

AUTOREFERAT

przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych,
w szczególności określonych w art. 16 ust. 2 ustawy
z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym
oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki

dr inż. Radosław Wajman
Instytut Informatyki Stosowanej
Wydział Elektroniki, Elektrotechniki, Informatyki i Automatyki
Politechnika Łódzka

Łódź, 9 kwietnia 2019

SPIS TREŚCI

Spis treści

1. Dane osobowe.....	3
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.....	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	3
4. Wskazanie osiągnięcia naukowego	3
a) Tytuł osiągnięcia naukowego	3
b) na które składa się cykl ośmiu prac naukowych, powiązanych tematycznie, z okresu 2006-2017	3
c) Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników, wraz z omówieniem ich aspektów użytkowych.....	6
5. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze	22
6. Literatura	24

poświęcone komputerowym metodom nieinwazyjnej trójwymiarowej diagnostyki tomograficznej i rozmytej regulacji dedykowanym dla procesów przepływów dwu-fazowych.

Dlatego też jako osiągnięcie (wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki) wskazuję cykl publikacji powiązanych tematycznie, na który składa się osiem prac. Zostały one wymienione poniżej w tabeli nr 1. w kolejności chronologicznej, wraz z wyszczególnioną pozycją referencyjną wynikającą z umieszczenia tych prac w załączniku nr 3 do niniejszego autoreferatu na liście pt. „Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki” (np. I.B.1 oznacza rozdział I, sekcja B, pozycja nr 1). W skład cyklu wchodzi:

- 6 publikacji w czasopismach indeksowanych w bazie JCR i na liście MNiSW część A,
- 2 publikacje w recenzowanych czasopismach z listy MNiSW część B.

Uśredniona wartość parametru „*impact factor*” IF ośmiu publikacji przedstawionych w ramach cyklu wynosi 1.69, a sumaryczny 5-Year IF – 1,81. Sumaryczna liczba punktów według MNiSW, zgodnie z obowiązującym od roku 2017 wykazem czasopism naukowych, jest równa 195. Mój indeks Hirscha wg baz Scopus i Web of Science z wyłączeniem autocytowań wynosi odpowiednio 9 i 8¹.

Tabela 1: Wykaz publikacji powiązanych tematycznie zgodnie z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki

Poz. z zal. 3	Publikacja
I.B.1.	<p>R. Wajman, R. Banasiak, Ł. Mazurkiewicz, T. Dyakowski, D. Sankowski „<i>Spatial imaging with 3D capacitance measurements</i>”; Meas. Sci. Technol. 17 (July 2006) pp. 2113-2118</p> <p>Lokalizacja elektroniczna DOI: 10.1088/0957-0233/17/8/009 Impact Factor: 1,685 5-years Impact Factor: 1,735 Punkcja MNiSW: 35 (Część A) Rodzaj pracy: artykuł, zasięg międzynarodowy Udział własny: 40%</p>
I.B.2.	<p>R. Wajman, R. Banasiak, Ł. Mazurkiewicz, D. Sankowski „<i>Reply to comments on 'Spatial imaging with 3D capacitance measurements'</i>”; Meas. Sci. Technol. 18 No 11 (November 2007) pp. 3668-3670</p> <p>Lokalizacja elektroniczna DOI: 10.1088/0957-0233/18/11/N02 Impact Factor: 1,685 5-years Impact Factor: 1,735 Punkcja MNiSW: 35 (Część A) Rodzaj pracy: artykuł, zasięg międzynarodowy Udział własny: 50%</p>
I.B.3.	<p>M. R. Rząsa, R. Wajman „<i>Dobór metody wyznaczania mapy czułości dla tomografu pojemnościowego o zwiększonej czułości przy ścianie</i>” ; Automatyka 13/3 (2009), AGH, Kraków, 1361-1368</p> <p>Punkcja MNiSW: 5 (Część B) Rodzaj pracy: artykuł, zasięg krajowy Udział własny: 50%</p>

¹ Współczynniki IF oraz pięcioletni IF (5-Year IF) zostały podane według bazy JCR zgodnie z dostępem z dnia 9 kwietnia 2019. Liczbę punktów przyznawaną za publikację wyszczególniono zgodnie z obowiązującym od roku 2017 wykazem czasopism naukowych ogłoszonym przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 23 grudnia 2015 roku.

I.B.4.	<p>R. Wajman, P. Fiderek, H. Fidos, T. Jaworski, J. Nowakowski, D. Sankowski and R. Banasiak „<i>Metrological evaluation of a 3D electrical capacitance tomography measurement system for two-phase flow fraction determination</i>”; Meas. Sci. Technol., (2013) Vol. 24 No. 065302</p> <p>Lokalizacja elektroniczna DOI: 10.1088/0957-0233/24/6/065302 Impact Factor: 1,685 5-years Impact Factor: 1,735 Punktacja MNiSW: 35 (Część A) Rodzaj pracy: artykuł, zasięg międzynarodowy Udział własny: 30%</p>
I.B.5.	<p>R. Banasiak, R. Wajman, T. Jaworski, P. Fiderek, H. Fidos, J. Nowakowski, D. Sankowski „<i>Study on two-phase flow regime visualization and identification using 3D electrical capacitance tomography and fuzzy-logic classification</i>” International Journal of Multiphase Flow, Vol. 58, 2014, pp. 1-14</p> <p>Lokalizacja elektroniczna DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.07.003 Impact Factor: 2,592 5-years Impact Factor: 3,039 Punktacja MNiSW: 40 (Część A) Rodzaj pracy: artykuł, zasięg międzynarodowy Udział własny: 25%</p>
I.B.6.	<p>R. Wajman, R. Banasiak “<i>Tunnel-based method of sensitivity matrix calculation for 3D-ECT imaging</i>”, Sensor Review, Vol. 34 Iss: 3, (2014), pp.273 – 283</p> <p>Lokalizacja elektroniczna DOI: 10.1108/SR-06-2013-692 Impact Factor: 1,07 5-years Impact Factor: 1,089 Punktacja MNiSW: 20 (Część A) Rodzaj pracy: artykuł, zasięg międzynarodowy Udział własny: 75%</p>
I.B.7.	<p>P. Fiderek, J. Kucharski, R. Wajman “<i>Fuzzy inference for two-phase gas-liquid flow type evaluation based on raw 3D ECT measurement data</i>”, Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 54, 2017, pp.88–96</p> <p>Lokalizacja elektroniczna DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2016.12.010 Impact Factor: 1,407 5-years Impact Factor: 1,522 Punktacja MNiSW: 30 (Część A) Rodzaj pracy: artykuł, zasięg międzynarodowy Udział własny: 40%</p>
I.B.8.	<p>P. Fiderek, T. Jaworski, R. Banasiak, J. Nowakowski, J. Kucharski, R. Wajman “<i>Intelligent system for the two-phase flows diagnosis and control on the basis of raw 3D ECT data</i>”, IAPGOS, Vol. 7, No. 1, 2017, pp. 17-23, ISSN 2083-0157</p> <p>Lokalizacja elektroniczna DOI: 10.5604/01.3001.0010.4576 Punktacja MNiSW: 7 (Część B) Rodzaj pracy: artykuł, zasięg międzynarodowy Udział własny: 35%</p>

Należy nadmienić, że moje osiągnięcia naukowo-badawcze są wynikiem osobistego aktywnego udziału w międzynarodowym projekcie pt. „*Development of Excellence in Non-Invasive Diagnostic System for Industrials and Scientific Applications*” o akronimie: DENIDIA (2006-2010). Projekt ten był realizowany w Instytucie Informatyki Stosowanej PŁ w ramach 6. Programu Ramowego - Mobility - Marie Curie Host Fellowships for the Transfer of Knowledge. Dodatkowo, byłem kierownikiem jednego projektu naukowo-badawczego w dziedzinie informatyki (panel ST6) oraz głównym wykonawcą w czterech innych projektach finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki. Efektem wymiernym tych prac badawczych są publikacje naukowe. Licząc od momentu uzyskania stopnia doktora jestem współautorem:

- 10 artykułów opublikowanych na łamach czasopism indeksowanych w bazie JCR oraz na liście MNiSW część A,
- 4 rozdziałów w anglojęzycznych monografiach,
- 1 europejskiego patentu,
- 24 artykułów opublikowanych na łamach recenzowanych czasopism znajdujących się na liście MNiSW część B,

- 7 projektów, które łącznie uzyskały 16 nagród, bądź wyróżnień na międzynarodowych wystawach innowacji i wynalazczości.

Za każdym razem byłem wykonawcą (a raz kierownikiem) interdyscyplinarnych zespołów badawczych. W skład tych zespołów wchodził przedstawiciel takich dziedzin nauki jak: informatyka, inżynieria procesowa, automatyka, mechanika oraz metrologia. Taki sposób realizacji badań naukowych wymusza współautorstwo w publikacjach naukowych. Niemniej jednak, niniejszy autoreferat porusza tylko te osiągnięcia naukowe, które stanowią mój wkład w zastosowanie informatyki w dziedzinie tomografii procesowej. Oświadczenia o indywidualnym wkładzie, moim i współautorów wymienionych publikacji (w poszczególne etapy ich przygotowywania) stanowiący monotematyczny cykl, zostały dołączone do niniejszego wniosku i autoreferatu w postaci załącznika 4.

c) Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich aspektów użytkowych

Wprowadzenie do tematyki badań

Podstawowym obszarem moich badań dedykowanych aplikacjom przemysłowym, których wyniki zostały zaprezentowane w postaci przedstawionego do oceny cyklu publikacji powiązanych tematycznie, są **komputerowe metody nieinwazyjnej diagnostyki i regulowania procesem przepływów dwufazowych mieszanin gaz-ciecz**. Procesy te należą do najbardziej dynamicznie rozwijającego się nurtu badań mechaniki płynów. W ostatnich latach nastąpił znaczny, ale wciąż niewystarczający, postęp w rozwoju wiedzy na temat tych procesów (Fang Dong et al., 2012). Przepływy dwufazowe są ściśle związane z dynamicznie rozwijającymi się badaniami w dziedzinie inżynierii bioprocessowej, biotechnologii, inżynierii ochrony środowiska, w energetyce i wielu pokrewnych dziedzinach.

Przepływy dwufazowe typu gaz-ciecz stanowią istotną część wielu procesów przemysłowych (Mokhatab, 2008). Jednym z przykładów ich występowania są procesy aeracji (Jothiprakash et al., 2015; Teng et al., 2016), które zachodzą w takich aplikacjach przemysłowych jak reaktory chemiczne (Kiambi et al., 2011), procesy flotacji (Vadlakonda and Mangadoddy, 2017) oraz urządzenia do napowietrzania wody i ścieków (Beux et al., 2007; Guo et al., 2013).

Dwufazowe procesy przepływowe występują również w kolumnach barbotażowych (Abdulmouti, 2015; Delnoij et al., 2000; Mewes and Wiemann, 2003). Ich przeznaczeniem jest realizacja różnych procesów fizyko-chemicznych. Kontrolując wielkość powierzchni międzyfazowej często decyduje się o intensywności przebiegania tych procesów. Dla przykładu w kolumnach air-lift (Akita et al., 1988; Błażej et al., 2004; Kassab et al., 2009) oraz eżektorach (Balamurugan et al., 2007) przepływ cieczy wymuszany jest właśnie poprzez strumień wprowadzanego gazu. Urządzenia takie powszechnie stosowane są w przemyśle wydobywczym (np. procesy flotacji) (Zargaran et al., 2016) lub do wytrącania pewnych frakcji z cieczy w procesach sedymentacji (Malijevsky and Archer, 2013), np. odtłuszczania gdzie istotna jest wielkość pęcherzyków.

Oddzielną grupę stanowią procesy, w których pęcherzyki gazu mogą powstawać w cieczy w wyniku reakcji chemicznych. Ma to miejsce np. w reaktorach chemicznych czy w procesach elektrolizy (Lafmejani et al., 2017; Olesen et al., 2016), w których faza gazowa jest produktem (często ubocznym) reakcji chemicznej. Istnieją też procesy, w których pojawienie się pęcherzyków jest niepożądane np. wymienniki ciepła lub urządzenia grzewcze, gdzie pojawienie się gazu świadczy o niepożądanym wrzeniu cieczy (Solotych et al., 2016) i wymusza sygnalizację stanu awaryjnego. Podobnie jest w przypadku zjawisk kawitacji np. w pompach wirowych (Liu et al., 2015; Zhu et al., 2015).

Omówione powyżej, tylko wybrane, przykłady istnienia i znaczenia przepływów dwufazowych typu gaz-ciecz w procesach przemysłowych uwiadcniają **rosnące potrzeby**

przemysłu w zakresie rozwoju uniwersalnych, nieinwazyjnych i skutecznych metod komputerowej diagnostyki i regulacji procesami przepływów dwufazowych w rurociągach poziomych i pionowych. Znajomość charakterystyki oraz rodzaju przepływu gaz-ciecz jest bardzo istotna podczas projektowania instalacji przemysłowych oraz w procesie badań numerycznych w celu weryfikacji wyników. Z kolei ciągłe monitorowanie i diagnozowanie ewentualnych nieprawidłowości może stanowić istotną informację o ich przebiegu oraz pozwoli na ich ciągłe i automatyczne kontrolowanie i regulowanie. Zastosowanie tego typu rozwiązań we współczesnych systemach produkcyjnych stanowi dzisiaj główne kierunki rozwoju i postępu technologicznego w wielu sektorach przemysłowych, wpisując się tym samym w trendy energooszczędności i podnoszenia jakości. Wszędzie tam, gdzie w produkcji transportowana jest mieszanina faz gaz-ciecz lub gaz-ciało stałe i proces ten nie funkcjonuje optymalnie, bądź nie jest ekonomiczny istnieje potrzeba zastosowania systemu, który byłby w stanie zapobiec wystąpieniu awarii i zatrzymaniu linii produkcyjnej lub sytuacji, gdy z przyczyn złych parametrów przepływu, finalny produkt będzie wadliwy. Takie rozwiązanie byłoby również niezastąpione, w przypadku gdy dany proces przepływu wymaga stałego nadzoru, a środowisko pracy stwarza zagrożenie bezpieczeństwa bądź utraty zdrowia lub życia pracowników. Potrzebny jest wtedy ciągły, automatyczny, nieinwazyjny a zarazem szybki monitoring trudno dostępnych fragmentów rurociągów.

Informatyczne metody trójwymiarowej diagnostyki tomograficznej

Istotną kwestią wielu systemów identyfikacji i sterowania procesów przemysłowych jest ich diagnostyka. Prowadzone od wielu lat badania parametrów przepływu dwufazowego mieszanin gaz-ciecz, nie dają spójnego obrazu tego zagadnienia (Fang Dong et al., 2012). Związane to jest po części z naturą i dużą dynamiką trudnych do badania przepływów dwufazowych, które są w wielu przypadkach zjawiskami stochastycznymi, ale ma również związek z możliwościami badawczymi. W dziedzinie diagnostyki tego rodzaju przepływów wykorzystywano dotychczas metody badawcze, oparte na zastosowaniu najróżniejszych technik pomiarowych (Brebba and Mammol, 2011). Te stosowane powszechnie metody, nie pozwalały z reguły na otrzymanie identycznych rezultatów badań (w wielu przypadkach opis zachodzących zjawisk nie jest jednoznaczny) (Abbagoni and Yeung, 2016; Arvoh et al., 2012; Bertola, 2003; Ozbayoglu and Ozbayoglu, 2009), bądź też ingerowały w badany proces zmieniając jego charakter (Venkata and Roy, 2012; Xie et al., 2004).

Jedną z komputerowych metod pomiarowych oferujących nieinwazyjną diagnostykę dynamicznych procesów przemysłowych jest Elektryczna Tomografia Pojemnościowa – ECT (ang. *Electrical Capacitance Tomography*). Jest to technika dwu- lub trójwymiarowego obrazowania realizowana w oparciu o pomiar właściwości dielektrycznych badanego procesu np. przepływu dwufazowego. Pierwsze systemy ECT (Płaskowski A., Beck M.S., Thorn R., 1995; Reinecke and Mewes, 1996) pozwalały uzyskać jedynie przybliżoną ocenę stanu procesu przemysłowego, bowiem zakodowana w danych pomiarowych informacja reprezentowała jedynie uśredniony fragment procesu w płaszczyźnie przechodzącej przez skanowaną czujnikiem pojemnościowym przestrzeń monitorowanego procesu tzw. 2D ECT (Isaksen, 1996; Yang and Peng, 2003). Przeważnie ten rodzaj informacji okazuje się niewystarczający z punktu widzenia kontroli parametrów procesu. Obraz przekroju poprzecznego nie oddaje w pełni informacji o rozkładzie faz oraz o strukturze przepływu w obszarze pomiarowym. Powstaje on poprzez uśrednienie sygnału z całej elektrody pomiarowej, tworząc obraz przekroju poprzecznego zbiornika, w którym odbywa się badany proces. Zaniechany jest tu rozkład pola elektromagnetycznego w przestrzeni trójwymiarowej, a dodatkowo w przypadku długich elektrod uśrednienie to uniemożliwia dokonanie pomiaru w pożądanym obszarze procesu przemysłowego. Z tego też względu tomografia procesowa została rozszerzona o wykorzystanie innych metod przetwarzania

danych, takich jak: korelacja wzajemna (Mosorov et al., 2002), przetwarzanie i analiza obrazów, tomografia wielopłaszczyznowa (Gadd et al., 1992; Holder, 2004; Metherall et al., 1996; Wang et al., 2003), etc. Niezależnie od tych rozszerzeń, klasyczna tomografia cechuje się poważnym ograniczeniem wynikającym z charakteru obrazu przekroju poprzecznego. Wiele procesów przemysłowych posiada silnie przestrzenny charakter i zredukowanie ich do zagadnienia płaskiego prowadzi do nieakceptowanych uproszczeń.

Opracowany przeze mnie, w ramach pracy doktorskiej w 2006 roku, przegląd literatury już wtedy pozwolił zidentyfikować szereg nierozwiązanych problemów i stanowił dodatkową motywację do prowadzenia tych badań. Większość z prac badawczych stosujących techniki ECT do wizualizacji różnych procesów przemysłowych implementowała metody rekonstrukcji² obrazów, których wyniki pozostawiały wiele do życzenia. W metodach tych, w szczególności dla domeny 3D, na uzyskiwanych obrazach brak było wyraźnych granic pomiędzy poszczególnymi komponentami badanego procesu (Polydorides and Lionheart, 2002; Warsito and Fan, 2005, 2003; York et al., 2003). W wielu dziedzinach przemysłu, gdzie zastosowanie znalazła już elektryczna tomografia pojemnościowa, dużą rolę, obok precyzyjnych urządzeń pomiarowych, odgrywa proces przetwarzania danych pomiarowych i budowania obrazu wnętrza procesu, od którego wymagana jest wysoka jakość otrzymywanych obrazów i jednocześnie szybkość ich uzyskiwania. Poruszone tutaj wyzwania dotyczą między innymi istotnych aspektów informatycznych takich, jak: zwiększenie rozdzielczości obrazów przy jednoczesnym zachowaniu jakości i szybkości pozyskiwania, co w następstwie skutkuje zwiększeniem złożoności obliczeniowej i wypracowaniem algorytmów efektywnego zarządzania zasobami oraz mocą obliczeniową komputerów, błędy numeryczne, komputerowe modelowanie czujników pomiarowych.

Opisane powyżej problemy sprawiły, że moje zainteresowania naukowo-badawcze skupiły się na tematyce dotyczącej **opracowania nowych komputerowych metod wizualizacji i przetwarzania trójwymiarowych tomograficznych danych pomiarowych dla potrzeb nieinwazyjnej diagnostyki i regulacji typu przemysłowych procesów przepływu**. Wyniki tych badań i opracowane metody wniosły w dziedzinę informatyki i w problematykę ECT wzrost jakości oraz jednocześnie szybkości wizualizacji i diagnostyki procesów przepływu zwiększając dokładność i jednoznaczność pozyskiwanej informacji diagnostycznej. Zakres badań obejmował w szczególności:

- rozwój, implementację i weryfikację algorytmów przetwarzania surowych tomograficznych danych pomiarowych pochodzących z przepływów dwufazowych;
- rozwój, implementację i weryfikację komputerowych metod przestrzennego modelowania i projektowania czujników ECT;
- rozwój, implementację i weryfikację algorytmów wnioskowania rozmytego dla potrzeb identyfikacji i regulacji typu przepływów dwufazowych;
- rozwój oprogramowania wdrażającego opracowane ww. metody do monitorowania i regulowania rzeczywistymi procesami przepływów.

² rekonstrukcja (lub też konstrukcja) obrazu. Podwójna terminologia jest wynikiem różnego postrzegania samego procesu generowania obrazów tomograficznych. Z jednej strony posiadając zgromadzone dane pomiarowe możliwa jest konstrukcja obrazów (Polakowski et al., 2007). Ale jednocześnie, w danych pomiarowych zawarta jest zakodowana informacja o rozkładzie komponentów, faz procesu, która z kolei jest rekonstruowana w postaci obrazu (Budzik and Turak, 2016; Smolik, 2013). Drugi termin jest bliższy zastosowaniom przemysłowym rozważanym w niniejszym autoreferacie dlatego jest stosowany w tym przypadku.

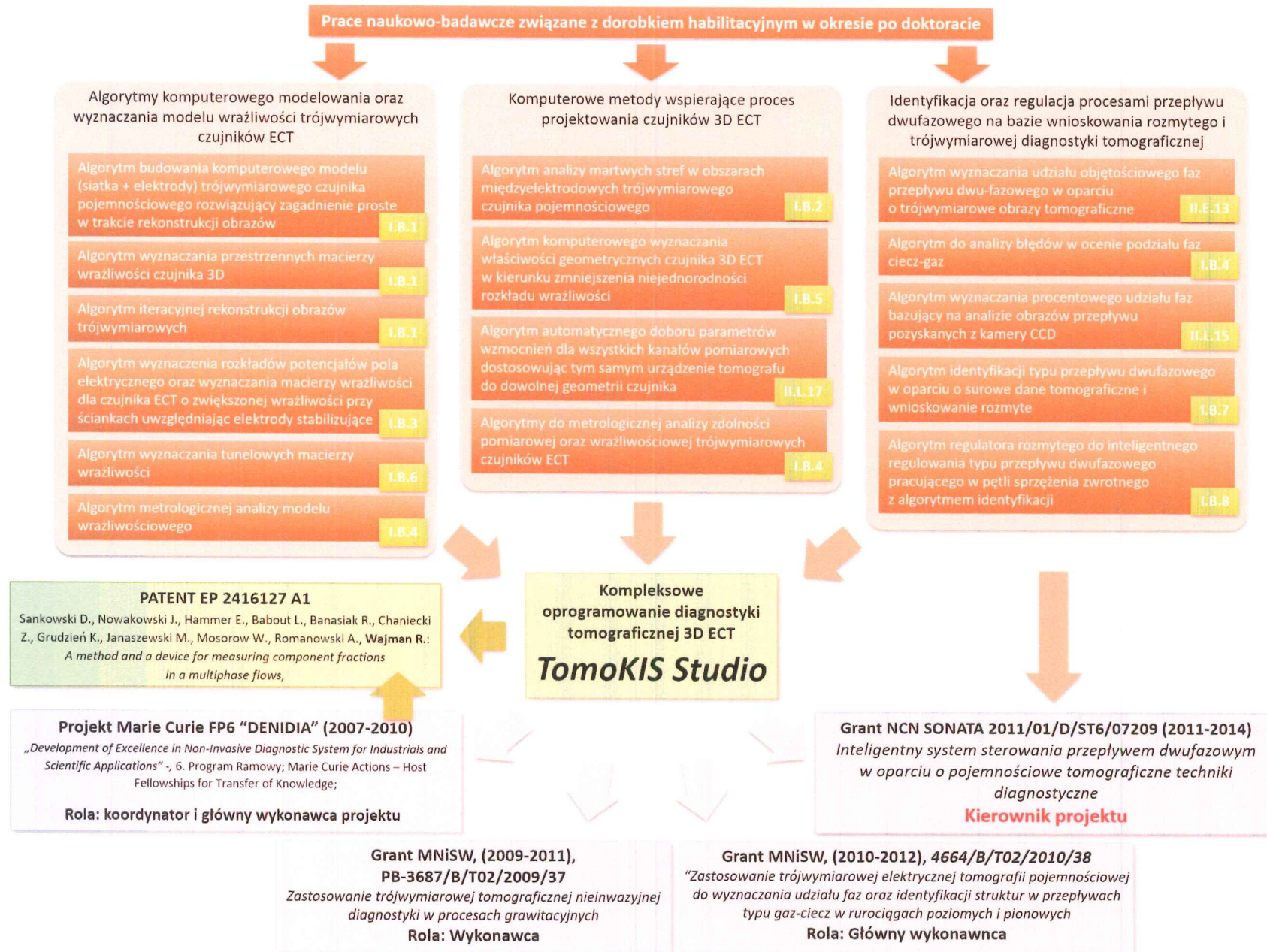
Po obronie pracy doktorskiej moja tematyka badawcza koncentrowała się zatem głównie na trzech następujących problemach:

- algorytmy komputerowego modelowania oraz wyznaczania modelu wrażliwości trójwymiarowych czujników ECT dla potrzeb wizualizacji tomograficznej;
- komputerowe metody wspierające proces projektowania czujników 3D ECT;
- identyfikacja oraz regulowanie procesami przepływu dwufazowego na bazie wnioskowania rozmytego i trójwymiarowej diagnostyki tomograficznej.

Na rysunku nr 1 (na kolejnej stronie) umieszczone zostały opracowane przeze mnie (po uzyskaniu stopnia doktora) algorytmy dla potrzeb tomograficznej diagnostyki i regulowania procesem przepływów dwufazowych gaz-ciecz z zaznaczeniem ich użyteczności w najważniejszych projektach naukowo-badawczych, w których brałem udział. Algorytmy, wraz z referencją do artykułów z cyklu, zostały pogrupowane w oparciu o wymienione powyżej problemy badawcze. W dalszej części autoreferatu zaprezentuję wyniki badań prowadzonych z użyciem opracowanych przeze mnie algorytmów i metod komputerowych. Opis ten podzielony jest na sekcje zgodnie z wyszczególnionymi powyżej problemami badawczymi.

Algorytmy komputerowego modelowania oraz wyznaczania modelu wrażliwości trójwymiarowych czujników ECT

W roku 2006 po obronie pracy doktorskiej kontynuowałem prace badawcze z zakresu komputerowego modelowania czujników pojemnościowych. Wykonałem wówczas pierwsze prace związane z implementacją numeryczną 16-to elektrodowego systemu 3D ECT wraz z pełnym oprogramowaniem realizującym proces rekonstrukcji obrazów 3D, wizualizację trójwymiarowych tomogramów oraz przestrzenną symulację pola elektrycznego wewnątrz czujnika 3D ECT. Wyniki tych prac opublikowane zostały w lipcu 2006 roku w [Zał. 3 poz. I.B.1]. Pierwszym moim zadaniem naukowo-badawczym było opracowanie i zweryfikowanie **algorytmu wspierającego proces budowania komputerowego modelu trójwymiarowego czujnika pojemnościowego i rozwiązującego zagadnienie proste w trakcie rekonstrukcji obrazów**. Ten etap odpowiada za obliczenie rozkładu pola elektrycznego na podstawie zadanego rozkładu przenikalności elektrycznej wewnątrz czujnika oraz numerycznie wyznacza wektor wartości pojemności międzyelektrodowych. Kolejnym etapem moich prac badawczych było opracowanie **algorytmu wyznaczania przestrzennych macierzy wrażliwości czujnika** na podstawie wyznaczonych wartości potencjałów elektrycznych w elementach siatki. Następnie opracowałem i zaimplementowałem **algorytm rozwiązujący zagadnienie odwrotne procesu trójwymiarowej rekonstrukcji obrazów**. W ramach tego etapu zmodyfikowałem i zastosowałem dla zagadnienia 3D iteracyjne algorytmy rekonstrukcji obrazów stosowane już wcześniej w systemach dwuwymiarowych. Wszystkie wymienione tutaj algorytmy zweryfikowałem numerycznie i wraz z wynikami badań potwierdzającymi ich skuteczność opisałem w artykule [Zał. 3. poz. I.B.1] oraz zaimplementowałem na platformie WINAPI C++. Zbudowałem specjalistyczne oprogramowanie o nazwie *WinRECO*, które realizowało kompletny proces rekonstrukcji obrazów 3D. Oprogramowanie to było również wykorzystane w kolejnych badaniach w Laboratorium Tomografii Procesowej Instytutu Informatyki Stosowanej PŁ, gdzie jako element diagnostyczny stosowana była trójwymiarowa tomografia pojemnościowa. Szczegóły dotyczące praktycznego wykorzystania moich algorytmów opisałem w dalszej części autoreferatu w sekcji „*Użyteczność zrealizowanych badań*”. Pozyskiwana informacja diagnostyczna otrzymana poprzez wizualizację rozkładu materiału w postaci obrazu 3D znacząco wzbogaciła możliwości zastosowania techniki tomografii pojemnościowej.



Rysunek 1. Zestawienie autorskich algorytmów opracowanych (po uzyskaniu stopnia doktora) dla potrzeb tomograficznej diagnostyki i regulowania procesem przepływów dwufazowych gaz-ciecz z zaznaczeniem ich użyteczności w najważniejszych projektach naukowo-badawczych

W ramach moich pierwszych osiągnięć w dziedzinie trójwymiarowej tomografii pojemnościowej zaprojektowałem specjalny model wrażliwościowy dla dwuwymiarowego czujnika ECT. W 2007 roku jako główny wykonawca brałem udział w projekcie N-B MNiSW nr PB-1318/T10/2005/28 pt. „*Opracowanie metody pomiarowej do identyfikacji struktur*”, którego kierownikiem był dr hab. inż. Mariusz R. Rząsa z Politechniki Opolskiej. Przydzielone mi zadanie badawcze polegało na opracowaniu nowej metody rekonstrukcji obrazów dla tomografii pojemnościowej, której podstawową cechą charakterystyczną była poprawa zdolności detekcyjnych tomograficznego systemu diagnostycznego w sąsiedztwie ścian rurociągu. Biorąc pod uwagę, że dla przepływów dwufazowych gaz ciecisz, występują bardzo złożone struktury, niejednokrotnie składające się z małych obiektów takich jak: pęcherzyki czy krople, opracowany został specjalny czujnik pojemnościowy, który umożliwił pomiar struktur o jednolitym rozkładzie faz wzdłuż rurociągu, np. struktury rozwarstwione, pierścieniowe, korkowe. Nowatorska struktura czujnika umożliwia diagnostykę cienkiej warstwy cieczy przy ścianie rurociągu oraz zapewnia poprawne pomiary dla struktur rozwarstwionych. Cechą znamioną tego czujnika były niespotykane dotąd elektrody *pomocnicze*, które zostały zamontowane pomiędzy elektrodami pomiarowymi a ich szerokość była wielokrotnie mniejsza od elektrod pomiarowych. Podczas pomiaru elektrody *pomocnicze* sąsiadujące z elektrodą pomiarową posiadają potencjał równy przeciwległej elektrodzie uczestniczącej w pomiarze. W wyniku takiego rozwiązania (Rys. 2b w [Zał. 3 poz. I.B.3]) pojemność mierzona jest równa wartości zastępczej trzech pojemności składowych. Ponieważ elektrody *pomocnicze* i pomiarowe znajdują się blisko siebie, to z rozkładu pola wynika, że najwyższa wrażliwość takiego układu jest blisko ścianki rurociągu, a to dodatkowo zwiększa wrażliwość czujnika w tym regionie. Dobierając odpowiednią szerokość elektrod *pomocniczych* można uzyskać odpowiednią proporcję wrażliwości w środku i na ścianie rurociągu. Dla tak zdefiniowanej struktury czujnika opracowałem nową **metodę rekonstrukcji obrazów, która zarówno w zagadnieniu odwrotnym, jak i prostym uwzględnia opracowaną geometrię czujnika**. W pierwszym kroku opracowałem **algorytm dyskretyzacji przestrzeni czujnika**, który uwzględnia nowe elementy konstrukcyjne czujnika oraz dostosowuje współczynnik gęstości siatki tak, aby zwiększyć dokładność numeryczną przy elektrodach i jednocześnie minimalizować wpływ pod-określoności procesu rekonstrukcji (tj. znacznie większa liczba punktów obrazu - niewiadomych równania niż liczba danych pomiarowych) [Zał. 3 poz. I.B.3]. Następnym etapem było zaprojektowanie **algorytmów numerycznego wyznaczenia rozkładów potencjałów pola elektrycznego oraz wyznaczenia macierzy wrażliwości dla czujnika tomograficznego o zwiększonej wrażliwości przy ściankach** przeznaczonego do diagnostyki przeciwaprądowych przepływów dwu-fazowych [Zał. 3 poz. I.B.3]. Algorytm dla poszczególnych par pomiarowych elektrod uwzględnia zarówno ich odmienną geometrię jak i wpływ elektrod *pomocniczych*. W klasycznym podejściu w fazie zbierania danych pomiarowych mierzone są wartości pojemności międzyelektrodowych pomiędzy wszystkimi możliwymi kombinacjami elektrod czujnika (bez powtórzeń). W tym przypadku dodatkowo doszła konieczność uwzględnienia specyficznej strategii podawania dla wybranych elektrod *pomocniczych* potencjału elektrody pomiarowej i co ważne: dla każdej pary pomiarowej inaczej. Ta cecha ostatecznie przyczyniła się do ograniczenia całkowitej liczby elektrod pomiarowych w zaprojektowanym urządzeniu tomograficznym wykluczając tym samym możliwość realizacji pomiaru przestrzennego 3D. Niemniej jednak, jak zostało wykazane w pracy [Zał. 3 poz. I.B.3], zaprojektowany system pomiarowy przyczynił się do zwiększenia jakości obrazowania tomograficznego w regionach przyelektrodowych czujnika dając możliwość dokładniejszego opisu zjawiska przepływów dwufazowych gaz-ciecz w strukturach, których najbardziej dynamiczne zmiany obserwowane są przy ściankach rurociągu.

Jednym z najważniejszych etapów procesu rekonstrukcji obrazów w trójwymiarowej tomografii pojemnościowej jest wyznaczenie macierzy wrażliwości. Jest ona głównym

czynnikiem wpływającym na jakość finalnych obrazów. Problematyka macierzy wrażliwości dla systemów tomografii pojemnościowych jest mi bliska już od pracy doktorskiej. Wówczas, ale tylko dla problemu 2D, opracowałem algorytmy nowatorskiej metody rekonstrukcji obrazów oraz wyznaczania macierzy czułości w oparciu o śledzenie linii pola elektrycznego, które stanowiły sedno prac badawczych opisanych w artykule (Loser, Wajman, Mewes, 2001). O tym, jak ważny jest to problem, może świadczyć duża liczba cytowań tego artykułu, która obecnie wynosi 69 (wg bazy Scopus z wyłączeniem autocytowań), a chociażby w ciągu ostatnich 4 lat artykuł był cytowany 13 razy. Wyniki tych badań, które prowadziłem odbywając staż naukowy na Uniwersytecie w Hanowerze, uwzględniłem w swojej pracy doktorskiej.

Dlatego też w pracy [Zał. 3 poz. I.B.1] dla przypadku 3D ECT mój udział w pracach badawczych polegał na **opracowaniu oraz implementacji metody wyznaczania macierzy wrażliwości** głównie w oparciu o algorytm bazujący na zależnościach energii pola elektrycznego. Algorytm ten daje w większości przypadków zadawalające wyniki rekonstrukcji i umożliwia dodatkowo wykonanie procesu iteracyjnej aktualizacji map wrażliwości, dostosowując ich naturę do zmieniającego się wraz z procesem rekonstrukcji symulowanego rozkładu pola elektrycznego. Jednakże w roku 2014, na skutek rosnących wymagań diagnostycznych co do jakości obrazów, zaproponowałem istotną modyfikację procesu wyznaczania trójwymiarowych map wrażliwości poprzez uwzględnienie w tym procesie szczegółowego rozkładu pola we wnętrzu czujnika. **Opracowany i zaimplementowany tunelowy algorytm wyznaczania macierzy wrażliwości** w każdej iteracji procesu rekonstrukcji konstruuje mapy wrażliwości w oparciu o śledzenie powierzchni budowanych wzdłuż linii sił pola elektrycznego. Jak wykazałem w artykule [Zał. 3 poz. I.B.6] nowe mapy wrażliwości znacznie dokładniej oddają nieliniową naturę pola elektrycznego, a metodę ich wyznaczania nazwałem metodą tunelową z uwagi na charakterystyczny kształt geometryczny generowanych rozkładów wrażliwości. Algorytm tunelowy bazuje na tym, że większość z deterministycznych metod rekonstrukcji obrazów, które stosują w swoich obliczeniach rozkłady wrażliwości, jest wyprowadzona bezpośrednio z tomografii liniowej (np. promienie gamma, X, metody optyczne). Możliwość zaadoptowania tych metod rekonstrukcji dla potrzeb tomografii nieliniowej (tj. pola elektrycznego) jest uwarunkowana odpowiednio wyznaczoną macierzą wrażliwości, która aproksymuje podstawowe właściwości pola elektrycznego wewnątrz układu czujników ECT. W tomografii liniowej analiza wrażliwości polega na wyznaczeniu współczynnika osłabienia każdej projekcji promienia. Współczynnik ten jest wynikiem sumy iloczynu funkcji rozkładu własności fizycznych materiału wewnątrz czujnika z wagami stanowiącymi udział wszystkich wokseli (definiowanych jako przestrzenne elementy trójwymiarowego obrazu np. czworościany) w biegu danego promienia. Uzyskane tunele wrażliwości odzwierciedlają wpływ poszczególnych wokseli zdyskretyzowanej przestrzeni pomiarowej czujnika 3D ECT na projekcję poszczególnych strumieni tj. linii sił pola elektrycznego z uwzględnieniem, co ważne, przestrzennego rozkładu przenikalności elektrycznej.

W artykule [Zał. 3 poz. I.B.6] przedstawiłem również wyniki eksperymentów przeprowadzonych zarówno jako symulacje jak i rzeczywiste badania przepływów dwufazowych z wykorzystaniem instalacji badawczej w Laboratorium Tomografii Procesowej Instytutu Informatyki Stosowanej PŁ. Efektem tych eksperymentów było opracowanie kompleksowej metody numerycznej weryfikacji zdolności pomiarowej i rekonstrukcyjnej czujników 3D ECT. W ramach tej metody opracowałem **algorytm metrologicznej analizy modelu wrażliwościowego**. Do oceny i porównania zrekonstruowanych obrazów zostały przyjęte następujące kryteria: znormalizowany średni błąd kwadratowy obrazu oraz współczynnik liniowej korelacji Pearsona. Przyjęte kryteria oceny za każdym razem wykazały zwiększoną szybkość zbieżności w przypadku zastosowania tunelowych macierzy wrażliwości w przeciwieństwie do tradycyjnych metod

(np. bazujących na analizie energii pola elektrycznego). Cecha ta uwydatnia się bardziej z chwilą zwiększania agresywności (szybkości) procesu rekonstrukcji (zwiększanie współczynnika relaksacji). Warto tu również nadmienić, że dla (specjalnie dobranej) przesadnie dużej wartości współczynnika agresywności procesu w przypadku tradycyjnych macierzy wrażliwości ostatecznie metoda traci swoją zbieżność, a błędy rekonstrukcji z każdą iteracją powiększają się. Zastosowanie tunelowych macierzy wrażliwości w procesie rekonstrukcji owocuje nawet w tym przypadku skuteczniejszym odwzorowaniem rzeczywistych struktur przepływu dwu-fazowego w obrazach tomograficznych. Algorytm tunelowy został zastosowany w procesie nieliniowej rekonstrukcji obrazów wspierającej proces diagnostyczny w systemie identyfikacji przepływów dwufazowych gaz-ciecz skonstruowanym na potrzeby realizacji projektu N-B MNiSW nr 4664/B/T02/2010/38 pt. „Zastosowanie trójwymiarowej elektrycznej tomografii pojemnościowej do wyznaczania udziału faz oraz identyfikacji struktur w przepływach typu gaz-ciecz w rurociągach poziomych i pionowych”, którego kierownikiem był dr hab. inż. Robert Banasiak.

Komputerowe metody wspierające proces projektowania czujników 3D ECT

Zbudowanie poprawnej struktury mechaniczno-elektrycznej czujnika pojemnościowego 3D jest zagadnieniem złożonym (Zhang et al., 2014). Najczęściej rozkład elektrod, ich kształt oraz wymiary geometryczne są określane względem użytecznego zakresu wrażliwości pomiarowej tomografu pojemnościowego oraz względem oczekiwanego zakresu stałych dielektrycznych badanego medium. Wrażliwość tomografu wymaga, aby mierzone wielkości i zmiany pojemności miały określoną minimalną wartość, co wymusza z kolei stosowanie elektrod z odpowiednio dużą powierzchnią. W przypadku techniki ECT mierzy się pojemności z zakresu od kilkudziesięciu do kilkuset pikofaradów a różnice tych pojemności wywołane zmianą rozkładu dielektryka są rzędu femtofaradów. Biorąc powyższe pod uwagę podczas, gdy oczekuje się od czujnika np. jednorodnej wrażliwości w całym jego obszarze pomiarowym, niezbędnym staje się wypracowanie narzędzi, które wspomogą czasochłonny i żmudny proces projektowania takiej sondy uwzględniając przy tym warunki wynikające z aplikacyjności dla potrzeb diagnostyki procesu przemysłowego.

Wspomniane parametry geometryczno-mechaniczne trójwymiarowych czujników pojemnościowych to przede wszystkim średnica profilu montażowego rurociągu, pole powierzchni elektrod i ich kształt, lokalizacja, odstęp międzyelektrodowe poziome i pionowe, szerokość ekranów wewnątrz-elektrodowych i brzegowych, grubość izolacji ochronnej itp. Opracowanie czujnika na rury o różnych profilach dodatkowo przeznaczonego do badania frakcji o różnej wartości przenikalności elektrycznej nie jest zadaniem polegającym na zwykłym „przeskalowaniu” geometrii. Pole elektryczne jest nieliniowe i dobór tych parametrów musi być realizowany drogą eksperymentalną przy użyciu np. precyzyjnego miernika RLC. W trakcie tych eksperymentów należy testowo wypełniać przestrzeń czujnika medium o dużej przenikalności dielektrycznej oraz gazem (jako medium o małej przenikalności dielektrycznej) i dokonywać statycznych pomiarów pojemności przy pomocy miernika. Analiza zgromadzonych w ten sposób zestawów pojemności międzyelektrodowych pozwala dopasować wyszczególnione powyżej parametry czujnika do zakresu pomiarowego systemu tomografii pojemnościowej.

Jednym z problemów dotyczących konstrukcji trójwymiarowych czujników ECT, z jakim zetknąłem się zaraz na początku mojej przygody z tą techniką, była identyfikacja martwych stref w przestrzeniach międzyelektrodowych. W 2007 roku w kontekście artykułu [Zał. 3 poz. I.B.1] w wyniku prowadzonej polemiki z grupą naukowców z Ohio State University pod kierownictwem prof. Fana opracowałem **algorytm analizy martwych stref w obszarach międzyelektrodowych trójwymiarowego czujnika pojemnościowego**. Wyniki działania algorytmu zostały opublikowane w pracy [Zał. 3 poz. I.B.2]. Zostało tam wykazane, iż w zastosowanej przez nas koncepcji czujnika pojemnościowego 3D, martwe strefy są

znacząco zredukowane, a zaproponowany czujnik charakteryzuje się zwiększoną zdolnością pomiarową w porównaniu do czujnika opracowanego przez naukowców z USA (Warsito and Fan, 2003). Wnioski opublikowane w odpowiedzi zostały wsparte wynikami przeprowadzonych eksperymentów. To pozwoliło wyjaśnić wątpliwości podniesione przez naukowców z USA.

Mechanizmy wypracowane w kontekście opisanego problemu przyczyniły się do opracowania **komputerowej metody wyznaczania właściwości geometrycznych i mechanicznych czujników 3D ECT** przeznaczonych do konkretnych zastosowań. Na działanie metody składa się szereg algorytmów opracowanych przeze mnie i zaimplementowanych we wspomnianym już wcześniej oprogramowaniu *WinRECO*, w tym przede wszystkim algorytmu generowania modelu czujnika 3D ECT, symulacji pola elektrycznego oraz metrologicznej i wrażliwościowej analizy martwych stref czujnika. Metoda została wykorzystana m. in. przy opracowywaniu materiału do artykułów [Zał. 3 poz. II.A.2] i [Zał. 3 poz. II.A.3], gdzie byłem odpowiedzialny za proces wytworzenia czujników 3D ECT i budowy stanowiska badawczego. W każdej z tych prac warunki aplikacyjności były różne, stąd istniała potrzeba wypracowania odrębnej koncepcji czujników.

Badania, opisane w [Zał. 3 poz. II.A.2], miały na celu ocenę przydatności systemów ECT pod kątem poszukiwania defektów w strukturze dielektryka. Czujnik 3D ECT składał się z czterech pierścieni elektrod. Elektrody w kolejnych pierścieniach były przesunięte względem elektrod z poprzedniego pierścienia o 5° . Dodatkowo środkowe pierścienie zawierały o cztery elektrody więcej. Takie podejście przyczyniło się do wyrównania jednorodności efektywnego obszaru obrazowania w całej przestrzeni czujnika oraz pomogło zredukować liczbę przesileni natężenia pola elektrycznego w pobliżu zewnętrznych krawędzi czujnika. Jednakże najbardziej zauważalnym zyskiem było zwiększenie zdolności detekcji w środkowych sekcjach czujnika.

Z kolei w badaniach [Zał.5 poz. II.A.3] nad rozwojem algorytmów rekonstrukcji obrazu dla elektrycznej tomografii pojemnościowej 3D zastosowana została metoda Czasowego Algorytmu Rekonstrukcji Obrazów, jako alternatywa do klasycznego podejścia rekonstrukcji obrazów z sekwencji czasowych ramek pomiarowych (tradycyjne podejście 4D, gdzie czwarty wymiar jest czasem trwania eksperymentu). Zbudowany czujnik posiadał środkowe pierścienie węższe od tych na zewnątrz. W dotychczasowych sondach mierzone wartości pojemności pomiędzy elektrodami wewnętrznych pierścieni były zdecydowanie wyższe niż pomiędzy elektrodami z warstw zewnętrznych. Przy dynamicznych procesach, w których dodatkowo istnieją chwilowe, a zarazem duże różnice przenikalności dla poszczególnych frakcji, obserwuje się znaczne niejednorodności w zbiorze wartości pojemności, często wykraczające poza te zmierzone dla czujnika jednorodnie wypełnionego medium o maksymalnej przenikalności elektrycznej. To sprawiało, że zastosowany system pomiarowy ECT generował wartości wykraczające poza zakres przetwornika zakłamując wyniki eksperymentów. W ramach tych prac zaproponowałem modyfikację sondy pojemnościowej, która polegała na zwężeniu środkowych warstw, co spowodowało wyrównanie zakresu wartości pomiarowych również dla dynamicznych procesów.

Procesy przemysłowe, które diagnozowałem w ramach moich pierwszych prac badawczych, charakteryzowały się stosunkowo małą różnicą w wartościach przenikalności dielektrycznej pomiędzy użytymi materiałami. W kontraście do powietrza m.in. stosowałem granulaty z tworzywa sztucznego (np. pcv, ertalon), ryż lub żwir (piasek) [Zał. 3 poz. II.L.9] i [Zał. 3 poz. II.L.11]. Z odmiennymi warunkami spotkałem się przy realizacji przywołanego już raz projektu N-B nr 4664/B/T02/2010/38, w ramach którego diagnozowane były przepływy dwufazowe gaz – ciecz. Stosowane wówczas ciecze tj. glikol polipropylenowy, karboksymetyloceluloza ale również i woda charakteryzowały się znacznie (bo nawet 80-cio krotnie) wyższą wartością przenikalności elektrycznej w stosunku do powietrza. W wyniku przeprowadzonych symulacji dla czujnika, którego elektrody były zamontowane na zewnątrz

rury, zauważyłem, że pole elektryczne skupione było głównie na obrzeżach rury wewnętrznej wykonanej z PCV o wartości przenikalności elektrycznej znacznie mniejszej niż ciecz wypełniająca przestrzeń czujnika i nie mogło wnikać w badaną ciecz. To zjawisko (widoczne na rys. 5a w [Zał. 3 poz. I.B.4]) nie istniało w przypadku zaprojektowanego przeze mnie czujnika z elektrodami montowanymi wewnątrz [Zał. 3 poz. I.B.5] i [Zał. 3 poz. II.E.16] również wypełnionego tą samą cieczą. Pole elektryczne głębiej wnikało w środek czujnika w wyniku czego, równomiernie rozkładało się w całej jego przestrzeni. Opracowany przeze mnie **algorytm komputerowego wyznaczania parametrów geometrycznych czujnika w kierunku zmniejszenia niejednorodności rozkładu wrażliwości** pozwolił skutecznie dobrać właściwą geometrię oraz przestrzenny rozkład elektrod czujnika do badań cieczy o wysokiej wartości względnej przenikalności dielektrycznej. Na podstawie uzyskanych wyników działania metody opracowałem projekt czujnika, a rezultaty przeprowadzonych eksperymentów opublikowane w [Zał. 3 poz. I.B.5] wykazały większą skuteczność opracowanego modelu czujnika dla potrzeb wizualizacji przepływów.

W Instytucie Informatyki Stosowanej PŁ do badań nad trójwymiarową tomografią pojemnościową zespół TomoKIS (tj. zespół naukowców w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej zajmujących się problematyką tomografii procesowej) wykorzystuje tomograf ET3 zaprojektowany i zbudowany przez naukowców Instytutu Radioelektroniki Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem doc. dr. inż. Romana Szabatina (Brzeski et al., 2003). Ważną, z punktu widzenia zastosowań przemysłowych, funkcjonalnością tego urządzenia jest możliwość doboru wartości wzmacnień wzmacniaczy toru pomiarowego dla poszczególnych par pomiarowych elektrod. Cecha ta sprawia, że urządzenie jest uniwersalne i może być stosowane do diagnostyki różnych procesów. Przy zastosowaniu czujnika 3D ECT 32-elektrodowego dostępnych jest 496 torów pomiarowych sterowanych czterema parametrami decydującymi o stabilności i amplitudzie sygnału, wpływającymi na SNR (ang. *signal-to-noise ratio*) pomiaru. 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 do wymaganej geometrii czujnika pojemnościowego byłoby niezwykle czasochłonne. Jednocześnie z punktu widzenia specyfiki trójwymiarowych czujników pojemnościowych bardzo ważna jest precyzyjna konfiguracja tomografu w taki sposób, aby pomimo dużych odległości pomiędzy elektrodami, różnorodnej geometrii czujników oraz różnorodnej specyfiki procesów przemysłowych wartości pomiarowe oscylowały w zakresach pomiarowych urządzenia i dawały znaczącą różnicę pomiędzy pomiarami dla pustego i wypełnionego czujnika. Z uwagi na te aspekty **opracowałem i zaimplementowałem metodę, która automatycznie dobiera parametry wzmacnień dla wszystkich kanałów pomiarowych dostosowując tym samym urządzenie do dowolnej geometrii czujnika** [Zał. 3 poz. II.L.17]. Metoda została zweryfikowana przez zespół TomoKIS podczas prowadzenia badań eksperymentalnych dostosowując urządzenie ET3 do różnych czujników i procesów przemysłowych (m.in. [Zał. 3 poz. II.L.11], [Zał. 3 poz. II.L.13] oraz [Zał. 3 poz. II.L.14]).

W trakcie wieloletniej pracy naukowo-badawczej zetknąłem się z wieloma potrzebami aplikacyjności techniki 3D ECT do różnorodnych procesów przemysłowych. Nadrzędnym celem było zbudowanie takiej struktury czujnika, która spowodowałaby wzrost rozdzielczości pomiarowej oraz wzmacnienie wrażliwości w najbardziej pożądanym jego obszarach (jednorodnie bądź tylko przy ściankach). W celu weryfikacji tych parametrów jednoznacznie identyfikujących lepszą bądź gorszą przydatność (aplikacyjność) czujnika do konkretnych zastosowań w roku 2013 dla potrzeb projektu N-B nr 4664/B/T02/2010/38 opracowałem **zbiór algorytmów do metrologicznej analizy zdolności pomiarowej oraz wrażliwościowej trójwymiarowych czujników ECT** pod kątem możliwości skanowania przepływu mieszanin gaz-ciecz [Zał. 3 poz. I.B.4]. W ramach prac przeprowadziłem numeryczną analizę rozkładu wrażliwości dla zaprojektowanych nowych struktur trójwymiarowych czujników w celu

oceny ich zdolności pomiarowej. Należy tu podkreślić, iż przeprowadzona symulacja efektywnie wspomogła proces optymalnego doboru geometrii czujnika w kryterium jednorodności rozkładu wrażliwości dla potrzeb badań mieszanin z udziałem cieczy o wysokiej wartości względnej przenikalności elektrycznej.

Identyfikacja oraz regulacja procesami przepływu dwufazowego na bazie wnioskowania rozmytego i trójwymiarowej diagnostyki tomograficznej

W zastosowaniach przemysłowych, jak i laboratoryjnych, ważne jest przedstawienie przepływów wielofazowych w sposób, który zarówno zobrazuje samo zachowanie materiału (badania jakościowe), jak również pozwoli na oszacowanie charakterystycznych parametrów dynamicznego procesu przepływu (badania ilościowe) w czasie rzeczywistym. Dwufazowe procesy przemysłowe (ciecz/ciecz, ciecz/gaz) charakteryzują się wysokimi wymaganiami dotyczącymi zarówno ich kontroli jak i monitorowania. Komputerowe systemy pomiarowe oparte na analizie i przetwarzaniu informacji wizyjnej w porównaniu do klasycznych narzędzi pomiarowych posiadają dwie główne zalety pozwalające sprostać tym wymaganiom. Zdecydowanie lepiej uwidaczniają zjawiska fizyko-chemiczne (w czasie i przestrzeni) zachodzące podczas procesu przemysłowego, co w następstwie pozwala na opracowanie lepszych metod kontroli i diagnozowania procesów przemysłowych.

Moim wkładem własnym w tę dziedzinę było opracowanie i zweryfikowanie **algorytmu wyznaczania udziału objętościowego faz przepływu dwu-fazowego w oparciu o trójwymiarowe obrazy tomograficzne** [Zał. 3 poz. II.E.13]. Algorytm ten był nowym rozwiązaniem w dziedzinie diagnostyki przepływów dwufazowych mieszanin gaz-ciecz. Bazował na analizie i przetwarzaniu trójwymiarowych tomogramów przepływu i wyznaczał procentowy udział frakcji cieczy w objętości czujnika stosując klasyczne algorytmy segmentacji obrazów (nie mechanizmy sztucznej inteligencji). Jako wynik końcowy, oprócz zwróconej wartości udziału, oprogramowanie budowało obraz trójwymiarowy z wyodrębnioną frakcją cieczy. W ramach tych badań opracowałem również **algorytm do analizy błędów w ocenie podziału faz ciecz-gaz**. W celu weryfikacji uzyskiwanych wyników metody opublikowanej w [Zał. 3 poz. I.B.4] opracowałem również **algorytm wyznaczania procentowego udziału faz bazujący na analizie obrazów przepływu pozyskanych z kamery CCD** [Zał. 3 poz. II.L.15].

Rezultaty tych badań stały się dla mnie inspiracją do podjęcia kolejnych prac badawczych w zakresie rozwoju metod diagnostyki przepływów. Kontynuowanie przeze mnie tego tematu badawczego uzasadniały wciąż duże potrzeby w zakresie uniwersalnej, automatycznej i bezinwazyjnej metody do monitorowania i regulacji procesami przepływów dwufazowych. Jednocześnie analiza literatury światowej pozwoliła mi stwierdzić, że wówczas (tj. rok 2010) nie istniały alternatywne inteligentne metody diagnostyki i sterowania, szczególnie z zastosowaniem tomografii pojemnościowej.

W latach 2011 – 2014 uzyskałem finansowanie dla projektu naukowo-badawczego (N-B) SONATA o numerze 2011/01/D/ST6/07209 pt. „*Inteligentny system sterowania przepływem dwufazowym w oparciu o pojemnościowe tomograficzne techniki diagnostyczne*”, **którego byłem kierownikiem**. Podstawowym celem zrealizowanym przeze mnie w ramach tego projektu, było zbudowanie i eksperymentalna weryfikacja inteligentnego systemu diagnostyczno - sterującego na potrzeby monitorowania i automatycznego regulowania procesów przepływów dwufazowych mieszanin gaz-ciecz w rurociągach pionowych i poziomych o przekroju walcowym. Informacja diagnostyczna pozyskana na bazie wnioskowania rozmytego umożliwiła mi opracowanie metody przestrzennej identyfikacji charakterystyki przepływu, wyznaczania map przepływów oraz ich analizy. To z kolei stanowi sygnał wejściowy dla algorytmu sterującego przebiegiem procesu przepływowego jako kompleksowa wiedza o bieżącym stanie tego procesu. W tym celu zastosowałem wnioskowanie oparte na logice rozmytej i jako dane wejściowe wykorzystałem surowe dane

pomiarowe. Dzięki zastosowaniu techniki trójwymiarowej tomografii pojemnościowej – 3D ECT możliwa jest nieinwazyjna diagnostyka i monitorowanie wnętrza wybranego fragmentu przepływu, realizowana w czasie rzeczywistym. **Istotą tych prac badawczych było opracowanie mechanizmów opartych na technice klasteryzacji rozmytej oraz analizy relacji przestrzennych do wyznaczania kształtów i lokalizacji struktur przepływu z surowych przestrzennych danych pomiarowych (nie obrazów) oraz regulowania tego przepływu.** Było to całkowicie nowe rozwiązanie nie opisywane wcześniej w literaturze naukowej. Docelowo opracowane metody i algorytmy zostały wdrożone w instalacji przepływu dwufazowego gaz-ciecz w skali półtechnicznej (półprzemysłowej) i współdziałają w pętli sprzężenia zwrotnego.

Efektom końcowym moich prac badawczych w ramach powyższego grantu jest zbudowany inteligentny system diagnostyki i sterowania o akronimie *intelliFlowControl* zdolny do kompleksowej oceny i charakterystyki dwufazowego przepływu na podstawie tomograficznych danych pomiarowych jego wnętrza oraz zdolny do definiowania sygnałów sterujących utrzymujących proces przepływu na zadanym poziomie. System całkowicie obsługuje instalację badawczą zbudowaną w Laboratorium Tomografii Procesowej im. Prof. Tomasza Dyakowskiego w Instytucie Informatyki Stosowanej PŁ. We wrześniu 2015 roku do Polskiego Urzędu Patentowego został zgłoszony wniosek o numerze P.413804 o ochronę wynalazku pt. „*Rozmyty regulator do sterowania typem przepływu dwufazowego*”. Zgłoszenie zostało opublikowane w zasobach UP RP. Wartością dodaną opracowanego rozwiązania jest jego potencjał komercjalizacyjny. Rozwiązanie zostało zaprezentowane licznemu gronu potencjalnych odbiorców z przemysłu (Azoty Włocławek, Orlen S.A., National Instruments) i stanowi obecnie element oferty wdrożeniowej Politechniki Łódzkiej.

Rdzeń systemu *intelliFlowControl* stanowią dwa algorytmy:

- algorytm identyfikacji typu przepływu dwufazowego w oparciu o surowe dane tomograficzne i wnioskowanie rozmyte,
- algorytm regulatora rozmytego do inteligentnego regulowania typu przepływu dwufazowego pracującego w pętli sprzężenia zwrotnego z algorytmem identyfikacji.

Pierwszym etapem **algorytmu rozmytej identyfikacji** [Zał. 3 poz. I.B.7] jest klasteryzacja rozmyta FCM w odmianie FCE (Fuzzy c-elliptotypes) odpowiedzialna za opis podstawowych struktur przepływu jak korki i rzuty. Informacje opisu wygenerowane przez blok klasteryzacji wraz z wynikiem analizy danych surowych są przekazywane do bloku właściwej identyfikacji przepływu, który wykorzystuje algorytm opisujący aktualny stan przepływu na bazie zarówno mapy relacji przestrzennych między obiektami jak i rozmytej oceny tych relacji (Zadeh, 1999). Otrzymana mapa, uwzględniająca wzajemne położenie, zajmowaną przestrzeń i kształt struktur, jest ostatecznie wykorzystana, jako wektor cech charakterystycznych typu badanego przepływu w procesie dopasowywania do wzorców typów przepływów uzyskanych wcześniej na drodze eksperymentów i służy do opracowania wielu kolejnych map przepływów w zależności od rodzaju rurociągu oraz użytego do badań medium. Posiadane mapy przepływów stanowią wzór dla relacji regulowania i bieżącego charakteru przepływu.

Mój pomysł opracowania algorytmu identyfikacji opierał się na wykorzystaniu surowych tomograficznych danych pomiarowych (nie obrazów) pozyskanych przestrzennie z sondy umieszczonej na badanym odcinku instalacji oraz na bezpośredniej analizie tych danych i identyfikacji kształtów struktur badanych przepływów, a następnie, na podstawie uzyskanego opisu struktur, wnioskowaniu o charakterze przepływu [Zał. 3 poz. I.B.7]. Operowanie na surowych danych tomograficznych w celu rozpoznania struktur przepływów dwufazowych stanowi efektywne (również pod względem czasu przetwarzania) uzupełnienie opracowanej w 2012 roku, w ramach projektu nr 4664/B/T02/2010/38 kierowanego przez dr hab. inż. Roberta Banasiaka, metody bazującej na analizie zrekonstruowanych obrazów

trójwymiarowych oraz implementujących skomplikowane metody zrównoleglania obliczeń adresowane na procesory graficzne. Mimo, iż poprzednia metoda dawała zadowalające wyniki, to podczas jej stosowania istniało ryzyko pominięcia (niewykrycia) pewnych charakterystycznych elementów przepływów takich jak rzuty czy korki, które są dynamiczne a zarazem istotne w procesie rozpoznawania charakteru przepływów dwufazowych. Znaczna część informacji diagnostycznej może zostać uzyskana już bezpośrednio na etapie analizy surowych tomograficznych danych pomiarowych jeszcze przed procesem rekonstrukcji obrazu. Analiza tego typu danych znacznie zmniejsza ryzyko pominięcia istotnych elementów charakterystycznych takich jak drobne pęcherze czy rzuty niewykrywane właśnie w trakcie procesu rekonstrukcji. Przetwarzanie surowych danych tomograficznych wiąże się ze znacznym wzrostem liczby punktów pomiarowych przebiegu, ponieważ zrekonstruowanie wszystkich ciągle napływających danych tomograficznych jest zadaniem czasochłonnym. W następstwie tego, pomijając proces rekonstrukcji obrazów, ocena typów przepływów jest możliwa do zastosowania w czasie rzeczywistym procesu bez konieczności aplikowania dodatkowego drogiego sprzętu komputerowego opartego na szybkich kartach graficznych oraz metod zrównoleglania obliczeń i wykonywania ich na procesorach graficznych, a szybkość przetwarzania jest ograniczona tylko wydajnością tomograficznego systemu pomiarowego (obecnie w przypadku ET3 dla 32 elektrod pomiarowych to jest 12 kompletnych ramek pomiarowych na sekundę). Zaproponowane przeze mnie rozwiązanie upraszcza implementację, co zdecydowanie minimalizuje ostateczne koszty całego systemu.

Prace badawcze nad blokiem rozmytej identyfikacji prowadziłem jako kierownik zespołu badawczego, który powołałem dla potrzeb realizacji mojego projektu. Jednym z członków zespołu był mgr inż. Paweł Fiderek – doktorant w IIS PŁ. Pełnię funkcję promotora pomocniczego jego przewodu doktorskiego (promotor dr hab. inż. Jacek Kucharski, prof. PŁ). Wspólnie z doktorantem opracowałem algorytm wnioskowania rozmytego, który bazuje na cechach statystycznych przepływu pomijając przy tym zbiór wzorców i eliminując tym samym potrzebę budowania bazy wiedzy o przepływie. W algorytmie zastosowany został unikalny kształt funkcji przynależności, których boki konstruowane są na bazie funkcji wykładniczych. Dało to możliwość dostosowywania systemu rozpoznawania pod kątem subiektywnej oceny użytkownika końcowego oraz dopasowania procesu identyfikacji do specyficznych cech instalacji poprzez korektę wyłącznie wartością jednego parametru.

Opracowany algorytm identyfikacji pozwala na monitorowanie przepływów w czasie rzeczywistym w sposób bezpieczny i nieinwazyjny dla badanego procesu. Umożliwia też dokładną analizę dynamiki procesu przepływu wyznaczając wzorce i struktury przepływów oraz podatność rurociągu na zakorkowania. Warto tu wspomnieć, że jednym z atrybutów opracowanej metody jest jej przydatność do opracowywania nowych map przepływów. Jedną z cieczy, na których miałem możliwość testować system, był glikol propylenowy. Jest to ciecz higroskopijna, która z czasem zmienia swoje parametry absorbując wilgoć z otoczenia. Co istotniejsze, z uwagi na niską wartość napięcia powierzchniowego glikol jest cieczą, która ulega spienianiu w trakcie przepływu warunkując niestabilność tworzenia się struktur i brak powtarzalności charakteru przepływu przy tych samych nastawach w krótkich odstępach czasu. Ta cecha jednak determinuje ją do różnych zastosowań, gdzie istnieje potrzeba odbierania nadmiernej wilgoci z procesu lub wymiany ciepła np. w kolektorach słonecznych. Ale dodatkowo ta cecha sprawia również, że brak jest opracowanych jednoznacznych map przepływów dla instalacji z udziałem tej cieczy (Parsi et al., 2015; van Nimwegen et al., 2015). Opracowana metoda identyfikacji okazała się niezwykle pomocna przy budowaniu takich map m.in. dla instalacji w Laboratorium Tomografii Procesowej Instytutu. Nowe mapy uwzględniają dopuszczalny zakres pomiarowy dla strumienia gazu oraz strumienia cieczy podawanych do instalacji. Wyznaczenie takich map przepływu na podstawie wyników algorytmu identyfikacji przepływów dwufazowych okazało się niezbędne zwłaszcza dla poziomych sekcji pomiarowych. Mapy dla tych sekcji różnią się znacząco od tych

powszechnie używanych np. w obszarze przejścia pomiędzy przepływem tłokowym a rzutowym [rys 1. w artykule (Zał. 3 poz. I.B.7)].

Ponadto, z punktu widzenia potrzeb przemysłu zadanie diagnostyki jest kluczowe, ponieważ oprócz właściwej identyfikacji typów przepływów algorytm udostępnia mechanizm wykrywania różnych nieprawidłowości w funkcjonowaniu procesu, które mogą i często skutkują całkowitym zatrzymaniem procesu, gorszą jakością finalnego produktu lub nawet możliwością wystąpienia sytuacji niebezpiecznych – wypadków, katastrof. Opracowany algorytm identyfikacji rodzaju przepływu jest również skutecznym narzędziem właśnie do wykrywania sytuacji niepożądanych.

Algorytm modułu sterowania pracą instalacji generującą przepływy dwu-fazowe, opisany w [Zał. 3 poz. I.B.8], wykorzystuje z kolei informacje o obiektach i ich relacjach przestrzennych do pracy w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego. Moduł ten umożliwia zadawanie typu przepływu w konkretnych odcinkach instalacji przemysłowej oraz zbadanie wpływu czynników zakłócających (np. gwałtowne zmiany ciśnienia układu, sytuacje awaryjne) na przebieg przepływu. Algorytm bazuje na metodzie wnioskowania rozmytego, dzięki czemu sam automatycznie podejmuje decyzje o strategii regulacji. Gruntowna analiza dostępnej literatury, przeprowadzona przeze mnie w 2010 roku, pozwoliła stwierdzić, że do tej pory nie opracowano podobnej komputerowej metody regulowania typem przepływu, bazującej na przestrzennej diagnostyce tomograficznej i wnioskowaniu rozmytym.

W algorytmie zaimplementowany został mechanizm bezpieczeństwa, który realizuje dwa zadania. Po pierwsze, prowadzona jest obserwacja bieżącego stanu procesu w kierunku wykrywania zaistniałych nieprawidłowości. Po drugie, analiza aktualnych sygnałów diagnostycznych pod kątem ryzyka wystąpienia sytuacji awaryjnej i zapobieganie takim sytuacjom.

Algorytm sterowania pracą instalacji charakteryzuje się nie tylko dużą szybkością reakcji, ale również uniwersalną aplikacyjnością. Przeznaczony jest do różnorodnych procesów przepływów dwufazowych, które wymagają precyzyjnego i efektywnego sterowania. Wspomniana precyzyjność została osiągnięta poprzez rozróżnienie sygnałów wejściowych na dwie klasy. Nie ma tu klasycznego rozmywania, ponieważ sygnałami wejściowymi są dwie relacje rozmyte (tj. aktualny oraz zadany typ przepływu) oraz dwie liczby rozmyte (tj. przybliżona wartość strumienia gazu oraz przybliżona wartość strumienia cieczy). Podobnie jak w algorytmie identyfikacji, tu też zostały zastosowane te same funkcje przynależności, ponieważ precyzyjniej oddają one nieostrą naturę granic pomiędzy poszczególnymi typami przepływów. Dzięki temu cechą charakterystyczną regulatora jest to, że możliwe jest dokonywanie zmian nastaw typu przepływu poprzez zmianę wartości tylko jednego parametru, a zmiana ta optymalnie wykorzystuje efektywność urządzeń zasilających unikając ich nadmiernych obciążeń, wydłużając ich żywotność i eliminując tym samym dodatkowe koszty użytkowe. Ponadto, ta funkcjonalność odpowiedzialna jest również za zapobieganie sytuacji zapętlenia regulatora w przypadku, gdyby nastąpiła próba uzyskania nieobsługiwanej lub niepożądanego typu przepływu.

Dodatkową cechą jest stosunkowo łatwa aplikacyjność, która może być zrealizowana przez samą kadrę techniczną obsługującą instalacje przepływu. Zostało to osiągnięte dzięki udostępnieniu dla użytkownika końcowego zbioru indywidualnych parametrów oraz intuicyjnych reguł wnioskowania. Główne badania zostały przeprowadzone między innymi w zakresie opracowania metody automatycznego doboru kształtu oraz ilości funkcji przynależności wejściowych i wyjściowych regulatora. Dlatego też, nie jest wymagane konstruowanie żadnych dodatkowych (często skomplikowanych) modeli komputerowych instalacji przepływu, co często było podstawą przy klasycznych regulatorach. To wszystko sprawia, że opracowany w ramach mojego projektu naukowo-badawczego algorytm sterowania może być oferowany jako wbudowany zamknięty (ang. *typ Black-Box*) komponent inteligentnego urządzenia przeznaczonego do regulowania typu przepływu dwu-fazowego.

Utylitarność zrealizowanych badań

Istotnym aspektem wymienionych obszarów badań jest praktyczne wdrożenie opracowanych przeze mnie nowych metod komputerowych i algorytmów do pracy w warunkach rzeczywistych. Pierwszym przykładem jest opracowanie w 2009 roku kompletnego oprogramowania dla potrzeb monitorowania stanu instalacji przepływów dwufazowych gaz-ciecz. Badania, prowadzone przy współpracy z naukowcami z Politechniki Opolskiej, polegały na zwiększeniu wrażliwości przy ściankach czujników systemu ECT dla potrzeb diagnostyki przepływów przeciwwądowych w odcinkach pionowych – projekt N-B PB-1318/T10/2005/28 pt. „*Opracowanie metody pomiarowej do identyfikacji struktur w przepływie dwufazowym gaz-ciecz*”. Dla potrzeb projektu zmodyfikowałem i udostępniłem program *WinRECO*, w ramach którego zaimplementowane zostały specjalistyczne metody analizy danych surowych i dwuwymiarowych obrazów przekrojów poprzecznych.

W latach 2006 – 2010 brałem czynny udział w pracach naukowo-badawczych ale również i administracyjnych międzynarodowego projektu DENIDIA. Jednocześnie byłem odpowiedzialny za przygotowywanie wniosku oraz dalsze prowadzenie i raportowanie innego krajowego projektu przyznanego przez MNiSW, którego celem było wsparcie uczestnictwa we wspomnianym programie międzynarodowym DENIDIA. Opracowałem metody badawcze, które przyczyniły się do uzyskania dwóch głównych celów projektu DENIDIA tj. poprawy zdolności pomiarowej systemów tomografii pojemnościowej oraz pozyskiwania trójwymiarowych danych pomiarowych, tworzenia obrazów i wizualizacji przy jednoczesnym zachowaniu głównej zalety systemu jaką jest szybkość zbierania danych. Opracowane przeze mnie algorytmy umożliwiły realizację zadań regulacji i synchronizacji pojemnościowego czujnika obrotowego [Zał. 3 poz. II.L.14], rekonstrukcji obrazów w trybie tomografii dwumodalnej pojemnościowo-rezystancyjnej [Zał. 3 poz. II.L.8] dla czujnika przeznaczonego do wizualizacji wielofazowych procesów przepływu [Zał. 3 poz. II.E.14] [Zał. 3 poz. II.E.15]. Mój wkład w to drugie zadanie przyczynił się do opracowania koncepcji wielomodalnego systemu pomiarowego (Gamma, ECT, ERT). Rozwiązania zastosowane w czujniku tego systemu chronione są patentem europejskim, którego jestem współautorem.

Jednocześnie należy nadmienić, że jednym z najważniejszych osiągnięć projektu DENIDIA jest laboratorium naukowo-badawcze Tomografii Procesowej im. prof. Tomasza Dyakowskiego w IIS PŁ. Brałem czynny udział w pracach projektowych, organizacyjnych oraz konstrukcyjnych. W Laboratorium znajdują się trzy instalacje do nieinwazyjnego badania zjawisk fizyko-chemicznych w przepływach wielofazowych. W celu zapewnienia możliwości przeprowadzenia badań w warunkach analogicznych do mających miejsce podczas rzeczywistych procesów przemysłowych, obiekt zaprojektowano i zbudowano w skali przemysłowej.

W 2011 wraz z dr hab. inż. Robertem Banasiakiem ukończyłem projektowanie oprogramowania o nazwie *TomoKISStudio* [Zał. 3 poz. II.L.17]. Zbudowana platforma programowo-sprzętowa jest kompleksowym narzędziem przeznaczonym dla systemów elektrycznej tomografii procesowej i jest podstawowym oprogramowaniem diagnostycznym w laboratorium tomografii procesowej. W procesie tworzenia tego oprogramowania samodzielnie opracowałem algorytmy odpowiedzialne za:

- komunikację i konfigurację urządzeń tomograficznych,
- komputerową metodę automatycznego doboru parametrów konfiguracyjnych tomografu w celu dostosowania przestrzennych czujników tomograficznych do potrzeb konkretnych procesów, uwzględniając przy tym charakter badanego medium oraz różnorodną geometrię czujników tak, aby wartości pomiarowe oscylowały w zakresach pomiarowych urządzenia i dawały znaczącą różnicę pomiędzy pomiarami dla pustego i wypełnionego czujnika,
- budowę modelu komputerowego czujników 3D ECT oraz 3D ERT w tym generatory siatki elementów skończonych, swobodnego rozkładu przestrzennego elektrod

pomiarowych, przestrzennego rozkładu potencjałów pola elektrycznego oraz rozkładu wrażliwości [Zał. 3 poz. II.E.12],

- wyznaczenie modelu wrażliwości w oparciu o algorytm tunelowy,
- rekonstrukcję obrazów tomograficznych w trybie tomografii dwu-modalnej pojemnościowo-rezystancyjnej (algorytm opracowany na potrzeby realizacji projektu DENIDIA),
- sterowanie i synchronizację pojemnościowego czujnika obrotowego (algorytm opracowany na potrzeby realizacji projektu DENIDIA),
- transmisję tomograficznych danych pomiarowych w sieci Internet umożliwiając tym samym jednoczesną zdalną diagnostykę w różnych (często oddalonych od siebie) sekcjach pomiarowych,
- analizę przepływów na podstawie zrekonstruowanych obrazów tomograficznych, które zwracają informację o procentowym udziale faz przepływu [Zał. 3 poz. II.E.13],
- graficzny interfejs użytkownika, wielowątkową i wielomodułową strukturę oprogramowania.

Opracowane oprogramowanie *TomoKISStudio* wraz z zaimplementowanymi moimi algorytmami modelowania oraz wyznaczenia tunelowego modelu wrażliwości trójwymiarowych czujników ECT zostało zastosowane między innymi do diagnostyki grawitacyjnego przepływu opróżniania silosów w ramach projektu naukowo-badawczego nr PB-3687/B/T02/2009/37 pt. „*Nieinwazyjna metoda pomiaru dynamiki przemysłowych procesów przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich*” (kierownik dr inż. Krzysztof Grudzień). Działanie oprogramowania pozwoliło wyznaczyć mapy wrażliwości konieczne do obrazowania 3D procesu przepływu dwufazowego opróżniania grawitacyjnego zbiornika. Otrzymane wyniki posłużyły do dalszych prac nad monitorowaniem przepływu materiałów sypkich [Zał. 3 poz. II.L.11. Badania prowadzone były m.in. przy współpracy z dr hab. inż. Maciejem Niedostatkiem z Politechniki Gdańskiej. Dodatkowo, jestem współautorem pracy, w której dzięki moim metodom zostało opracowanych i zaimplementowanych szereg rozwiązań umożliwiających między innymi obserwację on-line trójwymiarowego obrazu przepływu grawitacyjnego w laboratoryjnych modelach silosów zarówno w stanie statycznym jak i podczas procesu jego opróżniania [Zał. 3 poz. II.E.9]. Za te badania wraz z wnioskodawcami grantu zostaliśmy uhonorowani licznymi nagrodami i medalami na międzynarodowych wystawach wynalazczości.

Podsumowanie

Główne nurty prac badawczych, prowadzonych przeze mnie po obronie pracy doktorskiej dotyczyły przede wszystkim **rozwoju komputerowych metod wizualizacji i przetwarzania trójwymiarowych tomograficznych danych pomiarowych dla potrzeb nieinwazyjnej diagnostyki i regulowania procesem przepływu**. Poniżej wymienione zostały najważniejsze osiągnięcia stanowiące mój oryginalny wkład do rozwoju dziedziny informatyki:

- algorytmy rekonstrukcji obrazów dla trójwymiarowej tomografii pojemnościowej, w tym algorytm wyznaczenia trójwymiarowej macierzy wrażliwości, oraz algorytm iteracyjnej rekonstrukcji obrazów trójwymiarowych [Zał. 3 poz. I.B.1],
- algorytm analizy martwych stref w obszarach międzyelektrodowych trójwymiarowego czujnika pojemnościowego [Zał. 3 poz. I.B.2],
- algorytm wyznaczenia właściwości geometrycznych i mechanicznych trójwymiarowych czujników pojemnościowych w kierunku zmniejszenia niejednorodności rozkładu wrażliwości [Zał. 3 poz. I.B.4], [Zał. 3 poz. I.B.5],

- algorytm wyznaczania macierzy wrażliwości dla czujnika tomograficznego o zwiększonej wrażliwości przy ściankach przeznaczonego do diagnostyki przeciwprądowych przepływów dwu-fazowych [Zał. 3 poz. I.B.3],
- algorytm wyznaczania tunelowych macierzy wrażliwości trójwymiarowego czujnika pojemnościowego [Zał. 3 poz. I.B.6],
- algorytm metrologicznej analizy modelu wrażliwościowego [Zał. 3 poz. I.B.4], [Zał. 3 poz. I.B.6]
- algorytm wyznaczania udziału objętościowego faz przepływu dwu-fazowego w oparciu o trójwymiarowe obrazy tomograficzne [Zał. 3 poz. II.E.13],
- algorytm identyfikacji struktur przepływu dwufazowego w oparciu o surowe dane tomograficzne i wnioskowanie rozmyte [Zał. 3 poz. I.B.7],
- algorytm sterowania pracą instalacji generującej przepływy dwufazowe, pracujący w pętli sprzężenia zwrotnego z algorytmem identyfikacji [Zał. 3 poz. I.B.8].

Opracowane przeze mnie algorytmy i metody komputerowe charakteryzują się dużą aplikacyjnością i potencjałem komercjalizacyjnym. Algorytmy dedykowane systemom trójwymiarowej tomografii pojemnościowej wzbogacają tę technikę nieinwazyjnej diagnostyki zwiększając jej użyteczność dla potrzeb wybranych procesów przemysłowych. Z kolei metody wnioskowania zaprojektowane do celów identyfikacji i regulowania przepływów dwu-fazowych oparte na diagnostyce tomograficznej otwierają nowe możliwości w tej dziedzinie przemysłu. Szeroki zakres występowania ww. przepływów sprawia, że opracowane przeze mnie metody komputerowe mogą zostać zastosowane do zoptymalizowania wielu procesów przemysłowych oraz mogą zapobiec nieoczekiwanym awariom, a w krańcowych przypadkach katastrofom przemysłowym. Istotnym elementem moich prac badawczych była weryfikacja eksperymentalna zaproponowanych metod i rozwiązań w oparciu o półprzemysłowe instalacje transportu pneumatycznego, przepływu dwufazowego oraz stanowiska grawitacyjnego opróżniania silosów.

Zrealizowane przeze mnie zadania badawcze mają ściśle informatyczny charakter i wnoszą znaczący wkład w rozwój tej dziedziny nauki. Opracowane metody dotyczą komputerowych technik wizualizacji, modelowania, analizy i przetwarzania obrazów. Zakres ostatnio wykonywanych prac był ściśle związany z mechanizmami sztucznej inteligencji. Opracowane zostały nowe rozwiązania w dziedzinie klasyfikatorów rozmytych, definiowania rozmytych zmiennych lingwistycznych, przeznaczone do procesów przepływów dwufazowych, które wzbogacają stan światowej wiedzy w tematyce aplikacyjności sztucznej inteligencji. Prace badawcze nad inteligentnymi mechanizmami skutkowały również nowymi rozwiązaniami w dziedzinie statystycznego przetwarzania danych i sygnałów oraz, w zakresie algorytmiki, unowocześniły metodę symulacji pola elektrycznego w tomografii pojemnościowej 3D z użyciem metody elementów skończonych.

Opracowanie nowych rozwiązań w zakresie inteligentnych regulatorów wnosi również wkład w dyscyplinę informatyki przemysłowej i automatyki. Zastosowanie ww. algorytmu sterowania umożliwia efektywniejsze zautomatyzowanie linii produkcyjnych udostępniając przy tym mechanizmy prewencji stanom awaryjnym czy też z zakresu bezpieczeństwa.

5. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze

Od roku 2006 brałem również udział w licznych pracach naukowo-badawczych, które nie były ściśle związane z zaprezentowanym w poprzednim rozdziale osiągnięciem naukowym.

W latach 2008 – 2011 brałem udział, jako wykonawca, w projekcie N-B pt. „Autonomiczny robot pola walki przeznaczony do zadań zwiadu i wykrywania min” nr 0010/1/R/T00/2008/05. Celem przeprowadzonych prac badawczych, zrealizowanych wspólnie z firmą Prexer, była weryfikacja możliwości aplikacyjnych systemu

diagnostycznego tomografii pojemnościowej do wykrywania ładunków wybuchowych zakopanych w ziemi. W ramach przeprowadzonych wraz z kolegami z zespołu *TomOKIS* eksperymentów wykazaliśmy, że system ECT zdolny jest rozróżniać materiały wybuchowe umieszczone płytko pod powierzchnią gruntu nawet w otoczeniu innych materiałów jak drewno czy tworzywa sztuczne.

W ramach mojego uczestnictwa w projekcie naukowym „DENIDIA” w Instytucie Informatyki Stosowanej w roku 2010 brałem udział w opracowaniu metody i urządzenia do pomiaru frakcji składników w przepływie wielofazowym, w szczególności pomiaru frakcji wody, ropy i gazu w przepływach wielofazowych w rurach instalacji wydobywczej ropy [Zał. 3 poz. II.E.14] i [Zał. 3 poz. II.E.15]. Istotą wynalazku, chronionego od 27.02.2015 patentem europejskim EP-2416127, jest zastosowanie trzech tomograficznych technik EIT/ECT/GRT w jednym czujniku i opracowanie komputerowych metod agregacji danych pomiarowych. Mój wkład w jego powstanie obejmował opracowanie i implementacje algorytmów diagnostyki tomografii elektrycznej w tym m.in. algorytmu synchronizacji i kalibracji systemu pojemnościowego i rezystancyjnego, algorytmów rekonstrukcji obrazów z modułu pojemnościowego i rezystancyjnego oraz algorytmów agregacji tych obrazów.

Jestem również twórcą dwóch niewymienionych dotąd komponentów systemu *intelliFlowControl*, które *de facto* nie są ściśle powiązane tematycznie z prezentowanym w tym autoreferacie osiągnięciem naukowo-badawczym, ale niewątpliwie dodatkowo wzbogacają ofertę systemu. Pierwszy z algorytmów dotyczy potrzeby opracowania jednolitej usługi znaczników czasowych do synchronizacji danych pomiarowych pochodzących z różnych źródeł o różnej prędkości ich akwizycji [Zał. 3. poz. II.E.19]. Synchronizacji podlegają dwa tomografy pojemnościowe, kamera CCD oraz liczne urządzenia pomiarowe instalacji jak gazomierze, ciśnieniomierze oraz przepływomierz. Każdy z programów rejestrujących dane pomiarowe otrzymuje znaczniki czasowe, dostarczane w oparciu o czas wyznaczony przez jeden z komputerów i przypisuje je do każdej wartości pomiarowej. To rozwiązanie zdecydowanie pomaga w późniejszej analizie, jak również przy walidacji metrologicznej całego systemu. Drugi komponent to mobilny panel dotykowy wizualizacji modelu systemu wraz z implementacją programistycznego interfejsu graficznego wizualizacji stanu instalacji. Opracowałem i zaprojektowałem nowatorską metodę wizualizacji procesu przepływowego, w ramach której prezentowane są wszystkie strategiczne elementy instalacji przepływu dwu-fazowego. Poprzez wprowadzenie „gestów dotykowych” jako popularnej funkcjonalności mobilnych systemów operacyjnych możliwe jest sterowanie procesem przepływu z poziomu np. monitora dotykowego lub tabletu. Możliwy jest też wybór odpowiedniej drogi przepływu, rodzaju przepływu, oraz, co najważniejsze, możliwe jest łatwe programowanie nowych dodatkowych elementów wizualizacji nawet przez samego użytkownika. Takie rozwiązanie stanowi alternatywę dla drogich komercyjnych systemów wizualizacji przemysłowej.

Moje doświadczenie w dziedzinie systemów 3D ECT okazało się również przydatne przy dwóch innych pracach badawczych, których wyniki zostały opublikowane w czasopiśmie indeksowanym na liście Thomson Reuters JCR. W przypadku obu tych prac tj. [Zał. 3. poz. I.A.1] i [Zał. 3. poz. I.A.4], których jestem współautorem, byłem odpowiedzialny za projekt stanowiska badawczego do realizacji eksperymentów, na które składały się: system pomiarowy ECT oraz system akwizycji danych pomiarowych. Byłem też odpowiedzialny za realizację eksperymentów.

W 2017 roku zostałem zaproszony do projektu naukowo-badawczego w ramach programu HORYZONT 2020 Marie Skłodowska-Curie Innovative Training Network zatytułowanego „*Smart tomographic sensors for advanced industrial process control (TOMOCON)*”. W projekcie, który łączy współpracę 12 instytucji naukowych (krajowych i zagranicznych) oraz 15 partnerów przemysłowych w kontekście rozwoju nowych obszarów zastosowań dla tomografii procesowej w zakresie innowacyjnych inteligentnych czujników

i systemów kontroli procesów, od 2017 roku pełnię rolę opiekuna pomocniczego jednego z zagranicznych doktorantów Guruprasad Rao studiujących na PŁ. Jestem współodpowiedzialny za jedno z 15 zadań badawczych tj. „Zastosowanie tomografii ERT dla potrzeb pomiaru procesu krystalografii w reaktorach wsadowych”.

Dodatkowo, moje doświadczenie oraz osiągnięcia naukowe w obszarze komputerowych metod dla elektrycznej tomografii procesowej zostały wykorzystane w dwóch innych projektach naukowo-badawczych finansowanych od 2017 roku przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Projekty, w których już biorę aktywny udział, realizowane są przy współpracy PŁ z centrum badawczo – rozwojowym NETRIX z Lublina. Pierwszy z projektów o akronimie LETS dotyczy opracowania systemu „tomografu elektrycznego do innowacyjnego obrazowania i monitorowania obszarowego z wykorzystaniem mapy potencjałów węzłowych”. Celem drugiego projektu o akronimie PLATOM jest zbudowanie „nowej generacji platformy tomografii przemysłowej do diagnostyki i sterowania procesami technologicznymi”.

6. Literatura

- Abbagoni, B.M., Yeung, H., 2016. Non-invasive classification of gas-liquid two-phase horizontal flow regimes using an ultrasonic Doppler sensor and a neural network. *Meas. Sci. Technol.* 27, 84002. doi:10.1088/0957-0233/27/8/084002
- Abdulmouti, H., 2015. Bubbly Two-Phase Flow: Part II- Characteristics and Parameters. *Am. J. Fluid Dyn.* 4, 115–180. doi:10.5923/j.ajfd.20140404.01
- Akita, K., Okazaki, T., Koyama, H., 1988. Gas holdups and friction factors of gas-liquid two-phase flow in an air-lift bubble column. *J. Chem. Eng. Japan* 21, 476–482. doi:10.1252/jcej.21.476
- Arvoh, B.K., Hoffmann, R., Halstensen, M., 2012. Estimation of volume fractions and flow regime identification in multiphase flow based on gamma measurements and multivariate calibration. *Flow Meas. Instrum.* 23, 56–65. doi:10.1016/j.flowmeasinst.2011.11.002
- Balamurugan, S., Lad, M.D., Gaikar, V.G., Patwardhan, A.W., 2007. Hydrodynamics and mass transfer characteristics of gas-liquid ejectors. *Chem. Eng. J.* 131, 83–103. doi:10.1016/j.cej.2006.12.026
- Bertola, V., 2003. Two-Phase Flow Measurement Techniques. Springer Vienna, pp. 281–323. doi:10.1007/978-3-7091-2538-0_6
- Beux, S., Nunes, E., Barana, A.C., 2007. Effect of temperature on two-phase anaerobic reactors treating slaughterhouse wastewater. *Brazilian Arch. Biol. Technol.* 50, 1061–1072. doi:10.1590/S1516-89132007000700017
- Blażej, M., Cartland Glover, G.M., Generalis, S.C., Markoš, J., 2004. Gas-liquid simulation of an airlift bubble column reactor. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 43, 137–144. doi:10.1016/S0255-2701(03)00010-2
- Brebbia, C. a., Mammol, a. a., 2011. Computational Methods in Multiphase Flow VI.
- Brzeski, P., Mirkowski, J., Olszewski, T., Płasowski, A., Smolik, W., Szabatin, R., 2003. Multichannel capacitance tomograph for dynamic process imaging. *Opto-Electronics Rev.* 11, 175–180.
- Budzik, G., Turak, P., 2016. Proces rekonstrukcji obrazów tomograficznych. *Probl. Nauk Stosow.* 4, 57–64.
- Dclnoij, E., Kuipers, J.A., van Swaaij, W.P., Westerweel, J., 2000. Measurement of gas/liquid two-phase flow in bubble columns using ensemble correlation PIV. *Chem. Eng. Sci.* 55, 3385–3395. doi:10.1016/S0009-2509(99)00595-3
- Fang Dong, Li-De Fang, Hong-Lian Li, Yan Zhu, 2012. Characterization of gas-liquid two-phase flow pattern based on complexity measures analysis, in: 2012 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. IEEE, pp. 996–1000. doi:10.1109/ICMLC.2012.6359490
- Gadd, R., Vinther, F., Record, P.M., Rolfe, P., 1992. Reconstruction of three-dimensional data for electrical impedance tomography. *Electron. Lett.* 28, 974–976. doi:10.1049/el:19920619
- Guo, X., Zhou, X., Chen, Q., Liu, J., 2013. Flow field and dissolved oxygen distributions in the outer channel of the Orbal oxidation ditch by monitor and CFD simulation. *J. Environ. Sci. (China)* 25, 645–51.
- Holder, D.S., 2004. Electrical Impedance Tomography: Methods, History and Applications. CRC Press. doi:10.1118/1.1995712
- Isaksen, Ø., 1996. A review of reconstruction techniques for capacitance tomography. *Meas. Sci. Technol.* 7, 325–337. doi:10.1088/0957-0233/7/3/013
- Jothiprakash, V., Bhosekar, V.V., Deolalikar, P.B., 2015. Flow characteristics of orifice spillway aerator: numerical model studies. *ISH J. Hydraul. Eng.* 21, 216–230. doi:10.1080/09715010.2015.1007093
- Kassab, S.Z., Kandil, H.A., Warda, H.A., Ahmed, W.H., 2009. Air-lift pumps characteristics under two-phase flow conditions. *Int. J. Heat Fluid Flow* 30, 88–98. doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.09.002
- Kiambi, S.L., Kiriamiti, H.K., Kumar, A., 2011. Characterization of two phase flows in chemical engineering reactors. *Flow Meas. Instrum.* 22, 265–271. doi:10.1016/j.flowmeasinst.2011.03.006
- Lafmejani, S.S., Olesen, A.C., Kær, S.K., 2017. VOF modelling of gas-liquid flow in PEM water electrolysis cell micro-channels. *Int. J. Hydrogen Energy.* doi:10.1016/j.ijhydene.2017.05.079
- Liu, Y., Wang, L., Zhu, Z., 2015. Numerical study on flow characteristics of rotor pumps including cavitation. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 229, 2626–2638. doi:10.1177/0954406214562634
- Loser, T., Wajman, R., Mewes, D., 2001. Electrical capacitance tomography: image reconstruction along electrical field lines. *Meas. Sci. Technol.* 12, 1083. doi:10.1088/0957-0233/12/8/314
- Malihevsky, A., Archer, A.J., 2013. Sedimentation of a two-dimensional colloidal mixture exhibiting liquid-liquid and gas-liquid phase separation: A dynamical density functional theory study. *J. Chem. Phys.* 139, 144901. doi:10.1063/1.4823768
- Metherall, P., Barber, D.C., Smallwood, R.H., Brown, B.H., 1996. Three-dimensional electrical impedance tomography. *Nature* 380, 509–512. doi:10.1038/380509a0
- Mewes, D., Wiemann, D., 2003. Two-Phase Flow with Mass Transfer in Bubble Columns. *Chem. Eng. Technol.* 26, 862–868. doi:10.1002/ceat.200300009
- Mokhatab, S., 2008. Two-Phase Flow: Theory and Applications. 1st Edition Clement Kleinstreuer Taylor & Francis Group. Published May 2003, 454 pages ISBN: 1591690005. *Can. J. Chem. Eng.* 84, 260–261. doi:10.1002/cjce.5450840214

- Mosorov, V., Sankowski, D., Mazurkiewicz, P., Dyakowski, T., 2002. The "best-correlated pixels" method for solid mass flow measurements using electrical capacitance tomography. *Meas. Sci. Technol.* 13, 1810–1814. doi:10.1088/0957-0233/13/12/302
- Olesen, A.C., Römer, C., Kaer, S.K., 2016. A numerical study of the gas-liquid, two-phase flow maldistribution in the anode of a high pressure PEM water electrolysis cell. *Int. J. Hydrogen Energy* 41, 52–68. doi:10.1016/j.ijhydene.2015.09.140
- Ozbayoglu, E.M., Ozbayoglu, M.A., 2009. Estimating Flow Patterns and Frictional Pressure Losses of Two-Phase Fluids in Horizontal Wellbores Using Artificial Neural Networks. *Pet. Sci. Technol.* 27, 135–149. doi:10.1080/10916460701700203
- Parsi, M., Vieira, R.E., Torres, C.F., Kesana, N.R., McLaury, B.S., Shirazi, S.A., Schleicher, E., Hampel, U., 2015. On the effect of liquid viscosity on interfacial structures within churn flow: Experimental study using wire mesh sensor. *Chem. Eng. Sci.* 130, 221–238. doi:10.1016/j.ces.2015.03.033
- Pląskowski A., Beck M.S., Thorn R., D.T., 1995. *Imaging Industrial Flows – Applications of Electrical Process Tomography*. IOP Publishing, Bristol.
- Polakowski, K., Sikora, J., Filipowicz, S.F., 2007. Algebraiczne metody konstrukcji obrazów tomografii ultradźwiękowej. *Pr. Inst. ELEKTROTECHNIKI* 230.
- Polydorides, N., Lionheart, W.R.B., 2002. A Matlab toolkit for three-dimensional electrical impedance tomography: a contribution to the Electrical Impedance and Diffuse Optical Reconstruction Software project. *Meas. Sci. Technol.* 13, 1871–1883. doi:10.1088/0957-0233/13/12/310
- Reinecke, N., Mewes, D., 1996. Recent developments and industrial/research applications of capacitance tomography. *Meas. Sci. Technol.* 7, 233–246. doi:10.1088/0957-0233/7/3/004
- Smolik, W.T., 2013. Rekonstrukcja obrazów w elektrycznej tomografii pojemnościowej. *Pr. Nauk. Politech. Warsz. Elektron.* 188, 3–226.
- Solotych, V., Lee, D., Kim, J., Amalfi, R.L., Thome, J.R., 2016. Boiling heat transfer and two-phase pressure drops within compact plate heat exchangers: Experiments and flow visualizations. *Int. J. Heat Mass Transf.* 94, 239–253. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.11.037
- Teng, P., Yang, J., Pfister, M., 2016. Studies of Two-Phase Flow at a Chute Aerator with Experiments and CFD Modelling. *Model. Simul. Eng.* 2016, 1–11. doi:10.1155/2016/4729128
- Vadlakonda, B., Mangadoddy, N., 2017. Hydrodynamic study of two phase flow of column flotation using electrical resistance tomography and pressure probe techniques. *Sep. Purif. Technol.* 184, 168–187. doi:10.1016/j.seppur.2017.04.029
- van Nimwegen, A.T., Portela, L.M., Henkes, R.A.W.M., 2015. The effect of surfactants on air-water annular and churn flow in vertical pipes. Part 1: Morphology of the air-water interface. *Int. J. Multiph. Flow* 71, 133–145. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.03.008
- Venkata, S.K., Roy, B.K., 2012. An Intelligent Flow Measurement Scheme using Ultrasonic Flow Meter, in: *Modelling, Identification and Control / 770: Advances in Computer Science and Engineering*. ACTAPRESS, Calgary, AB, Canada. doi:10.2316/P.2012.769-033
- Wang, H., Liu, S., Fan, J., Yang, W., 2003. 3D Presentation of Images with Capacitance Tomography, in: *3rd World Congress on Industrial Process Tomography*. Banff, Canada, pp. 331–336.
- Warsito, W., Fan, L.-S., 2005. Dynamics of spiral bubble plume motion in the entrance region of bubble columns and three-phase fluidized beds using 3D ECT. *Chem. Eng. Sci.* 60, 6073–6084. doi:10.1016/j.ces.2005.01.033
- Warsito, W., Fan, L.-S., 2003. Development of three-dimensional electrical capacitance tomography, in: *Proc. 3rd World Congress on Industrial Process Tomography (Banff)*. p. 391.
- Xie, T., Ghiaasiaan, S.M., Karrila, S., 2004. Artificial neural network approach for flow regime classification in gas-liquid-fiber flows based on frequency domain analysis of pressure signals. *Chem. Eng. Sci.* 59, 2241–2251. doi:10.1016/j.ces.2004.02.017
- Yang, W.Q., Peng, L., 2003. Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography. *Meas. Sci. Technol.* 14, R1–R13. doi:10.1088/0957-0233/14/1/201
- York, T., Mazurkiewicz, L., Polydorides, N., Mann, R., Grieve, B., 2003. Image Reconstruction for Pressure Filtration Using EIDORS 3D, in: *3rd World Congress on Industrial Process Tomography*. p. 559.
- Zadeh, L.A., 1999. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets Syst.* 100, 9–34. doi:10.1016/S0165-0114(99)80004-9
- Zargarani, A., Mozaffari, E., Giddings, D., 2016. Gas-liquid slip velocity determination in co-current column flotation. *Sep. Purif. Technol.* 169, 179–186. doi:10.1016/j.seppur.2016.05.018
- Zhang, W., Wang, C., Yang, W., Wang, C.-H., 2014. Application of electrical capacitance tomography in particulate process measurement – A review. *Adv. Powder Technol.* 25, 174–188. doi:10.1016/j.apt.2013.12.003
- Zhu, Z.T., Wang, Y., Zhao, L.F., Ning, C., Xie, S.F., Liu, Z.C., 2015. The effect of gas fraction on centrifugal pump. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 72, 32022. doi:10.1088/1757-899X/72/3/032022

Radosław Wajman