcia zarejestrowanego przez moduł pomiarowy podczas badania rury całkowicie wypełnionej wodą

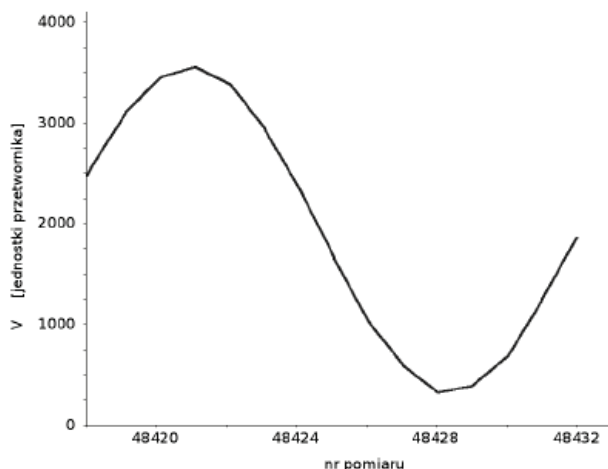
Wyniki rekonstrukcji obrazu zawartości rury w 50 % wypełnionej wodą, przedstawione zostały na rys. 12. W prezentowanym przypadku przekrój kołowy został wpisany w macierz o rozmiarze 20x20. Otrzymane wyniki zostały osiągnięte przy wykorzystaniu metody liniowej projekcji wstecznej, rozbudowanej o blok korekcji obrazu.



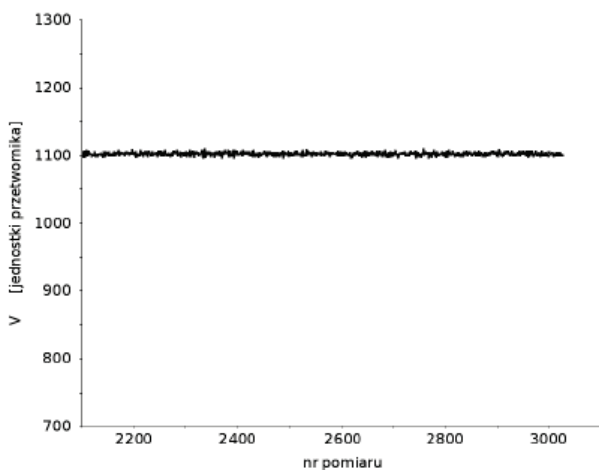
Rys. 12. Wynik rekonstrukcji obrazu wnętrza rury wypełnionej w 50 % wodą



Wyniki pomiaru pojedynczego modułu pomiarowego na dedykowanym stanowisku badawczym, przedstawione zostały na rys. 13 i 14. Zostały one przeprowadzone w układzie z dwoma elektrodami podłączonymi do pojedynczego modułu pomiarowego.



Rys. 13. Przebieg napięcia na wejściu przetwornika ADC podczas pomiaru na dedykowanym stanowisku pomiarowym



Rys. 14. Skuteczna wartość napięcia podczas pomiaru na dedykowanym stanowisku pomiarowym

Wyniki pomiarów zamieszczonych na rys. 11, 13 oraz 14 przedstawiają napięcie w jednostkach przetwornika ADC dla kolejnych pomiarów. W 12-bitowym przetworniku odpowiada to zakresowi od 0 do 4095, który koresponduje z napięciami od 0 do 3.0 V.

## 5. Zastosowania

Na podstawie układów opracowanych przez autora wykonane zostały próby eksperymentalne. Obejmowały one pomiary mające na celu określenie poziomu wody w przewodach rurowych oraz oszacowanie stopnia zanieczyszczenia oleju napędowego.

Opracowany układ może znaleźć zastosowanie w elektrociepłowniach, miejskich instalacjach ciepłowniczych oraz wodociągach, zakładach przetwarzających paliwa kopalne oraz stacjach dystrybucji paliw.

Na podstawie modułów pomiarowych TOMO-3 zbudowany został docelowy układ tomografu pojemnościowego. Ze względu na swoją funkcjonalność może on posłużyć do budowy innych układów z zakresu tomografii pojemnościowej o dowolnej liczbie elektrod.

## Podziękowania

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki.

## Literatura

- [1] ARKO, *Image Reconstruction Algorithm for Electrical Capacitance Tomography (ECT)*, Lokakarya Komputasi Dalam Sains dan Teknologi Nuklir (XII), 2001.
- [2] Brzeski P., Mirkowski J., Olszewski T., Płaszowski A., Smolik W., Szabatin R., Multichannel capacitance tomograph for dynamic process imaging. *Opto-Electronics Review*, 11(3), 175-180, 2003.
- [3] Dickin F. J., Hoyle B. S., Hunt A., Huang S. M., Ilyas O., Lenn C., Waterfall R. C., Williams R. A., Xie C. G., Beck M. S.: *Tomographic imaging of industrial process equipment: techniques and applications*, Circuits, Devices and Systems, 139(1), 72–82, 1992.
- [4] Fidos H., Wajman R., Banasiak R., Sowiński J., Sankowski D., *Application of Electrical Capacitance Tomography System for Non-Invasive Phases Distribution Detection in Gas-Liquid Mixtures*, Automatyka, 14(3/2), 671–680, 2010.
- [5] Gamio J. C., Ortiz-Alemn C., Martin R., *Electrical capacitance tomography two-phase oil-gas pipe flow imaging by the linear back-projection algorithm*, Geofisica Internacional, 44(3), 265–273, 2005.
- [6] Hahnel H., Yang W. Q., York T. A., *An AC-base capacitance measuring circuit for tomography systems and its silicon chip design*. IEE, 1995.
- [7] Isaksen Ø., *A review of reconstruction techniques for capacitance tomography*. Meas. Sci. Technol., 1996.
- [8] Rerkratn A., Chitsakul K., Soisup A., Wuti V., *Electrical capacitance tomography system for monitoring process flow in pipe*, SICE Annual Conference 2010, 3229–3232, 2010.
- [9] Yang W. Q., Scott A. L., Beck M. S., *High frequency and high resolution capacitance measuring circuit for process tomography*. IEE, 1994.
- [10] Yang W. Q., York T. A., *Capacitance tomography sensor without CMOS switches*. ELECTRONICS LETTERS vol. 33 no. 14, 1997.
- [11] Yang W. Q., York T. A., *New AC-based capacitance tomography system*. IEE, 1999.
- [12] Zaprawa P.: *Tomograf pojemnościowy do pomiaru medium w rurociągach*. Nowa Elektrotechnika 1/2006, s. 15-17.
- [13] Zaprawa P.: *Tomograf pojemnościowy do zastosowań przemysłowych*. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 236, 2008.
- [14] Zaprawa P.: *Nowa konstrukcja tomografu pojemnościowego do kontroli przepływów dwufazowych*. VII Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna PES-7 „Postępy w Elektrotechnice Stosowanej”, Kościelisko 2009.
- [15] Zaprawa P.: *Nowa konstrukcja tomografu pojemnościowego do zastosowań przemysłowych*. Miesięcznik Elektronika nr 2/2010.
- [16] Zaprawa P.: *Capacitance Tomography and its potential application*, Electrical Capacitance Tomography — Theoretical Basis and Applications, 206–216, 2010.

**Mgr inż. Piotr Zaprawa**  
e-mail: pzaprawa@iel.gda.pl

Ur. w 1975 r. ukończył Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej o specjalności Napęd Elektryczny i Energoelektronika. Od 1999 roku pracuje w Oddziale Instytutu Elektrotechniki w Gdańsku na stanowisku asystenta w Pracowni Napędów i Sterowania. Tomografią zajmuje się od 2005 roku. Jego prace zostały nagrodzone m. in. brązowym medalem na wystawie w Genewie.



Artykuł recenzowany