

# INFORMATYKA AUTOMATYKA POMIARY



CITT LPNT

[www.IAPGOS.pl](http://www.IAPGOS.pl)

W GOSPODARCE I OCHRONIE ŚRODOWISKA

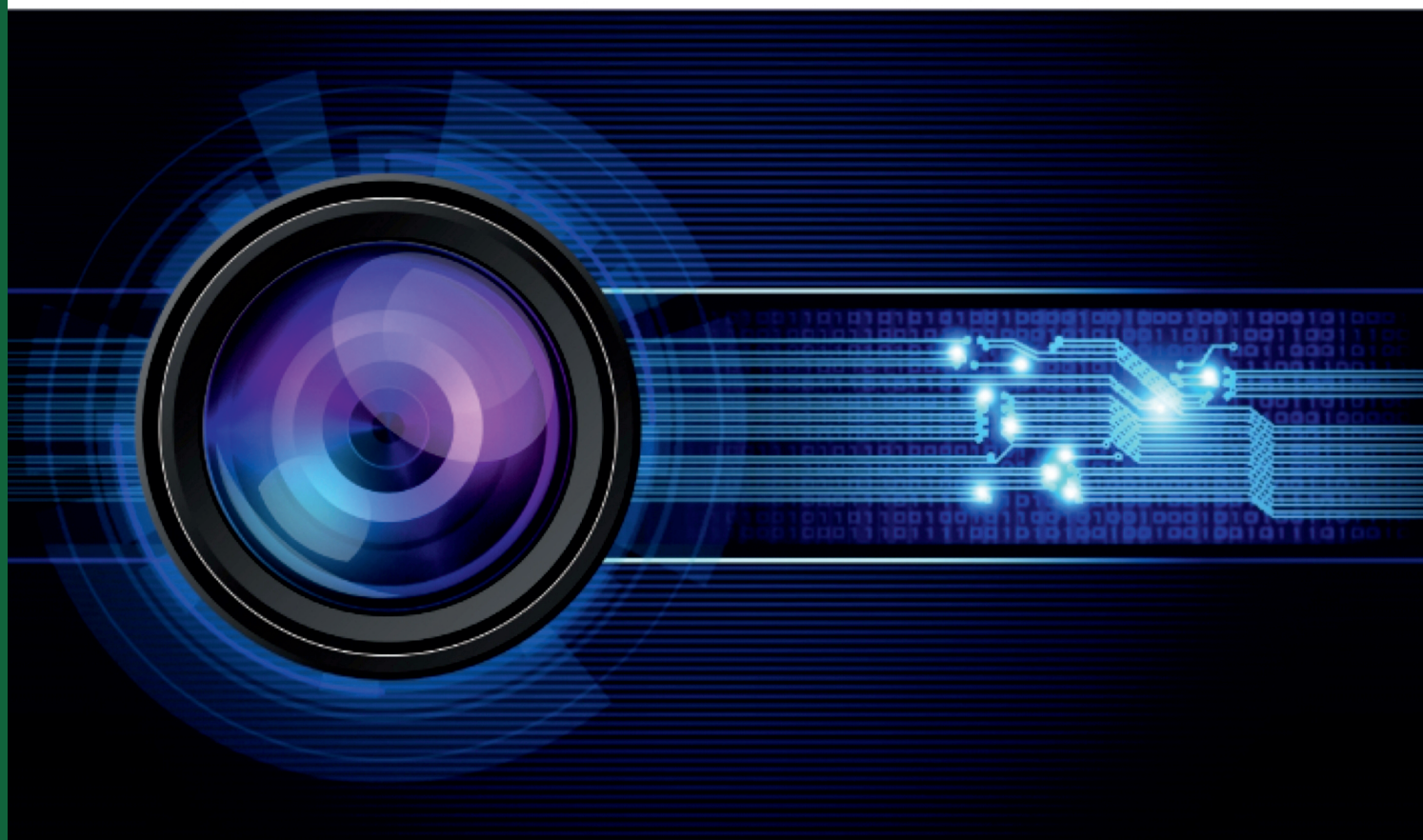
ISSN 2083-0157

Kwartalnik Naukowo-Techniczny

cena 16 zł (w tym 5% VAT)

INNO-TECH EXPO

# 2013



17-19 PAŹDZIERNIKA 2013  
KIELCE, POLSKA

[WWW.TARGIKIELCE.PL/INNOTECH](http://WWW.TARGIKIELCE.PL/INNOTECH)



The 7th World Congress on Industrial Process Tomography was held in Krakow (Poland) between the 2<sup>nd</sup> to the 5<sup>th</sup> of September 2013. The Congress was organized by the Institute of Applied Computer Science of the Lodz University of Technology and the International Society for Industrial Process Tomography (ISIPT). There were **140 participants from 20 countries from all over the world** presenting their research work and results.

The Congress provided an opportunity to bring together researchers, developers, practitioners, and applications engineers to discuss the latest research methods, scientific results and future ideas in process tomography. There were **108 articles considering achievements in the area of process tomography focused on:**

- design, development and construction of sensors and measurement instrumentation,
- data acquisition systems and instrumentation,
- tomography software engineering,
- 2D and 3D image reconstruction in hard and soft-field tomography,
- modelling and simulation,
- hard field tomography (X-ray, gamma, muon),
- data and sensor fusion,
- multi-modality tomographic techniques,
- emerging technologies in process tomography and applications of industrial process tomography.

The Congress was under the patronage of: National Instruments Poland, Technika Obliczeniowa, Marvel Kia/Hyundai, Ministry of Science and High Education Republic of Poland, Rector of the Lodz University of Technology, Rector of the AGH University of Science and Technology, Polish Information Processing Society, Lord Major of Krakow, Lodz Province Governor, Lodz ACM Chapter.

Four prizes were awarded: Best Technical presentation, Best Young Researcher Presentations (2 ex aequo) and Best Poster. The Best Poster was for the first time, in the WCIPT history, elected by all attendees.





### SPIS TREŚCI

str.

<b>Mieczysław Borysiewicz, Karol Kowal, Piotr A. Prusiński, Marcin Dąbrowski</b> <i>Zastosowanie IRIDM w procesie decyzyjnym dotyczącym konwersji paliwa w reaktorze MARLA</i> .....	3
<b>Edyta Łukasik, Beata Pańczyk, Jan Sikora</b> <i>Wyznaczanie całek niewłaściwych w metodzie elementów brzegowych Fouriera</i> .....	7
<b>Volodymyr Drevetskiy, Marko Klepach</b> <i>Inteligentny system do oceny jakości paliw samochodowych</i> .....	11
<b>Jakub Smółka, Maria Skublewska-Paszowska</b> <i>Porównanie wybranych metod interpolacji ruchu</i> .....	14
<b>Piotr Lipnicki</b> <i>Sieci "smart grids" – wyzwania synchronizacji</i> .....	18
<b>Marcin Bigoraj, Kamil Kaźmierak, Mateusz Krupa, Ewelina Narejko, Rafał Pytka</b> <i>Monitoring GPS</i> .....	24
<b>Robert Banasiak, Radosław Wajman, Henryk Fidos, Paweł Fiderek, Tomasz Jaworski, Jacek Nowakowski, Dominik Sankowski</b> <i>System trójwymiarowej tomografii pojemnościowej w zastosowaniu do wyznaczania udziału faz oraz identyfikacji struktur w przepływach mieszanin gaz-ciecz</i> .....	28
<b>Radosław Wajman, Robert Banasiak</b> <i>Nowa metoda tunelowej wyznaczania macierzy wrażliwości dla potrzeb procesu rekonstrukcji obrazów dla trójwymiarowej tomografii pojemnościowej</i> .....	32
<b>Radosław Wajman, Tomasz Jaworski, Paweł Fiderek, Robert Banasiak</b> <i>Algorytm dystrybucji znaczników czasowych dla potrzeb synchronizacji danych z różnych systemów pomiarowych</i> .....	38
<b>Tomasz Jaworski, Paweł Fiderek, Radosław Wajman, Robert Banasiak</b> <i>Identyfikacja przepływu dwufazowego gaz-ciecz oparta na ocenie rozmytej obrazów tomograficznych 3D</i> .....	41
<b>Radosław Wajman, Henryk Fidos, Paweł Fiderek, Tomasz Jaworski, Jacek Nowakowski, Dominik Sankowski, Robert Banasiak</b> <i>Ocena metrologiczna systemu pomiarowego dla potrzeb wyznaczania udziału faz w przepływie mieszanin gaz-ciecz metodą tomografii pojemnościowej 3D</i> .....	49
<b>Marek Wancerz, Paweł Wancerz</b> <i>Zarządzanie historią danych - slowly changing dimensions</i> .....	55
<b>Daniel Olchowy</b> <i>System impedancyjnej tomografii komputerowej bazujący na procesorze sygnałowym o niskim poborze mocy</i> .....	57

### CONTENTS

page

<b>Mieczysław Borysiewicz, Karol Kowal, Piotr A. Prusiński, Marcin Dąbrowski</b> <i>An application of IRIDM in the decision making process on fuel conversion of the MARLA reactor</i> .....	3
<b>Edyta Łukasik, Beata Pańczyk, Jan Sikora</b> <i>Calculation of the improper integrals for Fourier Boundary Element Method</i> .....	7
<b>Volodymyr Drevetskiy, Marko Klepach</b> <i>The intelligent system for automotive fuels quality definition</i> .....	11
<b>Jakub Smółka, Maria Skublewska-Paszowska</b> <i>Comparison of the selected motion interpolation methods</i> .....	14
<b>Piotr Lipnicki</b> <i>Smart grids – general review of synchronization techniques</i> .....	18
<b>Marcin Bigoraj, Kamil Kaźmierak, Mateusz Krupa, Ewelina Narejko, Rafał Pytka</b> <i>GPS monitoring</i> .....	24
<b>Robert Banasiak, Radosław Wajman, Henryk Fidos, Paweł Fiderek, Tomasz Jaworski, Jacek Nowakowski, Dominik Sankowski</b> <i>Application of 3d electrical capacitance tomography for phase fraction determination and structures identification in two-phase flows</i> .....	28
<b>Radosław Wajman, Robert Banasiak</b> <i>New tunnel based method of sensitivity matrix calculation for 3D capacitance tomography image reconstruction</i> .....	32
<b>Radosław Wajman, Tomasz Jaworski, Paweł Fiderek, Robert Banasiak</b> <i>Algorithm of time stamps distribution for data synchronization of various measurement systems</i> .....	38
<b>Tomasz Jaworski, Paweł Fiderek, Radosław Wajman, Robert Banasiak</b> <i>Two-phase flow structure identification based on fuzzy assesment of 3D tomographical imaging</i> .....	41
<b>Radosław Wajman, Henryk Fidos, Paweł Fiderek, Tomasz Jaworski, Jacek Nowakowski, Dominik Sankowski, Robert Banasiak</b> <i>Metrological evaluation of measurement system for two-phase flow fractions determination using 3D electrical capacitance tomography</i> .....	49
<b>Marek Wancerz, Paweł Wancerz</b> <i>History management of data - slowly changing dimensions</i> .....	55
<b>Daniel Olchowy</b> <i>Electrical impedance tomography hardware system based on low power digital signal processor</i> .....	57

### INFORMACJE

<i>Od wydawcy</i> .....	2
<i>Z żałobnej karty - dr inż. Konrad Nita</i> .....	III

### IMPREZY SPECJALISTYCZNE

<i>WC IPT</i> .....	II
<i>15th Conference on Optical Fibers and Their Applications</i> .....	40
<i>VI Kongres Metrologii</i> .....	59
<i>IIPHDW 2013, WDWEII 2013</i> .....	60
<i>WD2013</i> .....	IV

### KOLEGIUM REDAKCYJNE

<i>redaktor naczelny</i>	prof. dr hab. inż. Jan Sikora
<i>z-ca redaktora naczelnego</i>	dr inż. Tomasz Więcek
<i>sekretarz redakcji</i>	dr inż. Paweł Komada
<i>redaktor językowy (ang., ros.)</i>	Tatiana Kolesnikova
<i>skład i łamanie</i>	mgr inż. Katarzyna Sobańska

Reklama: str. 37

## OD WYDAWCY

## Szanowni Czytelnicy,

oddajemy w Państwa ręce trzeci w 2013 roku numer wydawanego przez CITT LPNT kwartalnika IAPGOŚ.

Gorąco polecamy artykuł profesora Volodymyra Drevetskiego oraz mgr. inż. Marko Klepacha na temat inteligentnego systemu do oceny jakości paliwa w oparciu o metody hydrodynamiczne i sieci neuronowej.

W numerze znajdują Państwo również artykuł prezentujący sposób zarządzania historią tabel wymiarowych w bazach danych i hurtowniach danych autorstwa dr. inż. Marka Wancerza oraz mgr inż. Pawła Wancerza.

Polecamy również kilka artykułów dotyczących systemów automatycznego rozpoznawania przepływów dwufazowych mieszanin gaz-ciecz oraz wyznaczenia udziału faz w procesach przemysłowych autorstwa m. in. dr. inż. Radosława Wajmana oraz dr. inż. Roberta Banasiaka.

Miłośnikom technologii GPS proponujemy artykuł opisujący budowę i działanie aplikacji monitorującej położenie urządzenia mobilnego w terenie wykorzystując wbudowany moduł GPS.

Osoby zainteresowane metodami numerycznymi na pewno nie pominą artykułu autorstwa dr Edyty Łukasik, dr Beaty Pańczyk oraz prof. dr. hab. inż. Jana Sikory dotyczącego algorytmu obliczania całek niewłaściwych.

## RADA PROGRAMOWO-NAUKOWA

**prof. Waldemar Wójcik** (*Politechnika Lubelska, Lublin, Polska*)  
– przewodniczący

**prof. Kazimierz Adamiak** (*University of Western Ontario, Ontario, Kanada*), **prof. Darya Alontseva** (*D.Serikbaev East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazachstan*), **prof. Shin-ichi Aoqui** (*Sojo University, Kumamoto, Japonia*), **prof. Javier Ballester** (*Universidad de Zaragoza, Saragossa, Hiszpania*), **prof. Anatolij Bielecki** (*National Aviation University, Kijów, Ukraina*), **prof. Yurii Bobalo** (*Lviv Polytechnic National University, Lwów, Ukraina*), **prof. Oleksy Borysenko** (*Department of Electronics and Computer Technics, Sumy, Ukraina*), **prof. Hartmut Brauer** (*Universität Potsdam, Poczdam, Niemcy*), **dr Kathleen Curran** (*School of Medicine & Medical Science, Dublin, Irlandia*), **prof. Milan Dado** (*University of Žilina, Žylina, Słowacja*), **prof. Jarmila Dedkova** (*Brno University of Technology, Brno, Czechy*), **dr Józef Dresner** (*EUROTEK International, Warszawa, Polska*), **prof. Pavel Fiala** (*Brno University of Technology, Brno, Czechy*), **prof. Vladimir Firago** (*Belarusian State University, Mińsk, Białoruś*), **prof. Aleksandr Galuszkin** (*Moscow Institute of Physics and Technology, Moskwa, Rosja*), **prof. Jan Górski** (*Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Polska*), **prof. Antoni Grzanka** (*Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska*), **dr Jeni Heino** (*Helsinki University of Technology, Helsinki, Finlandia*), **prof. Oleksandra Hotra** (*Politechnika Lubelska, Lublin, Polska*), **prof. Zenon Hotra** (*Lviv Polytechnic National University, Lwów, Ukraina*), **prof. Piotr Kacejko** (*Politechnika Lubelska, Lublin, Polska*), **prof. Yurii Krak** (*V.M.Glushkov Institute of Cybernetic of NAS of Ukraine, Kijów, Ukraina*), **prof. Yurii Kryvonos** (*V.M.Glushkov Institute of Cybernetic of NAS of Ukraine, Kijów, Ukraina*), **prof. Piotr Lesiak** (*Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny, Radom, Polska*), **prof. Georgii Lysyhenko** (*National Academy of Sciences, Institute of Environmental Geochemistry, Kijów, Ukraina*), **prof. Volodymyr Lytvynenko** (*Kherson National Technical University, Chersoń, Ukraina*), **mgr inż. Andrzej Lobzowski** (*Firma LAB-EL, Warszawa, Polska*), **prof. Henryk Madura** (*Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Polska*), **prof. Artur Medved** (*Riga Technical University, Ryga, Łotwa*), **dr Pawel Mergo** (*Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin, Polska*),

**prof. Andrzej Nafalski** (*South Australia University, Adelajda, Australia*), **prof. Vladimir Odzhaev** (*Belarusian State University, Mińsk, Białoruś*), **prof. Jan Owsik** (*Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Polska*), **prof. Il Han Park** (*Sungkyunkwan University, Suwon, Korea*), **prof. Sergey Pavlov** (*Vinnytsia National Technical University, Winnica, Ukraina*), **prof. Wiaczesław Pietrow** (*członek korespondent NANU, Kijów, Ukraina*), **prof. Liudvikas Pranevicius** (*Vytautas Magnus University, Kowno, Litwa*), **prof. Denis Premel** (*CEA Saclay, Gif-sur-Yvette, Francja*), **dr Jason Riley** (*The Eunice Kennedy Shriver National Institute of Child Health and Human Development, Bethesda, USA*), **prof. Ryszard Roskosz** (*Politechnika Gdańska, Gdańsk, Polska*), **mgr inż. Pawel Rutkowski** (*Przedstawicielstwo FLIR Systems AB, Warszawa-Piaseczno, Polska*), **prof. Przemysław Sanecki** (*Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, Polska*), **prof. Jan Sikora** (*Politechnika Lubelska, Lublin, Polska*), **prof. Stanislav Slosarcik** (*Technical University of Kosice, Koszyce, Słowacja*), **prof. Jan Sroka** (*Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska*), **prof. Bohdan Stadnyk** (*Lviv Polytechnic National University, Lwów, Ukraina*), **prof. Henryka Danuta Stryczewska** (*Politechnika Lubelska, Lublin, Polska*), **prof. Batyrbek Sulemenov** (*Kazakh National Technical University, Ałmaty, Kazachstan*), **prof. Valery Szmarow** (*National Aviation University, Kijów, Ukraina*), **mgr Jerzy Szyndler** (*Centrum Innowacji i Transferu Technologii LPNT, Lublin, Polska*), **prof. Mirosław Świercz** (*Politechnika Białostocka, Białystok, Polska*), **prof. Stanisław Tarasiewicz** (*Université Laval, Quebec, Kanada*), **dr Murielle Torregrossa** (*Université de Strasbourg, Strasburg, Francja*), **prof. Andrzej Wac-Włodarczyk** (*Politechnika Lubelska, Lublin, Polska*), **doc. dr inż. Zygmunt Warsza** (*Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP Warszawa*), **mgr Grzegorz Woźniak** (*Centrum Innowacji i Transferu Technologii LPNT, Lublin, Polska*), **prof. Sotoshi Yamada** (*Kanazawa University, Kanazawa, Japonia*), **prof. Xiaoyi Yang** (*Beihang University, Pekin, Chiny*), **prof. Mykola Yermoshenko** (*International Academy of Information Sciences, Kijów, Ukraina*), **dr Athanasios Zacharopoulos** (*University College London, Londyn, Wielka Brytania*), **prof. Ivan Zharski** (*Belarusian National Technical University, Mińsk, Białoruś*), **prof. Cao Zhihong** (*The Institute of Soil Science, Nanjing, Chiny*), **prof. Pawel Zhukowski** (*Politechnika Lubelska, Lublin, Polska*)



# AN APPLICATION OF IRIDM IN THE DECISION MAKING PROCESS ON FUEL CONVERSION OF THE MARIA REACTOR

Mieczysław Borysiewicz<sup>1</sup>, Karol Kowal<sup>1</sup>, Piotr A. Prusiński<sup>1</sup>, Marcin Dąbrowski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Centre for Nuclear Research (NCBJ), Nuclear Energy Department, Nuclear Energy Division, Poland

<sup>2</sup>National Atomic Energy Agency (NAEA), Department of Nuclear Safety, Division of Inspection of Nuclear Installations, Poland

**Abstract.** Poland, when acceded to GTRI (Global Threat Reduction Initiative) in 2004, has committed to convert the nuclear fuel of the Research Reactor MARIA, operated by the National Centre for Nuclear Research (NCBJ) in Świerk. The conversion means giving up of high enriched uranium fuel containing 36% of U-235, which was used so far, and replacing it with the low enriched uranium fuel (19.7% U-235). This article describes the potential usability of the Integrated Risk Informed Decision Making (IRIDM) methodology in optimization of the fuel conversion procedure.

**Keywords:** nuclear safety, Integrated Risk Informed Decision Making (IRIDM), Research Reactor MARIA, Global Threat Reduction Initiative (GTRI), nuclear fuel conversion

## ZASTOSOWANIE IRIDM W PROCESIE DECYZYJNYM DOTYCZĄCYM KONWERSJI PALIWA W REAKTORZE MARIA

**Streszczenie.** Polska, przystępując w 2004 roku do programu GTRI (Inicjatywa Redukcji Zagrożeń Globalnych), zobowiązała się do konwersji paliwa jądrowego w reaktorze badawczym MARIA, eksploatowanym przez Narodowe Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) w Świerku. Konwersja ta oznacza rezygnację z dotychczas użytkowanego paliwa, zawierającego 36% U-235 i zastąpienie go paliwem nisko wzbogaconym (19.7% U-235). Niniejszy artykuł opisuje potencjalne zastosowanie zintegrowanego procesu decyzyjnego (IRIDM) w optymalizacji procedury konwersji paliwa.

**Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo jądrowe, zintegrowany proces decyzyjny, Reaktor Badawczy MARIA, Inicjatywa Redukcji Zagrożeń Globalnych (GTRI), konwersja paliwa

### Introduction

The regulatory body responsible for nuclear issues in Poland is the National Atomic Energy Agency (NAEA). The mission of this organization is to make decisions on the nuclear facilities and activities within the country, including technology licensing, developing of the nuclear regulations and conducting technical inspections, in order to ensure public safety and environmental protection. In carrying out its responsibilities, NAEA cooperates with external organizations, i.e. the International Atomic Energy Agency (IAEA) and U.S. Nuclear Regulatory Commission (U.S. NRC), in the field of development and implementation of the nuclear safety and security standards.

In 2004 Poland has also officially acceded to Global Threat Reduction Initiative (GTRI) established by the U.S. National Nuclear Security Administration (NNSA). The main aim of this programme is to identify, secure, remove and/or facilitate the disposition of the high risk vulnerable nuclear and radiological materials around the world that pose a threat to the international community. Otherwise these materials could potentially be used by terrorists to make an improvised nuclear device, a radiological dispersal device or a dirty bomb. One of the main GTRI goals is to convert research reactors and isotope production facilities from the use of highly enriched uranium (HEU) to low enriched uranium (LEU), which cannot be used to make a nuclear weapon even if it falls into the wrong hands. So far under the GTRI project 82 research reactors around the world that used HEU have converted to LEU fuel or been verified as shut down. It means that more than 3450 kilograms of HEU and plutonium – enough for more than 135 nuclear weapons – have been removed [14].

Poland, when acceded to GTRI project, has also committed to convert the nuclear fuel of the Research Reactor MARIA, operated by the National Centre for Nuclear Research (NCBJ) in Świerk. The conversion means giving up of MR-6 – Russian HEU fuel containing 36% of U-235, which was used so far, and replacing it with CERCA LEU (19.7% U-235) fuel, manufactured in France. However, due to the significant differences in physical characteristics between the previously used and the new fuel elements, the conversion is a very complex process. Change of the uranium enrichment as well as modification of the fuel element design leads to changes of physical parameters of the reactor core. Therefore, when the decision on the fuel conversion has been made, one needs to answer question how to perform this process in an optimal manner. Basic criterion is to maintain the previous operating parameters of the reactor while meeting the safety requirements after the conversion.

However, economic costs as well as time and specialized resources have to be also taken into account in the decision making. In such cases, when non-routine decision has to be made, usage of the IRIDM (Integrated Risk Informed Decision Making) methodology is recommended by the IAEA [13]. This article describes the potential application of IRIDM in optimization of fuel conversion process of the MARIA reactor.

### 1. The Research Reactor MARIA

The Research Reactor MARIA is a multi-purpose, high flux, pool type reactor, moderated with water and beryllium with graphite reflector and pressurized channels consisting of 22 concentric six-tube assemblies of fuel elements. The active length of the fuel assemblies is 1000 mm. The reactor was designed with a high degree of application flexibility and it has been using the high enriched uranium fuel (UO<sub>2</sub>-Al alloy) with aluminium cladding since it began the operation. The fuel channels are situated in a matrix containing beryllium blocks and enclosed in a lateral reflector made of graphite blocks in aluminium cans. MARIA is equipped with vertical channels for irradiation of target materials, a rabbit system for short irradiations and 7 horizontal neutron beam channels. The nominal power of reactor is 30 MW<sub>t</sub>, while the thermal neutron flux density is 4.0·10<sup>14</sup> neutrons/cm<sup>2</sup>s.

The Research Reactor MARIA went critical for the first time in December 1974 and remained in operation until 1985 when it was shut down for modernization, that encompassed upgrading and refurbishment of the technological systems. In particular, efficiency of the ventilation and cooling system was improved. In 1993 the reactor has been put into operation again [6].

Currently the main area of its application is the radioisotopes production. It should be highlighted here that MARIA is one of the few reactors able to produce Mo-99 on a global scale. Providing a regular supply of molybdenum is essential for the diagnosis of cancer in medical centres all over the world [5]. This reactor is also suitable for testing of fuel and materials for the nuclear power engineering, neutron studies (radiography, activation analysis and transmutation doping) and for the scientific research in the field of condensed matter physics.

Moreover, implementation of a new experimental medical installation inside of the reactor is being considered, i.e. the Boron-Neutron Capture Therapy (BNCT) which is an experimental radiotherapy technique used to treat the most aggressive types of brain tumours that cannot be surgically removed from the human body. To date, clinical trials of that therapy have been initiated at only a handful of research reactors around the world [4, 11].

## 2. The fuel conversion procedure

The fuel conversion process, which leads to decrease of the enrichment from 36% to 19.7% of U-235, is posing a problem. Namely, in order to maintain approximately the same thermal power after the conversion, the volume of fuel itself has to be greater. For that reason the present fuel channel configuration – that bases on 6 concentric tubes (Fig. 1) – will be replaced with a new one, which consists of only 5 tubes but with different diameters and thicknesses. Moreover, some extra internals for stiffening of the structure will be also installed.

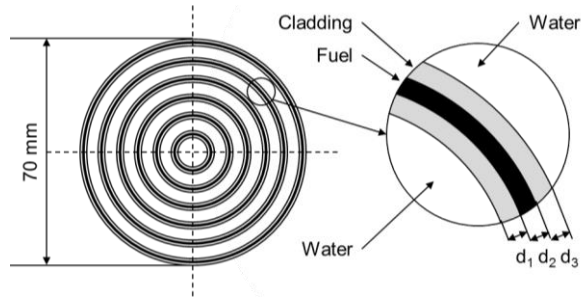


Fig. 1. Horizontal cross section of the high enriched uranium (HEU) fuel element

Since the new fuel elements have a different design it was necessary to qualify them for usage in the MARIA reactor by direct irradiation of two trial assemblies in the core, under normal operational conditions. It was preceded by calculation analyses and measurements. First of all the neutronic and core reactivity characteristics for a configuration with the trial LEU assemblies were compared to the core with HEU fuel. The calculations did not show significant differences between these two cases [8].

The thermal hydraulic analysis shows that the cladding temperature for both types of fuel elements are almost the same, e.g. maximum cladding temperature on the internal surface of the tube is 425 K and 426 K for LEU and HEU, respectively. However, the maximum heat flux on the external wall of the fuel tube is 2,61 MW/m<sup>2</sup> and 2,04 MW/m<sup>2</sup> for the LEU and HEU fuel, respectively. Moreover, the data acquired from the performed measurements point out that the coefficient of hydraulic resistance for LEU fuel elements exceeds by around 30% the resistance coefficient for the Russian HEU fuel [3].

The required coolant flow rate through the new LEU fuel channel is at least 30 m<sup>3</sup>/h while in the HEU fuel it is equal to 25 m<sup>3</sup>/h. This difference implies the necessity of increasing the mass flow in the new channels up to 120% of previous nominal flow. Since the existing infrastructure is not sufficient to increase the mass flow, this process requires replacement of the primary cooling channel pumps. It complicates the whole procedure and makes the full conversion impossible without expensive investments. However, the experiment which has been carried out, shows a possibility of initiating the partial conversion process even before modernization of the pump system [7]. Thus the whole procedure would proceed in a gradual way and the most burned-up HEU fuel would be unloaded first.

Such a solution seems to be optimal from the utility point of view, but the final decision and ultimate responsibility in such a case lies always in the competence of the NAEA. The NAEA, while making decisions on nuclear installations, firstly shall be guided by the public safety. Thus the transparency and auditability of the decisions is highly expected by people. In order to meet this challenge it is recommended to implement IRIDM methodology within the regulatory organization.

## 3. Framework of the IRIDM process

According to the basic framework of IRIDM, proposed by the IAEA, the clear definition of issue to be resolved is crucial in identifying which elements or information are relevant in decision making. Thus, this is the first step of the IRIDM process (Fig. 2).

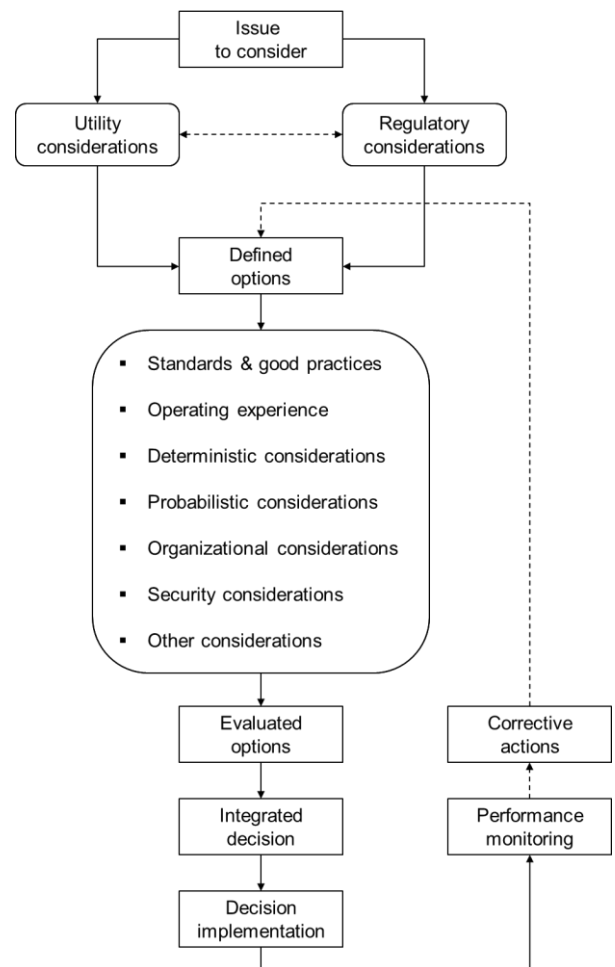


Fig. 2. Organizational framework and key elements of the IRIDM process [cf. 9, 13]

After defining the problem, consideration must be given to the requirements of both regulatory body and utility in order to draft a preliminary set of options that potentially could solve the issue. However, to make the final decision and choose one from the preliminary set of options, specified elements (i.e. the standards and good practices, operating experience, deterministic and probabilistic considerations, organizational and security systems, research and economic insights) should be accounted for. All these elements have been described in detail in a separate article of the authors [2].

Relative importance of each element depends upon the decision to be made and should be weighted either qualitatively or quantitatively. This process leads to evaluation and to reduction of the preliminary set of options. Finally, one of them should be chosen, implemented and monitored. If the performance of just implemented decision is not satisfactory corrective actions should be undertaken and the list of options needs to be redefined.

## 4. Potential application of IRIDM

Until now, the activities of the NAEA were based mainly on the deterministic approach and engineering judgment. The IRIDM methodology is not yet a mandatory formula for the decision making process, but its implementation is considered to be a valuable asset due to its well organized structure, consistency and an approach easy to follow step by step.

The very first case study made with use of the IRIDM methods was to determine the best way of the MARIA reactor core conversion process. According to the IRIDM methodology, at the point when the issue to be resolved is known, one needs to define some options overcoming the problem. This means that either the regulatory body or the utility has to consider and outline the possible solutions.



In this case, NAEA preferences were as follows. First of all, the new fuel means either the change in reactor core configuration (i.e. structure of the fuel channels) or in cooling circuit (i.e. higher efficiency of the feed-water pumps). This can be qualified as a major change and thus it requires additional analyses that will provide the safety margins. The results together with technical data should be then submitted to the President of NAEA in a form of annex to the Safety Analysis Report of the reactor. Additionally, the document should contain an impact study of the LEU fuel introduction on reactor operation (i.e. insufficient coolant flow, neutronic balance aspects etc.) during the conversion period. One should remember that the gradual way of core conversion means handling two types of fuel at the same time. It requires more complex safety analyses but on the other hand it gives a chance to avoid radical change of the core matrix that could lead either to technical or economical maintenance difficulties.

Beyond safety aspects, from the utility point of view, it is highly important to maintain production of the isotopes. For certain types of them it is necessary to maintain proper neutron flux in the core, which requires operation with high power of reactor. Finally, in order to deal with the issue, NAEA has defined three options to be considered (Tab. 1). The only difference between them is the time when the conversion may begin. Each option assumes the need for making the safety analysis for reactor operating either with new LEU fuel or with new pumps, but for option 1 and 2 it is necessary to make additional analyses in case of old pumps, i.e. under condition of insufficient amount of coolant provided to the new LEU fuel channels.

Table 1. Preliminary set of options prepared by the National Atomic Energy Agency

Option number ( <i>i</i> )	Option description
1	Permission may be granted for partial core conversion before change of the pumps (with higher flow rate) without any additional criteria
2	Permission may be granted for partial core conversion before change of the pumps (with higher flow rate) but with additional criteria
3	Rejection of partial core conversion before change of the pumps

The above considerations should now be thoroughly checked, by the dedicated multidisciplinary IRIDM team. The team members were recruited from two divisions of the Nuclear Safety Department (at NAEA), each of them with a suitable knowledge of the facility. It should be stressed out that designated NAEA experts have an experience with the core conversion. The first successful core conversion of the MARIA reactor was conducted in 2002. At that time the enrichment of the HEU fuel was decreased from 80% to 36% of U-235. This process revealed also some aspects, which were not accounted for, but should be put on higher attention later on. Due to limited computational capabilities of NAEA certain analyses were also performed by the NCBJ experts [1, 10].

Information from two official IAEA documents (INSAG-25 and TECDOC-1436), describing the principles of risk informed regulations of nuclear facilities as well as the basic framework for IRIDM, were used as a basis for this study [12, 13].

Finally, all these experiences and information were used in further stage of IRIDM, by means of preparation of inputs for decision making process and assignation the input weights. The inputs were set into the following categories: deterministic aspects, probabilistic aspects, mandatory requirements, cost and benefits, organizational influence and doses for workers. Then the importance weights have been assigned to each input category (Tab. 2). The weights were ranging from 0 – negligible impact to 10 – the highest impact on decision.

The highest weight (10) was given to deterministic aspects. This choice comes from the fact that during the operation of reactor, it is necessary to maintain safety limits and requirements of defence in depth methodology.

Since the LEU fuel will be used here simultaneously with HEU fuel and their relative proportion will change in time during whole conversion period, there is a need for analysis of facility behaviour under such condition. This analysis should cover all possible accident scenarios.

Probabilistic aspects should stay in conjunction with the deterministic results. Besides, since this transient period implies a rise of the core damage frequency, the probabilistic aspects should be assigned at least medium weight (8).

Another thing is the mandatory requirements, i.e. all of the conversion-related analyses and in turn all changes performed in the core structure should strictly follow national and international law and regulations. Due to the fact that they can limit some of the actions, their impact should be considered in general at a medium level. However, taking into account that the reactor facility is operated by experienced staff, which follows high standards, it is unlikely to exceed safety limits. For that reason, the low rank (3) was set to mandatory requirements in this study.

Other issues like economic cost and benefits are still quite relevant, because operation of the reactor is highly related to production of radioisotopes for the international market. Thus the medium impact (5) to this IRIDM study was applied.

Reactor core conversion requires also special organizational effort, changes in safety management and competences, leadership or communication pathways between co-workers. This, in turn, means medium impact (5) on final decision.

Since it is highly unlikely to exceed accounted safety limits, radiation doses for workers are of negligible level. That is why their effects are omitted in this study.

Table 2. Weights of the input categories taken into account in the IRIDM process

Category No. ( <i>j</i> )	Inputs description	Weight ( $w_j$ )
1	Deterministic aspects – safety margins	10
2	Probabilistic aspects – risk changes	8
3	Other – economic costs and benefits	5
4	Other – organizational impact	5
5	Mandatory requirements	3

Next step is to determine an impact of implementation of the various IRIDM options on each particular input. Usually, at the beginning of this process qualitative impact assessment is performed. It means that each option *i* needs to be analyzed in the context whether it has an overall positive or negative impact on each particular input *j*. After that the score can be assigned for each option in the range of values from -10 (the highest negative impact) through 0 (no impact) up to 10 (the highest positive impact). It allows evaluating of option *i* by the total weighted score ( $S_i$ ) described by the following equation:

$$S_i = \sum_j w_j \cdot s_{ij} \quad (1)$$

where  $w_j$  is the weighting factor of the input *j* and  $s_{ij}$  is the impact of option *i* on the input *j* [2]. Consequently, the preliminary set of options has been ranked by the  $S_i$  factor (Tab. 3).

Table 3. Ranking of the preliminary set of options

Inputs	Option 1		Option 2		Option 3	
	Score ( $s_{1j}$ )	Weighted score	Score ( $s_{2j}$ )	Weighted score	Score ( $s_{3j}$ )	Weighted score
Deterministic	-6	-60	-2	-20	0	0
Probabilistic	-3	-24	-1	-8	0	0
Economic	0	0	-2	-10	-10	-50
Organizational	0	0	-2	-10	-10	-50
Requirements	0	0	-3	-9	0	0
Total ( $S_i$ )	---	-84	---	-57	---	-100

Option 1 (full conversion without changes in cooling system) is the best solution from the economic point of view. The radioisotopes can be produced continuously and no additional changes in the organizational system are needed. However, this option has an overall negative impact on both DSA and PSA results, -6 and -3 respectively. This is because the primary cooling channel pumps are not efficient enough to provide appropriate mass flow after conversion. Consequently, the safety margins cannot be maintained, which also increases the probability of an undesired event. Therefore, this option was rejected due to the highest negative impact on the safety aspects.

Option 3 is the best solution in terms of safety. Replacement of the pumps ensures the same operational parameters like these before the core conversion. Thus the results of DSA and PSA would not be changed in this case. However, this option assumes a long-term shutdown of the reactor for the time of pump replacement. This generates, however, significant economic losses associated with interruption of the isotopes production during shutdown. Additionally, it needs some changes in the organizational system at the time of that process. These are the main reasons why option 3 was rejected as well.

Finally, option 2 has been chosen even though there is a slightly negative impact on both safety and economic aspects. Moreover, the additional requirements meaning criteria on power limits have been proposed by the NAEA, which implies necessity of some organizational changes. Due to the power limits a slightly lower production of isotopes is expected. However, the economic losses are not as high as in option 3. Thus the option 2 is much safer than the first one and still very economically attractive. This is also the most balanced solution in the terms of risk distribution between different IRIDM inputs.

## 5. Conclusions

In this study each IRIDM option has an overall negative impact on the IRIDM inputs. Thus the lowest one, corresponding to the second option, was chosen. However, one has to remember that the decision on core conversion has been made in order to increase the security level, which balances the negative impact on the considered inputs. Thus, the selected option is the most satisfactory one. It assumes that the permission may be granted for partial core conversion before change of the pumps, but with some additional criteria, i.e. to set lower limits on power generated in fuel elements, where it cannot be provided nominal flow. That conclusion stays in compliance with results of the traditional decision making process, meaning the deterministic approach with engineering judgment. It may be also useful for further NAEA considerations, despite that the application of IRIDM is not yet obligatory in Poland.

## Acknowledgements

The presented work was supported by the EU and MSHE grant nr POIG.02.03.00-00-013/09.

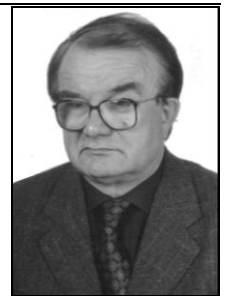
## References

- [1] Borek-Kruszewska E., Mielewszczenko W.: New LEU Fuel in the MARIA Research Reactor. NCBJ Annual Report 2011, pp. 261.
- [2] Borysiewicz M., Kowal K., Prusiński P.A., Dąbrowski M.: An Integrated Risk Informed Decision Making in the Nuclear Industry. Informatics Control Measurement In Economy and Environment Protection 02/2013, in press.
- [3] Dorosz M., Nowakowski P.: Hydraulically measurement to compare fuel elements types MC5 and MR6. IAE Internal Report, Otwock-Świerk 2009.
- [4] Golnik N., Pytel K.: Irradiation Facilities for BNCT at Research. Reactor MARIA in Poland. Polish Journal of Medical Physics and Engineering 12/2006, pp. 143-153.
- [5] Krzysztozek G., Gołąb A., Jaroszewicz J.: Operation of the Maria Research Reactor, IEA Annual Report 2010, pp. 13-16.
- [6] Krzysztozek G., Jaroszewicz J., Pytel K.: Irradiations of HEU targets in MARIA RR for Mo-99 production. Proceedings of the 1st International Nuclear Energy Congress, Warszawa 2011.

- [7] Krzysztozek G., Marcinkowska Z., Pytel K., Hanan N.: Qualification Process of LEU Fuel – CERCA Type and Conversion Planning for MARIA Research Reactor. Proceedings of the International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Santiago 2011, pp. 1-8.
- [8] Krzysztozek G., Pytel K.: Irradiation of the LEU fuel in MARIA research reactor. Proceedings of the International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Beijing 2009.
- [9] Lyubarskiy A., Kuzmina I., El-Shanawany M.: Advances in Risk Informed Decision Making – IAEA's Approach. Proceedings of the Nordic PSA Conference, Gottröra 2011, pp. 1-14.
- [10] Marcinkowska Z., Pytel K., Moldysz A.: Neutronic Calculations for MARIA Core Conversion. NCBJ Annual Report 2011, pp. 250.
- [11] Prusiński P.A., Potemski S., Borysiewicz M., Kowal K., Kwiatkowski T., Prusiński A.M.: CFD analysis of the safety related thermal hydraulic parameters describing a flow domain of an experimental medical installation (BNCT converter) inside of the Research Reactor MARIA. Journal of Power Technologies 4/2012, pp. 227-240.
- [12] International Atomic Energy Agency: Risk informed regulation of nuclear facilities: Overview of the current status. IAEA, Vienna 2005.
- [13] International Atomic Energy Agency: A Framework for an Integrated Risk Informed Decision Making Process. IAEA, Vienna 2011.
- [14] <http://nnsa.energy.gov/>

**Ph.D. Mieczysław Józef Borysiewicz**  
e-mail: manhaz@cyf.gov.pl

Deputy Head - Nuclear Energy Division at the NCBJ in Swierk. Till 2012 Director of the EU Centre of Excellence for Management of Health and Environmental Hazards (MANHAZ). Visiting professor of Università di Bologna, Italy (1977, 1978, 1980, 1983) and researcher of Université Libre de Bruxelles (1972-1973). Numerous publications and monographs on major accident risk assessment and management of nuclear and chemical installations and computer aided decision support systems for NCBR emergencies.



**M.Sc., Eng. Karol Kowal**  
e-mail: karol.kowal@ncbj.gov.pl

Graduated from the AGH Univ. of Science and Tech. in Cracow in the field of Nuclear Physics. Completed postgraduate studies of Computer Science at the Rzeszow Univ. of Tech. as well as High Performance, Parallel and Distributed Computing courses at Maria Curie-Skłodowska Univ. in Lublin. Ph.D. student at the Lublin Univ. of Tech. in the field of Electrical Engineering. Participant of the IAEA workshops on the PSA and IRIDM held in Vienna (Austria), Sofia (Bulgaria), Petten (Netherlands) and Trieste (Italy).



**M.Sc., Eng. Piotr Andrzej Prusiński**  
e-mail: piotr.prusinski@ncbj.gov.pl

Graduated from Warsaw University of Technology (Poland) in the field of Nuclear Power Engineering. 1 year scholarship at Royal Institute of Technology (Sweden) funded by the Polska Grupa Energetyczna S.A. 6 weeks scholarship at CEA Grenoble (France) funded by the French Government. Currently employed as Senior Specialist at National Centre for Nuclear Research (Poland). Particular interest in combining deterministic (DSA) and probabilistic (PSA) approaches to reactor safety studies.



**M.Sc., Eng. Marcin Dąbrowski**  
e-mail: marcin.dabrowski@paa.gov.pl

Graduated from Warsaw University of Technology (Poland) at the Faculty of Power and Aeronautical Engineering in the Nuclear Power Engineering field. 1 year scholarship at Royal Institute of Technology (Sweden) awarded by Polska Grupa Energetyczna S.A. Since 2010, Specialist and Nuclear Safety Inspector at National Atomic Energy Agency (Poland) in Nuclear Safety Department. Participant of the Regional Workshop on Advances and Issues in IRIDM, organized by IAEA in Sofia (Bulgaria).



otrzymano/received: 15.04.2013

przyjęto do druku/accepted: 22.04.2013



# CALCULATION OF THE IMPROPER INTEGRALS FOR FOURIER BOUNDARY ELEMENT METHOD

Edyta Łukasik<sup>1</sup>, Beata Pańczyk<sup>1</sup>, Jan Sikora<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lublin University of Technology, Electrical Engineering and Computer Science Faculty, Institute of Computer Science

<sup>2</sup>Lublin University of Technology, Electrical Engineering and Computer Science Faculty, Institute of Electronics and Information Technology

**Abstract.** The traditional Boundary Element Method (BEM) is a collection of numerical techniques for solving some partial differential equations. The classical BEM produces a fully populated coefficients matrix. With Galerkin Boundary Element Method (GBEM) is possible to produce a symmetric coefficients matrix. The Fourier BEM is a more general numerical approach. To calculate the final matrix coefficients it is necessary to find the improper integrals. The article presents the method for calculation of such integrals.

**Keywords:** Fourier Boundary Element Method, numerical integration, improper integrals

## WYZNACZANIE CAŁEK NIEWŁAŚCIWYCH W METODZIE ELEMENTÓW BRZEGOWYCH FOURIERA

**Streszczenie.** Tradycyjna metoda elementów brzegowych (MEB) prowadzi w efekcie do rozwiązania układu równań liniowych z pełną macierzą współczynników. Stosując podejście Galerkin'a ostateczny układ równań liniowych jest reprezentowany macierzą symetryczną. W podejściu Fouriera, współczynniki układu równań wyznaczone są w przestrzeni Fouriera co pozwala uniknąć problemów z całkowaniem całek nieosobliwych, ale powoduje konieczność obliczania całek niewłaściwych. W artykule zaprezentowano algorytm obliczania takich całek.

**Słowa kluczowe:** metoda elementów brzegowych Fouriera, całkowanie numeryczne, całki niewłaściwe

### Introduction

Basic integral equation for the Boundary Element Method (BEM) is constructed by the convolution with the fundamental solution [2,3,6]. Figure 1 presents domain  $\Omega \subset R^n$  with Dirichlet and Neumann boundary.

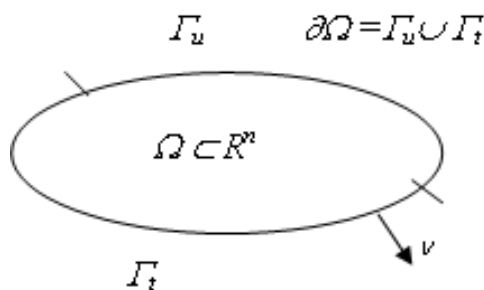


Fig. 1. The domain  $\Omega$

The basic principles of the traditional BEM are presented for the paradigmatic example of the  $n$ -dimensional stationary heat conduction described by [2]:

$$\Delta u(x) = -f(x), x \in \Omega \subset R^n, \Delta = \sum_{k=1}^n \partial^2 / \partial x_k^2$$

$$u(x) = u_\Gamma(x), x \in \Gamma_u \subset \Omega, \quad (1)$$

$$t(x) = t_\Gamma(x), x \in \Gamma_t \subset \Omega.$$

where:  $\Delta$  - Laplace operator,  $u$  - the unknown quantity,  $f$  - the known volume sources in  $\Omega$

The flux on the boundary is:

$$t = A_t u = -\partial_\nu u = -\nu \cdot \nabla u, \quad (2)$$

where:

$\nabla, \nu$  - the gradient and the outer unit normal,

$A_t = -\nu \cdot \nabla$  - the boundary operator,

$\partial / \partial x_k$  - the partial derivatives denotes  $\partial_k$ ,

$x$  -  $n$ -dimensional vector,

$dx$  - the short form for  $dx_1 dx_2$  (or  $dx_1 dx_2 dx_3$ ).

To obtain a well posed problem, half of the boundary data (either  $u$  on  $\Gamma_u$  or  $t$  on  $\Gamma_t$ ) should be defined by boundary conditions, i.e.  $\Gamma_u \cup \Gamma_t = \partial\Omega$ .

### 1. The distribution theory

Distributions are objects which generalize functions [2, 8]. They extend the concept of derivative to all locally integral

functions and are used to formulate generalized solutions of partial differential equations. They are important in physics and engineering where many non-continuous problems naturally lead to differential equations whose solutions or initial conditions are distributions, such as the Dirac delta distribution.

The basic idea is to identify functions with abstract linear functionals on a space of well-behaved *test functions*.

For example, let:  $u: R \rightarrow R$ , be a locally integrable, and  $\phi: R \rightarrow R$ , be a smooth (infinitely differentiable) function with compact support (i.e., identically zero outside of some bounded set). The function  $\phi$  is the *test function* and:

$$u(\phi) = \langle u, \phi \rangle = \int_R u \phi dx < \infty. \quad (3)$$

This is a real number which depends on  $\phi$ . The function  $u$  is then a continuous linear functional on the space which consists of all the test functions  $\phi$ . The set of generalized functions  $u$  include all linear and continuous functionals. They are defined by some test functions  $\phi$ . Properties of the test functions define the set of *generalized functions*.

The test functions:  $\phi(x) \in D(\Omega) = C_0^\infty(\Omega)$ , are bounded, possess a compact support and are infinitely continuously differentiable. They and all their derivatives vanish at the boundary.

Distribution  $u \in D'(\Omega)$  is defined by the scalar product with the test function  $\phi$ :

$$u(\phi) = \langle u, \phi \rangle = \int_{R^n} u(x) \overline{\phi(x)} dx < \infty. \quad (4)$$

The differentiation of generalized functions is defined as:

$$\langle \partial_k u, \phi \rangle = -\langle u, \partial_k \phi \rangle, \phi \in C_0^\infty. \quad (5)$$

Because of the definition of the test function  $\phi$ , distributions are infinitely differentiable. Jumps and singularities can be differentiated [2].

By using a larger space of test functions, it is possible to define the *tempered distributions*, useful for the Fourier transformation in generality. All tempered distributions have a Fourier transformation, but not all distributions have one [2].

The invariance of the scalar product concerning the Fourier transformation is called Parseval's identity:

$$\langle u_1, u_2 \rangle = \frac{1}{(2\pi)^n} \langle \hat{u}_1, \hat{u}_2 \rangle. \quad (6)$$

It is possible to define the Fourier transformation of tempered distributions. These include all the integrable functions, as well as well-behaved functions of polynomial growth and distributions of compact support, and have the added advantage that the Fourier transformation of any tempered distribution is again a tempered distribution.

### The special distributions

The  $n$ -dimensional **Dirac distribution**:

$$\delta(x) = \prod_{k=1}^n \delta(x_k) \quad (7)$$

is defined by:

$$\begin{aligned} \int_{R^n} \delta(x) dx &= 1, x \in R^n; \\ \delta(x) &= 0 \text{ for all } |x| \neq 0. \end{aligned} \quad (8)$$

The Dirac distribution is the identity object concerning convolution:

$$u = u * \delta = \int_{R^n} u(y) \delta(x-y) dy, x, y \in R^n, \quad (9)$$

and its Fourier transformation is:

$$\delta(x) \xrightarrow{F} 1, x \in R^n. \quad (10)$$

The **Heaviside distribution** is obtained by the integration of the Dirac distribution:

$$H(x) = \int_{-\infty}^x \delta(y) dy = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}. \quad (11)$$

In the literature, there are several definitions for the value at  $x=0$ . For the linear distribution it is determined by:

$$\langle H(x), \delta(x) \rangle = \kappa = \frac{1}{2}, x \in R^1. \quad (12)$$

For the multidimensional Heaviside distribution, the cutoff distribution for a domain  $\Omega \in R^n$  is defined:

$$\chi(x) := \begin{cases} 1 & x \in \Omega \\ \kappa(x) & x \in \partial\Omega \\ 0 & x \notin \bar{\Omega} = \Omega \cup \partial\Omega \end{cases}, \quad (13)$$

which can be expressed by:

$$\chi(x) = H(\psi(x)), \quad (14)$$

with a function  $\psi \in C^\infty(R^n)$ .

The integration of a distribution  $u$  over the domain  $\Omega$  can be described by:

$$\langle H(\psi), u \rangle = \int_{\psi \geq 0} u(x) dx. \quad (15)$$

The main advantage of the theory of distribution is that it re-establishes differentiation as the simple procedure and all quantities are differentiable even if they exhibit singularities and jumps [2].

## 2. Fourier BEM

To obtain the Fourier transformation of the Boundary Integral Equations (BIE), all quantities have to be extended from  $\Omega$  to  $R_n$ . It can be done by defining a **cutoff distribution**  $\chi$  [2]. All quantities are multiplied by  $\chi$  and finally transformed into Fourier space. Mathematically this extension and transformation is justified only in the frame of the theory of distributions [2, 8].

The main advantage of the distributional BIE is that the integrals extend formally over the entire  $R_n$  and therefore the Fourier transformation can be applied to these integral equation.

For the definition of the trial functions it is needed to define a cutoff distribution [2] for a rectangular element:

$$\chi^0(x) := H(x_1)H(1-x_1)\delta(x_2), x \in R^2, \quad (16)$$

$$\chi^0(x) := H(x_1)H(1-x_1)H(x_2)H(1-x_2)\delta(x_3), x \in R^3. \quad (17)$$

The trial functions are obtained by multiplying  $\chi^0(x)$  and  $p^0(x) \in C^\infty(R^n)$ :

$$\phi^0(x) := \chi^0(x)p^0(x). \quad (18)$$

The trial functions  $\phi_{u,i}^j(x)$  on arbitrary straight elements are obtained by translation and/or dilation operators:

$$T^i : \phi^0 \rightarrow \phi_{u,i}^j = \phi^0(x-b^i), \quad (19)$$

$$D^i : \phi^0 \rightarrow \phi_{u,i}^j = \phi^0(a^i x),$$

with the translation vector  $b_i$  and the dilation matrix  $a_i$ .

Finally the unknown and the known quantities on the boundaries are approximated by:

$$\delta(x)u(x) \approx \sum_i^{N_u} u^i \phi_u^i(x), \quad \delta(\psi) \nabla \psi(x) \cdot \nabla u(x) \approx \sum_i^{N_t} t^i \phi_t^i(x). \quad (20)$$

The  $n$ -dimension Fourier transformation:

$$F(u) = \hat{u}, u \in L_1(R^n), i = \sqrt{-1} \quad (21)$$

is defined as:

$$\hat{u}(\hat{x}) = \int_{R^n} u(x) e^{-i \langle x, \hat{x} \rangle} dx, \langle x, \hat{x} \rangle = \sum_{k=1}^n x_k \hat{x}_k. \quad (22)$$

The basics of Fourier BEM are two known theorems of the Fourier transformation.

**The theorem of Parseval** states the invariance of energy or work with respect to the dimensional Fourier transformation:

$$\int_{R^n} \phi(x)u(x) dx = \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{R^n} \hat{\phi}(-\hat{x})\hat{u}(\hat{x}) d\hat{x}, x, \hat{x} \in R^n \quad (23)$$

**The convolution theorem** links the convolution in the original space to a simple multiplication in the transformed space:

$$\int_{R^n} \phi(y)u(x-y) dy \xrightarrow{F} \hat{\phi}(\hat{x})\hat{u}(\hat{x}) \quad (24)$$

In the notation:

$$\langle a, b \rangle = \int_{R^n} a(x)b(x) dx, \quad (25)$$

$$a * b = \int_{R^n} a(y)b(x-y) dy, \quad (26)$$

these two theorems may be described as:

$$\langle \phi(x), u(x) \rangle = \frac{1}{(2\pi)^n} \langle \hat{\phi}(-\hat{x}), \hat{u}(\hat{x}) \rangle, \quad (27)$$

$$\phi(x) * u(x) \xrightarrow{F} \hat{\phi}(\hat{x})\hat{u}(\hat{x}). \quad (28)$$

The Fourier BEM method analysed by [2] is especially of interest for cases where the fundamental solution is not known.

The transformation of the cutoff distribution  $\chi_0$  is:

- for reference element in  $R^2$ :

$$\begin{aligned} \chi^0(x) &= H(x_1)H(1-x_1)\delta(x_2) \\ \xrightarrow{F} \hat{\chi}^0(\hat{x}) &= \frac{i}{\hat{x}_1} (e^{-i\hat{x}_1} - 1) \end{aligned} \quad (29)$$

- for reference element in  $R^3$ :

$$\begin{aligned} \chi^0(x) &= H(x_1)H(1-x_1)H(x_2)H(1-x_2)\delta(x_3) \\ \xrightarrow{F} \hat{\chi}^0(\hat{x}) &= \frac{i}{\hat{x}_1} (e^{-i\hat{x}_1} - 1) \frac{i}{\hat{x}_2} (e^{-i\hat{x}_2} - 1) \end{aligned} \quad (30)$$

For straight elements and for arbitrary polynomial trial functions  $p_0(x)$ , the transformed expressions are analytically known in  $R_2$  and  $R_3$  [2].

The discretized Fourier BIE lead to an algebraic system identical to that obtained in the original space (Galerkin BEM [7]), where the matrices are computed in the transformed space and:

$$\begin{aligned} F_u^j &= \frac{1}{(2\pi)^n} \langle \hat{\phi}_t^j(-\hat{x}), \hat{f}(\hat{x})\hat{U}(\hat{x}) \rangle, \\ H_u^{ji} &= \frac{1}{(2\pi)^n} \langle \hat{\phi}_t^j(-\hat{x}), \hat{\phi}_t^i(\hat{x})\hat{U}(\hat{x}) \rangle, \\ G_u^{ji} &= \frac{1}{(2\pi)^n} \langle \hat{\phi}_t^j(-\hat{x}), \hat{\phi}_u^i(\hat{x})\hat{A}_t^i\hat{U}(\hat{x}) \rangle, \\ K_u^{ji} &:= \frac{1}{(2\pi)^n} \langle \hat{\phi}_t^j(-\hat{x}), \hat{p}_u^i(\hat{x}) \rangle. \end{aligned} \quad (31)$$



### 3. Numerical example

The problem of the numerical integration for Fourier BEM formulation is presented for the boundary integral equations limited to constant elements and 2D space. As the test example, the Dirichlet problem of the Poisson equation is considered [2].

The Dirichlet problem for Poisson equation:

$$\Delta u(x) = -f(x), x \in \Omega, \tag{32}$$

$$u(x) = u_\Gamma = 0, x \in \Gamma, \tag{33}$$

is solved in a quadratic two-dimensional domain  $\Omega = [0,1] \times [0,1]$  at the boundaries  $u=0$ . The interior is subjected to stationary heat source  $f$ . The boundary  $\partial\Omega$  is divided into 8 elements (Fig. 2).

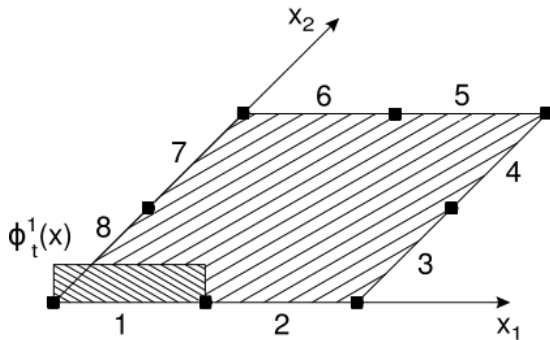


Fig. 2. Quadratic domain  $\Omega$  with 8 boundary elements and constant trial function

The fundamental solution and its transformation for the Laplacian  $\Delta$  are [2]:

$$U = \frac{1}{2\pi} \ln \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \xleftrightarrow{F} \hat{U} = -\frac{1}{\hat{x}_1^2 + \hat{x}_2^2} \tag{34}$$

Taking into account the fact that  $u=0$  at the boundaries, the general system of BIE can be reduced to:

$$0 = \langle \phi_t^j, f_x * U \rangle + \sum_i t^i \langle \phi_t^j, \phi_t^i * U \rangle \tag{35}$$

$$\xleftrightarrow{F} 0 = \langle \hat{\phi}_t^j(-\hat{x}), \hat{f}_x \hat{U} \rangle + \sum_i t^i \langle \hat{\phi}_t^j(-\hat{x}), \hat{\phi}_t^i \hat{U} \rangle$$

For the  $R^2$  elements the cutoff distribution definition is described by eq.13 .

$$\chi^0 = H(x_1)H(1-x_1)\delta(x_2), \quad x \in R^2, \tag{36}$$

and its Fourier transformation is described by:

$$\chi^0(x) = H(x_1)H(1-x_1)\delta(x_2) \xleftrightarrow{F} \hat{\chi}^0(\hat{x}) = \frac{i}{\hat{x}_1} (e^{-i\hat{x}_1} - 1) \tag{37}$$

In our example, for constant elements, the trial function and its Fourier transformation is:

$$\phi^0 = \chi^0 \xleftrightarrow{F} \hat{\phi}^0 = \hat{\chi}^0. \tag{38}$$

Additionally, the Fourier transformation for dilation and translation operators is described as (eq. 19):

$$\begin{aligned} \phi^0(x-b) &\xleftrightarrow{F} \hat{\phi}^0(\hat{x})e^{-ib\hat{x}}, \\ \phi^0(ax) &\xleftrightarrow{F} \frac{1}{a} \hat{\phi}^0(a\hat{x}). \end{aligned} \tag{39}$$

The trial functions should be defined for 16 constant elements. For every element, the coefficients for Heaviside and Dirac distribution should be modified to receive the value of the product  $H(x_1)H(1-x_1)\delta(x_2)$  equal to one inside the element and equal to zero outside. From the definition, the Dirac distribution is equal to one only for  $x=0$ , and Heaviside distribution is equal to one for  $x>0$ . For 8 elements we have the constant trial functions for the flux  $t$  [2]:

$$\begin{aligned} \phi_t^1 &= H(x_1)H(1-2x_1)\delta(x_2) \xleftrightarrow{F} \\ \hat{\phi}_t^1 &= \frac{i}{\hat{x}_1/2} (e^{-i\hat{x}_1/2} - 1) \frac{1}{2} = i \frac{(e^{-i\hat{x}_1/2} - 1)}{\hat{x}_1}, \end{aligned} \tag{40}$$

$$\begin{aligned} \phi_t^2 &= H(2x_1-1)H(1-x_1)\delta(x_2) \xleftrightarrow{F} \\ \hat{\phi}_t^2 &= \frac{1}{2} \frac{i}{\hat{x}_1/2} e^{-i\hat{x}_1/2} (e^{-i\hat{x}_1/2} - 1) = i \frac{(e^{-i\hat{x}_1} - e^{-i\hat{x}_1/2})}{\hat{x}_1}. \\ \phi_t^3 &= H(x_2)H(1-2x_2)\delta(x_1-1) \xleftrightarrow{F} \\ \hat{\phi}_t^3 &= \frac{i}{\hat{x}_2/2} (e^{-i\hat{x}_2/2} - 1) \frac{1}{2} e^{-i\hat{x}_1} = i \frac{(e^{-i\hat{x}_2/2} - 1)e^{-i\hat{x}_1}}{\hat{x}_2} \\ \phi_t^4 &= H(2x_2-1)H(1-x_2)\delta(x_1-1) \xleftrightarrow{F} \\ \hat{\phi}_t^4 &= \frac{1}{2} \frac{i}{\hat{x}_2/2} e^{-i\hat{x}_2/2} (e^{-i\hat{x}_2/2} - 1) e^{-i\hat{x}_1} = \\ &= i \frac{(e^{-i\hat{x}_2} - e^{-i\hat{x}_2/2})e^{-i\hat{x}_1}}{\hat{x}_2} \end{aligned}$$

and similar for other  $\phi_t^j, j = 5 \dots 8$ .

The equation system in Fourier space is:

$$\sum_i H_u^{ji} t^i = -F_u^j, \tag{41}$$

where:

$$H_u^{ji} = \frac{1}{(2\pi)^n} \langle \hat{\phi}_t^j(-\hat{x}), \hat{\phi}_t^i(\hat{x}) \hat{U}(\hat{x}) \rangle,$$

$$F_u^j = \frac{1}{(2\pi)^n} \langle \hat{\phi}_t^j(-\hat{x}), \hat{f}(\hat{x}) \hat{U}(\hat{x}) \rangle$$

In our case:

$$\sum_i t^i \langle \hat{\phi}_t^j(-\hat{x}), \hat{\phi}_t^i \hat{U} \rangle = -\langle \hat{\phi}_t^j(-\hat{x}), \hat{f}_x \hat{U} \rangle, \tag{42}$$

for  $j = 1, \dots, 8$

and for example (for  $f_0=1$ ):

$$\begin{aligned} H^{12} &= \frac{1}{(2\pi)^2} \langle \hat{\phi}_t^1(-\hat{x}), \hat{\phi}_t^2(\hat{x}) \hat{U}(\hat{x}) \rangle \\ &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{R^2} \frac{[i(e^{-i\hat{x}_1/2} - 1)] \cdot [i(e^{-i\hat{x}_1} - e^{-i\hat{x}_1/2})]}{-\hat{x}_1 \hat{x}_1 (-\hat{x}_1^2 - \hat{x}_2^2)} dx_1 dx_2, \end{aligned} \tag{43}$$

$$\begin{aligned} F^1 &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{R^2} \hat{\phi}_t^1(-\hat{x}) \hat{U}(\hat{x}) d\hat{x} \\ &= \frac{-1}{(2\pi)^2} \int_{R^2} \frac{(e^{-i\hat{x}_1/2} - 1)}{-\hat{x}_1 (-\hat{x}_1^2 - \hat{x}_2^2)} d\hat{x}_1 d\hat{x}_2. \end{aligned} \tag{44}$$

Computer implementation of Fourier BEM requires the same skills as classical BEM [1, 3, 6, 7]. Integration with respect to unknowns in the Fourier approach is equivalent to the integral:

$$H_u^{ji} := \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi_t^j(\mathbf{x}) \phi_t^i(\mathbf{y}) U(\mathbf{x}-\mathbf{y}) d\mathbf{x} d\mathbf{y}, \tag{45}$$

where:

$i, j$  – number of elements,

$\mathbf{x} = [x_1, x_2], \mathbf{y} = [y_1, y_2]$  (two dimensional case).

#### The integral determination

After dividing the infinite area into four subareas (Fig. 3) we have:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dx dy &= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(x, y) dx dy + \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^0 f(x, y) dx dy + \\ &+ \int_{-\infty}^0 \int_0^0 f(x, y) dx dy + \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^0 f(x, y) dx dy = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(x, y) dx dy + \tag{46} \\ &+ \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^0 f(x, y) dx dy + \int_{-\infty}^0 \int_0^{\infty} f(x, y) dx dy + \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^0 f(x, y) dx dy. \end{aligned}$$

To calculate the integrals (46) the Gaussian quadrature with the -1 and 1 integration limits was used. To do that every subarea was transformed to a local coordinate system using the transformations  $T_1, T_2$  and  $T_3$  (Fig. 4).

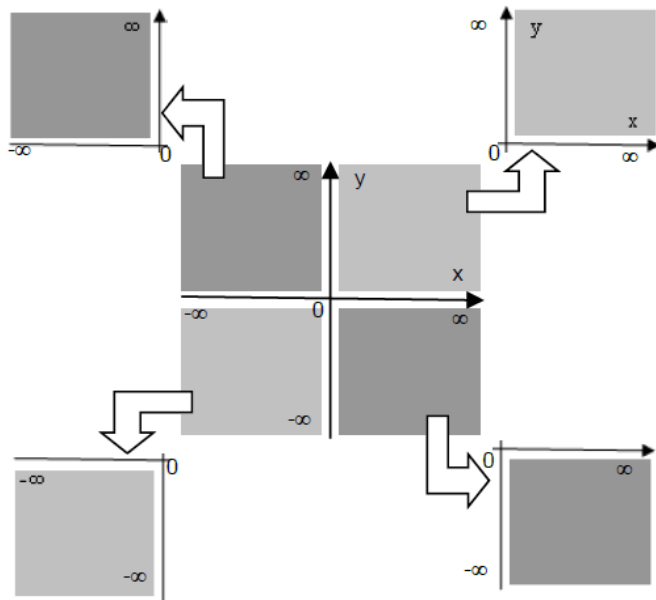


Fig. 3. Dividing the infinite area into four subareas

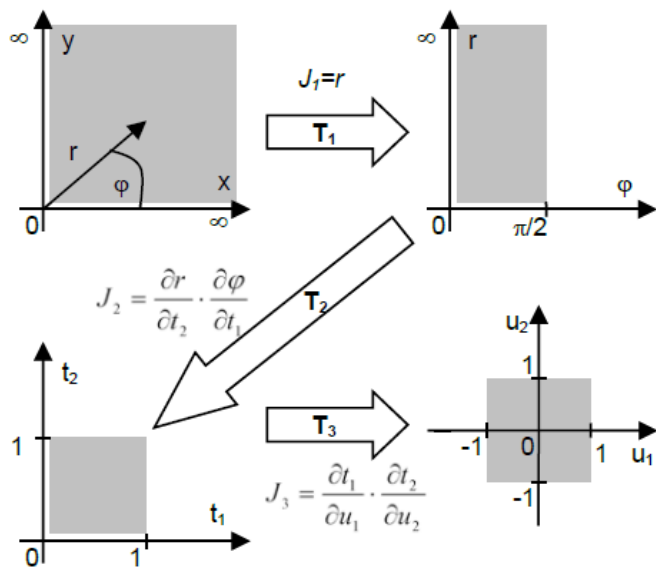


Fig. 4. Transformations to the local coordinate system

## 4. Results

For 8 elements the matrix  $\mathbf{H}$  coefficients were calculated symbolically [4] and numerically. Table 1 presents the value of the final solution (the solutions for 8 elements discretization are the same). For the numerical calculation the 80 integration points were used [5].

Table 1. Results

Exact solution	Numerical solution	Relative error
0.256360289033495	0.259308496598225	1.13 %

The numerical calculation of the integrals (46) is very complicated. The calculation based on the proposed algorithm allows us to achieve the 1.13% accuracy.

## 5. Conclusion

Numerical method for determination of improper integrals occurring in FBEM allowed to determine the results with an error of 1.13%. The Fourier BEM method is more difficult than the standard BEM method but is specially of interest for cases where the fundamental solution is not known.

## Bibliography

- [1] Beer G., Programming the boundary element method, John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- [2] Duddeck F., "Generalization of Boundary Element Methods by Fourier Transformation", Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002.
- [3] Jabłoński P., Metoda elementów brzegowych w analizie pola elektromagnetycznego, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2003.
- [4] Łukasik E., Pańczyk B., Sikora J, Methods of Optimisation and Data Analysis. Selected Issues, scientific editors: Kesra Nermend and Tomasz Komorowski, chapter 8: Matlab symbolic integration for Galerkin BEM, str. 137-155, Szczecin 2010.
- [5] Pańczyk B., Sikora J., Numerical Integration for symmetric Galerkin Boundary Element Method, Przegląd Elektrotechniczny, No/Vol: 12a/2011, p.36-39.
- [6] Sikora Jan, Podstawy metody elementów brzegowych, wydawnictwo Instytutu Elektrotechniki, Warszawa 2009.
- [7] Sutradhar A., Paulino G.H., Gray L. J., Symmetric Galerkin Boundary Element Method, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2008.
- [8] Zagórski A., Metody matematyczne fizyki, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007.

**Ph.D. Edyta Łukasik**  
e-mail: e.lukasik@pollub.pl

Edyta Łukasik graduated from mathematics at the Maria Curie-Skłodowska University in Lublin. In 2007 she received PhD titled "Iterative methods for nonlinear regular singular equations" in Faculty of Mathematics, Physics and Computer Science at UMCS in Lublin. She worked as assistant at the Institute of Computer Science, Lublin University of Technology from 1998 to 2007. Since 2007 she works as adjunct at the Institute of Computer Science, Lublin University of Technology. Research activities: object oriented programming, algorithms and data structures, applications of numerical methods in engineering.



**Ph.D. Beata Pańczyk**  
e-mail: b.panczyk@pollub.pl

She graduated from mathematics at the Maria Curie-Skłodowska University in Lublin. Since 1989 she has been working at the Lublin University of Technology (LTU), where she completed a PhD in 1996. The doctoral thesis title was Construction of the physical properties distribution image using Impedance Computer Tomography. Currently she is the senior lecturer at the Institute of Computer Science of the LTU. Her didactic and research interest are: object oriented programming, web application development and application of numerical methods in engineering.



**PhD. DSc. Eng. Jan Sikora**  
e-mail: sik59@wp.pl

PhD. DSc. Eng. Jan Sikora graduated from Warsaw University of Technology Faculty of Electrical Engineering. During 40 years of professional work he has proceeded all grades, including the position of full professor at his alma mater. Since 1998 he has worked for the Institute of Electrical Engineering in Warsaw. In 2008 he has joined Electrical Engineering and Computer Science Faculty In Lublin University of Technology. During 2001-2004 he has worked as a Senior Research Fellow at University College London in the prof. S. Arridge's Group of Optical Tomography. His research interests are focused on numerical methods for electromagnetic field.



# THE INTELLIGENT SYSTEM FOR AUTOMOTIVE FUELS QUALITY DEFINITION

**Volodymyr Drevetskiy, Marko Klepach**

National University of Water Management and Natural Resources Use, Rivne, Ukraine

**Abstract.** An intelligent system, based on hydrodynamic method and artificial neural networks usage for automotive fuels quality definition have been developed. Artificial neural networks optimal structures for the octane number of gasoline, cetane number, cetane index of diesel fuel definition have been substantiated and their accuracy has been analyzed. The implementation of artificial neural networks by means of microcontroller-based systems has been considered.

**Keywords:** Hydrodynamics, Artificial neural network, Fuels, Real-time systems

## INTELIĞENTNY SYSTEM DO OCENY JAKOŚCI PALIW SAMOCHODOWYCH

**Streszczenie.** Opracowano inteligentny system bazujący na metodach hydrodynamicznych i sieci neuronowej wykorzystywany do oceny jakości paliwa samochodowego. Przedstawiono optymalne struktury sieci neuronowych do oceny liczby oktanowej benzyny, liczby cetanowej i indeksu cetanowego dla oleju napędowego oraz przeanalizowano ich dokładności. Rozważono możliwość implementacji sieci neuronowych z wykorzystaniem mikrokontrolera.

**Słowa kluczowe:** hydrodynamika, sztuczna sieć neuronowa, paliwa, system czasu rzeczywistego

### Introduction

Efficiency of automotive fuels usage requires continuous operative quality control. Modern devices and methods do not provide a comprehensive operational quality control, adapted only to a certain type of petroleum product, are unable to be integrated into industrial automation and ERP- class systems. Consequently there is a necessity of building intelligent information-measurement systems (IMS), which combines the techniques of classical hydrodynamics and modern intelligent components based on programmable logic controllers.

### 1. The basis for the system design

We developed methods [1] and synthesized based on them an intelligent information-measuring system [2] that provide hydrodynamic method of determining in real time mode the physical and mechanical properties of petroleum products such as gasoline (density), diesel fuel (density, viscosity), oil and fuel oil (density, viscosity, viscosity-temperature characteristics).

The aim of the research is to determine on the basis of known values of density and viscosity such parameters as octane number, cetane number and index using artificial neural networks (ANN). To provide the measurement process control, implementation of ANN, flexibility and compatibility with modern systems of industrial automation we have to use the programmable logic controllers.

Information-measuring system shall have a modular structure to facilitate its construction, maintenance and integration capabilities. So for the collection of primary data and the implementation of control actions should be used only standard industrial sensors and executive mechanism with unified input and output signals.

Human-machine interface of measurement system has to be realized by means of operator graphic touch panel or computer.

#### 1.1. Hydrodynamic method

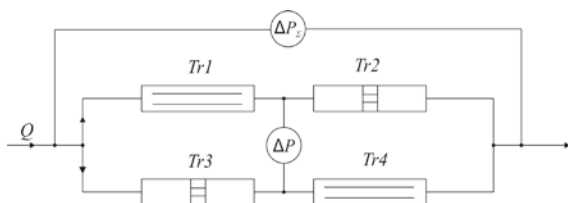


Fig. 1. Structure of throttle bridge converter

The measurement process is based on hydrodynamic methods of kinematic viscosity and density definition. Sensing element is a

throttle bridge converter (TBC) [3]. Hydraulic bridge (Fig. 1) formed by two laminar Tr1, Tr3 and two turbulent Tr2, Tr4 throttle elements. The principle of measurement is in continuous pumping of the exploring oil products through the TBC and automatic astatic balancing of the bridge by changing the volumetric flow rate Q of the product.

By value of volumetric flow and total pressure drop  $\Delta P_z$  on TBC determined at the time of balance (when  $\Delta P$  - pressure drops in the indicator diagonal equal to zero) the next parameters are calculated:

Kinematic viscosity:

$$\nu = kQ \quad (1)$$

where:  $k$  - coefficient that depends on the geometrical dimensions of the measuring bridge throttles.

Density of oil products:

$$\rho = k_p \frac{\Delta P_z}{Q^2} \quad (2)$$

where:  $k_p$  - constant of proportionality, determined on construction and geometric dimensions of throttles.

Dynamic viscosity:

$$\mu = \nu\rho \quad (3)$$

To improve the measurement accuracy TBC must be equipped with a thermostat, because the density and viscosity dependent on temperature.

### 1.2. Determination of oil products viscosity-temperature characteristics

Presence of thermostat in IMS allows us to determine viscosity-temperature characteristic by fixing the appropriate values of temperature and viscosity during heating. At some moment of time after the change in temperature by  $0.5^\circ\text{C}$ , measured temperature and kinematic viscosity values are recorded in the intermediate base. After filling the intermediate database by least squares method, the approximating polynomial coefficients are calculated that mathematically describes the curve of viscosity on temperature. The real values of temperature and viscosity are plotted at the schedule as points with interval changes in temperature by  $5^\circ\text{C}$  and a mathematical relationship depicted as a continuous curve in a given range of temperature change. Thus there is a possibility of visual comparison of obtained and calculated data.

To assess the accuracy of the device as the test environment was taken jet fuel type T-1C and received its viscosity-temperature characteristic (Fig. 2).

Viscosity-temperature characteristic of studied sample of jet fuel is described by a third degree polynomial:

$$\nu = -0.000007t^3 + 0.0013t^2 - 0.0931t + 3.3557 \quad (4)$$

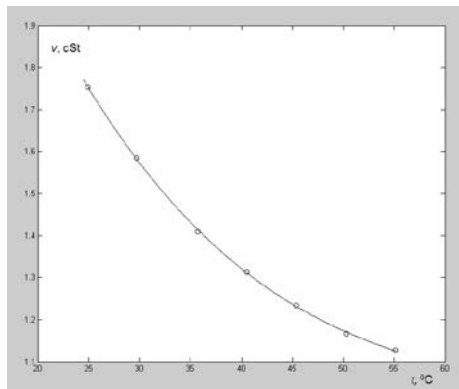


Fig. 2. Viscosity-temperature characteristic of jet fuel T-1C

Comparative analysis of the calculated values with the actual values of the kinematic viscosity showed that the absolute error is less than 0.04 cSt, and the relative error is under 3%.

### 1.3. Design of artificial neural networks

Training and testing ANN for determining octane number based on premeasured density, cetane number and index by density and viscosity performed according to the data from the certificates of laboratory tests. Characteristics of datasets are given in Table 1.

Table 1. The training and testing data sets characteristics

№	Artificial neural network		Dataset, points		Fuel
	Input	Output	Train	Test	
1	Density	octane Number	150	84	Gasoline A80, A92, A95, Premium A95
2	Density, kinematic viscosity	Cetane number	29	16	Premium summer diesel
3	Density, kinematic viscosity	Cetane index	29	16	Premium summer diesel

Training and testing of networks was carried out by means of application Neural Network Toolbox from Matlab software package. For best results of the fuel quality parameters definition accuracy we used the network models such as Feed-forward (FF) and Cascade-forward (CF) without delays, because previous research should not affect the next results. Given that the nature of the relationship between the parameters are not defined beforehand, using different activation functions of neurons (tansig, purelin, logsig) with different number of layers and neurons in layers. Considering that nature of the relationship between the parameters are not defined beforehand, we used different activation functions of neurons (tansig, purelin, logsig) with different number of layers and neurons in layers. The number of neurons in the layers of neural network depends on the complexity of the relationship between input and output parameters. However, too large number of them increases the difficulty and thus calculation and learning time. In addition, it can lead to over training of ANN, that means excessive adaptation to training set that negatively affects the accuracy of the output value. Therefore, the number of neurons in the layers of the models was different and was set in the range from 4 to 20.

Verification of models performance was carried out using additional data sets that were not used during training. The main criteria for choosing the optimal structure and parameters of the neural networks were the mean square and mean absolute errors.

As a result of comparison the octane number values determined using ANN with real the most effective was three-layered Cascade-Forward neural network (Fig. 3), with 10 and 6 neurons in the hidden layers and the transfer functions tansig-pureline-pureline.

Mean square error of octane number definition is 0.063, mean absolute error (MAE) 0.193 octane number units.

After analyzing the accuracy of models for cetane number definition the best performance had the ANN with mean square error of 0.2 and mean absolute error of 0.38 units. The structure of this neural network is shown on Fig. 4.

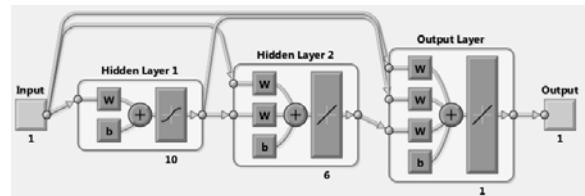


Fig. 3. Structure of ANN for the gasoline octane number definition

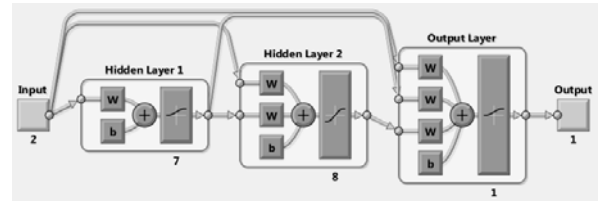


Fig. 4. Structure of ANN for the diesel fuel cetane number definition

This is CF-class, three-layered network with transfer functions logsig tansig-logsig which has 7 and 8 neurons in the hidden layers.

By analysis results of neural network models for the cetane index definition most effective appeared the CF-class, two-layer artificial neural network with linear transfer functions and 11 neurons in the hidden layer (Fig. 5).

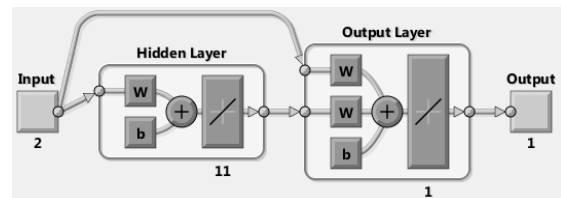


Fig. 5. Structure of ANN for the diesel fuel cetane index definition

The performance of this artificial neural network was mean square error – 0.11 and the average absolute error of 0.27 units of cetane index.

In all 3 cases, neural networks of Feed-Forward class although showed similar in accuracy results but were less effective. In general, as the analysis revealed, the accuracy is high enough to use the ANN in express analysis of fuels quality. Also, the adaptation of networks to large data set can significantly improve their performance.

## 2. The IMS structure

The main requirements for the structure of IMS is the control of process primary information parameters measuring using hard real-time, possibility of neural networks implementation, temperature stabilization, flexibility in exploitation by using modular structure and standard industrial equipment. Block diagram of the system we have designed is shown in Fig. 6.

In this case, the optimal choice is the use of industrial programmable logic controllers, as the basic unit for operating, processing and transmitting information. To provide human-machine interface we can use operator graphic touch panel or PC in case of integration into a higher automation systems.

The VIPA PLC software designed so, that through analog and discrete inputs/outputs to provide collection of information from sensors, that are installed to the throttle bridge converter (Automatic TBC control), to process information signals from sensors and to transmit them to the upper levels and to give control influences to the executive mechanisms of measuring process (Measurement process control).

According to the hydrodynamic method for viscosity and density measurement using the TBC our system equipped with two manometers made by ABB, one to measure the total pressure drops across the bridge scheme and second for Automatic TBC control system balanciation, thermoresistor by OWEN, volumetric flow sensor by Kobold.



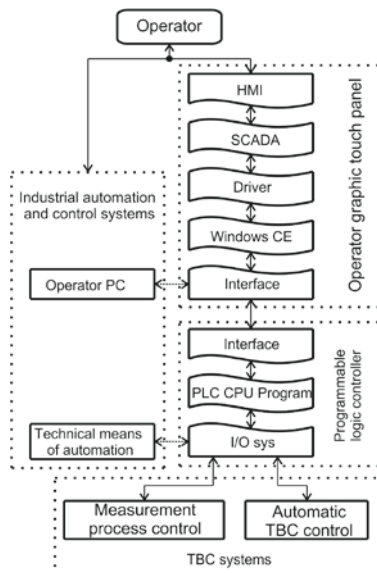


Fig. 6. Block diagram of the intelligent system

To provide the measurement process it is required the throttle bridge converter to be equipped with the balancing and temperature stabilization subsystems. Changes in viscosity leads to the TBS to unbalanced unbalanced state. Speed of the bridge scheme balancing by influencing on the volumetric flow is very important to ensure the system performance, because the measurements could be made only in the balance state so we applied PID-controller.

For parametric optimization of the automatic balancing subsystem we built its Simulink-model [4]. Using the Simulink library Design Optimization we received optimal PID-controller parameters. Using the Real Time Windows Target together with PCI-card Advantech for PC [5] allow us to simulate subsystems in real-time mode. The results of automatic balancing subsystem modeling with step changes of kinematic viscosity are shown in Fig. 7.

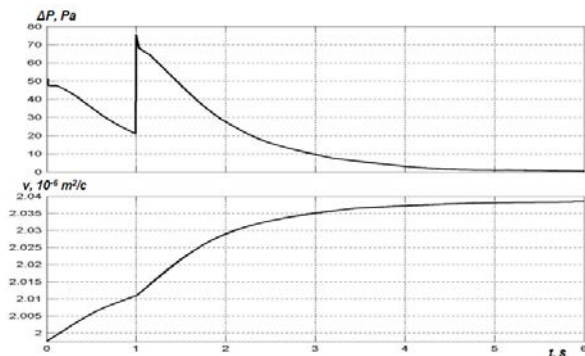


Fig. 7. The simulation of automatic balancing subsystem results

One can see that the reaction of DMP to viscosity changes is accompanied by two jumps, due to its design and hydraulic transients. Immediately after the pressure jump system produces control influences to change the volumetric flow and balances the throttle bridge converter for time less than 5 s, indicating its high efficiency.

System of the product temperature stabilization works on PID-PWM control law that eliminates pre-defined error which appears when using the classical two-position controllers with the dead zone.

### 3. Results

Database of artificial neural networks can be realized by means either PLC through code generation from Simulink-model using PLC Coder, or operator graphic touch panel with SCADA-system preinstalled.

To implement the human-machine interface we used VIPA Touch Panel with Movicon SCADA-system. The touch panel graphic user interface of measurement process is shown on Fig. 8.

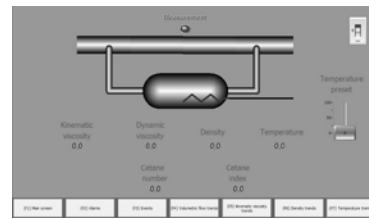


Fig. 8. Operator graphic user interface

Given previous research, we have developed a laboratory prototype of an intelligent system for oil products quality characteristics definition (Fig. 9).

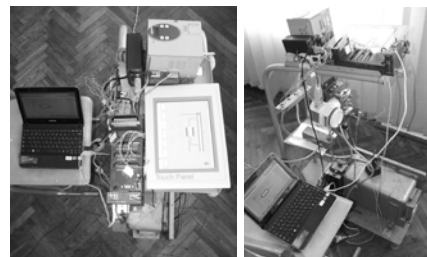


Fig. 9. A prototype of intelligent system

### Conclusions

A prototype of intelligent information-measuring system for the oil products kinematic and dynamic viscosity, viscosity-temperature characteristic, density, octane number, cetane number and index definition with high accuracy has been developed.

### Bibliography

- [1] Drevetskiy V., Kvasnikov V.: Oil products quality control by the hydrodynamic method. Bulletin of Engineering Academy of Ukraine 3.4/2008, p. 87-89.
- [2] Drevetskiy V., Klepach M.: The information-measurement system of oil products quality. MDMTNDTTDE, Ivano-Frankivsk 2011.
- [3] Drevetskiy V.: Measurements of physical and mechanical properties of liquids with the throttle converter. MSR, Dnipropetrovsk 2003.
- [4] Drevetskiy V., Klepach M.: Dynamic properties of the viscosity and density automatic analyzer for oil products. Bulletin of Engineering Academy of Ukraine 1/2009, p. 128-131.
- [5] Drevetskiy V., Klepach M. Real time modeling of the information-measurement system for physical-chemical parameters of oil products. Mathematical Machines and Systems. 2/2011, p. 81-84.

**D.Sc.(Technical), prof. Volodymyr Drevetskiy**  
e-mail: Westra@rv.uar.net

Vice President of Engineering Academy of Ukraine, Head of Automation, electrical engineering and computer integrated technologies Department (NUWMNRS)

The main scientific direction - development of methods and devices for continuous automatic monitoring of the physical and mechanical parameters of Newtonian and non-Newtonian fluids, as well as the quality of oil products. Author of over 200 scientific papers, including 51 patents, most of which are implemented in production.

**M.Sc. Marko Klepach**  
e-mail: KlepachMM@ukr.net

Research engineer of computer systems and automation, postgraduate student, assistant of the Department of Automation, electrical engineering and computer integrated technologies.

The main scientific direction - automation of oil refining technological processes, construction of data collection, information-processing and industrial automation systems; research and design of artificial neural networks models for industrial automation and measurement systems; mathematical modeling of physical and chemical processes.



## PORÓWNANIE WYBRANYCH METOD INTERPOLACJI RUCHU

**Jakub Smolka, Maria Skublewska-Paszowska**

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki

**Streszczenie.** Interpolacja jest jednym z kluczowych elementów wykorzystywanych w animacji komputerowej. Dobór odpowiedniej metody interpolacji wpływa na ruch animowanej postaci. Artykuł przedstawia wybrane metody interpolacji i porównuje je ze względu na czas wykonywania obliczeń oraz dokładność uzyskanych wyników. Algorytmy, które przeanalizowano to: metoda Catmulla-Roma, zmodyfikowana metoda Catmulla-Roma oraz krzywe przejściowe między parabolami (blended parabolas). Eksperymenty numeryczne przeprowadzono za pomocą programu komputerowego napisanego w języku C++.

**Słowa kluczowe:** metody interpolacji, Hermite, krzywe sklejące Catmulla-Roma, krzywe sklejące Blended Parabolas

### COMPARISON OF THE SELECTED MOTION INTERPOLATION METHODS

**Abstract.** Interpolation is one of key aspects of computer animation. The selection of the proper interpolation method influences motion of animated objects. The paper presents selected interpolation methods and compares them with respect to computation time and accuracy. The three algorithms that were analyzed are: Catmull-Rom Spline, modified Catmull-Rom Spline and Blended Parabolas method. Numerical experiments were performed using a program written in C++ language.

**Keywords:** interpolation methods, Hermite, Catmull-Rom, Blended Parabolas

### Wstęp

Animowanie ruchu obiektu polega na zmienianiu wartości parametrów, które wpływają na jego położenie. Ze względu na to, że dane ruchu nie są dostępne z wymaganą dokładnością, jednym z kluczowych elementów animacji obiektu jest dobór odpowiedniej metody interpolacji. Interpolacja może być zastosowana do wyznaczania wartości wielu parametrów animacji takich jak: pozycja obiektu, czy jego orientacja (pozycja kątowa) w przestrzeni. Dlatego można stwierdzić, że interpolacja jest jednym z fundamentów animacji komputerowej. Algorytmy interpolacji pozwalają na przedstawienie płynnego ruchu animowanego obiektu w sposób zbliżony do naturalnego.

Interpolacja jest narzędziem, dzięki któremu można wyznaczyć wartości pośrednie, pomiędzy danymi należącymi do zbioru zadanych parametrów animacji [5]. Istnieje wiele różnych algorytmów interpolacji, które różnią się złożonością, czasem działania oraz dokładnością wyników [3].

Zastosowanie interpolacji w animacji nie jest łatwym zadaniem [9]. W celu jej użycia należy wykonać kolejne etapy jak: (1) wybór odpowiedniej funkcji interpolacji, (2) parametryzację funkcji uwzględniając ścieżkę ruchu obiektu, oraz (3) zapewnienie kontroli nad położeniem obiektu (punktu) w zależności od czasu (ustalenie zmian prędkości – ponowna parametryzacja funkcji interpolacyjnej w czasie).

Artykuł ten przedstawia wybrane algorytmy interpolacji ruchu, które mogą zostać zastosowane do interpolacji pozycji punktu w przestrzeni. Ponadto zawiera on analizę wybranych algorytmów interpolacyjnych przeprowadzoną na podstawie opisanych testów związanych ze złożonością i dokładnością badanych metod.

### 1. Wybrane metody interpolacji

Istnieje wiele różnych algorytmów, które pozwalają na interpolację danych liczbowych [7]. Krzywe stosowane do budowy funkcji interpolacyjnej mogą być różne. Można je podzielić na [4]: (1) wielomianowe, (2) liniowe, które są szczególnym przypadkiem wielomianowych, (3) wymierne oraz (4) przestępne. Wybrane algorytmy zostały przedstawione poniżej.

#### Interpolacja liniowa

Najprostszą metodą interpolacji jest interpolacja liniowa, której równanie zostało przedstawione wzorem 1. Wyrażenia:  $1-u$  oraz  $u$  sumują się do jedności. Gwarantuje to, że otrzymana krzywa interpolacyjna (w tym przypadku odcinek) zawarta jest w otocze wypukłej danych punktów [4, 8].

$$P(u) = (1 - u)P_0 + uP_1 \quad (1)$$

Liniową interpolację (wzór 1) można przedstawić w bardziej ogólnej postaci przy pomocy funkcji mieszających (ang. *blending functions*) –  $F_0, F_1$ . Reprezentacja ta została przedstawiona wzorem 2 [4, 8].

$$P(u) = F_0(u)P_0 + F_1(u)P_1 \quad (2)$$

W przypadku tej reprezentacji muszą być spełnione warunki gwarantujące budowę odcinka:  $F_0(u) + F_1(u) = 1$  oraz  $0 \leq F_0(u) \leq 1$ .

Ten sam problem może zostać rozwiązany przy pomocy równania wielomianowego (wzór 3) [4, 8].

$$P(u) = (P_1 - P_0)u + P_0 \quad (3)$$

Algebraiczna forma tego równania została przedstawiona we wzorze 4 [4, 8].

$$P(u) = a_1 u + a_0 \quad (4)$$

Dodatkowo, każde z zaprezentowanych równań (od 1 do 4) można przedstawić w postaci macierzowej. Forma ta została pokazana wzorem 5 [4].

$$P(u) = [u \ 1] \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \end{bmatrix} = U^T M B \quad (5)$$

gdzie:  $U$  - macierz zawierająca parametry,  $M$  - macierz zawierająca ustalone współczynniki,  $B$  - macierz zawierająca informacje geometryczne.

Ze względu na fakt, że reprezentacja macierzowa jest bardzo wygodna, a także łatwa w implementacji, wszystkie kolejne metody interpolacji w tym rozdziale zostaną przedstawione w tej formie.

#### Interpolacja Hermite'a

W przeciwieństwie do interpolacji liniowej, algorytm Hermite'a tworzy krzywą trzeciego stopnia pomiędzy dwoma punktami (przykładowo  $P_i, P_{i+1}$ ). W tej metodzie niezbędne jest utworzenie wektorów pochodnych parametryzacji ( $p'_i, p'_{i+1}$ ), które mają wpływ na kształt tworzonej krzywej – wektory są styczne do krzywej w punktach  $P_i, P_{i+1}$  [4, 8].

Parametry równania macierzowego (ze wzoru 5) zostały podane we wzorach od 6-8.

$$U^T = [u^3 \ u^2 \ u \ 1] \quad (6)$$

$$M = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B = \begin{bmatrix} P_i \\ P_{i+1} \\ p_i \\ P_{i+1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Dużym utrudnieniem podczas stosowania tej metody jest konieczność wyznaczenia wektorów pochodnych parametryzacji dla każdego węzła interpolacyjnego ( $p_i, p_{i+1}$ ). W przypadku, gdy algorytm Hermite'a zastosowany jest do większej liczby punktów, definiowanie wektorów pochodnych staje się znaczącą przeszkodą. Istnieją metody interpolacji, w których wektory te generowane są automatycznie [4].

### Krzywe sklepane Catmulla-Roma

Podobnie, jak w przypadku interpolacji Hermite'a, stosowanie krzywych sklepanych tworzy łuki trzeciego stopnia pomiędzy kolejnymi parami punktów. Krzywe te można rozpatrywać jako powstałe z wielomianowych łuków Hermite'a. Pochodne w punktach złączenia krzywych są łatwe do obliczenia, ze względu na ciągłość pochodnej drugiego rzędu. Zaletą tej metody jest automatyczne wyznaczenie wektorów pochodnych. Dla każdego punktu  $P_i$ , będącego punktem łączącym łuki, wektor jest generowany zgodnie ze wzorem 9 (jest on równy połowie różnicy punktu poprzedzającego oraz wcześniejszego) [4, 8].

$$p_i = \frac{1}{2}(P_{i+1} - P_{i-1}) \quad (9)$$

Wektor pochodnych dla punktu początkowego ( $P_0$ ) i końcowego może być wyznaczany w różny sposób (np. poprzez podanie ich przez użytkownika lub ich automatyczny dobór). Jedną z metod jego obliczenia przedstawia wzór 10 [4, 8].

$$p_0 = \frac{1}{2}(P_1 - (P_2 - P_1) - P_0) \quad (10)$$

Przedstawiając algorytm krzywych sklepanych Catmulla-Roma w postaci macierzowej, należy zastosować macierz  $U$  identyczną z podaną dla metody Hermite'a (wzór 6), natomiast macierze  $M$  oraz  $B$  dane są odpowiednio wzorami 11 oraz 12 [4, 8]:

$$M = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 2 & -5 & 4 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$B = \begin{bmatrix} P_{i-1} \\ P_i \\ p_i \\ P_{i+2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Metoda ta w dalszej części artykułu będzie nazywana krótko: CM1/2.

Największą zaletą tej metody jest jej prostota oraz szybkość obliczeń. Główną niedogodność stosowania krzywych sklepanych Catmulla-Roma polega na tym, że wektor pochodnej punktu  $P_i$  łączącego dwie krzywe nie zależy od położenia tego punktu względem punktów  $P_{i-1}$  i  $P_{i+1}$  [4]. Dlatego istnieją inne konstrukcje wyznaczania wektorów pochodnych bazujące na tej metodzie (np. przyjęcie wektora prostopadłego do dwusiecznej kąta między odcinkami) [4].

Zmodyfikowana metoda Catmulla-Roma pozwala na niezależne dobranie długości wektora pochodnej w punkcie ( $P_i$ ), w którym się łączą dwa łuki [4, 6]. Wtedy lewy i prawy wektor pochodnej łuku wyznaczany jest zgodnie ze wzorami 13 (pomiędzy punktami  $P_{i-1}$  oraz  $P_i$ ) i 14 (pomiędzy punktami  $P_i$  oraz  $P_{i+1}$ ) [4, 8].

$$p_i' = \frac{\left| \frac{P_i - P_{i-1}}{P_{i+1} - P_{i-1}} \right|}{\left\| \frac{P_i - P_{i-1}}{P_{i+1} - P_{i-1}} \right\|} (P_{i+1} - P_{i-1}) \quad (13)$$

$$p_i' = \frac{\left| \frac{P_{i+1} - P_i}{P_{i+1} - P_{i-1}} \right|}{\left\| \frac{P_{i+1} - P_i}{P_{i+1} - P_{i-1}} \right\|} (P_{i+1} - P_{i-1}) \quad (14)$$

Koszt wyznaczenia wektorów jest trochę większy niż tych otrzymanych przy pomocy wzorów 9 oraz 10 [4]. Metoda ta w dalszej części artykułu będzie nosiła skróconą nazwę CMP.

### Krzywe przejściowe między parabolami

Wyznaczanie krzywych przejściowych pomiędzy parabolami jest kolejną metodą uzyskiwania krzywych interpolacyjnych dla punktów, które tworzą łuki wielomianowe trzeciego stopnia [1, 4]. Dwie części krzywej - pierwsza i ostatnia są parabolami. Każdy z pozostałych łuków wyznaczany jest na podstawie czterech punktów i stanowi segment trzeciego stopnia otrzymany z interpolacji dwóch parabol. Powstają one w następujący sposób - parabola  $R(u)$  jest określona przez trzy kolejne punkty przy nałożeniu ograniczeń:  $R(0)=P_i$ ,  $R(0.5)=P_{i+1}$  oraz  $R(1)=P_{i+2}$ , a parabola  $S(u)$  przy analogicznych ograniczeniach dotyczących punktów:  $P_{i+1}$ ,  $P_{i+2}$ ,  $P_{i+3}$ . Pomiędzy punktami  $P_{i+1}$  oraz  $P_{i+2}$  dwie parabole  $R(u)$  oraz  $S(u)$  zachodzą na siebie. Parabole te są interpolowane liniowo, co przedstawia wzór 15 [4, 8].

$$P(u) = (1-u)R(u) + uS(u) \quad (15)$$

Macierz  $M$  z postaci macierzowej dla tej metody została przedstawiona wzorem 16 [4].

$$M = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 2 & -5 & 4 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

## 2. Eksperymenty numeryczne

Ze względu na fakt, że najczęściej w grafice komputerowej stosowane są wielomianowe krzywe trzeciego stopnia, zwane także kubicznymi, przedstawione testy dotyczą tej grupy funkcji interpolacyjnych.

Porównywane algorytmy zostały zaimplementowane przez autorów przy wykorzystaniu języka C++ [2]. Stworzony program pozwala na interpolację danych wejściowych i na generowanie danych wyjściowych interpolowanych z dowolną dokładnością. Kolejne metody interpolacyjne zostały zaimplementowane przy użyciu postaci macierzowej. Najważniejsze operacje, które umożliwiły obliczanie interpolowanych danych to dodawanie oraz mnożenie macierzy (także wektorów). Metody zostały zaimplementowane przy pomocy techniki przeciążania operatorów.

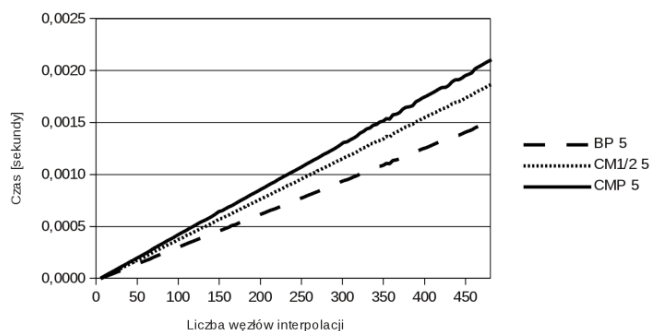
Przedstawiona poniżej analiza dotyczy dwóch aspektów interpolacji: czasu obliczeń wybranych algorytmów oraz dokładności interpolowanych danych.

Próbie czasu wykonano na 4800 zestawach danych, natomiast próbie dokładności przeprowadzono dla 80 zestawów danych wejściowych. Dane generowano losowo. W pierwszym wypadku maksymalna liczba węzłów interpolacyjnych wynosiła 480, zaś w drugim została ustawiona na 481 we wszystkich testach.

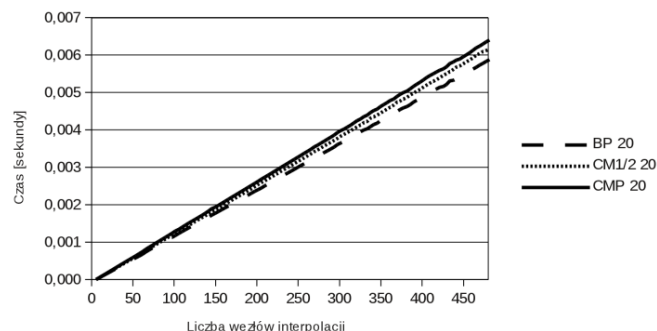
### Analiza czasu obliczeń wybranych algorytmów interpolacji

Jak już wspomniano, pierwsze z analizowanych zagadnień, dotyczy szybkości wykonywania obliczeń dla wybranych metod interpolacyjnych. Przetestowano opisane wcześniej metody: krzywych sklepanych Catmulla-Roma (CM1/2), zmodyfikowanej metody Catmulla-Roma (CMP) oraz krzywych przejściowych pomiędzy parabolami (BP). Wykresy przedstawiające czasy obliczeń dla analizowanych algorytmów przedstawiają rysunki 1 oraz 2.

Oś rzędnych reprezentuje liczbę węzłów interpolacji, podczas gdy oś odciętych przedstawia czas wykonywania poszczególnych metod. Każdy z rysunków ilustruje wyniki uzyskane dla kroku interpolacji ( $\Delta U$ ), odpowiednio: 0,2 dla pierwszego przykładu oraz 0,05 dla drugiego.



Rys. 1. Czas obliczeń dla kroku interpolacji równego 0,2



Rys. 2. Czas obliczeń dla kroku interpolacji równego 0,05

Z wyników przedstawionych na rysunkach 1 i 2 można wysnuć dwa wnioski. Pierwszy związany jest z czasem obliczeń, który jest zróżnicowany. Zależność ta jest liniowa w stosunku do liczby węzłów interpolacji. Dodatkowo, czas potrzebny na wyznaczenie wektorów pochodnych łączących dwie krzywe, jest także liniowo zależny od liczby węzłów. Przedstawione wyniki jednoznacznie wskazują, że najszybszą metodą z analizowanych jest algorytm wyznaczania krzywych sklejanych pomiędzy parabolami (oznaczona jako BP). Wynika to głównie z faktu, że w pozostałych metodach należy wyznaczać wektory pochodnych łączących dwie krzywe.

### Analiza dokładności interpolowanych danych wybranych algorytmów

Drugim analizowanym zagadnieniem była dokładność interpolowanych danych. Tak jak w przypadku próby czasu porównano następujące algorytmy: krzywych sklejanych Catmulla-Roma (CM1/2), zmodyfikowanej metody Catmulla-Roma (CMP) oraz krzywych przejściowych pomiędzy parabolami (BP).

Początkowy zbiór danych wejściowych składał się z 481 elementów. Testy, które zostały przeprowadzone i przedstawione w tym artykule, były wykonywane na danych wybranych ze zbioru wejściowego. Wybierane były węzły, odpowiednio co drugi i co czwarty. Dzięki temu sprawdzono jak bardzo można obniżyć szczegółowość danych wejściowych bez znacznego pogorszenia wyników interpolacji. Przykładowe wyniki pokazano na rysunkach 3, 4, 5 oraz 6.

Po otrzymaniu interpolowanych punktów, należało obliczyć, jak dokładna okazała się analizowana metoda interpolacyjna. W tym celu obliczana była odległość pomiędzy punktami wejściowymi, a odpowiadającymi im punktami wyjściowymi. Różnica ta była obliczana w dwóch etapach. Po pierwsze, dla każdego punktu interpolowanego wyznaczany był najbliższy punkt z danych wejściowych (według odległości osi rzędnych). Następnie wyznaczana była odległość (euklidesowa) tych punktów. Obliczone odległości zsumowano. Otrzymane wyniki zostały przedstawione w tabelach 1, 2 oraz 3, dla kolejno analizowanych algorytmów interpolacyjnych.

Wnioski, które nasuwają się po przeanalizowaniu danych w tabelach 1-3, są następujące: (1) dwukrotne zmniejszenie liczby punktów w zbiorze danych wejściowych powoduje zauważalne zmniejszenie dokładności otrzymanych wyników, otrzymany błąd nie jest jednak, w większości przypadków, dwukrotnie wyższy,

(2) zmniejszenie kroku interpolacji powoduje poprawę dokładności, jednak czterokrotna zmiana tego kroku nie powoduje czterokrotnego zmniejszenia błędu, (3) najlepszą metodą interpolacji okazał się algorytm wyznaczania krzywych sklejanych pomiędzy parabolami – błędy interpolacji były najmniejsze, a ponadto zmiana kroku interpolacji ma niewielki wpływ na jej dokładność.

Rysunki od 3 do 6 zawierają wyniki dokładności uzyskanych krzywych interpolacyjnych dla wybranych metod względem punktów wejściowych. Na rysunkach zaznaczono punkty oryginalnego zestawu danych oraz punkty wybrane jako dane wejściowe dla algorytmów (co drugi lub co czwarty) ze zbioru początkowego). Na podstawie wybranych punktów przeprowadzono interpolację dla dwóch liczb węzłów interpolacyjnych oraz dla dwóch wartości parametru  $\Delta U$  0,2 oraz 0,05.

Tabela 1. Obliczona odległość między punktami wejściowego i interpolowanych dla metody krzywych sklejanych Catmulla-Roma (CM1/2)

Liczba punktów w zbiorze wejściowym	CM1/2	
	$\Delta U=0,2$	$\Delta U=0,05$
243	896,1	675,9
123	1421,7	993,6

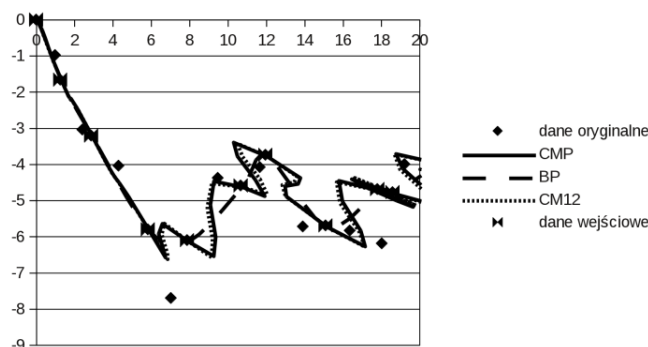
Tabela 2. Obliczona odległość między punktami wejściowego i interpolowanych dla metody krzywych sklejanych Catmulla-Roma (CMP)

Liczba punktów w zbiorze wejściowym	CMP	
	$\Delta U=0,2$	$\Delta U=0,05$
243	943,2	714,6
123	1394,1	992,1

Tabela 3. Obliczona odległość między punktami wejściowego i interpolowanych dla metody krzywych sklejanych pomiędzy parabolami (BP)

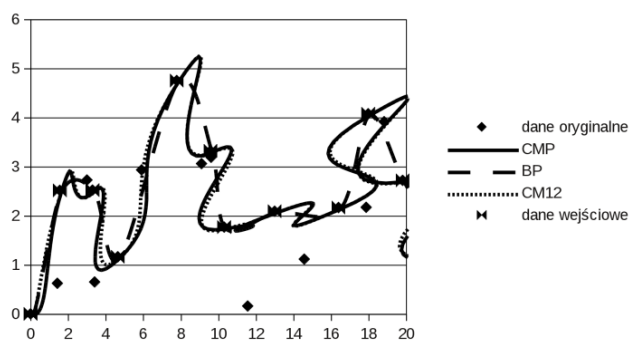
Liczba punktów w zbiorze wejściowym	BP	
	$\Delta U=0,2$	$\Delta U=0,05$
243	182,9	189,4
123	357,3	328,8

Rysunek 3 przedstawia interpolowane krzywe uzyskane analizowanymi metodami dla zbioru wejściowego o liczebności 243 elementów. Dla przejrzystości przedstawiono tylko pierwszych 20 elementów. Punkty te zostały uzyskano ze zbioru początkowego, wybierając co drugi element. Krok interpolacji został ustalony na 0,2.

Rys. 3. Porównanie dokładności wybranych metod interpolacji dla pierwszych 20 punktów (co drugi ze zbioru początkowego) i  $\Delta U=0,2$ 

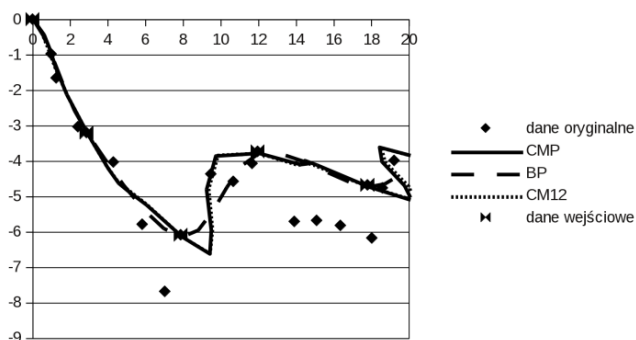
Rysunek 4 przedstawia interpolowane krzywe uzyskane analizowanymi metodami dla zbioru wejściowego o liczebności 243 elementów. Tutaj również dla przejrzystości przedstawiono tylko pierwszych 20 elementów. Punkty te uzyskano ze zbioru początkowego, wybierając co drugi element. Krok interpolacji był większy i został ustalony na 0,05.





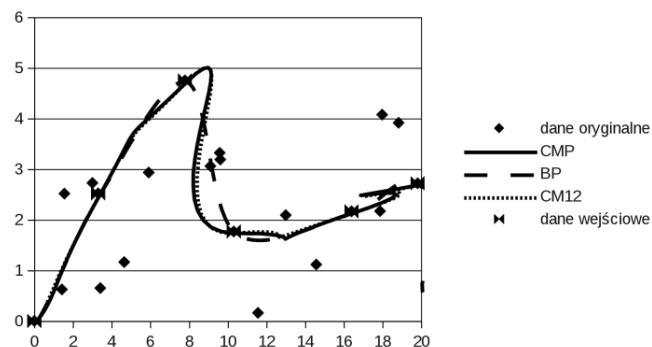
Rys. 4. Porównanie dokładności wybranych metod interpolacji dla pierwszych 20 punktów (co drugi ze zbioru początkowego) i  $AU=0,05$

Rysunek 5 przedstawia wynik kolejnej próby - krzywe uzyskane w wyniku interpolacji dla zbioru wejściowego o liczebności 123 elementów. Tak jak poprzednio przedstawiono tylko pierwszych 20 punktów. Punkty te zostały uzyskano ze zbioru początkowego, wybierając co czwarty element. Krok interpolacji  $\Delta U$  został ustalony na 0,2.



Rys. 5. Porównanie dokładności wybranych metod interpolacji dla 20 punktów (co czwarty ze zbioru początkowego) i  $AU=0,2$

Rysunek 6 przedstawia interpolowane krzywe uzyskane analizowanymi metodami dla zbioru wejściowego o liczebności 123 elementów. Punkty te zostały uzyskano ze zbioru początkowego, wybierając co czwarty element. Krok interpolacji wynosił 0,05.



Rys. 6. Porównanie dokładności wybranych metod interpolacji dla 20 punktów (co czwarty ze zbioru początkowego) i  $AU=0,05$

Również wyniki przedstawione na rysunkach wskazują, że najlepszą metodą interpolowania krzywych okazała się metoda krzywych przejściowych pomiędzy parabolami.

### 3. Podsumowanie

W artykule omówiono wybrane metody interpolacji danych, które mogą zostać zaimplementowane w różnych programach komputerowych. Mogą one zostać zastosowane między innymi podczas analizy czy wizualizacji danych ruchu, otrzymanych z systemów akwizycji ruchu (ang. Motion Capture Systems).

W artykule tym skupiono uwagę na trzech algorytmach interpolacji danych: metodzie krzywych sklejanych Catmulla-Roma, zmodyfikowanej metodzie Catmulla-Roma oraz metodzie krzywych przejściowych pomiędzy parabolami. Przeanalizowano zarówno szybkość obliczeń, a także dokładność danych otrzymanych w wyniku interpolacji. Wykonano eksperymenty numeryczne dla różnej liczby węzłów interpolacyjnych oraz kroku interpolacji.

Przeprowadzone testy pozwalają stwierdzić, że ze względu na przyjęte kryteria, najlepszą metodą okazała się metoda krzywych przejściowych pomiędzy parabolami. Jednym z powodów jest fakt, że nie wymaga ona generowania wektorów pochodnych. Dodatkową zaletą tego algorytmu jest niewielki wpływ kroku interpolacyjnego na dokładność uzyskiwanych wyników.

### Literatura

- [1] Barger R.: Trajectory fitting in Function Space With Application to Analytic modeling of Surfaces, NASA, Technical Paper 3232, 1992.
- [2] Eckel B.: Thinking in C++, Helion 2002.
- [3] Engel-Mullges G., Uhlig F.: Numerical Algorithms with C, Springer 1996.
- [4] Parent R.: Computer Animation: Algorithms & Techniques, Elsevier 2008.
- [5] Rogers D., Adams J.: Mathematical Elements for Computer Graphics, McGraw-Hill, 1990.
- [6] Rovenski V.: Geometry of Curves and Surfaces with Maple, BirkHauser, Boston, 2000.
- [7] Salomon D.: Computer Graphics and Geometric Modeling, Springer-Verlag New York, 1999.
- [8] Skublewska-Paszowska M., Łukasik E., Smolka J.: Analysis of motion interpolation methods, Shatsk Lakes, Ukraine, July 2-6, 2012, in press.
- [9] Yamane K.: Simulating and Generating Motions of Human Figures, Springer Tracts in Advanced Robotics 9, Springer-Verlag 2004.

**Dr inż. Maria Skublewska-Paszowska**  
e-mail: maria.paszowska@pollub.pl

Pracownik naukowo-dydaktyczny pracujący w Instytucie Informatyki Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Tytuł magistra uzyskała na Politechnice Lubelskiej. Stopień doktora otrzymała na Politechnice Śląskiej. Działalność naukowa związana jest z: transformacjami falkowymi, miarami jakości oceny wizualnej obrazów i zastosowania ich w adaptacyjnej kompresji obrazów, a także analizą ruchu.



**Dr inż. Jakub Smolka**  
e-mail: jakub.smolka@pollub.pl

Pracownik naukowo-dydaktyczny w Instytucie Informatyki Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Tytuł magistra uzyskał na Politechnice Lubelskiej natomiast stopień doktora na Politechnice Śląskiej. Jego działalność naukowa związana jest z przetwarzaniem obrazów cyfrowych w szczególności z ich segmentacją oraz kompresją, a także analizą ruchu.



otrzymano/received: 19.11.2012

przyjęto do druku/accepted: 23.05.2013

## SMART GRIDS – GENERAL REVIEW OF SYNCHRONIZATION TECHNIQUES

**Piotr Lipnicki**

Lublin University of Technology, Electrical Drive and Electrical Machines Department

**Abstract.** This paper deals with crucial aspect of synchronization in modern power grids. It presents the concept of intelligent networks ("smart grids"), as the future of today's grid infrastructure. The diversity of different grid codes in regards to the synchronization requirements for different Transmission System Operators (TSO) is discussed. This paper shows the applications of synchronizing algorithms, their role in power grid system.. The methods are classified according to application, the reference frame used and the possibility of using them in single and three phase systems. Proper selection of synchronization algorithms to meet the requirements of TSO's calls for creation of appropriate evaluation methods. For this reason, at the end of the article quality criteria for the evaluation of synchronizing algorithms were proposed and explained in detail. Finally, the last section states what are the most commonly used methods for grid synchronization.

**Keywords:** synchronization, smart grids, grid codes, phase locked loop (PLL), power electronics

### SIĘCI "SMART GRIDS" – WYZWANIA SYNCHRONIZACJI

**Streszczenie.** Niniejszy artykuł zajmuje się kluczowym aspektem, jakim jest synchronizacja w nowoczesnych sieciach elektroenergetycznych. Przedstawia on koncepcję sieci inteligentnych („smart grids”), uważaną jako przyszłość dzisiejszej infrastruktury sieciowej. Omówiono w nim różnice w zakresie przepisów sieci energetycznych różnych operatorów w odniesieniu do wymagań synchronizacji z siecią. Opisane metody sklasyfikowano według ich typowych aplikacji, zastosowanego układu odniesienia i możliwości zastosowania w systemie jedno- lub trójfazowym. Odpowiedni dobór algorytmów synchronizacji by spełnić wymagania TSO postuluje powstanie właściwych metod oceny tych algorytmów. Z tego powodu ostatni punkt artykułu opisuje i wyjaśnia szczegółowo dobrane kryteria oceny jakości algorytmów do synchronizacji. W ostatniej sekcji artykułu pokazano jakie są najczęściej stosowane metody do synchronizacji z siecią.

**Słowa kluczowe:** synchronizacja, sieci inteligentne, smart grids, kody sieci, pętla synchronizacji fazowej (PLL), energoelektronika

### Introduction

Nowadays modern European societies focus heavily on environmental protection and rational use of its resources. The increasing role of renewable energy sources (RES) together with the provision of rise in efficient energy utilization is one of the main objectives of modern energy business. On the other hand transmission system operators (TSO's) expand their requirements to ensure high power quality, supply continuity and resistance to interference and faults. To address these challenges creation of new, dedicated regulatory systems and methods for controlling are required.

To have modern, sustainable energy systems the concept of intelligent networks is introduced – the so-called "Smart grids". There are many different concepts of smart grids. The common feature of all of the definitions is the fact, that these networks should be managed in a way to ensure high performance, reliability and increased opportunities for supplying the customers. One of the examples of smart grids definition is a Directive [5] of European Commission stating, that "smart grids" are reliable networks, which ensure safety and the quality of power, providing at the same time flexibility during uncertain and risk states. This network should also be economical, without violating the regulatory rules and non-discrimination of the energy market parties.

An important assumption is the flexibility to meet the needs of consumers, in cooperation with the users – in particular in renewable sources cases.

One of the most important elements defining the smart networks is a two-way flow of energy. This feature allows to transfer the produced energy to the grid, and to draw it from the grid when needed. Having appropriate/additional power electronics systems provides the possibility of having distributed energy sources working in a standard operation mode with the network. These systems minimize the drawbacks of RES, such as instability of the energy source, reduction of the reliability of the system, the deterioration of quality of energy. Power electronics devices are capable of improving today's grid infrastructure and could create "smart grid" base.

Increasing use of power electronic systems is one of the dominant trends. This is due to the possibilities offered by systems containing converters. They allow having energy management

in an efficient manner, providing high power quality and supplying continuity. Basic information for systems connected to the grid converters are frequency and angle of the utility network. Phase angle of a current/voltage vector of the fundamental component at the connection point of system/inverter to the grid should be detected "online" in real time. The purpose of this article is to present and classify the existing synchronization methods for power converters in smart grids applications.

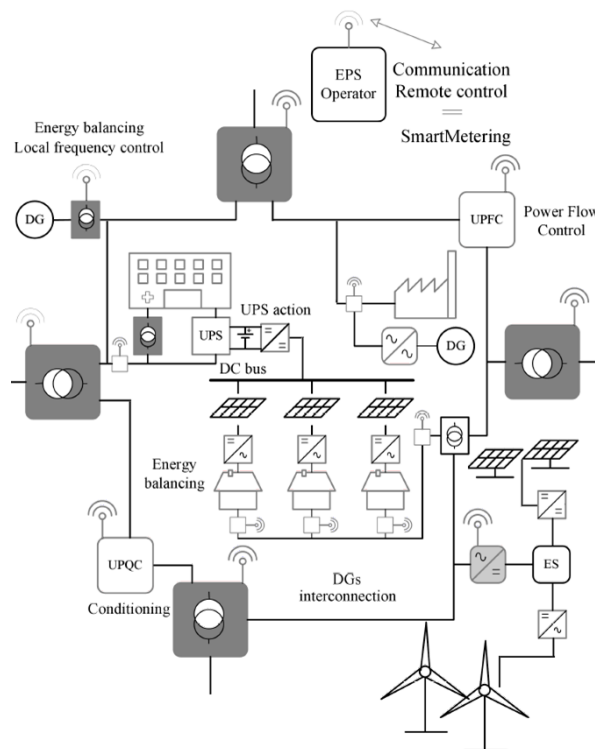


Fig. 1. SmartGrid with SmartMetering & SmartBuilding technology example [5]

An example of a "smart grid" network is shown in the Figure 1. It contains distributed generation systems connected to a grid, where energy flow is controlled by means of SmartMetering and conditioning.

## 1. Different synchronization requirements from various TSO

Grid codes are technical interconnection requirements of power network. Various TSO operators have many diverse requirements for the grid connection and synchronization. For different energy sources there are different regulations. This is due the fact, that many of the points of supplies vary in terms of quality, stability and availability of the energy source. As an example the definition from the Polish TSO (PSE Operator) is quoted: the synchronization is an “operation concerning the connection of the generating unit with the power system of connection of different power systems after their frequencies, phase and voltages are equalized to reduce the disparity of the vectors of connected voltages to a value close to zero” [39].

For all network users – the TSO, producers and consumers – having a novel, modern grid would benefit in terms of economy, transparency and greater efficiency. To illustrate the differences between the traditional networks and „smart grids” table 1 is presented.

Table 1. Comparison of existing networks and smart grids: tendency [34]

Area	Smart Grid	Traditional Grid
Control	Digital, ubiquitous	Analog, limited
Communication	Two-way	One-way
Power Generation	Distributed	Centralized
Architecture	Web	Hierarchical
Sensors	Common	Few
Transparency	Self-monitoring	Opaque
Structure	Self-maintainable	Manual
Disaster recovery activities, failures	Adaptability, formation of islanding structures	Susceptible to disturbances
Control testing	Remote	Manual
Selection by user	Many choices	Few

It has to be mentioned that the synchronization requirements depend on different factors. These include: the type of the application, synchronization time, faults, transients and failures resistance, recovery time and ability to fulfill automatic synchronizing conditions. The synchronization can be considered not only in pure synchronization terms, but also in terms of active and reactive power regulations, frequency and voltage variations and fault ride through. A comparison of some example requirements for several countries can be seen in the Table 2.

Table 2. Comparison of different TSO requirements [31]

	Poland	Germany	Denmark	Norway
Voltage dip recovery time	600 ms	150 ms	100 ms	250 ms
Frequency variation	49.5 to 50.5Hz	49 to 50.5Hz	48.5 to 51Hz	47.5 to 52 Hz
Reactive power compensation	$\cos\phi=0.95$	Q/P = 0.45 or 0.3	Q/P = 0.1 or -0.1	$\cos\phi=0.90$
Active Power Ramp Rate range	1 min with 30% power decrease up to $P<20\%P_n$	At least 10% of Grid capacity per 1 min	20-100% with Accuracy of 5% (5 min. Average)	-

Analyzing regulations shown in Table 2, it is possible to find that Polish demands has the longest FRT time. For a voltage dip, the maximal time before beginning of the recovery voltage is 600ms in Polish grid codes, while in Denmark it is 100ms, in Germany - 150ms and in Norway - 250ms. The time before which a voltage recovering process should finish respectively is in Poland - 3s, in Germany - 1.5s, in Denmark - 2s and in Norway only 0.75s. After this time line voltage should reach in Poland - 80% in Germany and Norway - 90% and in Denmark only 75% nominal voltage.

When comparing the grid code standards for different countries it is easy to see that they are significantly diverse. In most of the cases the dissimilarities are present for almost all of the operational requirements in the power system. This is due to different levels of development of each country power grids.

Polish grid codes and their cooperating infrastructure are technically backwarded. As an example the fact of having the requirement of voltage dip recovery time for Wind Power Plants has the lowest range (600 ms). The same applies for reactive power compensation requirement. Wind plants are turned off by deviation above 0.5Hz, while in the UK have to work in the frequency range (47.5-52)Hz, in Denmark (48.5-51)Hz and in Germany (49-50.5)Hz.

Possession of a small amount of reserve power plants results in an obligation of having and maintaining the high rates of power coefficient at a level above 0.95. As a consequence the reactive power is delivered particularly by the main power grid stations instead of coming from distributed power plants. Non-application of stringent demands on individual generation energy systems and not stimulating the reactive power production capacity in terms of distributed power, results in stopping the development of an intelligent network infrastructure. This means putting greater demands requirements on transmission system operator.

To unify different demands of various TSO a project of the master document governing those requirements is being created [40]. The European Network of Transmission System Operators is community and organization responsible for the proposed parent document - Network Code for Requirements for Grid Connection.

The development of the ENTSO-E codes is a colossal step towards building modern “smart grids” concepts in reality. As a compromise between the interests of national transmission system operators and up-to-date trends in design and development of power grids with distributed energy sources. Implementation of this document with a practical realization of the “smart grids” concepts is crucial step for future development of the networks. It will ensure the flow of the newest energy technologies. As it can be noticed, the growth the energy network tends to go into so-called “prosumant” direction. This will result in having more small energy producers in the network. To ensure right utilization of the latest technology trends appropriate synchronizing algorithms should be selected, depending on the several factors.

## 2. Applications of synchronization algorithms

The Distributed Generation Systems (DGS), consisting of RES and other power generating methods, are usually equipped with power electronic devices. Their purpose is to transfer the produced energy to the grid with fulfillment of the TSO requirements. This means that the power electronics used in each of the technologies has to be synchronized with the grid voltage. Power converters are also used as grid conditioners. This is done by using Flexible AC Transmission Systems (FACTS), protective power systems (i.e. Dynamic Voltage Restorer, Active Power Filters etc.). Another type of converters working with the grid synchronization are load devices. Utilizing so many, such diverse power electronics technologies in power grid leads to having many different synchronizing algorithms. The synchronization algorithms are used in variety of power applications. [15]:

- In terms of current control: reactive power and harmonics compensation [39]
- Support for “smart grid” management – fault ride through, carrying out the connection and disconnection process of network elements, islanding detection
- Grid monitoring – fault detection by frequency/angle determination, power factor estimation
- Reactive and active power regulation
- Dips and flicker compensation, voltage regulation
- In terms of RES integration in power systems – photovoltaic plants, wind power plants, wave energy plants etc.
- Different kinds of loads integration - AC loads with frequency converters, DC loads working with DC/AC converters

In this article different kinds of synchronizing algorithms are classified and presented. This is based on existing classifications, extended to a broader A set of evaluation features is presented.

### 3. Synchronization algorithms classification

There are many methods to synchronize with the grid. For power electronics this variety results also in volume. Until recently, the synchronization algorithms lacked classification. One of the possible means to classify the synchronization methods was described in [15]. It presents plain division based on reference frame coordinates in which algorithms operate. The classification focuses only on three-phase applications aimed for digital implementation on DSP platform. The idea is presented on Figure 2.

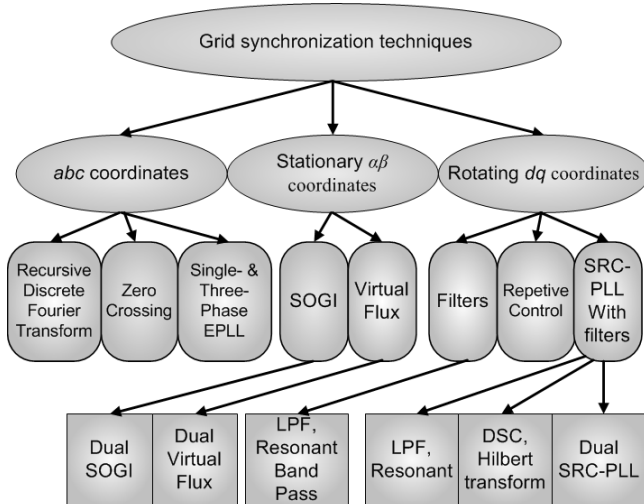


Fig. 2. Classification of synchronizing techniques according to [15]

This type of defining the kinds of synchronizing algorithms is a transparent and easy to understand way, but it limits the ability to show the full picture. As it was described in section one and section two, the operation modes of power electronics converters cover a wide range of different kinds of applications and functions. This necessitates, at first a detailed and comprehensive classification of the methods, and at second providing a set of appropriate quality/evaluation criteria. For this purpose, the following classification of synchronization algorithms is proposed. A general scheme is presented on Figure 3.

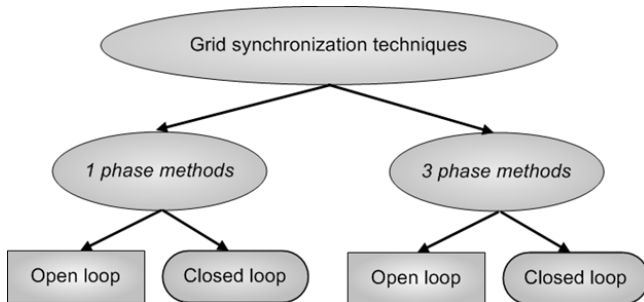


Fig. 3. The proposed general classification of synchronization algorithms

The methods are divided into two groups – utilized for 1 phase applications and 3 phase applications. Those are further subdivided into operating in an open loop manner and into a closed loop manner. Each of those groups is presented on following figures. The classification is divided into several drawings due to the fact of having a multitude of algorithms types.

Figure 4 illustrates the classification of synchronization algorithms for one phase utilization. For the open loop a method based on zero crossing detection is specified. The zero-crossing method detects the transition of a signal waveform from negative and positive, and vice versa, providing a narrow pulse that connected with the zero voltage condition. This method [13] is one of the first and basic method designed for synchronization.

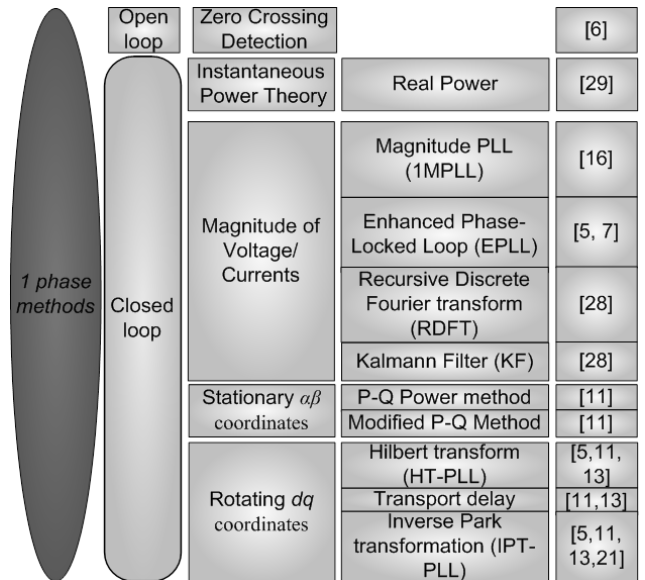


Fig. 4. Illustration of 1 phase subgroup of synchronization algorithms

The disadvantage of the zero crossing method is its sensitivity to any voltage distortion [13]. The closed loop section is divided into subsections taking into account the reference frame in which algorithms operates, like it is presented in Figure 2. The algorithms use different kinds of transformations techniques (Fourier transform, Hilbert transform, inverse Park transform) [6, 8, 35]. The RDFT method implements a band-pass filter and transform function to the frequency domain and vice versa [21]. The drawback in this case is high dependency on fundamental frequency, which implies low resistance to frequency variation.

The synchronization methods for the open loop operation in a three phase system are summarized in the Figure 5.

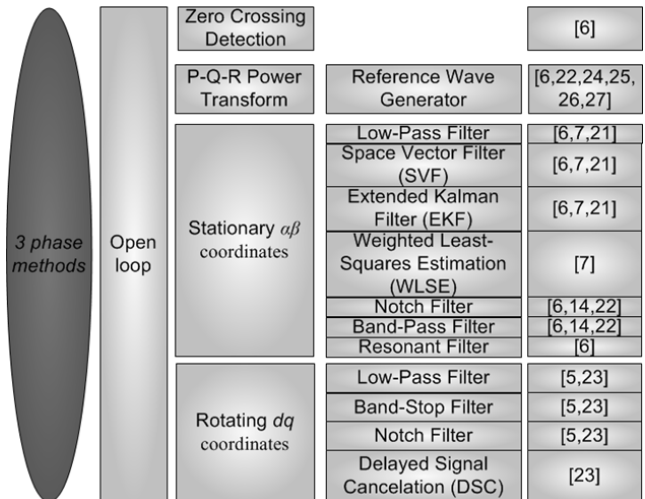


Fig. 5. Illustration of 3 phase for open loop operation subgroup of synchronization algorithms

As in single phase systems the basic algorithm is the zero crossing detection is the basic one. The rest of the algorithms are operating either in stationary or rotating coordinates or are based on P-Q-R transformation. The main drawback of the algorithms operating in rotating reference frame is their vulnerability to distortion of the grid voltage. This distortion propagates to the algorithms causing imprecise angle estimation. This usually solved by adding appropriate filtering technique (like LPF, Band-stop filter etc.) [6, 36]. Similar efforts are used in systems based on stationary reference frame [4, 13, 24, 33, 38]. Different filtering techniques perform with various dynamics responses and can introduce phase shifts.



In three phase system synchronization methods based on closed loop operation are shown in Figure 6 and Figure 7.

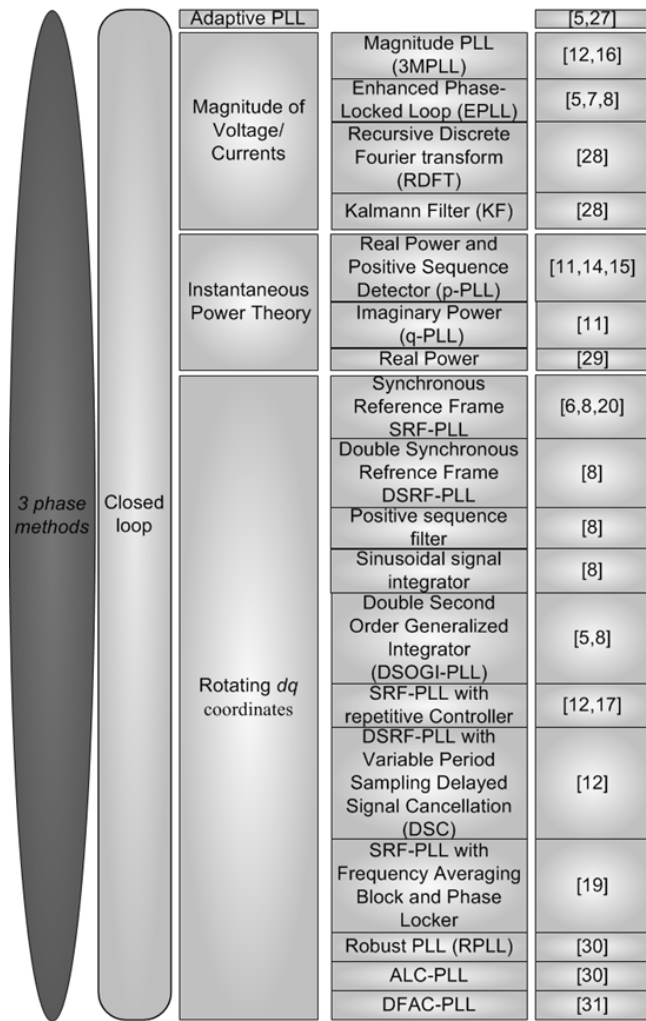


Fig. 6. Illustration of 3 phase for closed loop operation subgroup of synchronization algorithms PART I

The classification on Figure 6 is based on putting the synchronization method into four subgroups: Adaptive PLL, Magnitude of Voltages/Currents, Instantaneous Power Theory and Rotating dq coordinates. The Magnitude of Voltages/Currents are just methods adapted from one phase utilization with all their advantage and disadvantages.

The adaptive PLL utilizes three control blocks which individually manage the frequency, phase angle and voltage magnitude. The main drawback of this scheme is the large algorithm (3x3 controllers) – which results in high computational load.

The synchronizing algorithms based on instantaneous power theory can be explained by the example of p-PLL where the input signal of the PLL system is the measured single-phase voltage which is assumed to be equal to the coordinate alpha coordinate of stationary reference frame. The beta coordinate is obtained by introducing a phase delay of pi/2 of the alpha component. The operation principle is to cancel the dc component p' of the fictitious instantaneous power [35].

Algorithms placed in the rotating dq reference frame use the reference frame property as their working principle. This property, thanks to mathematical signal transformation, allows to transform the voltage signals for natural reference frame to synchronous reference frame, where when having ideal conditions the three-phase sinusoidal voltages become two DC signals. This feature allows using the PI controller for estimating the grid voltage phase angle.

One of the good examples of the working synchronization algorithms is the Double Synchronous Reference Frame Phase Locked Loop (DSRF-PLL) method [16]. It is based on transforming the positive and negative sequence components of the grid voltage into the a synchronous frame, separate for each of the sequences. Both of the reference frames are decoupled from each other by means of decoupling network. This allows for elimination of the detection errors of the conventional SRF-PLL. The uniqueness of the proposed decoupling network is due to the ability of canceling out the double frequency oscillations, and as a result there is no need to reduce the algorithm bandwidth. The accuracy in estimating the positive sequence component is superior compared to the conventional SRF-PLL. This method is very suitable for the control of grid-interfaced converters operating in the severe frequency disturbances and grid unbalanced conditions.

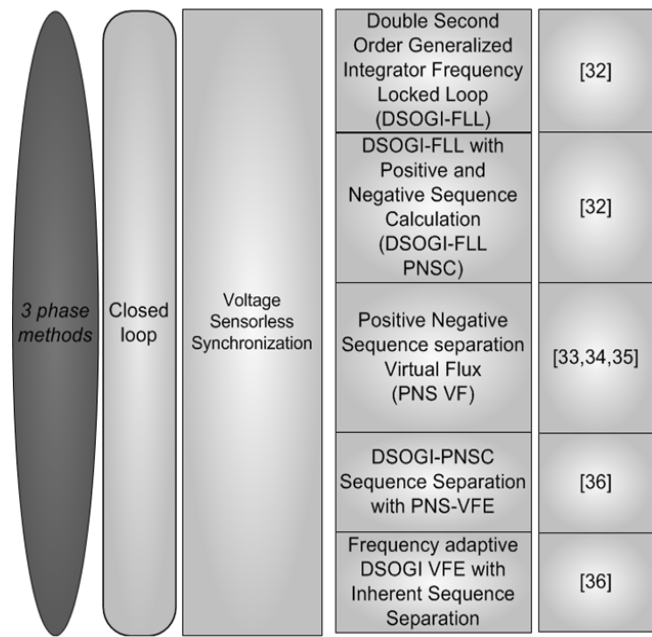


Fig. 7. Illustration of 3 phase for closed loop operation subgroup of synchronization algorithms PART II

Figure 7 illustrates the synchronization methods operating in closed loop for three phase systems based on voltage sensor less synchronization based on virtual flux estimation, as well as based on double second order generalized integrators.

The DSOGI-PLL [9] algorithm is operating in stationary reference frame and it uses the SOGI integrator for frequency-adaptive positive-sequence detection. The use of those integrator results in good performance in filtering the distortions [9].

The concept of the Virtual Flux is based on the assumption that the voltage flux of the grid voltage can be found by the means of estimation, where the voltage sensors are eliminated [37]. There are a couple of aspects that should be addressed for practical implementation of Virtual Flux estimation. Taking into account the switching characteristics of the voltage source converter when estimating the converter output voltage, if accurate estimation of the Virtual Flux should be achieved.

One of the disadvantages of incorporation the virtual flux into synchronization algorithm is the slower response in time domain. This is due to the LPF usage for elimination of the DC offset, which appears when a pure integrator for estimation VF is used. This also should be avoided.

Different kinds of method in upgrading the Virtual Flux method resulted in different kinds of algorithms. Namely Positive and Negative sequence separation (PNS), combination of DSOGI with positive and negative sequence calculation and PNS-VFE, DSOGI VFE with inherent sequence separation [1, 2, 9, 19, 37].

#### 4. Quality criteria for the evaluation of synchronization algorithms

Having so many different kinds of synchronization algorithms it could be difficult to choose appropriate solution. The suitable choice strongly depends on the application and specific requirements. Those can be specified by the application type or by TSO. As stated in [15] no simple criteria have been set yet, to compare the performance of the synchronization algorithms. The basic need for the methods, meaning the ability to estimate the amplitude, phase and frequency of the input signal in a precise manner, even under distortions, disturbances, sounds like a fundamental must.

In some of the papers a so-called “good practice” for defining requirements for synchronization algorithms is presented [9, 12]. Those are namely, estimations of the fundamental positive or negative sequences (used in the flexible power control of grid-interfaced converters for distributed power generation and active power filters) under grid disturbances and distortions.

The need for a selection guide is clear. Taking this into consideration a set of quality criteria parameters is required. With appropriate indicators to assess all of the methods it would be easy to create the selection guide. A set of such quality criteria parameters is proposed on Figure 8.

Quality criteria parameter				
	Synchronization criteria	Computation criteria	Design criteria	
	Normal operation	Bandwidth	Computational load	Noise immunity
Frequency estimation accuracy (0-1)		Application		
Frequency adaptive operation		Order of signals processed in cascade	Single phase utilization	
High frequency characteristics		State variables/integrations [36]	Protection modes	
Phase-angle jump Settling time		Multiplications/scaling operations	Required additional features	
Phase-angle jump Overshoot		Additions/subtractions	Method of realization	
Phase frequency jump Settling time		Total number of signals and variables	THD of sinus of phase angle (%) [4]	
Phase frequency jump Overshoot		Transient response		
				Operation under distortion

Fig. 8. A set of quality/evaluation criteria for synchronization methods assessment

Method of the synchronization algorithms evaluation is based on three basic quality criteria parameters groups. The criteria parameters are divided into three subsets:

- synchronization criteria,
- computation criteria,
- design criteria.

The design criteria take into account features such as application, noise immunity, single phase utilization, algorithms protection modes, required additional features (signal filtering etc.), methods of realization (analog, digital) and proposed in [15] THD level of a sinus of estimated phase angle. This quality set purpose is to assess the design of a method.

The computation criteria focus on total number of signals and variables, number of addition/subtractions and multiplications/scaling operations, transient response, state variable/integrations [36], computational load and order of signals processed in a cascade. These criteria set purpose is to assess the performance of the algorithm.

The synchronization criteria set draws attention to the core of the synchronization purpose. It validates properties such as method bandwidth, frequency estimation accuracy, frequency adaptive operation, high frequency characteristics, phase-angle jump settling time and overshoot and phase frequency jump and overshoot. It focuses on how good the synchronization algorithm is.

All of those evaluation properties are taken into account in two cases: normal operation and operation under distortions. The operation under distortions meaning ability to perform under:

- voltage sags and dips,
- frequency variations,
- flicker occurrence,
- harmonics occurrence,
- short supply interrupts – recovery time,
- short circuits.

#### 5. Machine learning techniques

When facing the idea of having “smart grid” future infrastructure can lead to the conclusion that there are still many things to do. Having a transmission network where flexible and reliable transmission capabilities can be realized by the advanced FACTS systems, where the RES sources are fully integrated by the means of smart substations with advanced control interfaces and power electronics devices, where the micro grids are fully integrated by the same means, where the number of nonlinear loads with variable speed drives is increasing, the power electronics usage will rise in a tremendous manner. All of those devices need proper grid synchronization algorithms. All of the can encounter different kinds of distortions caused by harmonics, voltage sags or swells, commutation notches, noise, and phase-angle jump and frequency deviations.

This lead to a conclusion that not only a detailed classification of synchronization algorithms is needed. Not only the classification with quality criteria for the evaluation of the methods, which leads to having a choice guide. One of the main challenges is to utilize all of the power electronics devices in terms of synchronization in a whole smart grid system.

Here advanced synchronization algorithms should be used. One of the way is to employ experts system, fuzzy logic algorithms, genetic algorithms or artificial neural networks [17].

Such idea is incorporated in [29] where an adaptive linear neural network (ADALINE) algorithm is used. This method is used to estimate the time-varying magnitudes and phases of the fundamental and harmonics from a distorted waveform. The uses of neural networks in combination with a standard PLL technique results in a robust and well performing synchronization algorithm, which is bale to govern the grid angle estimation under different disturbances.

#### 6. Conclusions

The author believes that the electrical power systems are under a transition to the smart grid concept. This is being achieved by the means in power electronics technology wide utilization, modern control usage and newest communication technologies incorporation. In the smart grids the components including power electronic converter are widely utilized - FACTS, grid interconnectors, RES integrators and so on. Thus, the accurate grid synchronization of those devices is a important issue for the modern grid concepts. Accurate - meaning fast, robust, fault and distortion resistant.

Nowadays there is no common practice in terms of choosing appropriate synchronization algorithms for power converters. The choice of the synchronization method should be determined by TSO requirements, application and type of grid.

One of the main criteria in the selection of an appropriate algorithm is the frequency estimation accuracy. The second would be the transient response (the speed of the method) and the ability to work under distortions explained in previous section. The most popular algorithm are SRF-PLL, DDSRF-PLL, DSOGI-PLL. The last two are performing well under the distortions.

Stable operation of the power electronic converters is a critical issue for intelligent networks. This is due to the fact that they are the fundamental building blocks for the smart grid infrastructure.

## Literature

- [1] Abrishamifar A., Abiri E., Rahmati A.: A sensorless and simple controller for VSC based HVDC system. In Journal of Zhejiang University: Science A, Vol. 10, No. 12, December 2009, pp. 1824-1834.
- [2] Abrishamifar A., Abiri E., Rahmati A.: Direct Power Control of an HVDC system based on VSCs. In Proceedings of the IEEE International Conference on Information Technology, Mumbai, India, 15-17 December 2006, pp. 2984-2989.
- [3] Arruda L. N., Diniz A. S., Filho B. J., Silva S. M., Silva S. R.: Wide bandwidth single and three-phase PLL structures for grid-tied PV systems. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference 02/2000.
- [4] Arruda L. N., Filho B. J., Silva S.: PLL Structures for Utility Connected Systems. Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference, 2001 IEEE.
- [5] Benysek G., Kaźmierkowski M.P., Popczyk J., Strzelecki R.: Power electronic system as a crucial part of Smart Grid infrastructure – a survey. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, Vol. 59, No. 4, 2011.
- [6] Blaabjerg F., Candela I., Liserre M., Rodríguez P., Teodorescu R., Timbus A.V.: New Positive sequence Voltage Detector for Grid Synchronization of Power Converters under Faulty Grid Conditions. Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. IEEE.
- [7] Blaabjerg F., Choi J., Jensen B. B., Kim H., Instantaneous Power Compensation in Three-Phase Systems by Using p-q-r Theory, IEEE Trans. On Power Electronics, vol.17, No.5, pp. 701-710, September.
- [8] Blaabjerg F., Ciobotaru M., Teodorescu R.: Improved PLL structures for single-phase grid inverters. Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 2010.
- [9] Blaabjerg F., Ciobotaru M., Luna A., Rodríguez P., Teodorescu R.: Advanced Grid Synchronization System for Power Converters under Unbalanced and Distorted Operating Conditions. In Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2006, Paris, France, 6-10 November 2006, pp. 5173-5178.
- [10] Blaabjerg F., Jensen B. B., Kim H.: Spectral analysis of instantaneous powers in single-phase and three-phase systems with use of p-q-r theory. IEEE Trans. Power Electronics, vol. 17, no. 5, pp. 711-720, Sept. 2002.
- [11] Blaabjerg F., Lee K.-B.: A Simple Sensorless Scheme for Induction Motor Drives Fed by a Matrix Converter Using Constant Air-Gap Flux and PQR Transformation. International Journal of Control, Automation, and Systems, Vol. 5, no. 6, pp. 652-662, 2007.
- [12] Blaabjerg F., Liserre M., Rodríguez P., Teodorescu R., Timbus A.V.: PLL Algorithm for Power Generation Systems Robust to Grid Voltage Faults. Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE.
- [13] Blaabjerg F., Liserre M., Teodorescu R., Timbus A.V.: Synchronization Methods for Three Phase Distributed Power Generation Systems. An Overview and Evaluation. Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC '05. IEEE 36th 16-16 June 2005.
- [14] Boaventura W. C., Campna R. P., Filho B. J., Lopes B. M., Silva S. M.: Performance evaluation of PLL algorithms for single-phase grid-connected systems. Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. IEEE, Vol. 4.
- [15] Bobrowska-Rafał M., Jasiński M., Kaźmierkowski M.P., Rafał K.: Grid synchronization and symmetrical components extraction with PLL algorithm for grid connected power electronic converters – a review. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, Vol. 59, No. 4, 2011.
- [16] Bojoi R., Limongi L. R., Pica C., Profumo F., Tenconi A.: Analysis and Comparison of Phase Locked Loop Techniques for Grid Utility Applications. Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07.
- [17] Bose B.K.: Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. Academic Press, 2010.
- [18] Chung S. K.: About design of Closed-Loop 3-phase PLL - A Phase Tracking System for Three Phase Utility Interface Inverters. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 15, NO. 3, MAY 2000.
- [19] Cichowlas M., Kaźmierkowski M. P., Malinowski M., Marques G.: New Direct Power Control of Three-Phase PWM Boost Rectifiers under Distorted and Imbalanced Line Voltage Conditions. In Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2003, Rio de Janeiro, Brazil, 9-11 June 2003, Vol. 1, pp. 438-443.
- [20] Coelho E., Novochadlo R., Silva S. A.: PLL Structures for Utility Connected Systems under Distorted Utility Conditions. IEEE Industrial Electronics, IECON 2006.
- [21] Deckmann S.M., Marafao F. P., Sperando G. S., Padue M. S.: Comparative analysis of Synchronization Algorithms based on PLL, RDFT and Kalman Filter. ISIE 2007, pp. 964-970, June 2007.
- [22] Dianguo X., Weiwei L., Xueguang Z.: A novel PLL design method applied to grid fault condition. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2008. APEC 2008. Twenty-Third Annual IEEE.
- [23] Finney S.J., Salamah A.M., Williams B.W.: Three-phase phase-lock loop for distorted utilities. IET Electric Power Applications, Volume 1, Issue 6, November 2007, pp. 937 – 945.
- [24] Ghartemani M., Iravani M. R.: A method for synchronization of power electronic converters in polluted and variable-frequency environments. IEEE Transactions on Power Systems, Issue 3, Vol. 19, 2004.
- [25] Ghartemani M.: A novel three-phase magnitude-phase-locked loop system. IEEE Transactions on Volume:53 , Issue: 8 , 2006.
- [26] Golestan S., Guerrero J. G., Freijedo F., Monfared M.: Design and Tuning of a Modified Power-Based PLL for Single phase grid-connected power Conditioning Systems. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, Issue 8, Aug 2012.
- [27] Gomes C., Mussa S. A., Petry C. A.: Digital Control Based on DPLL of an AC Line Conditioner. Power Electronics Specialists Conference, PESC 2008.
- [28] Gu H. R., Guo X. Q., Wu W. Y.: Phase Locked loop and synchronization methods for grid-interfaced converters: a review. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 87 Nr 4/2011.
- [29] Han Y.: On Using ADALINE Algorithm for Harmonic Estimation and Phase-Synchronization for the Grid-Connected Converters in Smart Grid Applications. 2013 Han, license InTech.
- [30] Hsieh G.-C., Hung J. C.: Phase-Locked Loop Techniques-A Survey. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 43, Issue 6, 1996.
- [31] Jarzyna W., Lipnicki P.: The Comparison of Polish Grid Codes to Certain European Standards and Resultant Differences for WPP Requirements. EPE JOINT WIND ENERGY AND T&D CHAPTERS SEMINAR, JUNE 2012.
- [32] Jovic D.: Phase Locked Loop System for FACTS. IEEE Trans. On Power Systems, vol. 18, no. 3, pp. 1116.1124, 2003.
- [33] Kim H., Lee S.-J., Sul S.-K.: Reference Wave Generator in Dynamic Voltage Restorers by use of PQR Power Theory. Proc. Of APEC'04, vol. 3, pp. 1452.1457, 2004.
- [34] Malko J.: SMART W ENERGETYCE – MODA CZY KONIECZNOŚĆ? Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), R. 87 Nr 6/2011.
- [35] Modesto R. A., Novochadlo R., Silva S.: Single-phase PLL structure using modified p-q theory for utility connected systems. Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE.
- [36] Saccomando G., Svensson J.: Transient Operation of Grid connected Voltage Source Converter Under Unbalanced Voltage Conditions. Proc. of IAS'01, vol. 4, pp. 2419.2424, 2001.
- [37] Suul J.A.: Control of grid Integrated Voltage Source Converters under Unbalanced Conditions. PhD Thesis, Trondheim, March 2012.
- [38] Svensson J.: Synchronization methods for grid-connected voltage source converters. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proc. Vol. 148, Issue 3, pp. 229-235, 2000.
- [39] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej – IRiESP, PSE Operator, 1-10-2011.
- [40] ENTSO-E Draft Network Code for Requirements for Grid Connection applicable to all Generators, European Network of Transmission System Operators for Electricity, 24 January 2012 <http://www.entsoe.eu>.

**M.Sc., Eng. Piotr Lipnicki**  
e-mail: Piotr.Lipnicki86@gmail.com



Received M.S. degrees in electrical engineering from the Aalborg University, and Lublin University of Technology in 2010, and 2010 respectively. He is a PhD Student of Lublin University of Technology. He dealt with the issue of reactive power compensation for wind farms. He worked on the issue of control voltage converters connected in parallel. Interested in the issue of intelligent network "smart grids", in the doctoral thesis deals with algorithms for synchronization of power converters to the network.

otrzymano/received: 22.04.2013

przyjęto do druku/accepted: 23.06.2013

## MONITORING GPS

**Marcin Bigoraj, Kamil Kaźmierak, Mateusz Krupa, Ewelina Narejko, Rafał Pytka**

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki

**Streszczenie.** Artykuł opisuje budowę i działanie aplikacji monitorującej położenie urządzenia mobilnego w terenie wykorzystując wbudowany moduł GPS. Opisuje sposób prezentacji zebranych danych przy pomocy dedykowanej aplikacji webowej oraz obrazuje jej możliwości.

**Słowa kluczowe:** GPS, monitoring, śledzenie, Android, ASP.NET, Google Maps API, Comarch ERP

### GPS MONITORING

**Abstract.** The article describes construction and performance of mobile application monitoring position of the mobile device using the built-in GPS. Describes the presentation of the collected data using dedicated web application and demonstrates its capabilities.

**Keywords:** GPS, monitoring, tracking, Android, ASP.NET, Google Maps API, Comarch ERP

### Wstęp

Dynamiczny rozwój technologii w XXI wieku dotknął każdej sfery życia ludzkiego. Bez względu na czas i miejsce, nie istnieją ograniczenia w przemieszczaniu się i komunikacji międzyludzkiej. Zjawiska te w szczególności sposób odbiły się na biznesie, gdzie pracownik przebywający poza biurem nie jest obecnie zdany na samego siebie, ma nieograniczony dostęp do informacji jak i kontakt z centralą firmy.

Niestety zwierzchnik nie zawsze może pozwolić sobie na pełną kontrolę pracowników przemieszczających się po dużym obszarze. Im jest ich więcej, tym posiada mniejszą kontrolę nad ich poczynaniami. O ile sprawniejsza byłaby ich praca, gdyby miał możliwość sprawdzić położenie wszystkich pracowników jednocześnie, za pomocą jednego narzędzia. Ile łatwiejsze stałoby się rozstrzygnięcie kwestii spornych, jeżeli istniałby niemożliwy do podważenia zbiór danych, zawierający dokładną lokalizację i czas pobytu podwładnych, odtwarzający ich trasy sprzed wielu miesięcy czy lat, której koszty nie wiązałyby się z ilością monitorowanych pracowników.

### 1. Idea działania systemu

Zaimplementowany przez nas system ma na celu umożliwienie pracodawcy monitoringu pracowników działających w terenie. W związku z naporem nowych technologii i wciąż rosnącym zainteresowaniem dotyczącym urządzeń mobilnych, to właśnie na nich został oparty projekt systemu.

Aktualnie najpopularniejszym systemem operacyjnym na smartphony i tablety jest platforma Android. W ciągu kilku lat znacząco opanowała rynek telefonii komórkowej, oferując swoim użytkownikom bogaty zestaw aplikacji dostępnych w sklepie Google Play oraz zestaw darmowych narzędzi programowania dla ich twórców.

Rozwój technologii i powszechnej miniaturyzacji od wielu lat wpływa na skupianie wielu elementów funkcjonalnych w jednym urządzeniu. Dzisiejszy telefon nie służy jedynie do wykonywania połączeń, czy pisania krótkich wiadomości SMS. Został on zaopatrzony m. in. w akcelerometr, mechanizmy umożliwiające połączenie z siecią Internet czy moduł GPS. Na bazie dwóch ostatnich modułów w prosty sposób można zaimplementować część mobilną systemu [3].

Podążając ideą mobilności stwierdziliśmy, iż pracodawca również nie powinien być skazany na przebywanie w biurze, aby móc monitorować pracę podwładnych. Dlatego obserwację pracowników i ich położenia zaimplementowano w postaci aplikacji webowej, dostępnej z poziomu przeglądarki internetowej. Aby sprostać wymaganiom klientów biznesowych została ona zaimplementowana przy użyciu technologii ASP.NET.

### 2. Zapisywanie lokalizacji

Zapis danych na urządzeniu mobilnym powinien funkcjonować bez znaczącej ingerencji użytkownika. W tym celu został zaimplementowany serwis czytający położenie i zapisujący je do lokalnej bazy danych. Takie rozwiązanie nie posiada interfejsu użytkownika, a samo zainicjowanie czy zakończenie zapisu trasy jest tożsame z włączeniem i wyłączeniem odbiornika GPS w telefonie komórkowym. Dzięki mechanizmowi zapisu do lokalnej bazy danych gwarantujemy poprawne funkcjonowanie aplikacji zarówno online jak i offline.

Usługa startowana jest w momencie pierwszego uruchomienia aplikacji, a w przypadku wyłączenia telefonu, po jego ponownym włączeniu. Działa więc przez cały czas, gdy telefon jest aktywny i w każdym momencie możliwy jest odbiór nowych danych. Dzięki takiemu rozwiązaniu użytkownik nie musi pamiętać o każdorazowym włączeniu aplikacji.

W celu aktualizacji położenia użytkownika, serwis implementuje interfejs `LocationListener`. Jedną z metod, których dostarcza, jest `onLocationChanged()`, wywoływana w przypadku uzyskania nowych współrzędnych z modułu GPS. Właśnie wtedy zapisywane są nowe informacje. Ważny element stanowi dobór odpowiednich parametrów zapisu trasy (czasu i odległości między kolejnymi odbieranymi punktami). Konieczne jest znalezienie kompromisu między dokładnością rejestracji trasy, a korzyściami wynikającymi z oszczędzania baterii urządzenia mobilnego. W trakcie testów ustaliliśmy następujące wartości: odległość 150 metrów, czas 15 sekund.



Rys. 1. Powiadomienie o konieczności włączenia modułu GPS



Dodaliśmy również powiadomienie o konieczności włączenia modułu GPS (rys. 1). Użytkownik samodzielnie może zdecydować czy powinno być widoczne na pasku statusu systemu Android i ma możliwość jego wyłączenia. Po kliknięciu na zakładkę z przypomnieniem zostaje uruchomiona aktywność lokalizacji i zabezpieczeń systemu Android (rys. 2), gdzie w łatwy sposób można dokonać zmian w ustawieniach i włączyć potrzebne moduły.



Rys. 2. Ustawienia lokalizacji i zabezpieczeń systemu Android

Rodzajem systemu GPS wykorzystywanym w telefonii komórkowej jest A-GPS (ang. Assisted GPS). W przypadku dostępności systemu u operatora, usługa wykorzystująca infrastrukturę operatorów GPS potrafi ustalić lokalizację urządzenia w ciągu 2-3 sekund. Trzeba wspomnieć, iż pobranie pierwszych współrzędnych geograficznych lub brak dostępności systemu u operatora może wydłużyć ten czas wielokrotnie [1].

Do gromadzenia danych na urządzeniu mobilnym stworzona została tabela zawierająca pola służące do przechowywania długości i szerokości geograficznej, czasu odebrania współrzędnych oraz kolumnę informującą czy dane zostały przesłane na zewnętrzny serwer.

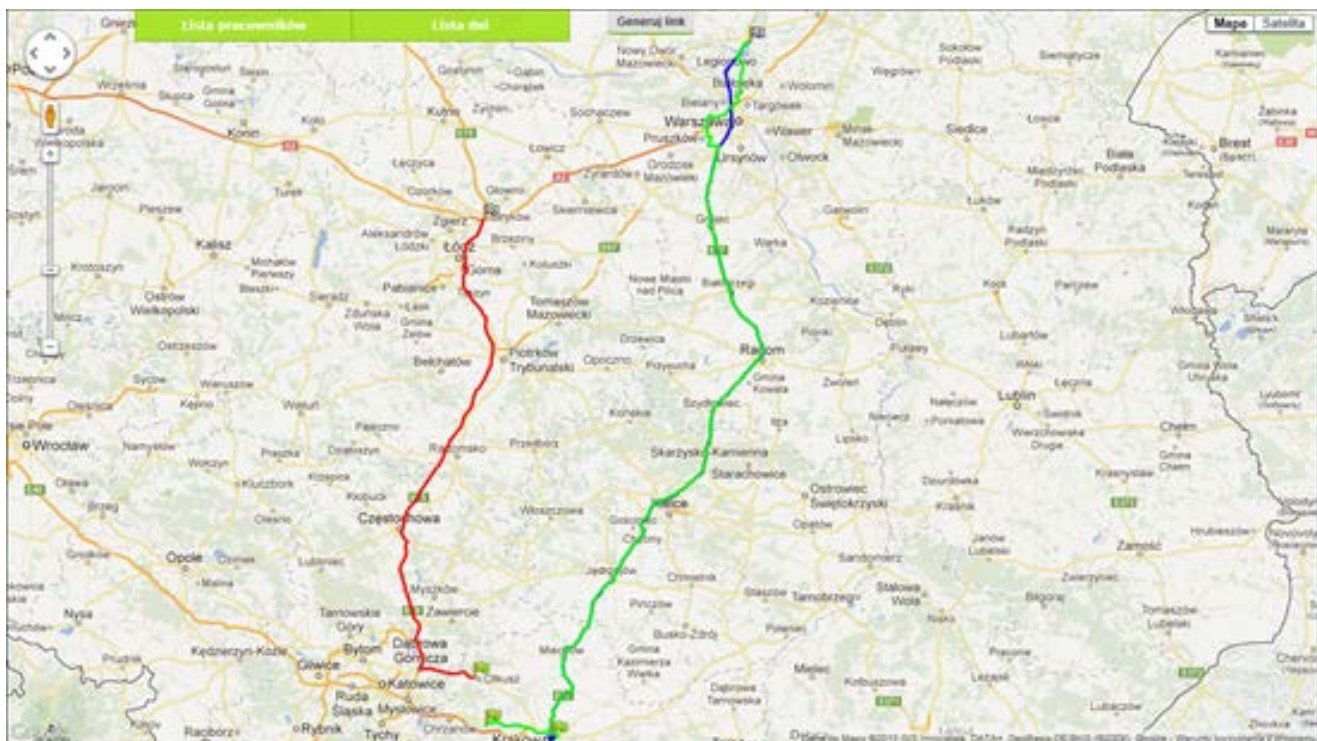
### 3. Synchronizacja danych

Aplikacja implementuje mechanizmy umożliwiające synchronizację i przesyłanie zgromadzonych danych na serwer zewnętrzny. Również w tym przypadku wykorzystaliśmy usługę systemu Android. Serwis startowany jest w momencie wykrycia uzyskania połączenia z Internetem. Tworzone jest nowe zadanie i co 2 minuty następuje próba przesłania nowych współrzędnych, o ile takie istnieją. Ustalenie odpowiedniego czasu pozwoliło oszczędzać baterię urządzenia mobilnego, a jednocześnie zapewnić możliwość podglądu aktualnego położenia użytkowników na stronie WWW.

Zapisane punkty wysyłane są z wykorzystaniem formatu tekstowej wymiany danych JSON. JSON swoją popularność zawdzięcza prostej reprezentacji struktur danych powszechnie stosowanych w wielu językach programowania. Do najczęściej wykorzystywanych formatów danych należą: typy proste, listy oraz wartości składające się z pary klucz-wartość. Format umożliwia przedstawienie danych w sposób naturalny, łatwy do odczytu. Nie wprowadza przy tym nieścisłości w odwzorowaniu między ich wewnętrzną implementacją w języku programowania, a postacią tekstową. Dzięki temu możliwe staje się łatwe przekształcanie łańcuchów znaków zakodowanych formatem JSON do postaci obiektów i odwrotnie [4].

W momencie uruchomienia serwisu usuwane są również dane, które zostały pomyślnie przesłane. Dzięki temu zapobiegamy gromadzeniu nadmiarowych informacji w bazie danych telefonu.

Kiedy system wykryje utratę połączenia z siecią, wówczas usługa jest zatrzymywana. W takiej sytuacji próba wysłania uzyskanych punktów jest bezcelowa, a aplikacja nie zabiera niepotrzebnie zasobów systemu innym uruchomionym procesom.



Rys. 3. Reprezentacja tras zarejestrowanych w czasie jednego dnia

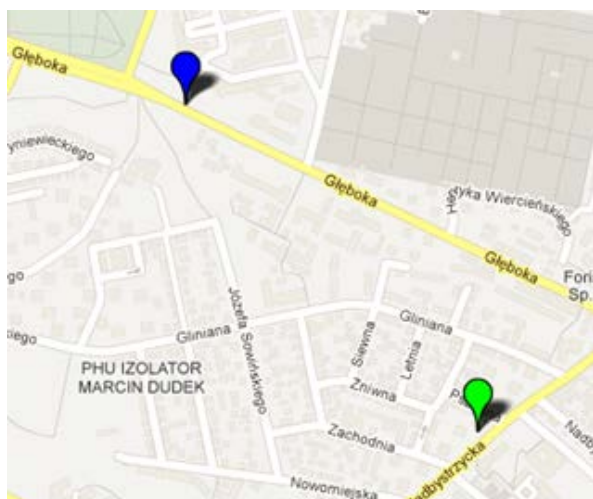
#### 4. Aplikacja webowa

Celem aplikacji internetowej było udostępnienie pracodawcy narzędzia, za pomocą którego miałby możliwość monitorowania swoich pracowników. Tworząc stronę wzorowaliśmy się na sportowej aplikacji Endomondo, której przeznaczenie jest inne, jednak sposób prezentacji tras jest niemalże jednakowy. Chcieliśmy również wyeliminować pewne wady Endomondo oraz dopasować profil naszej aplikacji do klientów biznesowych.

Do dyspozycji pracodawcy została oddana strona internetowa, która nie wymaga przeładowywania, gdyż cała treść jest tworzona i zastępowana dynamicznie. Jest to możliwe, dzięki zastosowaniu technologii AJAX. Podejście to umożliwiło sprawienie wrażenia użytkownika aplikacji internetowej, dostępnej w przeglądarce, zamiast zwykłej strony internetowej. Wyeliminowało też jedną z największych wad Endomondo – konieczność przewijania strony w dół, po wybraniu nowej trasy.

Dzięki zastosowaniu technologii ASP.NET MVC3, będącego implementacją wzorca strukturalnego Model-View-Controller, uzyskaliśmy przejrzystość kodu. Trasy rysowane są w języku JavaScript za pomocą API, udostępnionego przez Google. Wywołanie funkcji rysujących odbywa się w widoku, jednakże odpowiednie dane są wybierane i dostarczane przez kontroler.

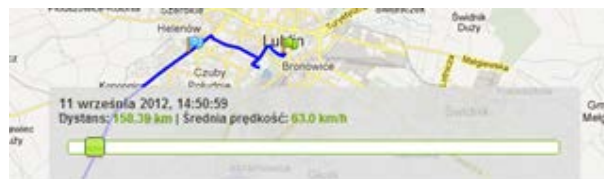
Prawie cały ekran aplikacji stanowi mapa Google. Pierwszy widok, z jakim zetknie się użytkownik, zależy od stanu bazy danych w aktualnym dniu. Jeśli nie zostało zarejestrowane położenie jakiegokolwiek pracownika w obecnym dniu, zostanie wyświetlona mapa Polski. Jednakże, gdy do bazy danych trafi choć jeden punkt z aktualnego dnia, użytkownik ujrzy znacznik na mapie. Liczba znaczników na mapie zależy od liczby pracowników, którzy rozpoczęli już swoje trasy (rys. 4). Pozycje przedstawicieli handlowych są na bieżąco aktualizowane. Zostało to zrealizowane za pomocą żądań AJAX, wykonujących się w tle, co zadany czas (domyślnie 2 sekundy). Każde takie żądanie wysyła do serwera identyfikator pracownika oraz datę ostatniego punktu. Jeśli w bazie danych nie istnieją nowsze punkty, nic się nie stanie. W innym przypadku, zostanie zwrócony widok, zawierający funkcje JavaScript, usuwające stary znacznik i dodające nowy.



Rys. 4. Widok aktualnych pozycji

Pracodawca może także rozwinąć jedną z dwóch list (pracowników oraz dat), dających dostęp do historii. Po kliknięciu na link, znajdujący się na liście dat, zostanie wygenerowany widok, zawierający wszystkie trasy dla wybranego dnia (rys. 3). Trasy poszczególnych pracowników różnią się od siebie kolorem. Jeśli wybrano aktualną datę, trasy będą automatycznie dorysowywane, jak tylko pojawią się nowe punkty w bazie danych. Po kliknięciu na trasę, w miejscu kursora zostanie rozwinięta lista opcji, zawierająca także identyfikator pracownika. Implementując tę funkcję, kierowaliśmy się rozwiązaniami

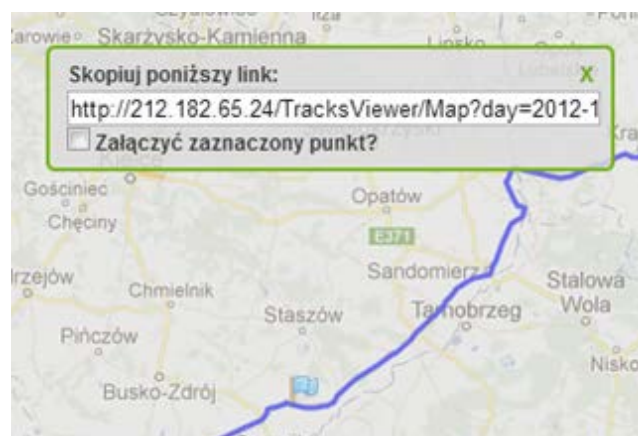
dostępnymi w systemach operacyjnych. Większość użytkowników korzysta z systemów z rodziny Windows, gdzie schowanie listy opcji następuje albo po wybraniu jednej z nich, albo po kliknięciu poza listę, dlatego nie chcieliśmy tworzyć nie intuicyjnych rozwiązań. Jedną z opcji do wyboru jest wyświetlenie pojedynczej trasy. Jest to skrót, gdyż taki sam rezultat można uzyskać po wybraniu przedstawiciela handlowego z listy pracowników, a następnie klikając na odpowiednią datę.



Rys. 5. Belka informacyjna

Widok pojedynczej trasy wprowadza dodatkowe możliwości, a mianowicie belkę informacyjną (rys. 5). Jest to stosunkowo niewielki obszar na dole ekranu, zawierający szczegóły danej trasy. Możliwe jest odczytanie identyfikatora pracownika, przebytego dystansu, średniej prędkości oraz daty pierwszego punktu. W przyszłości, gdy aplikacja zostałaby połączona z systemami firmy Comarch S.A., możliwe jest zastąpienie identyfikatora imieniem i nazwiskiem pracownika, oraz wprowadzenie dodatkowych danych na belce informacyjnej (np. ilości zawartych umów handlowych w danym dniu). Na belce znajduje się także suwak, którego przesuwanie powoduje wyświetlenie się flagi na mapie oraz aktualizację pola daty. Funkcja ta umożliwia dokładne sprawdzenie gdzie znajdował się pracownik w konkretnej godzinie.

Zastosowanie technologii AJAX powoduje, że nie jest możliwe uzyskanie linku prowadzącego do konkretnego widoku. Wszystkie dane aktualizacyjne przesyłane są w tle, co powoduje płynniejsze działanie systemu. Jeśli użytkownik chciałby udostępnić trasę innej osobie lub zapisać link prowadzący do wybranego widoku, stworzyliśmy możliwość wygenerowania takiego adresu URL. Po kliknięciu przycisku „Generuj link” otworzone zostanie okno z odpowiednim adresem (rys. 6).



Rys. 6. Generator linków

#### 5. Google Maps API

Google Maps API jest udostępnionym przez firmę Google interfejsem aplikacji Google Map, czyli nowoczesnego i zaawansowanego serwisu internetowego, który udostępnia oglądanie map i zdjęć lotniczych Ziemi. Dzięki API programiści mogą wykorzystywać stworzone przez firmę Google mapy we własnych aplikacjach. W aplikacji webowej została wykorzystana 3 wersja Maps JavaScript API, która została zapowiedziana podczas konferencji Google I/O w maju 2009 roku.

Praca z wykorzystaniem map na własnej stronie wygląda bardzo dynamicznie, przez co może się wydawać, iż Google Maps



wykorzystuje bardzo złożone technologie. W rzeczywistości wyświetlanie map bazuje na technologiach HTML, CSS i JavaScript, których użycie w danym przypadku sprowadza się do dość prostych działań.

Wyświetlana mapa jest złożona z kwadratowych obrazów, które zostają wyświetlone w tle za pomocą technologii Ajax i wstawione do znaczników <div> języka HTML. Podczas poruszania się po mapie, czyli zmiany aktualnego widoku, API przesyła informacje o nowym położeniu i przybliżeniu mapy, po czym Ajax zwraca i umieszcza na stronie nowe obrazy.

## 6. Perspektywy rozwoju

W celu umożliwienia monitoringu wielu jednostek mobilnych, a tym samym elastycznej rozbudowy istniejącego już systemu, została wprowadzona możliwość identyfikowania urządzenia mobilnego za pomocą indywidualnego numeru identyfikującego. Jego ustawienie może odbyć się w dwojaki sposób:

- programowo, dokonując niewielkich edycji w kodzie serwisu synchronizującego dane z serwerem zewnętrznym przed każdą instalacją oprogramowania;
- dokonując integracji mobilnej części programu z innymi aplikacjami dedykowanymi na urządzenia mobilne z systemem operacyjnym Android.

To drugie podejście otwiera przed systemem ogromne możliwości rozwoju. Wykorzystała je firma Comarch S.A. - właściciel omawianego systemu monitorującego, rozbudowując Comarch ERP Mobilny Sprzedawca poprzez dodanie modułu pobierającego aktualne położenie.

Firma Comarch S.A. jest globalnym dostawcą biznesowych rozwiązań IT [2]. Stworzyła ona zespół aplikacji w znaczącym stopniu ułatwiających zarządzanie przedsiębiorstwem. Dokonując wdrożenia systemu monitorującego i łącząc go z wewnętrznymi bazami danych innych produktów, został stworzony jednolity system usprawniający pracę przedstawicieli handlowych i ich obserwację w terenie [5].



Rys. 7. Comarch ERP Mobilna Flota [5]

## 7. Wnioski

W czasach kiedy odległość przestaje być jakąkolwiek przeszkodą dla współczesnego człowieka, zaś technologie stwarzają wciąż nowsze możliwości aplikacja taka jak monitoring sprawdza się w wielu dziedzinach życia. Zastosowanie jej do monitorowania pracowników, które wdrożyła firma Comarch S.A. w aplikacji Comarch ERP Mobilna Flota, jest jedynie niewielką częścią jej możliwości.

System w łatwy sposób może zostać zaimplementowany w całkiem odmiennych celach jak biznesowych. Może służyć chociażby do monitorowania przez rodziców młodszych dzieci wracających samotnie ze szkoły, transportów ważnych dóbr, osób przebywających pod nadzorem policyjnym.

Oferowane przez aplikację funkcjonalności również mogą podlegać ciągłemu rozwojowi i modyfikacjom. Dzięki

współrzednym geograficznym można określać adres miejsca, w którym znajdował się użytkownik. Moduł GPS potrafi dostarczyć takich informacji jak prędkość chwilowa przemieszczającego się urządzenia, wysokość nad poziomem morza, kierunek w którym się przemieszczamy.

Wszystkie wymienione powyżej elementy stwarzają możliwość implementacji nieograniczonej liczby aplikacji bazujących na omawianym systemie.

## Literatura

- [1] Banaszkiewicz K., Dworak M., Łata K., Repeć G.: Aplikacja mobilna "Przystanek". Informatyka, Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska, 2/2012, s. 5-7.
- [2] comarch.pl
- [3] Hu W.-C., Kaabouch N., Yang H.-J., Sharif A.: Location-Based Services Design and Implementation Using Android Platforms. Midwest Instruction and Computing Symposium, Cedar Falls, IA, USA 2012
- [4] Severance C.: Discovering JavaScript Object Notation. IEEE Computer Society: Computer Magazine, April 2012, p. 6-8
- [5] www.comarch.pl/erp/duze-i-srednie-przedsiębiorstwa/produkty/comarch-erp-rozwiazania-mobilne/

### Inż. Marcin Bigoraj

e-mail: bigoraj.marcin@pollub.edu.pl

Student I roku studiów magisterskich na kierunku Informatyka o specjalności technologie wytwarzania oprogramowania Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.



### Inż. Kamil Kaźmierak

e-mail: kazmierak.kamil@pollub.edu.pl

Student I roku studiów magisterskich na kierunku Informatyka o specjalności technologie wytwarzania oprogramowania Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.



### Inż. Mateusz Krupa

e-mail: krupa.mateusz@pollub.edu.pl

Student I roku studiów magisterskich na kierunku Informatyka o specjalności technologie wytwarzania oprogramowania Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.



### Inż. Ewelina Narejko

e-mail: narejko.ewelina@pollub.edu.pl

Studentka I roku studiów magisterskich na kierunku Informatyka o specjalności technologie wytwarzania oprogramowania Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.



### Inż. Rafał Pytka

e-mail: pytkarafa@pollub.edu.pl

Student I roku studiów magisterskich na kierunku Informatyka o specjalności technologie wytwarzania oprogramowania Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.



# SYSTEM TRÓJWYMIAROWEJ TOMOGRAFII POJEMNOŚCIOWEJ W ZASTOSOWANIU DO WYZNACZANIA UDZIAŁU FAZ ORAZ IDENTYFIKACJI STRUKTUR W PRZEPLYWACH MIESZANIN GAZ-CIECZ

Robert Banasiak<sup>1</sup>, Radosław Wajman<sup>1</sup>, Henryk Fidos<sup>2</sup>, Paweł Fiderek<sup>1</sup>, Tomasz Jaworski<sup>1</sup>,  
Jacek Nowakowski<sup>1</sup>, Dominik Sankowski<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instytut Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej, <sup>2</sup> Katedra Inżynierii Chemicznej Politechniki Łódzkiej

**Streszczenie.** W procesach przemysłowych, w których bezpośrednie monitorowanie jest utrudnione, zastosowanie nieinwazyjnego systemu tomografii pojemnościowej dla identyfikacji struktur przepływów dwufazowych mieszanin gaz-ciecz oraz wyznaczenia udziału faz jest szczególnie ważne. W artykule przedstawiono wyniki badań poświadczonej rozwojowi nowych nieinwazyjnych metod identyfikacji i wizualizacji struktur przepływów dwufazowych. Nowe możliwości, jakie niesie ze sobą zastosowanie komputerowych technik tomograficznych w pomiarach wielkości elektrycznych, wyznaczają dziś standardy w pomiarach dynamicznych. Proponowane rozwiązanie zakłada możliwość zastosowania systemu tomograficznego do pomiaru rozkładu koncentracji poszczególnych frakcji procesu. Opracowane algorytmy pozwoliły na szybką trójwymiarową wizualizację wnętrza rurociągów, w których występują przepływy mieszanin gaz-ciecz, poprzez uzyskanie w krótkim czasie obrazów oraz ich szybką analizę i identyfikację. Taka diagnostyka może być użyteczna w kontekście przemysłowych procesów monitorowania oraz sterowania przepływami mieszanin gaz-ciecz w systemach czasu rzeczywistego.

**Słowa kluczowe:** elektryczna tomografia pojemnościowa, trójwymiarowa wizualizacja, przepływ dwufazowy, mieszaniny gaz-ciecz, udział faz, struktury przepływu

## APPLICATION OF 3D ELECTRICAL CAPACITANCE TOMOGRAPHY FOR PHASE FRACTION DETERMINATION AND STRUCTURES IDENTIFICATION IN TWO-PHASE FLOWS

**Abstract.** In the industrial processes, where the direct monitoring is difficult, the application of the non-invasive electrical capacitance tomography system for the two-phase gas-liquid mixtures flow structures identification and the phase distribution calculation is of great importance. This paper presents the research results of development new non-invasive diagnostic methods. The new possibilities offered by the tomographic techniques applications for the purposes of the electrical quantities measurement, define today the standards of dynamic measurements. The proposed solution involves the possibility of applying the tomographic system to measure the fractions concentration distribution of the flow. The designed algorithms allowed the fast 3D visualization of the pipeline interior through the quick tomographic image reconstruction and their analysis and structure identification. The obtained diagnostic data could be useful in the context of monitor and control of the flow industrial facilities in the real time.

**Keywords:** electrical capacitance tomography, three-dimensional visualization, two-phase flow, gas-liquid mixtures, phase fraction, flow structures

## Wprowadzenie

Badania opisane w artykule odnoszą się do zakończonego projektu naukowo – badawczego, którego celem było opracowanie systemu pomiarowego do identyfikacji struktur oraz wyznaczenia udziału faz przepływu dwufazowego mieszanin gaz-ciecz w oparciu o trójwymiarową tomografię pojemnościową 3D ECT (ang. *three dimensional electrical capacitance tomography*) [6, 9]. Założeniem projektu było zbudowanie urządzenia posiadającego możliwości nieinwazyjnego monitorowania i diagnozowania procesów przepływowych, które znajdują szerokie zastosowania w przemyśle budowlanym, spożywczym, farmaceutycznym, chemicznym, rafineryjnym i wielu innych.

W ramach zrealizowanych prac badawczych dokonano oceny własności metrologicznych prototypowego systemu trójwymiarowej elektrycznej tomografii pojemnościowej w zastosowaniu do nieinwazyjnego wyznaczenia udziału faz oraz identyfikacji struktur w przepływach dwufazowych mieszanin gaz-ciecz, w rurociągach pionowych i poziomych [6, 12]. Istota proponowanego rozwiązania polegała na zastosowaniu nowatorskiej, przestrzennej konstrukcji czujnika pojemnościowego o elektrodach wewnętrznych [4], systemu pomiarowego tomografii pojemnościowej 3D oraz specjalizowanych algorytmów równoległego, szybkiego przetwarzania danych pomiarowych do wizualizacji wnętrza fragmentu przepływu mieszanin gaz-ciecz [1, 5].

## 1. Przepływy mieszanin gaz - ciecz

W procesach przemysłowych, w których jest utrudnione bezpośrednio monitorowanie, zastosowanie tomografii pojemnościowej do identyfikacji przepływów mieszanin gaz-ciecz oraz wyznaczenia udziału faz jest szczególnie ważne. Istnieją przepływy, które przebiegają w nieprzeźroczystych profilach zamkniętych – umieszczenie klasycznych czujników wewnątrz takiej instalacji jest zwykle niemożliwe lub niekorzystnie wpływa na przebieg procesu. Stosowane do tej pory metody określania

struktur przepływów mieszanin gaz-ciecz wymagały wiercenia otworów w ścianach rurociągów, a sposoby obliczania udziału faz wymagały korzystania z technik opartych na błyskawicznym zatrzymywaniu porcji przepływającej mieszaniny (zamykaniu szybkich zaworów usytuowanych na rurociągu) [2, 3, 7].

Przepływy dwufazowe mieszanin gaz-ciecz stanowią istotną część wielu procesów przemysłowych jak chociażby procesy aeracji, które zachodzą w instalacjach przemysłowych reaktorów chemicznych, aparaty do flotacji oraz urządzenia do napowietrzania wody czy ścieków. Zadaniem urządzeń natleniających jest wytworzenie właściwej proporcji pomiędzy cieczą i tlenem. Wprowadzenie gazu do cieczy może również wywoływać cyrkulacje, intensyfikujące proces wymiany masy. Jednym z podstawowych zagadnień jest ocena powierzchni międzyfazowej – parametr ten ma, bowiem bezpośredni wpływ na wymianę ciepła i masy.

Przykładem napowietrzania wody i ścieków mogą być biologiczne oczyszczalnie ścieków. Istotną rolę w tych procesach odgrywają bakterie tlenowe (aerobowe), które rozwijają się tylko w obecności wolnego tlenu z powietrza atmosferycznego lub rozpuszczonego w wodzie, a stopień napowietrzania powinien mieścić się w określonym przedziale, zależnym od temperatury wody. Jednym ze sposobów napowietrzania jest wprowadzenie do układu, sprężonego powietrza i wymuszanie swobodnego przepływu pęcherzyków w górę słupa cieczy. Dwufazowe procesy przepływowe występują również w kolumnach barbotażowych. Ich przeznaczeniem jest realizacja różnych procesów fizykochemicznych. Kontrolując wielkość powierzchni międzyfazowej i udział faz często decyduje się o intensywności przebiegania tych procesów. Dla przykładu w kolumnach typu air-lift oraz ezektorach, ruch cieczy wymuszany jest właśnie strumieniem wprowadzanego gazu. Urządzenia takie powszechnie stosowane są w przemyśle wydobywczym (np. procesy flotacji) lub do wytrącania pewnych frakcji z cieczy w procesach sedymentacji, np. odtłuszczenia, gdzie istotna jest rozmiar 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, w których faza gazowa jest produktem (często ubocznym) reakcji chemicznej. Wówczas pojawianie się pęcherzyków świadczy o jakości zachodzących przemian, a pomiar wielkości pęcherzyków dostarcza informacji o przebiegu procesu. 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 i wymusza sygnalizację stanu awaryjnego. Podobnie jest w przypadku zjawisk kawitacji np. w pompach wirowych. Zjawiska te powodowane są szybkim obniżeniem ciśnienia poniżej wartości, w której rozpoczyna się wrzenie cieczy. Jest to zjawisko niepożądane, ponieważ prowadzi do erozji łopatek pompy. Zjawisko to może też świadczyć o braku szczelności układu.

## 2. Koncepcja systemu pomiarowego 3D ECT

W trakcie realizacji prac badawczych autorzy opracowali i zaimplementowali nieinwazyjny system trójwymiarowej tomografii pojemnościowej, wyposażony w nowy rodzaj przestrzennego czujnika pojemnościowego. W ramach prac autorzy skonstruowali nowy system pomiarowy. To zadanie wymagało:

- zaprojektowania czujnika o przestrzennym rozmieszczeniu elektrod na wewnętrznych ścianach rurociągu;
- opracowania protokołu pomiarowego;
- zastosowania architektury równoległej dla potrzeb szybkiego przetwarzania danych pomiarowych oraz rekonstrukcji i identyfikacji przepływu;
- opracowania i zaimplementowania nowych algorytmów, pozwalających na uzyskanie jakościowo lepszych obrazów tomograficznych 3D, dotyczących:
  - o rekonstrukcji obrazów i kształtów uwzględniających nieliniowy charakter pola elektrycznego;
  - o optymalizacji symulowanego rozkładu wrażliwości we wnętrzu modelu czujnika;
  - o wspomagania nieliniowego procesu rekonstrukcji obrazów 3D;
- opracowania nowych metod pozwalających oceniać i klasyfikować przepływ na podstawie obrazów tomograficznych.

Zaproponowane rozwiązanie umożliwia szybką identyfikację przepływów dwufazowych mieszanin gaz-ciecz w rurociągach. Uzyskane wyniki identyfikacji uwzględniają specyfikę zjawisk fizycznych zachodzących w sekcjach poziomych i pionowych rurociągu. Autorzy zastosowali w swoim systemie szereg nowych rozwiązań, które wymagały opracowania algorytmów przetwarzających dane pomiarowe. W wyniku prowadzonych badań opracowane zostały metody pozwalające na szybką rekonstrukcję dobrej jakości obrazów tomograficznych 3D. Wykorzystano do tego równoległą architekturę obliczeniową łączącą w sobie technologie Nvidia CUDA oraz OpenCL. Opracowana architektura zapewnia zasadniczy wzrost szybkości obliczeń dzięki wykorzystaniu mocy układów procesorów graficznych. Zrekonstruowane obrazy zostały poddane procesowi identyfikacji struktur przepływu mieszanin gaz-ciecz przy pomocy algorytmów klasteryzacji rozmytej.

## 3. Zakres badań naukowych

Prace badawcze ukierunkowane były na zastosowanie systemu pomiarowego tomografii pojemnościowej do wizualizacji i identyfikacji przepływów mieszanin gaz-ciecz ze szczególnym uwzględnieniem:

- oceny metrologicznej przydatności systemu ECT 3D do monitorowania przepływów mieszanin mediów

charakteryzujących się znaczną różnicą wartości względnych stałych elektrycznych, obejmującą:

- o optymalizację struktury czujnika pojemnościowego ECT o przestrzennym rozkładzie elektrod pod względem jego możliwości skanowania procesu przepływu mieszanin gaz-ciecz;
- o metrologiczną ocenę dokładności rekonstrukcji obrazu na bazie danych pomiarowych i symulacji;
- o metrologiczną ocenę identyfikacji struktur przepływu w porównaniu z innymi metodami: metodą szybko-zamykających się zaworów oraz metodą identyfikacji struktury przepływu przy pomocy kamery CCD;
- zbadania możliwości zastosowania akceleracji sprzętowej przy przetwarzaniu danych pomiarowych oraz rekonstrukcji i identyfikacji przepływu;
- opracowanie nowych metod komputerowych pozwalających na uzyskanie lepszych jakościowo tomogramów 3D, dotyczących:
  - o algorytmów rekonstrukcji obrazów i kształtów uwzględniających nieliniowy charakter pola elektrycznego;
  - o algorytmów optymalizacji symulowanego rozkładu wrażliwości wewnątrz modelu czujnika;
  - o algorytmów wspomagających nieliniowy proces rekonstrukcji obrazów przestrzennych oraz kształtów,
- opracowanie nowych metod komputerowych pozwalających oceniać i klasyfikować przepływ na podstawie obrazów tomograficznych.

Wszystkie prace badawcze zrealizowane były w Laboratorium Tomografii Procesowej im. Prof. Tomasza Dyakowskiego, zbudowanym w latach 2007 - 2010 w Instytucie Informatyki Stosowanej PŁ [8], w którego skład wchodzi instalacja przepływu dwufazowego. Zakres wykonanych prac przedstawiono w postaci diagramu zamieszczonego na rysunku 1. Prace badawcze zostały pogrupowane w bloki, odzwierciedlające kolejne fazy projektu. Na diagramie zamieszczono zarówno zadania przygotowawcze (ramki w kolorze niebieskim: opracowanie stanowiska optymalizacji czujników pojemnościowych, budowę, konfigurację i oprogramowanie komputera wysokiej mocy obliczeniowej oraz opracowanie i implementację nowego typu macierzy wrażliwości opartej na śledzeniu powierzchni ekwipotencjalnych [10]), zadania fazy algorytmiczno-eksperymentalnej (ramki w kolorze pomarańczowym: opracowanie i budowa zestawu czujników pojemnościowych, przygotowanie stanowiska pomiarowego [13], opracowanie i implementacja algorytmów przetwarzania i analizy danych pomiarowych oraz obrazów 3D, przeprowadzenie serii pomiarowych [13]) oraz faza końcowa projektu (ramki w kolorze zielonym: analiza i identyfikacja przepływu, charakterystyka [4] i porównanie wyników identyfikacji, ocena metrologiczna [12]).

## 4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania naukowe pozwoliły opracować nowe nieinwazyjne metody identyfikacji i wizualizacji struktur przepływów dwufazowych. Przedstawione techniki i algorytmy pozwoliły na szybką przestrzenną wizualizację w czasie rzeczywistym wnętrza rurociągów, w których zachodzą przepływy mieszanin gaz-ciecz. Otrzymane obrazy dają możliwość szybkiej analizy i identyfikacji, co może być użyteczne w przemysłowych procesach monitorowania oraz sterowania przepływami mieszanin gaz-ciecz. Opracowana metoda identyfikacji i wizualizacji przepływów dwufazowych, przy zastosowaniu tomografii pojemnościowej, może znaleźć praktyczne zastosowanie w wielu gałęziach gospodarki, gdzie powszechnie pojawiają się przepływy mieszanin gaz-ciecz np.: w przemyśle chemicznym, farmaceutycznym, wydobywczym, energetycznym, odlewniczym, spożywczym i wielu innych.





**Zadanie 1.** Opracowanie i zbudowanie stanowiska badawczego do wyznaczenia optymalnej struktury czujników pojemnościowych 3D dla średnicy rur o długości 40, 63 i 90 mm.



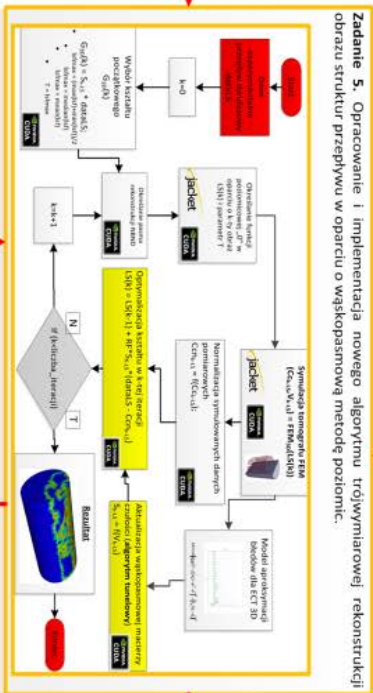
**Zadanie 2.** Opracowanie i wykonanie zestawu cylindrycznych 32-elektrodowych czujników pojemnościowych 3D w oparciu o profile montażowe f=40, 63 i 90 mm. Opracowanie i wykonanie zestawu cylindrycznych 32-elektrodowych czujników pojemnościowych 3D w oparciu o profile montażowe f=40, 63 i 90 mm.



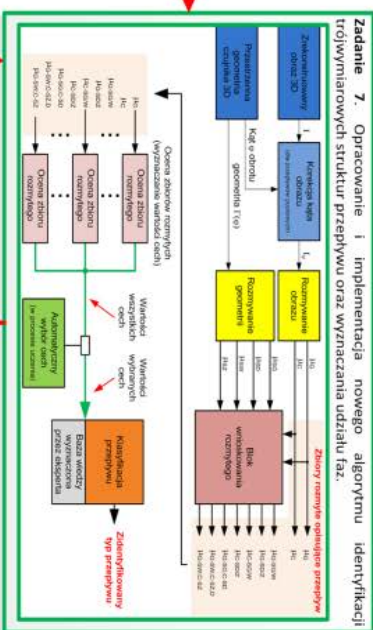
**Zadanie 3.** Przeprowadzenie eksperymentów z użyciem czujników f=40, 63 i 90 mm w kierunku identyfikacji kształtu i położenia struktur występujących w różnych rodzajach przepływu gaz-ciecz dla rur o dużym przekroju w sekcji poziomej i pionowej.



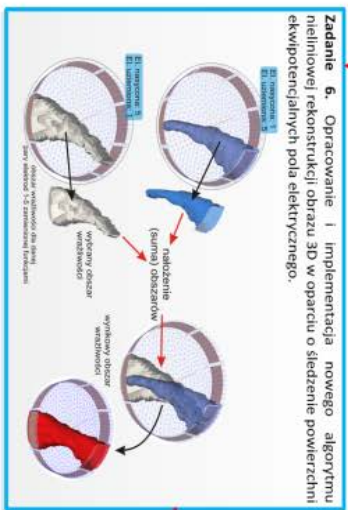
**Zadanie 4.** Opracowanie hybrydowej metody zrowniegleńca obliczeń (CPU-GPU) dla algorytmów trójwymiarowej rekonstrukcji obrazów i kształtów.



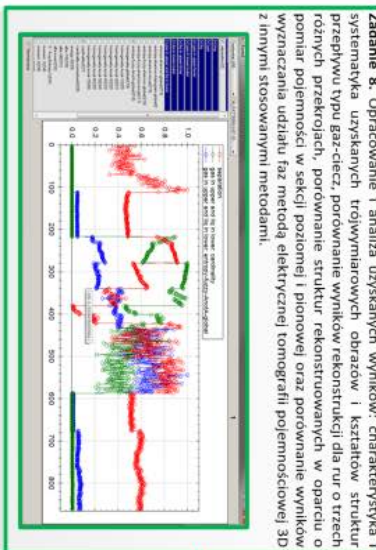
**Zadanie 5.** Opracowanie i implementacja nowego algorytmu trójwymiarowej rekonstrukcji obrazu struktur przepływu w oparciu o wąskopasmową metodę pozostnic.



**Zadanie 7.** Opracowanie i implementacja nowego algorytmu identyfikacji trójwymiarowych struktur przepływu oraz wyznaczenia udziału faz.



**Zadanie 6.** Opracowanie i implementacja nowego algorytmu nieliniowej rekonstrukcji obrazu 3D w oparciu o śledzenie powierzchni ekwipotencjalnych pola elektrycznego.



**Zadanie 8.** Opracowanie i analiza uzyskanych wyników: charakterystyka i systematyka uzyskanych trójwymiarowych obrazów i kształtów struktur przepływu typu gaz-ciecz, porównanie wyników rekonstrukcji dla rur o trzech różnych przekrojach, porównanie struktur rekonstruowanych w oparciu o pomiar pojemności w sekcji poziomej i pionowej oraz porównanie wyników wyznaczania udziału faz metodą elektrycznej tomografii pojemnościowej 3D z innymi stosowanymi metodami.

Rys. 1. Sieć działań przedstawiająca nurt prowadzonych badań w postaci bloków funkcjonalnych oraz występujące pomiędzy nimi zależności

Rosnące potrzeby przemysłu w zakresie nieskomplikowanej, relatywnie taniej, nieinwazyjnej i szybkiej metody sterowania procesami przepływów wielofazowych w rurociągach poziomych i pionowych, uzasadniają realizację podjętych tematów badawczych. Akwizycja obrazu oraz identyfikacja rodzaju przepływu dwufazowych mieszanin gaz-ciecz, w czasie rzeczywistym jest bardzo istotna przy monitorowaniu instalacji przemysłowych, a także w badaniach numerycznych przy weryfikacji wyników.

Ciągłe monitorowanie i diagnozowanie zachodzących procesów przepływowych może stanowić istotną informację o ich przebiegu i ewentualnych nieprawidłowościach oraz umożliwić ich ciągłe automatyczne kontrolowanie i sterowanie. W konsekwencji pozwoli to na zapobieganie awariom systemów przemysłowych. Zrealizowane badania naukowe przyczyniły się do tego, iż macierzyste jednostki autorów, Instytut Informatyki Stosowanej PŁ jak również Katedra Inżynierii Chemicznej PŁ, wzbogaciły swoją ofertę w zakresie nieinwazyjnych systemów diagnostycznych dla procesów przepływowych dedykowaną do szerokiej gamy przedstawicieli przemysłu.

## Podziękowania

Prace opisane w ramach niniejszego artykułu są finansowane z rządowego projektu naukowo-badawczego NCN nr 4664/B/T02/2010/38.

## Literatura

- [1] Banasiak R., Nowakowski J., Sankowski D.: Feasibility study of GPU supercomputing approach for solving 3D ECT forward and inverse problem, Proceedings of 6th International Symposium on Process Tomography, 26-28 march, 2012, Cape Town (RPA).
- [2] Dziubiński M., Fidos H., Sosno M., The flow pattern map of two-phase non-Newtonian liquid-gas flow in the vertical pipe, Int. J. Multiphase Flow (2004), 29, 132.
- [3] Hewitt, G.F., Roberts, D.N.: Studies of Two-Phase Flow Patterns by Simultaneous X-ray and Flash Photography, AERE-M 2159, HMSO, (1969).
- [4] Jaworski T., Fiderok P., Wajman R., Banasiak R.: Identyfikacja przepływu dwufazowego gaz-ciecz oparta na ocenie rozmytej obrazów tomograficznych 3D. IAPGOS, 2013, nr 3, 41-48.
- [5] Kapusta P., Banasiak R., Sankowski D.: Efficient computation of linearized inverse problem for 3D electrical capacitance tomography using GPU and CUDA technology, XVII International Conference on Information Technology Systems theory, design, implementations, applications, Lodz, November 3 – 4, 2010.
- [6] Marashdeh Q., Wang F, Fan L.S., Warsito, W.: Velocity Measurement of Multi-Phase flows Based on Electrical Capacitance Volume Tomography, Sensors, (2007) IEEE, pp. 1017-1019.
- [7] Oshinowo T., Charles M.E.: Vertical two-phase flow. Part I. Flow pattern correlations, The Canadian. J. Chem. Engng, 1974, 52, 25-35.
- [8] Sankowski D.: Laboratorium tomografii procesowej im. prof. Tomasza Dyakowskiego w Katedrze Informatyki Stosowanej. Zeszyty naukowe politechniki łódzkiej, seria: Elektryka, 2010, rocznik 1078, nr 121, s. 67-75.
- [9] Soleimani M., Wang H., Li Y, Yang W., A Comparative Study Of Three Dimensional Electrical Capacitance Tomography, International Journal For Information Systems Sciences, 2007, Vol.3, No.2.
- [10] Wajman R., Banasiak R.: Nowa metoda tunelowego wyznaczania macierzy wrażliwości dla potrzeb procesu rekonstrukcji obrazów dla trójwymiarowej tomografii pojemnościowej. IAPGOS, 2013, nr 3, 32-37.
- [11] Wajman R., Banasiak R., Jaworski T., Fidos H.: Three-dimensional Sensor for Electrical Capacitance Tomography System with the Internal Electrodes, Zeszyty naukowe AGH - Automatyka 15/3 2011, s. 571-582.
- [12] Wajman R., Fidos H., Fiderok P., Jaworski T., Nowakowski J., Sankowski D., Banasiak R.: Ocena metrologiczna systemu pomiarowego dla potrzeb wyznaczania udziału faz w przepływie mieszanin gaz-ciecz metodą tomografii pojemnościowej 3D. IAPGOS, 2013, nr 3, 49-54.
- [13] Wajman R., Jaworski T., Fiderok P., Banasiak R.: Algorytm dystrybucji znaczników czasowych dla potrzeb synchronizacji danych z różnych systemów pomiarowych. IAPGOS, 2013, nr 3, 38-40.

**Dr inż. Robert Banasiak**  
e-mail: robert.banasiak@p.lodz.pl



Dr inż. Robert Banasiak jest adiunktem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. W swoich pracach zajmuje się przemysłowymi zastosowaniami elektrycznej tomografii procesowej, a w szczególności problematyką rekonstrukcji obrazów oraz modelowania numerycznego systemów tomografii pojemnościowej. Kierownik grantu 4664/B/T02/2010/38.

**Dr inż. Radosław Wajman**  
e-mail: rwajman@kis.p.lodz.pl



Dr inż. Radosław Wajman jest adiunktem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. Prowadzone badania skupiają się nad zastosowaniem systemów trójwymiarowej tomografii pojemnościowej do nieinwazyjnego monitorowania, diagnozowania oraz automatycznego sterowania pracą przemysłowych instalacji transportu pneumatycznego materiałów sypkich oraz przepływu dwu-fazowego gaz-ciecz.

**Dr inż. Henryk Fidos**  
e-mail: henryk.fidos@p.lodz.pl



Dr inż. Henryk Fidos w roku 1975 ukończył studia w Instytucie Inżynierii Chemicznej Politechniki Łódzkiej. Jest adiunktem w Katedrze Inżynierii Chemicznej Wydziału Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska tej uczelni. Specjalność – inżynieria chemiczna i procesowa, mechanika płynów, przepływy wielofazowe, reologia i reometria płynów nienuktonowskich.

**Mgr inż. Paweł Fiderok**  
e-mail: p.fiderok@kis.p.lodz.pl



Mgr inż. Paweł Fiderok jest doktorantem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami związanymi z tomografią komputerową, rozpoznawaniem obrazów oraz sztuczną inteligencją zwłaszcza logiką rozmytą.

**Mgr inż. Tomasz Jaworski**  
e-mail: tjaworski@kis.p.lodz.pl



Mgr inż. Tomasz Jaworski jest doktorantem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami związanymi z logiką rozmytą oraz przetwarzaniem obrazów.

**Dr inż. Jacek Nowakowski**  
e-mail: jacnow@kis.p.lodz.pl



Dr inż. Jacek Nowakowski jest adiunktem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. Tematyka realizowanych prac naukowych obejmuje zagadnienia dotyczące pomiarów jak również sterowania przepływami wielofazowymi z wykorzystaniem wielomodalnych metod tomograficznych. W ramach grantu Maria Curie DENIDIA prowadził badania na Uniwersytecie w Bergen.

**Prof. dr hab. inż. Dominik Sankowski**  
e-mail: dsan@kis.p.lodz.pl



Prof. Sankowski jest dyrektorem Instytutu Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. W ramach prac badawczych zorganizował zespoły naukowe w dziedzinach: przetwarzania, rozpoznawania i analizy obrazów, tomografii procesowej, inżynierii oprogramowania, implementacji technik i metod sztucznej inteligencji, a także automatycznej identyfikacji i regulacji obiektów przemysłowych w systemach czasu rzeczywistego. Aktualna działalność naukowa prof. D. Sankowskiego obejmuje również tematykę związaną z informatyzacją jednostek administracji samorządowej.

# NOWA METODA TUNELOWEGO WYZNACZANIA MACIERZY WRAŻLIWOŚCI DLA POTRZEB PROCESU REKONSTRUKCJI OBRAZÓW DLA TRÓJWYMIAROWEJ TOMOGRAFII POJEMNOŚCIOWEJ

**Radosław Wajman, Robert Banasiak**

Institut Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej, Łódź, Polska

**Streszczenie.** Macierz wrażliwości jest głównym czynnikiem wpływającym na finalną jakość wyników procesu rekonstrukcji obrazów dla trójwymiarowej elektrycznej tomografii pojemnościowej 3D ECT. Dotychczasowe metody ich wyznaczania dają w większości przypadków dobre wyniki rekonstrukcji i umożliwiają dodatkowo wykonanie procesu iteracyjnej aktualizacji map wrażliwości, dostosowując ich naturę do zmieniającego się wraz z procesem rekonstrukcji symulowanego rozkładu pola elektrycznego. W ramach niniejszego artykułu autorzy przedstawiają własną istotną modyfikację procesu wyznaczania map wrażliwości poprzez uwzględnienie w tym procesie szczegółowego rozkładu pola we wnętrzu czujnika. Opracowany nowy tunelowy algorytm wyznaczania macierzy wrażliwości konstruuje mapy wrażliwości w oparciu o śledzenie powierzchni budowanych wzdłuż linii sił pola elektrycznego. W artykule zostaną przedstawione wyniki procesu rekonstrukcji obrazów, które wykażą większą skuteczność nowej metody.

**Słowa kluczowe:** 3D ECT, tomografia pojemnościowa, rekonstrukcja obrazu, macierz wrażliwości, MES

## NEW TUNNEL BASED METHOD OF SENSITIVITY MATRIX CALCULATION FOR 3D CAPACITANCE TOMOGRAPHY IMAGE RECONSTRUCTION

**Abstract.** The sensitivity matrix is main part of the image reconstruction process for 3D ECT imaging and strictly decides about the its final quality. Common sensitivity determination methods mostly provide acceptable results and additionally allow to perform the recalculation of the sensitivities according to the changing permittivity distribution. In this paper authors introduce the crucial modification of the sensitivity determination process based on the electric field distribution analysis. The designed new tunnel based algorithm follows the surfaces constructed along the electric field lines. In the paper the results of the image reconstruction experiments will be shown and the better accuracy of the new method will be proved.

**Keywords:** 3D ECT, capacitance imaging, sensitivity matrix, FEM

### Wprowadzenie

Macierz wrażliwości jest głównym czynnikiem wpływającym na finalną jakość wyników procesu rekonstrukcji obrazów dla trójwymiarowej elektrycznej tomografii pojemnościowej 3D ECT (ang. *three dimensional electrical capacitance tomography*) [5, 9, 10]. Najbardziej znaną i stosowaną w praktyce metodą jej wyznaczania jest algorytm obliczania map wrażliwości w oparciu o zależności matematyczno-fizyczne wynikające z fizyki pola elektrycznego [4]. Algorytm ten daje w większości przypadków dobre wyniki rekonstrukcji i umożliwia dodatkowo wykonanie procesu iteracyjnej aktualizacji map wrażliwości, dostosowując ich naturę do zmieniającego się wraz z procesem rekonstrukcji rozkładu pola elektrycznego. W ramach niniejszego artykułu autorzy przedstawiają istotną modyfikację procesu wyznaczania 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. W artykule zostanie wykazane, iż nowe mapy wrażliwości znacznie dokładniej oddają nieliniową naturę pola elektrycznego, a metoda ich wyznaczania została nazwana metodą tunelową z uwagi na geometryczny kształt generowanych rozkładów wrażliwości.

### 1. Proces rekonstrukcji trójwymiarowych obrazów tomograficznych

Mechanizm budowania obrazu dla potrzeb wizualizacji procesów przemysłowych przy użyciu elektrycznej tomografii pojemnościowej określany jest jako rekonstrukcja (bądź konstrukcja) obrazu. W praktyce proces ten może mieć charakter liniowy lub nieliniowy. W pierwszym przypadku rekonstrukcja obrazu jest wyznaczana bezpośrednio (deterministyczne metody projekcji wstecznej lub techniki regularyzacyjne [12]), bądź też na drodze optymalizacji iteracyjnej przy użyciu stałego symulowanego rozkładu wrażliwości w komputerowym modelu czujnika [2]. W drugim przypadku (rozważanym w ramach niniejszego artykułu) proces przebiega w schemacie iteracyjnym

i uwzględnia nieliniowy charakter pola elektrycznego. Nieliniowość pola elektrycznego w procesie rekonstrukcji obrazów oraz kształtów można aproksymować poprzez numeryczną symulację działania tomografu pojemnościowego w każdym (bądź tylko w wybranym) kroku iteracyjnym. W tym przypadku stosuje się najczęściej metodę elementów skończonych (MES) lub objętości skończonych [7, 14]. Nieliniowość można również aproksymować poprzez aktualizację modelu wrażliwościowego czujnika w oparciu o poprzednio zrekonstruowane obrazy 3D. W ogólnym ujęciu nieliniowy proces rekonstrukcji obrazu przebiega dwuetapowo: w cyklu iteracyjnym rozwiązywane są naprzemiennie dwa zagadnienia: proste i odwrotne. Zagadnienie proste w tomografii pojemnościowej 3D związane jest z trójwymiarowym numerycznym modelowaniem pola elektrycznego np. poprzez zastosowanie MES. Podstawowym celem tego etapu jest wyznaczenie map wrażliwości czujnika ECT. Wartość wrażliwości w określonym obszarze czujnika definiowana jest jako zmiana wartości pojemności międzyelektrodowej jako odpowiedź na zmianę rozkładu przenikalności w tym konkretnym obszarze. Ta właściwość pola elektrycznego decyduje o tym, że zagadnienie odwrotne jest źle postawione. Powstała na tym fundamencie macierz współczynników  $J$  (macierz Jacobiego) jest najważniejszym elementem deterministycznego zagadnienia odwrotnego. Jej zadaniem jest linearyzacja pola elektrycznego i wyznaczenie obrazu rozkładu przenikalności  $\epsilon$  na podstawie wartości pomiarowych  $C$  [11, 12]).

$$\epsilon = J^+ \cdot C \quad (1)$$

Z macierzą wrażliwości związanych jest szereg problemów numerycznych. Część z nich wynika z faktu, iż macierz wrażliwości nie jest macierzą kwadratową [13]. Jej wymiary zależą od liczby niezależnych pomiarów oraz od znacząco większej (w szczególności dla zagadnienia 3D) liczby punktów obrazu. Stąd, z matematycznego punktu widzenia, nie jest możliwe wyznaczenie jej odwrotności [13]. W praktyce, w różnych znanych metodach rekonstrukcji obrazów stosowana jest pseudo-odwrotność macierzy wrażliwości, a rozważany problem jest źle uwarunkowany. Wyznaczoną na etapie rozwiązywania zagadnienia prostego macierz wrażliwości stosuje się w drugim z etapów procesu rekonstrukcji obrazu: zagadnieniu odwrotnym.



Zagadnienie odwrotne w swojej najbardziej złożonej numerycznie postaci (uwzględniającej nieliniowość pola elektrycznego oraz komputerową symulację tomografu i kompletny model numeryczny czujnika pojemnościowego) można zapisać w postaci równania macierzowego - funkcji optymalizującej iteracyjnie obraz  $\epsilon_{3D}$  w oparciu o wektor danych pomiarowych  $\mathbf{Cm}_{3D}$ :

$$\epsilon_{3D}(k+1) = \epsilon_{3D}(k) + RF \cdot \mathbf{J}^+(\mathbf{V}_k)(\mathbf{Cm}_{3D} - FEM(\epsilon_{3D}(k))) \quad (2)$$

gdzie:

$\epsilon_{3D}(k+1)$  - nowy zrekonstruowany obraz 3D,

$\epsilon_{3D}(k)$  - poprzednio zrekonstruowany obraz 3D,

RF - parametr procesu zbieżności,

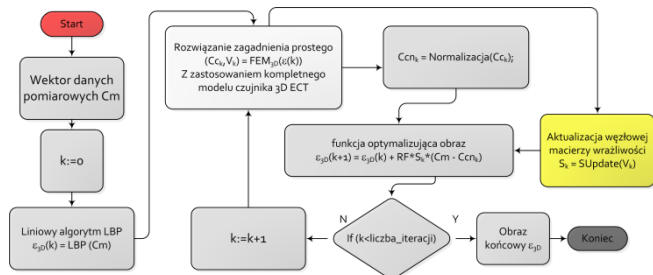
$\mathbf{J}^+(\mathbf{V}_k)$  - aktualizowana iteracyjnie macierz wrażliwości

(nieliniowość pola elektrycznego),

$\mathbf{Cm}_{3D}$  - wektor danych pomiarowych,

$FEM(\epsilon_{3D}(k))$  - komputerowa symulacja tomografu w oparciu o poprzednio zrekonstruowany obraz 3D.

Powyższe równanie stanowi kluczowy element procesu rekonstrukcji obrazów 3D zastosowany w ramach realizacji badań do niniejszego artykułu [1, 4]. Proces ten można również przedstawić w postaci algorytmicznej sieci działań – rysunek 1.



Rys. 1. Sieć działań algorytmu nieliniowej rekonstrukcji obrazu

## 2. Metoda tunelowa wyznaczania macierzy wrażliwości

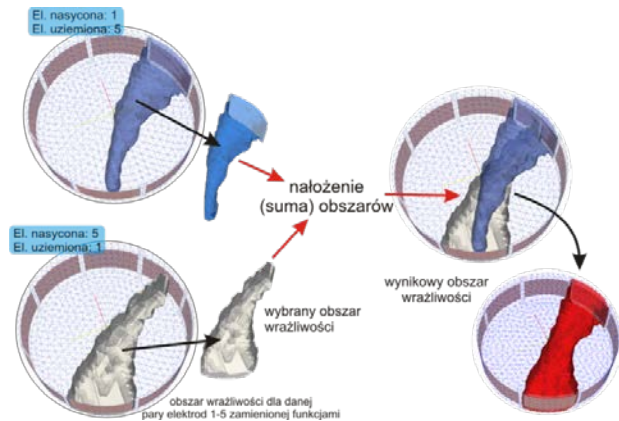
Algorytm tunelowy bazuje na tym, że większość z deterministycznych metod rekonstrukcji obrazów, które stosują w swoich obliczeniach rozkłady wrażliwości, jest wyprowadzona bezpośrednio z tomografii liniowej tzw. „hard field tomography”, reprezentowanej przez np. tomografię rentgenowską czy też metody optyczne. Możliwość zaadoptowania tych metod rekonstrukcji dla potrzeb tomografii elektrycznej (reprezentującej rodzinę „soft field” [4, 8]) jest uwarunkowana odpowiednio wyznaczoną macierzą wrażliwości, która, jak już wspomniano, 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 elementy trójwymiarowego obrazu) w biegu danego promienia.

Pole elektryczne wewnątrz czujnika ECT opisane jest równaniem Laplace’a [1]. Dla danego rozkładu przenikalności elektrycznej  $\epsilon(x, y, z)$  i warunków granicznych dla rozkładu potencjałów  $\varphi(x, y, z)$ , należy znaleźć funkcję polową wykorzystując metody numeryczne jak np. MES. Rozkład potencjałów pola elektrycznego wyznaczony przy pomocy analizy numerycznej dla dowolnego rozkładu materiału wewnątrz czujnika ECT jest silnie zaburzany. Widać to doskonale wyznaczając przebieg linii sił pola elektrycznego. Niech  $\vec{\sigma}(l)$  oznacza ścieżkę linii pola elektrycznego, która jest zdefiniowana jako:

$$\frac{d}{dl} \vec{\sigma}(l) = - \frac{\vec{E}}{|\vec{E}|} = - \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \quad (3)$$

gdzie  $l$  jest długością (po łuku) linii  $\vec{\sigma}$ .

Pochodna wyznacza kierunek gradientu potencjału. Jedną mapę wrażliwości należy budować podążając za spadkiem potencjału począwszy od każdego woksela stanowiącego krawędź elektrody uziemionej (ang. *grounded* - G) – rysunek 2.



Rys. 2. Idea konstruowania tunelu wrażliwości dla jednej pary elektrod

Wyznaczanych jest szereg linii sił pola elektrycznego. Każda z linii prowadzi aż do elektrody z ustawionym potencjałem - nasyconej (ang. *excited* - E). Wszystkie linie zawsze dotrą do elektrody nasyconej i nigdy nie wyjdą poza badany obszar czujnika ECT. W kolejnym etapie algorytmu pomiędzy sąsiednimi liniami odnajdywane są powierzchnie, które w efekcie tworzą tunel zwężający się w kierunku elektrody nasyconej. Następnie podobny tunel wyznaczany jest w oparciu o rozkład potencjałów wyliczony dla przypadku, gdy elektroda będąca do tej pory nasyconą staje się uziemioną, a dotychczasowa uziemiona staje się nasyconą. W efekcie końcowym objętości powstałych w ten sposób dwóch tuneli są ze sobą łączone w jeden tunel, który dalej jest traktowany jako spójny obszar wrażliwości dla jednej rozważanej pary elektrod oznaczanej tutaj symbolem E-G.

Proces wyznaczania podwójnego tunelu musi być teraz powtarzany dla każdej możliwej pomiarowej pary elektrod bez powtórzeń (E-G). Należy tu zaznaczyć, że bieg wszystkich linii, a w konsekwencji całego tunelu, jest zakłócany poprzez rozkład materiału. Żadna z linii nie jest prostą, lecz jej kształt jest funkcją rozkładu przenikalności. Jest to zgodne z tzw. „efektem pola miękkiego”. Rysunek 3 (na następnej stronie) przedstawia sieć działań algorytmu metody tunelowej z uwzględnieniem wszystkich możliwych par pomiarowych elektrod (bez powtórzeń).

Ta część algorytmu musi być realizowana za każdym razem przed przystąpieniem do właściwego wyznaczania macierzy wrażliwości, ponieważ zależy nie tylko od geometrii układu ECT ale również od rozkładu materiału w jego wnętrzu. Warto wspomnieć, że znaczne przyspieszenie algorytmu metody tunelowej dla siatki czworosiennej można uzyskać po uprzednim wyznaczeniu, dla każdego elementu tej siatki, jego sąsiadów i środka ciężkości. Można to uczynić np. zaraz po wyznaczeniu samej siatki. Dzięki temu unika się wielokrotnego szukania sąsiadów danego elementu.

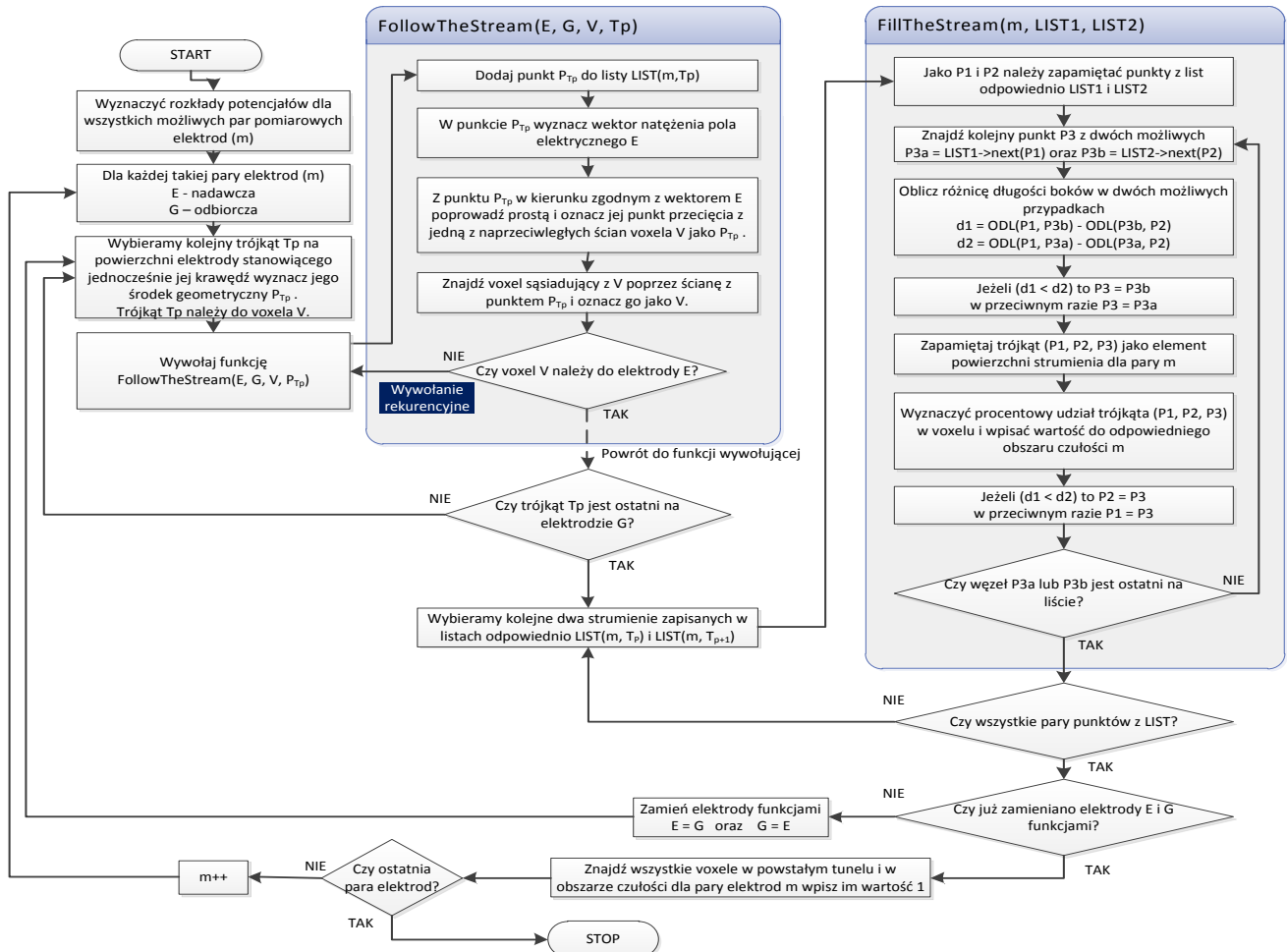
Uzyskane tunele wrażliwości odzwierciedlają tylko wpływ poszczególnych wokseli (tj. pojedynczych przestrzennych elementów zdyskretyzowanej przestrzeni pomiarowej czujnika ECT np. czworosianów) na projekcję poszczególnych strumieni tj. linii sił pola elektrycznego z uwzględnieniem przestrzennego rozkładu przenikalności elektrycznej. Natomiast nie oddają jeszcze w pełni charakterystyki tego układu. Mianowicie tego, że wrażliwość układu jest znacznie mniejsza w jego środku

w porównaniu do obszarów znajdujących się w pobliżu elektrod. Owszem, nowe mapy wrażliwości w danej chwili uwidaczniają zwiększony obszar wrażliwości w pobliżu elektrod w stosunku do centrum całego układu, ale tylko w znaczeniu obszarowym, natomiast wartości wag w obrębie lokalnych obszarów są zawsze takie same. Aby to zmienić, do algorytmu metody tunelowej należało wprowadzić kolejny ostatni etap. Polega on na wyznaczeniu dodatkowych map wag dla każdego woksela obrazu w postaci współczynników odległości od elektrod E i G

i przemnożeniu ich przez odpowiadające im obszary wrażliwości z map uzyskanych metodą tunelową. Mapy tych wag można wyznaczyć korzystając z następującego wzoru:

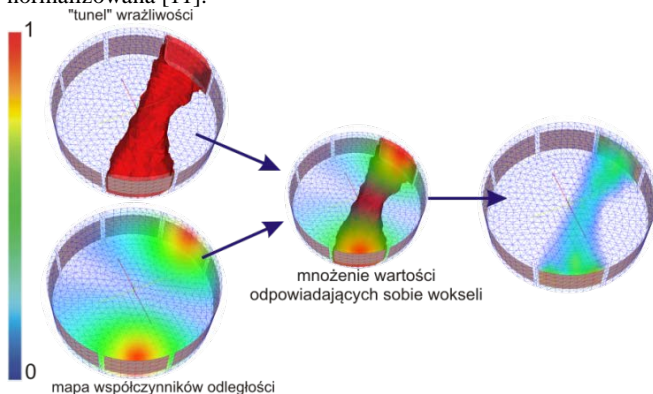
$$S_{ij} = \left( \frac{1}{d_S} + \frac{1}{d_R} \right)^2 \quad (4)$$

gdzie  $d_S$  i  $d_R$  to odległości punktu od elektrody odpowiednio nasyconej i uziemionej (patrz rysunek 4).



Rys. 3. Sieć działań algorytmu metody tunelowej wyznaczania macierzy wrażliwości

Gdy wszystkie elementy nowej mapy wrażliwości mają już przypisaną odpowiednią wartość, cała mapa jest normalizowana [11].



Rys. 4. Ostatni etap wyznaczania macierzy wrażliwości metodą tunelową polegający na przemnożeniu obszarów tuneli wrażliwości przez współczynniki wag odległości woksela od elektrod (skala kolorów wyraża wartość wrażliwości w jednostkach względnych)

### 3. Eksperymenty i wyniki

W tym rozdziale opisano przeprowadzone eksperymenty i przedstawiono wyniki działania nowych macierzy wrażliwości wyznaczanych metodą tunelową w procesie rekonstrukcji obrazów w porównaniu z użyciem tradycyjnych macierzy wrażliwości wyznaczanych w oparciu o zależności matematyczno-fizyczne wynikające z równania Laplace'a. Do oceny obrazów zostały przyjęte następujące kryteria:

- znormalizowany średni błąd kwadratowy obrazu (NMSE – *Normalized Mean Square Error*), który pozwala wyznaczyć różnicę pomiędzy zadaną (fantom) i skonstruowaną wartością przenikalności elektrycznej dla danego woksela (obraz) - opisany jest zależnością [13]:

$$\delta d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\varepsilon_i - \hat{\varepsilon}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}} \quad (5)$$

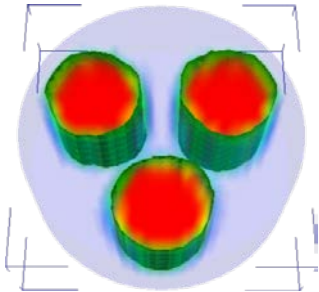


- współczynnik liniowej korelacji Pearsona, który pozwala ocenić zależność liniową pomiędzy zadaną a skonstruowaną wartością przenikalności elektrycznej dla poszczególnych elementów obrazu - wyrażony wzorem [13]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{\epsilon}_i - \bar{\hat{\epsilon}})(\epsilon_i - \bar{\epsilon})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{\epsilon}_i - \bar{\hat{\epsilon}})^2 \sum_{i=1}^N (\epsilon_i - \bar{\epsilon})^2}} \quad (6)$$

gdzie wektor  $\epsilon$  (zdefiniowany jako jednokolumnowa macierz) jest zakładanym (w przypadku symulacji) a  $\hat{\epsilon}$  jest zrekonstruowanym znormalizowanym rozkładem przenikalności. Wartości  $\epsilon_i$  oraz  $\hat{\epsilon}_i$  są elementami wektorów odpowiednio  $\epsilon$  oraz  $\hat{\epsilon}$ . Wartości  $\bar{\epsilon}$  oraz  $\bar{\hat{\epsilon}}$  to wartości średnie wszystkich elementów wektorów odpowiednio  $\epsilon$  oraz  $\hat{\epsilon}$ .

Aby możliwe było oszacowanie wartości błędów i zastosowanie powyższych kryteriów oceny, proces rekonstrukcji obrazów został przeprowadzony m. in. dla zasymulowanego przestrzennego rozkładu przenikalności elektrycznej przedstawionego na rysunku 5.



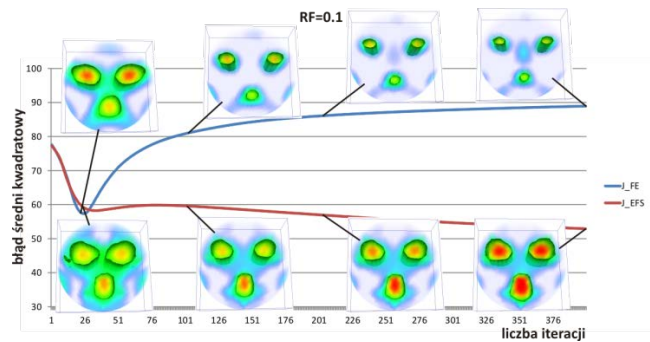
Rys. 5. Użyty do badań zasymulowany przestrzenny rozkład przenikalności elektrycznej

W przypadku pomiarów na rzeczywistych obiektach nie jest możliwe opracowanie wiarygodnego referencyjnego modelu rozkładu materiału, który należy podać do zdefiniowanych powyżej kryteriów oceny. Dla potrzeb eksperymentu - symulacji wykorzystana została liniowa metoda iteracji Landwebera [1]. Za każdym razem przeprowadzonych zostało 400 iteracji przy czym w celu wykazania szybkości zbieżności metody, do prezentacji wyników wybierane były obrazy po 25, 100, 200 i 400 iteracjach. Jednocześnie, po każdej iteracji wyznaczane były: błąd średni kwadratowy oraz współczynnik korelacji liniowej. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów oraz obliczonych wartości przyjętych kryteriów oceny zostały zaprezentowane na wykresach – Rysunki 6 do 9.

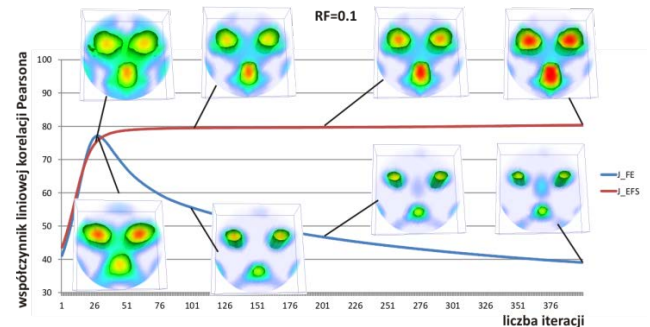
Symbole/skróty na rysunkach oznaczają:

- J\_FE – w procesie rekonstrukcji zastosowano klasyczne macierze wrażliwości wyliczane z energii pola elektrycznego (ang. *Filed Energy*);
- J\_EFS – w procesie rekonstrukcji zastosowano tunelowe macierze wrażliwości (ang. *Electrical Field Surfaces*);
- RF – (ang. *relaxation factor*) współczynnik relaksacji (agresywności) metody rekonstrukcji obrazów.

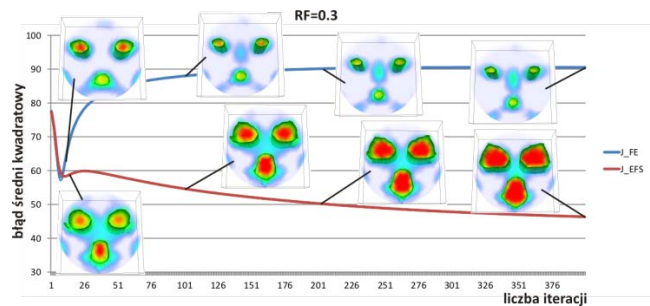
W artykule zdecydowano się przedstawić tylko dwa spośród wielu przeprowadzonych eksperymentów. W każdym z nich wykazana została zwiększona szybkość zbieżności w przypadku zastosowania tunelowych macierzy wrażliwości. Cecha ta uwydatnia się bardziej z chwilą zwiększania agresywności procesu rekonstrukcji (tj. zwiększanie współczynnika relaksacji). Warto zauważyć, że dla dużej agresywności procesu w przypadku klasycznych macierzy wrażliwości ostatecznie metoda traci swoją zbieżność, a błędy rekonstrukcji z każdą iteracją powiększają się.



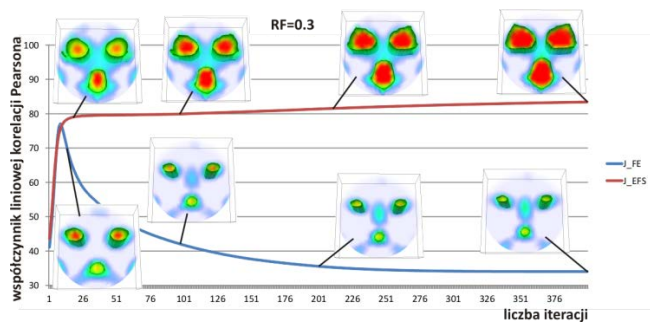
Rys. 6. Wykres przebiegu wartości błędu średniego kwadratowego dla obrazów otrzymanych w wyniku zastosowania metody iteracji Landwebera przy RF = 0.1 w funkcji liczby iteracji z użyciem klasycznych (J\_FE) i tunelowych (J\_EFS) macierzy wrażliwości



Rys. 7. Wykres przebiegu wartości współczynnika korelacji liniowej Pearsona dla obrazów otrzymanych w wyniku zastosowania metody iteracji Landwebera przy RF = 0.1 w funkcji liczby iteracji z użyciem klasycznych (J\_FE) i tunelowych (J\_EFS) macierzy wrażliwości



Rys. 8. Wykres przebiegu wartości błędu średniego kwadratowego dla obrazów otrzymanych w wyniku zastosowania metody iteracji Landwebera przy RF = 0.3 w funkcji liczby iteracji z użyciem klasycznych (J\_FE) i tunelowych (J\_EFS) macierzy wrażliwości

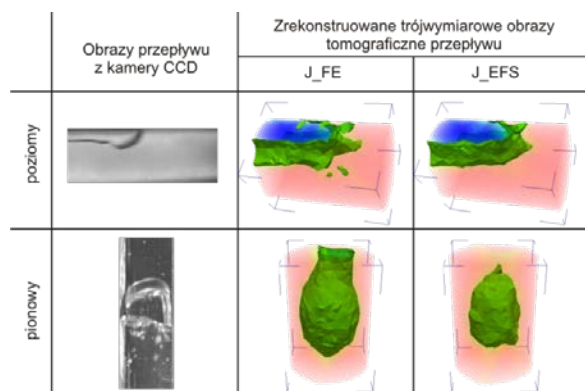


Rys. 9. Wykres przebiegu wartości współczynnika korelacji liniowej Pearsona dla obrazów otrzymanych w wyniku zastosowania metody iteracji Landwebera przy RF = 0.3 w funkcji liczby iteracji z użyciem klasycznych (J\_FE) i tunelowych (J\_EFS) macierzy wrażliwości

Na kolejnym etapie oceny zaproponowanych algorytmów rekonstrukcji w tym nowej tunelowej metody wyznaczania macierzy wrażliwości, dokonano jej integracji z przedstawionym na Rysunku 1 algorytmem nieliniowej rekonstrukcji obrazu. Zrealizowano rzeczywiste pomiary tomograficzne przepływu mieszaniny dwufazowej w sekcjach poziomej i pionowej [6] i na ich podstawie zrekonstruowano obrazy ponownie w oparciu o tunelowe (J\_EFS) oraz klasyczne (J\_FE) macierze wrażliwości.

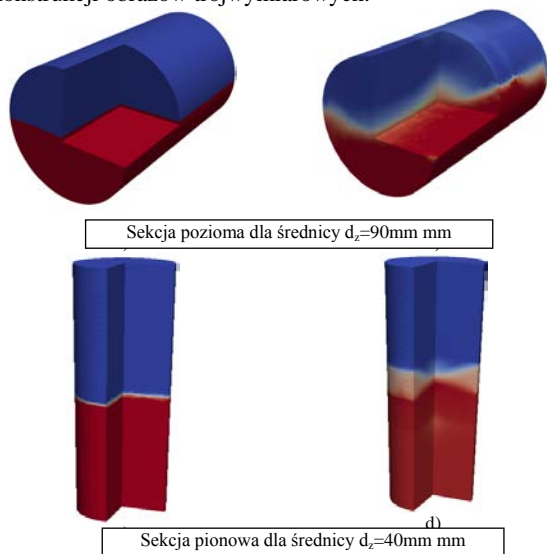
Wybrane wyniki tych badań zostały zestawione na rysunku 10 (na następnej stronie). Podobnie i w tym przypadku obrazy uzyskane dla przypadku macierzy tunelowych wykazują lepsze odwzorowanie rzeczywistych struktur przepływu w obrazach tomograficznych.

W celu dokonania oceny metrologicznej zaproponowanej metody zasymulowano dodatkowo dwa rozkłady przenikalności elektrycznej (fantom) odpowiadające 50% wypełnieniu cieczą o stałej elektrycznej 37.0 rurociągu poziomego o średnicy zewnętrznej 90 mm oraz 50% wypełnieniu cieczą o stałej elektrycznej 37.0 rurociągu pionowego o średnicy zewnętrznej 40 mm. Następnie dokonano akwizycji danych z rzeczywistego czujnika ECT 3D. Obraz fantomu oraz obraz zrekonstruowany na bazie danych eksperymentalnych dla sekcji poziomej i pionowej przedstawia rysunek 11 (na następnej stronie).



Rys. 10. Wyniki rekonstrukcji obrazów danych pomiarowych zrealizowanych dla przepływu mieszaniny dwufazowej przy zastosowaniu klasycznych (J\_FE) i tunelowych (J\_EFS) macierzy wrażliwości na tle obrazów zarejestrowanych kamera CCD

Zrekonstruowane obrazy znormalizowano i wyznaczono pomiędzy nimi znormalizowany średni błąd kwadratowy obrazu (NMSE): 29.24% oraz współczynnik liniowej korelacji Pearsona: 91.93%. Dla sekcji poziomej uzyskano wyniki: średni błąd kwadratowy obrazu (NMSE): 32.80% oraz współczynnik liniowej korelacji Pearsona: 88.61%. Pomimo relatywnie dużej wartości błędu NMSE, która może być wynikiem występowania zjawiska „przesunięcia” opracowanego, przestrzennego fantomu i rzeczywistego zrekonstruowanego rozkładu przenikalności elektrycznej, współczynnik liniowej korelacji potwierdza teoretycznie wysoką skuteczność opracowanego algorytmu tunelowego wyznaczania macierzy wrażliwości dla procesu rekonstrukcji obrazów trójwymiarowych.



Rys. 11. Obrazy 3D fantomu a) i c) oraz obrazy zrekonstruowane na bazie danych eksperymentalnych b) i d) – przygotowane w celu oceny skuteczności opracowanych algorytmów

#### 4. Wiarygodność przyjętych kryteriów oceny

Interpretacja wyników zastosowania miar porównawczych dla przeprowadzonych eksperymentów poddaje jednakże pod rozwagę jedną wątpliwość: skąd tak duże względne wartości całkowitego błędu obrazu przy jednocześnie spodziewanych wysokich wartościach współczynnika korelacji liniowej [1]? W przypadku zagadnienia 3D porównuje się obrazy liczące najczęściej kilkadziesiąt tysięcy elementów. Współczynnik liniowej korelacji Pearsona może, dla tak licznej populacji danych, wykazywać duże podobieństwo pomiędzy porównywanymi obrazami mimo występowania licznych lokalnych, czasami dużych rozbieżności pomiędzy zadaną a konstruowaną wartością przenikalności elektrycznej. Średni błąd kwadratowy obrazu jest znacznie bardziej wrażliwy na występowanie dużych różnic pomiędzy fantomem a obrazem skonstruowanym. Wyznaczenie średniego błędu kwadratowego obrazu polega na bezpośrednim porównaniu wartości znormalizowanej przenikalności elektrycznej dla odpowiadających sobie elementów obrazu fantomu i obrazu uzyskanego w oparciu o rzeczywisty pomiar. Możliwe jest również występowanie błędów konstrukcji obrazu, które powodują lokalne przesunięcia konstruowanego rozkładu przenikalności elektrycznej względem zadanego fantomu. W efekcie, widziany przez obserwatora konstruowany obraz 3D wykazuje cechy zgodności ze wzorcem (fantomem) lecz zastosowanie obiektywnych kryteriów tego nie potwierdza. Duży wpływ na wartość błędu obrazu mogą wywierać zniekształcenia występujące dla obiektów zlokalizowanych w okolicach skrajnych płaszczyzn pomiarowych. Występują tam obszary słabiej skanowane przez pomiary międzyelektrodowe. W konsekwencji, obiekty konstruowane w tych obszarach, mogą powodować silne zaburzenia kształtu oraz może pojawić się efekt „rozciągania” obiektów w kierunku granic obszaru pomiarowego. Podobny wpływ na dużą wartość błędu obrazu mogą mieć zaburzenia obrazu w obszarach pomiędzy płaszczyznami pomiarowymi. Przykład omówionych przyczyn występowania dużych błędów konstrukcji obrazu zaprezentowano na rysunku 12. Przedstawia on obraz 3D fantomu przenikalności elektrycznej złożonego z 9 kul rozmieszczonych w przestrzeni pomiarowej, skonstruowany obraz 3D oraz nałożone na siebie te dwa obrazy.



Rys. 12. Przykładowa wizualizacja przedstawiająca trzy obrazy: a – obraz fantomu oznaczony kolorem czerwonym, b – konstrukcję obrazu 3D w kolorze zielonym, c – obraz 3D powstały z nałożenia na siebie obrazów a i b

Obraz 3D przedstawiony na rysunku 12 (c) powstał w wyniku nałożenia na siebie wizualizacji fantomu (a) oraz wizualizacji konstrukcji obrazu (b). Analizując tylko wynik konstrukcji obrazu przedstawiony na (b) czytelnik może odnieść wrażenie, iż obraz został skonstruowany poprawnie, gdyż bez trudu możliwe jest, przy zastosowaniu oceny wzrokowej, wydzielenie obszarów o różnych wartościach przenikalności elektrycznej. Po połączeniu ze sobą obrazów (a) i (b) widoczne są znaczące różnice pomiędzy odpowiadającymi sobie elementami tych obrazów. Na obrazie (c) można zauważyć zarówno zjawisko „przesunięcia” przestrzennego obrazów jak i problem zniekształceń w skrajnych strefach obrazowania. W obszarach obrazu pokrywających się błąd będzie niewielki i związany z dokładnością odtworzenia w tych punktach wartości przenikalności elektrycznej. W obszarach, w których obrazy się nie pokrywają, nastąpi gwałtowny wzrost wartości błędu. Omówione problemy mogą zaowocować silnym wzrostem sumarycznego błędu obrazu mimo pozytywnej, subiektywnej oceny wzrokowej.



## 5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono przebieg i wyniki przeprowadzonych eksperymentów rekonstrukcji obrazów z użyciem systemu trójwymiarowej tomografii pojemnościowej. Zastosowano macierze wrażliwości wyliczane nową tunelową metodą działającą na bazie algorytmu śledzenia powierzchni budowanych wzdłuż linii sił pola elektrycznego. Dzięki takiemu zastosowaniu wyniki rekonstrukcji są znacząco lepszej jakości. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów potwierdziły dużo większą zbieżność procesu rekonstrukcji w przypadku zastosowania nowych macierzy wrażliwości. Opracowana metoda została już z sukcesem wdrożona do zakończonego projektu, którego celem było opracowanie systemu pomiarowego 3D ECT do identyfikacji struktur i wyznaczania procentowego udziału faz mieszanin typu gaz-ciecz w rurociągach poziomych oraz pionowych.

## 6. Podziękowania

Prace opisane w ramach niniejszego artykułu są finansowane z rządowego projektu badawczego nr 4664/B/T02/2010/38.

## Literatura

- [1] Banasiak R.: Algorytmy wizualizacji 3D w przemysłowych systemach elektrycznej tomografii procesowej; Praca doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź, 2007.
- [2] Banasiak R., Wajman R., Sankowski D., Soleimani M.: Three-dimensional nonlinear inversion of electrical capacitance tomography data using a complete sensor model. Progress In Electromagnetics Research PIER, 100, 2010, pp. 219-234.
- [3] Dyakowski T.: Process tomography applied to multi-phase flow measurement. Meas. Sci. Technol. 7/1996, pp. 343-353.
- [4] Loser T., Wajman R., Mewes D. 2001 Electrical capacitance tomography: image reconstruction along electrical field lines, Meas. Sci. Technol. 2001, vol. 12 nr 8 pp. 1083-1091.
- [5] Olszewski T., Kleczyński P., Brzeski P., Mirkowski J., Płaskowski A., Smolik W., Szabatin R.: Electrical capacitance tomograph design; 3rd International Symposium on Process Tomography in Poland, Łódź, 2004 s. 118-123.
- [6] Rząsa M.R. The Stand For Tests of Gas-Liquid Flow Structure; 3rd International Symposium on Process Tomography in Poland, Łódź 2004, s. 139-142.
- [7] Sikora J. Algorytmy numeryczne w tomografii impedancyjnej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [8] Wajman R.: Nowa metoda rekonstrukcji obrazów dla potrzeb pojemnościowej tomografii procesowej, Praca doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź 2006.
- [9] Wang H.G., Liu S., Jiang F., Yang W.Q. 3D Presentation of Images with Capacitance Tomography; 3rd World Congress on Industrial Process Tomography, Banff, Canada 2003, s. 331-336.
- [10] Williams R.A., Beck M.S. Process tomography: principles, techniques and applications. BH, Oxford 1995.
- [11] Xie C.G., Huang S.M., Hayes D.G., Gregory I.A., Beck C.M.: Transputer/DSP-based capacitance tomography for real-time imaging and velocity profile measurement of oilfield flow pipelines; Parallel Computing and Transputer Appl., Edts. M.S. Beck u.a. 1994, pp. 123-134.
- [12] Yang W.Q. and Peng L.: Review of image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography, Part 1, Principles, proc International Symposium on Process Tomography in Poland, Wrocław 2002, pp. 123-132.
- [13] Yang W.Q., Peng L.: Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography; Meas. Sci. Technol. 2003, Vol. 14, No. 1, pp. R1-R13.
- [14] Zienkiewicz O.C. Metoda Elementów Skończonych; Arkady Warszawa 1972.

**Dr inż. Radosław Wajman**  
e-mail: rwajman@kis.p.lodz.pl



Dr inż. Radosław Wajman jest adiunktem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. Prowadzone badania skupiają się nad zastosowaniem systemów trójwymiarowej tomografii pojemnościowej do nieinwazyjnego monitorowania, diagnozowania oraz automatycznego sterowania pracą przemysłowych instalacji transportu pneumatycznego materiałów sypkich oraz przepływu dwu-fazowego gaz-ciecz.

**Dr inż. Robert Banasiak**  
e-mail: robert.banasiak@p.lodz.pl



Dr inż. Robert Banasiak jest adiunktem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. W swoich pracach zajmuje się przemysłowymi zastosowaniami elektrycznej tomografii procesowej, a w szczególności problematyką rekonstrukcji obrazów oraz modelowania numerycznego systemów tomografii pojemnościowej. Kierownik grantu 4664/B/T02/2010/38.

otrzymano/received: 25.03.2013

przyjęto do druku/accepted: 31.08.2013



## Administrowanie Sieciami Komputerowymi

Politechnika Lubelska  
Instytut Elektroniki i Technik Informatycznych

### Dwusemestralne studia podyplomowe obejmują moduły kształcenia:

- |  |  |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Podstawy administrowania systemem Windows</li> <li>2 Podstawy administrowania systemem Linux</li> <li>3 Sieci LAN</li> <li>4 Sieci IP</li> <li>5 Routing w sieciach IP</li> <li>6 Sieci TCP/IP</li> <li>7 Usługi w sieciach TCP/IP</li> <li>8 Wykorzystanie Windows w sieciach LAN</li> <li>9 Wykorzystanie Linux w sieciach LAN</li> <li>10 Zarządzanie systemami informatycznymi</li> <li>11 Sieci telekomunikacyjne</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>12 Serwery usług sieciowych</li> <li>13 Bezpieczeństwo systemów komputerowych</li> <li>14 Diagnostyka sieci komputerowych</li> <li>15 Multimedia strumieniowe</li> <li>16 Systemy telefonii VoIP</li> <li>17 Sieci dostępne</li> <li>18 Kodowanie informacji multimedialnych</li> <li>19 Elementy sieci optoelektrycznych</li> <li>20 Światłowody i kable światłowodowe</li> <li>21 Podstawy normalizacji</li> <li>22 Seminarium dyplomowe</li> </ol> |
|--|--|

#### Telefon:

(0-81) 53 84 309 – sekretariat Instytutu Elektroniki i Technik Informatycznych  
(0-81) 53 84 317 – opiekun ds. organizacyjnych, dr inż. Piotr Kisała

#### Faks:

(0-81) 53 84 312

#### Poczta elektroniczna

ask@politechnika.lublin.pl

#### Adres pocztowy:

ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin

# ALGORYTM DYSTRYBUCJI ZNACZNIKÓW CZASOWYCH DLA POTRZEB SYNCHRONIZACJI DANYCH Z RÓŻNYCH SYSTEMÓW POMIAROWYCH

Radosław Wajman, Tomasz Jaworski, Paweł Fiderek, Robert Banasiak

Instytut Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej

**Streszczenie.** Badania opisane w artykule odnoszą się do zakończonego projektu naukowo – badawczego, którego celem było zbudowanie systemu pomiarowego do wyznaczania udziału faz w oparciu o trójwymiarową tomografię pojemnościową 3D ECT. W ramach tych prac przewidziano ocenę własności metrologicznych nowego systemu, w którym zastosowano równolegle wiele metod pomiarowych. Aby możliwe było dokładne porównanie wyników działań każdej z zastosowanych metod, potrzebne było opracowanie jednolitej usługi znaczników czasowych do synchronizacji danych pomiarowych pochodzących z różnych źródeł o różnej prędkości ich akwizycji. Artykuł opisuje zaprojektowany uniwersalny algorytm sieciowej usługi dystrybucji znaczników czasowych.

**Słowa kluczowe:** synchronizacja danych pomiarowych, znaczniki czasowe

## ALGORITHM OF TIME STAMPS DISTRIBUTION FOR DATA SYNCHRONIZATION OF VARIOUS MEASUREMENT SYSTEMS

**Abstract.** The described in this paper research refer to the finished project which aimed to build the measurement system for phase distribution calculation and two phase flow structure identification based on 3D ECT system. In the frame of this work the metrological validation of the measurement system was done where many of various measurement technics were applied parallel. In order to analyse the measurement results, there was a need to design the unified service of time stamps distribution for measurement data synchronization. The measured data were collected with different speed. This paper presents the designed universal network algorithm of the time stamps distribution.

**Keywords:** measurement data synchronization, time stamps

### Wprowadzenie

Określenie udziału faz w przepływającej mieszaninie dwufazowej gaz-ciecz ma podstawowe znaczenie przy obliczaniu powierzchni kontaktu międzyfazowego, decydującej o procesach wymiany ciepła i masy oraz może być użyteczne przy określaniu oporów przepływu takiej mieszaniny. Badania opisane w artykule odnoszą się do zakończonego projektu naukowo – badawczego, którego celem było zbudowanie systemu pomiarowy do wyznaczania udziału faz w oparciu o trójwymiarową tomografię pojemnościową 3D ECT (ang. *three dimensional electrical capacitance tomography*) [1]. W ramach tych prac przewidziano również ocenę metodami eksperymentalnymi własności metrologicznych tego systemu oraz analizę poszczególnych źródeł błędów na drodze odpowiednio zaplanowanej serii badań testowych [3]. W tym celu zostały zastosowane inne eksperymentalne metody wyznaczania udziału faz w przepływie mieszaniny gaz-ciecz, jako metody porównawcze - między innymi wspomniane stanowisko badawcze do obserwacji przepływu przy pomocy kamery CCD [2] oraz metoda błyskawicznego zamykania odcinka pomiarowego rurociągu systemem dwóch szybkozamykających się zaworów pneumatycznych usytuowanych na początku i na końcu tego odcinka (metoda niemożliwa do zastosowania w warunkach przemysłowych).

Aby możliwe było dokładne porównanie wyników działań każdej z zastosowanych metod badania procentowego udziału faz, potrzebne było opracowanie jednolitej usługi znaczników czasowych do synchronizacji danych pomiarowych pochodzących z różnych źródeł o różnej prędkości ich akwizycji. Takiej synchronizacji czasowej wymagały:

- dane pomiarowe z trójwymiarowego tomografu pojemnościowego – ECT (prędkość akwizycji danych 12 ramek pomiarowych (równe jest 496 wartościom pojemności międzyelektrodowych) na sekundę),
- sekwencje obrazów rejestrowane przez kamerę CCD (30 obrazów na sekundę),
- nastawy urządzeń zasilających instalację badawczą (prędkość przepływu cieczy i gazu – prędkość zbierania danych ustalono na 2 pomiary na sekundę).

### 1. Algorytm dystrybucji znaczników czasowych

Każda z aplikacji rejestrujących wymienione w poprzednim rozdziale dane pomiarowe otrzymywała znaczniki czasowe, które były dostarczane w oparciu o czas wyznaczany przez jeden

z komputerów i przypisywane do każdej wartości pomiarowej. Schemat sieci działań algorytmu usługi znaczników czasowych został przedstawiony na rysunku 1. Zaprojektowana usługa działa w oparciu o lokalną sieć komputerową LAN i wysyła dane używając protokołu UDP (ang. *User Datagram Protocol*) na zadanym porcie 9055. Na jednym z komputerów w laboratorium pracuje aplikacja serwera czasu. Jej zadaniem jest udostępnianie klientom lokalnego czasu tego komputera. Każdy z klientów, zanim przystąpi do rejestrowania swoich danych pomiarowych, korzystając z dodatkowej biblioteki DLL dołączonej do aplikacji pomiarowej zobligowany jest do wysłania do serwera zapytania o podanie jego lokalnego czasu systemowego. Na podstawie tej wartości oraz swojego czasu lokalnego i czasu transmisji danych, wyznaczana jest różnica pomiędzy czasem klienta, a czasem serwera, która później służy do wyliczenia znacznika czasowego. Ten znacznik czasowy dodawany jest z kolei do każdego pomiaru rejestrowanego przez komputer klienta. Warto zaznaczyć, że usługa jest zaprojektowana w ten sposób, że dowolny komputer może zostać wybrany jako serwer czasu. Klient, nie znając adresu IP serwera, jest w stanie szybko go odnaleźć i nawiązać z nim komunikację sieciową, stosując tryb rozgłaszania w sieci komputerowej LAN.

### 2. Zastosowanie znaczników czasowych

W celu weryfikacji metody wyznaczania udziału faz z wykorzystaniem trójwymiarowego systemu ECT, przeprowadzono eksperyment polegający na jednoczesnej obserwacji przepływu techniką ECT, CCD oraz na pomiarze techniką szybkozamykających się zaworów. W trakcie trwania eksperymentu zapewnione były stałe warunki zasilania rurociągu cieczą oraz gazem. W konsekwencji uzyskano niezmienny charakter przepływu, którego struktury rejestrowano jednocześnie z pomocą komputerów pracujących w systemie tomografu oraz z kamerą CCD, przy zapewnieniu synchronizacji czasowej obu urządzeń.

Ponieważ przeważnie długość struktur przepływu (pęcherzy gazowych i następujących po nich rzutów cieczy), które mogą zostać jednoznacznie zidentyfikowane, a co za tym idzie może być poprawnie zmierzony udział faz, jest znacznie większa niż zakres pomiarowy czujnika ECT, jak również obszar skanowania kamery CCD, należało zebrać pewną ilość pomiarów i analizować całą ich sekwencję. Rejestracja pomiarów trwała co najmniej 90s. To gwarantowało, że w danej sekwencji pomiarów udało się zarejestrować do kilku, nawet najdłuższych, powtarzających się struktur przepływu. Na rysunku 2 zamieszczono przykład jednego z przeprowadzonych eksperymentów.

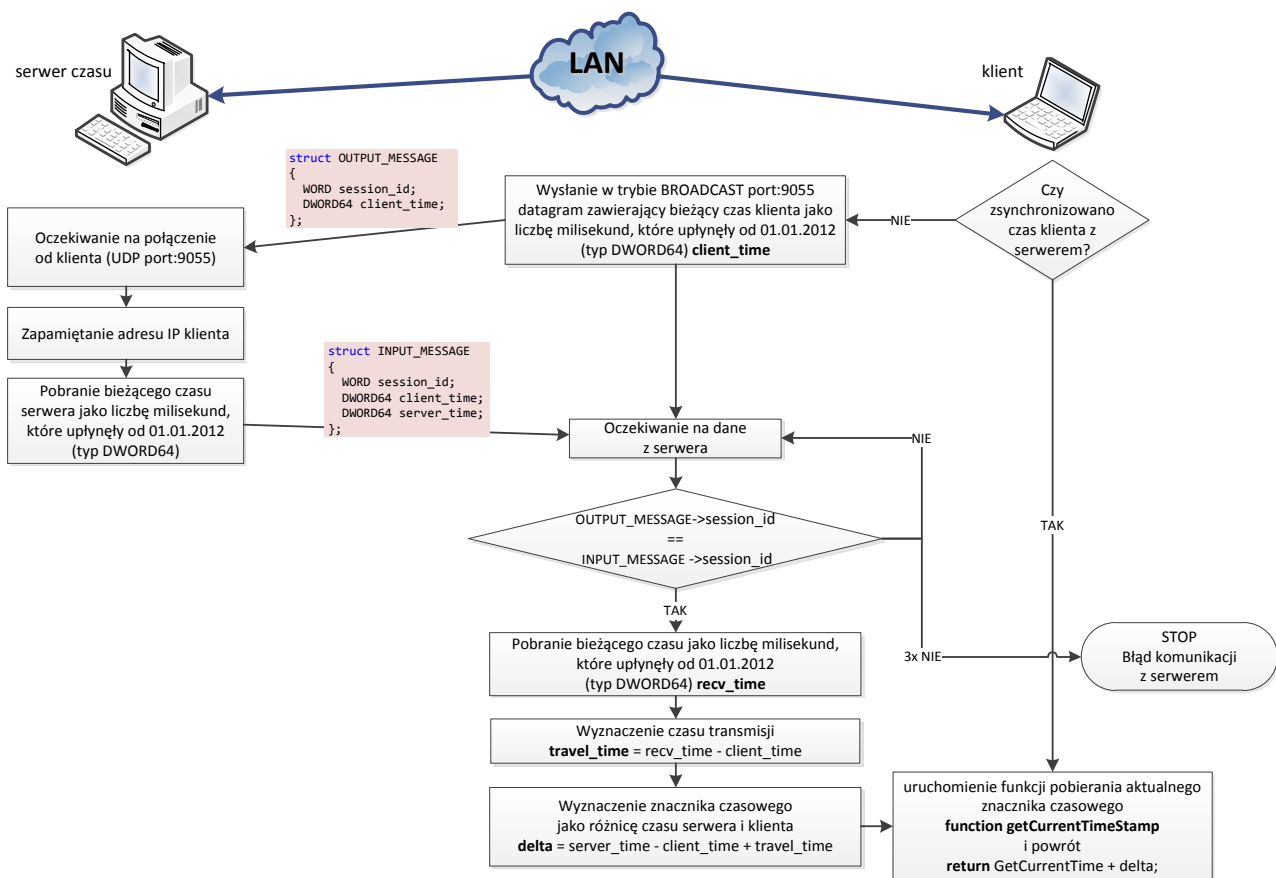
Rysunek 2 przedstawia zarejestrowane systemem ECT i kamerą CCD przebiegi przepływu rzutowego w sekcji poziomej. Na rysunku linią ciągłą zaznaczone zostały udziały fazy ciekłej i gazowej, wyznaczone na podstawie trójwymiarowych obrazów tomograficznych, zrekonstruowanych dla każdej zarejestrowanej ramki pomiarowej ECT (prędkość akwizycji danych to 12 ramek pomiarowych na sekundę; 1 ramka odpowiada 496 pomiarom pojemności). W dalszej kolejności udział fazy ciekłej lub gazowej został wyznaczony w oparciu o dane pochodzące z bloku wnioskowania rozmytego. Na rysunku 2 widać powtarzające się z dość dużą regularnością cykle rzutów w okresie co 160÷170 tomograficznych ramek pomiarowych. Linią przerywaną zaznaczono udziały obu faz (ciekłej i gazowej), wyznaczone tym razem na podstawie analizy przeprowadzonej dla całej sekwencji obrazów, zarejestrowanych kamerą CCD (pomiaru rejestrowane z prędkością 30 obrazów na sekundę).

Sekwencja obrazów CCD (w wyniku synchronizacji czasowej) dokładnie odpowiada pomiarom tomograficznym.

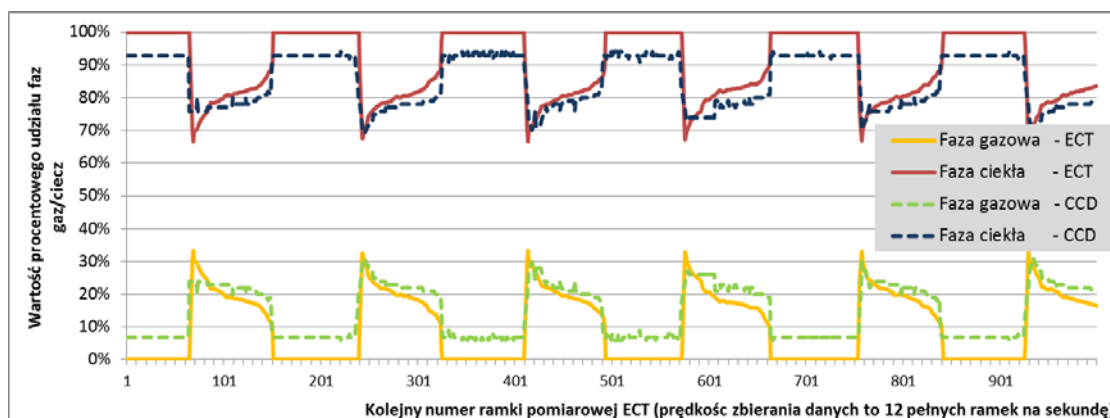
### 3. Podsumowanie

Synchronizacja czasowa okazała się niezwykle przydatna w przypadku zestawiania wyników pomiarowych z różnych systemów pomiarowych. Dzięki temu możliwe było dokładne odwzorowanie jednych danych pomiarowych (np. ECT), w innych (np. CCD), nawet dla tak dynamicznych procesów przemysłowych, jakimi są przepływy dwufazowe mieszanin gaz-ciecz.

Rysunek 2 przedstawia zarejestrowane systemem ECT i kamerą CCD przebiegi przepływu rzutowego w sekcji poziomej. Na rysunku linią ciągłą zaznaczone zostały udziały fazy ciekłej i gazowej, wyznaczone na podstawie trójwymiarowych obrazów tomograficznych, zrekonstruowanych dla każdej zarejestrowanej ramki pomiarowej ECT (prędkość akwizycji danych to 12 ramek pomiarowych na sekundę; 1 ramka odpowiada 496 pomiarom pojemności). W dalszej kolejności udział fazy ciekłej lub gazowej został wyznaczony w oparciu o dane pochodzące z bloku wnioskowania rozmytego.



Rys. 1. Sieć działań algorytmu usługi znaczników czasowych – w tym komunikacja sieciowa UDP serwer – użytkownik



Rys. 2. Zarejestrowany systemem ECT i kamerą CCD przebieg przepływu rzutowego w sekcji poziomej z zaznaczeniem fazy ciekłej i gazowej



Na rysunku 2 widać powtarzające się z dość dużą regularnością cykle rzutów w okresie co 160÷170 tomograficznych ramek pomiarowych. Linią przerywaną zaznaczono udziały obu faz (ciekłej i gazowej), wyznaczone tym razem na podstawie analizy przeprowadzonej dla całej sekwencji obrazów, zarejestrowanych kamerą CCD (pomiaru rejestrowane z prędkością 30 obrazów na sekundę).

Sekwencja obrazów CCD (w wyniku synchronizacji czasowej) dokładnie odpowiada pomiarom tomograficznym.

#### 4. Podsumowanie

Synchronizacja czasowa okazała się niezwykle przydatna w przypadku zestawiania wyników pomiarowych z różnych systemów pomiarowych. Dzięki temu możliwe było dokładne odwzorowanie jednych danych pomiarowych (np. ECT), w innych (np. CCD), nawet dla tak dynamicznych procesów przemysłowych, jakimi są przepływy dwufazowe mieszanin gaz-ciecz.

#### Podziękowania

Prace opisane w ramach niniejszego artykułu są finansowane z rządowego projektu badawczego nr 4664/B/T02/2010/38.

#### Literatura

- [1] Banasiak R., Wajman R., Fidos H., Fiderek P., Jaworski T., Nowakowski J., Sankowski D.: System trójwymiarowej tomografii pojemnościowej w zastosowaniu do wyznaczania udziału faz oraz identyfikacji struktur w przepływach mieszanin gaz-ciecz. IAPGOS, 2013, nr 3, 28-31.
- [2] Fiderek P., Kucharski J.: A Computer Vision System for On-Line Two-Phase Gas-Liquid Flows Recognition Using Fuzzy Methods, Zeszyty naukowe AGH - Automatyka 15/3, 2011, s. 505-519.
- [3] Wajman R., Fidos H., Fiderek P., Jaworski T., Nowakowski J., Sankowski D., Banasiak R.: Ocena metrologiczna systemu pomiarowego dla potrzeb wyznaczania udziału faz w przepływie mieszanin gaz-ciecz metodą tomografii pojemnościowej 3D. IAPGOS, 2013, nr 3, 49-54.

**Dr inż. Radosław Wajman**  
e-mail: rwajman@kis.p.lodz.pl



Dr inż. Radosław Wajman jest adiunktem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. Prowadzone badania skupiają się nad zastosowaniem systemów trójwymiarowej tomografii pojemnościowej do nieinwazyjnego monitorowania, diagnozowania oraz automatycznego sterowania pracą przemysłowych instalacji przepływów dwu-fazowych.

**Mgr inż. Tomasz Jaworski**  
e-mail: tjaworski@kis.p.lodz.pl



Mgr inż. Tomasz Jaworski jest doktorantem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami związanymi z logiką rozmytą oraz przetwarzaniem obrazów.

**Mgr inż. Paweł Fiderek**  
e-mail: p.fiderek@kis.p.lodz.pl



Mgr inż. Paweł Fiderek jest doktorantem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami związanymi z tomografią komputerową, rozpoznawaniem obrazów oraz sztuczną inteligencją zwłaszcza logiką rozmytą.

**Dr inż. Robert Banasiak**  
e-mail: robert.banasiak@p.lodz.pl



Dr inż. Robert Banasiak jest adiunktem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. W swoich pracach zajmuje się przemysłowymi zastosowaniami elektrycznej tomografii procesowej, a w szczególności problematyką rekonstrukcji obrazów oraz modelowania numerycznego systemów tomografii pojemnościowej. Kierownik grantu 4664/B/T02/2010/38.

otrzymano/received: 25.03.2013

przyjęto do druku/accepted: 31.08.2013

## 15th Conference on Optical Fibers and Their Applications

**29.01.2014 – 01.02.2014, Białystok - Lipowy Most, Poland**

**Conference on Optical Fibers and Their Applications** is a long lasting, traditional event, organized since 1976. The purpose is summarizing the developments in the field of optical fiber technology and applications in this geographical region and worldwide. Bring together experts from different fields: academia, government laboratories, industry, telecom operators, and hardware/software vendors.

#### Conference organizers

Białystok University of  
Technology, Faculty of Electrical  
Engineering (Poland)  
Polish Society of Theoretical  
and Applied Electrical  
Engineering (PTETIS) (Poland)

#### IMPORTANT DATES

15.11.2013 – Deadline for online registration and receipt of abstracts  
15.12.2013 - Deadline for payment  
29.01-01.02.2014 15th Conference on Optical Fibers and Their Applications

#### Conference site

<http://we.pb.edu.pl/swiatlowody>

#### Contact

Jacek Kusznier- [swiatlowody@we.pb.edu.pl](mailto:swiatlowody@we.pb.edu.pl)

# IDENTYFIKACJA PRZEPLYWU DWUFAZOWEGO GAZ-CIECZ OPARTA NA OCENIE ROZMYTEJ OBRAZÓW TOMOGRAFICZNYCH 3D

Tomasz Jaworski, Paweł Fiderek, Radosław Wajman, Robert Banasiak

Instytut Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej

**Streszczenie.** Prezentowany artykuł przedstawia wyniki prac nad systemem automatycznego rozpoznawania przepływów dwufazowych gaz-ciecz w rurociągach poziomych i pionowych. Opiera się on na logice rozmytej przy ocenie obrazów przestrzennych z tomografii 3D a następnie na przyporządkowaniu uzyskanych ocen do jednej z klas przepływu.

**Słowa kluczowe:** logika rozmyta, rozmyta ocena obrazów, przetwarzanie obrazów, obrazy przestrzenne

## TWO-PHASE FLOW STRUCTURE IDENTIFICATION BASED ON FUZZY ASSESMENT OF 3D TOMOGRAPHICAL IMAGING

**Abstract.** The following paper presents results of research on automated two-phase flow pattern identification, which is based on a fuzzy assessment of registered spatial images. Such images are obtained from 3D tomography reconstruction algorithms and for each a set of fuzzy-based features is calculated. Finally, acquired features are used to classify obtained image to one of flow regime structures.

**Keywords:** fuzzy logic, fuzzy image assessment, image processing, spatial images

### Wprowadzenie

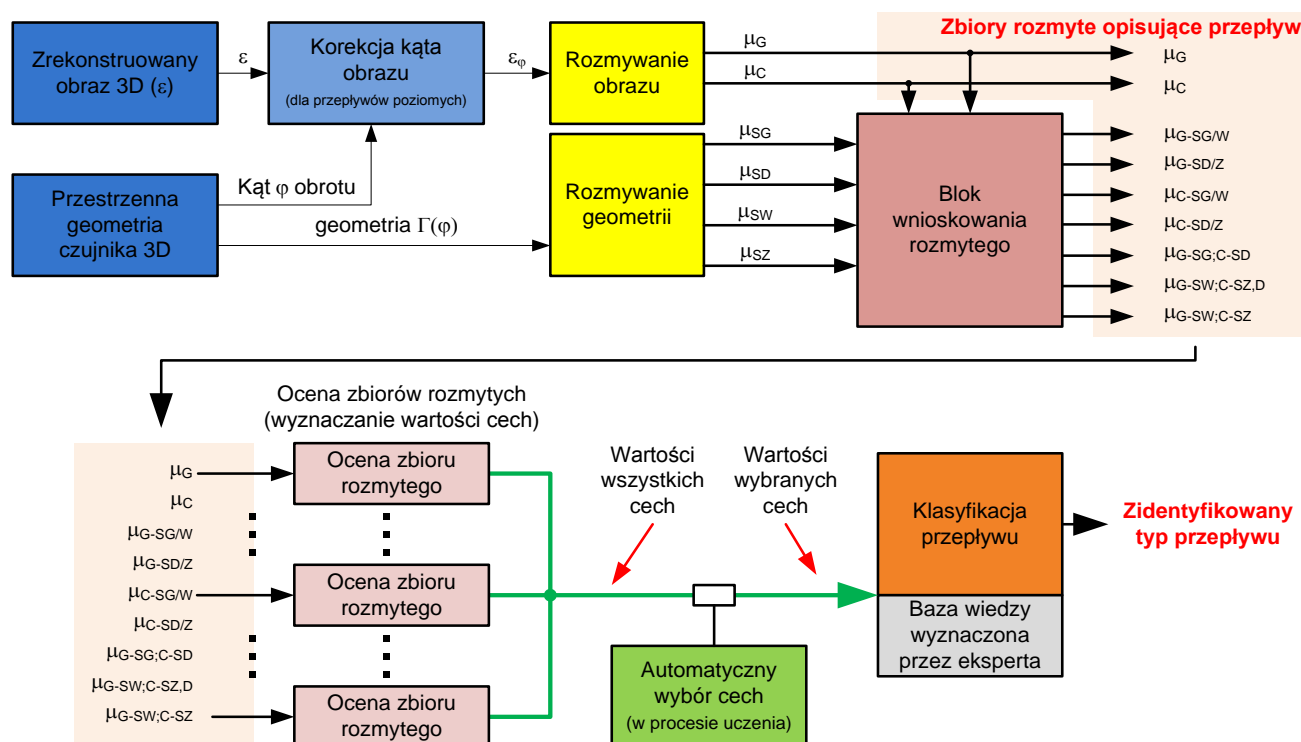
Niniejszy artykuł prezentuje wykorzystanie metod przetwarzania obrazów wraz z ich oceną na bazie logiki rozmytej w celu identyfikacji struktur przepływu dwufazowego gaz-ciecz w rurociągu pionowym i poziomym. Danymi wejściowymi są przestrzenne (wolumetryczne) obrazy pochodzące z rekonstrukcji pomiarów tomografem pojemnościowym.

Przepływy dwufazowe, przede wszystkim gaz-ciecz, są najczęściej spotykanymi przepływami w instalacjach przemysłowych. Ich cechy są wspólne, niezależnie od miejsca zastosowania, np. przemysł chemiczny, naftowy czy spożywczy. W porównaniu z przepływami jednofazowymi, dwufazowe są znacznie bardziej złożone ze względu na ruchomy i niestabilny interfejs międzyfazowy. Do tej pory opracowano wiele metod pomiaru i obrazowania przepływu, jednak według autorów najbardziej obiecującą rodziną metod są obrazowania nieinwazyjne, m.in. tomografia optyczna, rezystancyjna i pojemnościowa.

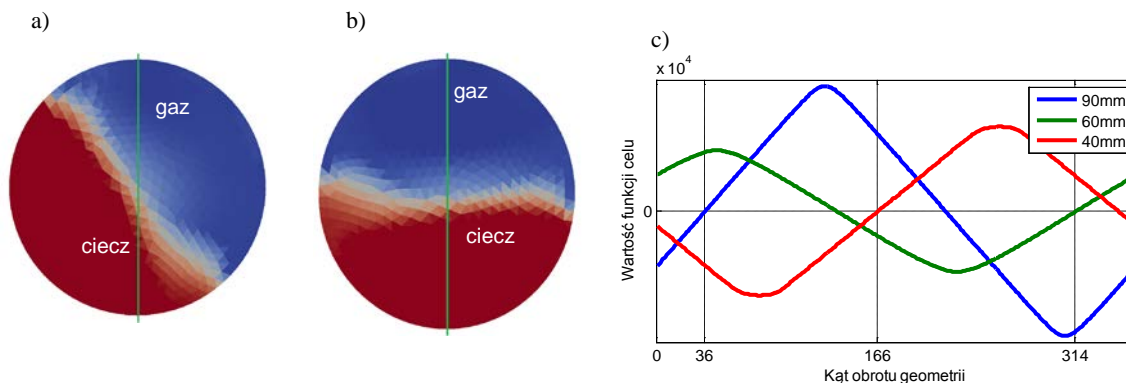
Jednym z zadań, jakie można postawić tomografii elektrycznej jest identyfikacja struktur przepływu. Do tej pory, według wiedzy autorów, w celu identyfikacji struktur przepływu wykorzystywano m.in. dwuwymiarowe obrazy tomograficzne [4, 17] z elementami logiki rozmytej [5, 11, 12], obrazy z szybkiej kamery CCD [3, 16], przetwarzanie surowych pomiarów [14]. Brak jednak badań w kierunku analizy przestrzennych obrazów tomografii 3D z siatką czworokątów. W niniejszym artykule autorzy proponują zastosowanie logiki rozmytej oraz klasyfikatora SVM do identyfikacji struktur przepływu.

### 1. Koncepcja algorytmu

Prezentowany algorytm został przygotowany do identyfikacji struktur przepływów poziomych i pionowych, które uzyskano w ramach badań instalacji pół-przemysłowej w Laboratorium Tomografii Przemysłowej Instytutu Informatyki Stosowanej PŁ. Koncepcja wykonanych badań została omówiona w [2]. Schemat blokowy algorytmu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy algorytmu identyfikacji struktur przepływu w rurociągu poziomym i pionowym; G – gaz; C – ciecz; SG – strefa górna; SD – strefa dolna; SW – strefa wewnętrzna; SZ – strefa zewnętrzna; SG/W – strefa górna lub wewnętrzna; SD/Z – strefa dolna lub zewnętrzna; SZ,D – strefa zewnętrzna, dolna



Rys. 2. Projektacja płaszczyzny XY geometrii czujnika (przekrój poprzeczny) dla przepływu poziomego: a) przed obrotem geometrii; b) po obrocie geometrii; c) wykres wartości funkcji celu

Wymagane informacje wejściowe dla algorytmu można podzielić na dwa źródła: zrekonstruowany obraz wraz z geometrią oraz bazę wiedzy, opracowaną przez eksperta zajmującego się przepływami [2]. Zrekonstruowany obraz, oznaczony symbolem  $\varepsilon$ , jest wynikiem działania algorytmów rekonstrukcji [15]. W przypadku, gdy identyfikowany jest przepływ poziomy, geometria przestrzenna czujnika obracana jest w osi kierunku przepływu o kąt określony przy kalibracji czujnika.

Określenie kąta obrotu geometrii umożliwia zniwelowanie ewentualnego błędu ustawienia czujnika w rurociągu poziomym i ostatecznie ułatwia to używanie rozmytej wartości lingwistycznej „górnadolna strefa czujnika”, w części wnioskowania rozmytego.

Algorytm określania kąta obrotu geometrii przewiduje, że obrazem wejściowym będzie trójwymiarowa rekonstrukcja wnętrza rurociągu, którego połowę zajmuje ciecz – rysunek 2a (tj. glikol w przypadku przeprowadzonych w ramach projektu eksperymentów).

W celu określenia kąta obrotu geometrii algorytm dokonuje minimalizacji funkcji celu, danej wyrażeniem (1)

$$Jrot(\varphi) = \sum_{p \in \Gamma(\varphi)} sign(p_x) V_p I_p \quad (1)$$

gdzie  $p$  jest wokselem<sup>1</sup> trójwymiarowego obrazu  $\varepsilon$ ,  $\Gamma(\varphi)$  jest geometrią obróconą o kąt  $\varphi$ ,  $p_x$  jest składową X środka ciężkości woksela  $p$ ,  $V_p$  jest objętością woksela  $p$  oraz  $I_p$  jest wartością zrekonstruowanego obrazu  $\varepsilon$  w danym wokselu  $p$ . W trakcie prac uzyskano trzy charakterystyki dla czujników o średnicach  $d_2=90$ , 63 i 40mm. Zostały one przedstawione na rysunku 2c. Wyrażenie (1) generuje dwa rozwiązania, przy czym właściwe jest tylko to znajdujące się na zbczu narastającym funkcji celu. Po wyznaczeniu kąta obrotu i wizualizacji rekonstrukcji otrzymywany jest obraz przedstawiony na rysunku 2b. Oczywiście, w przypadku identyfikacji przepływu pionowego korekcja kąta obrotu czujnika nie jest wykonywana.

## 2. Blok wnioskowania rozmytego

Po ewentualnej korekcji geometrii, zrekonstruowany obraz przekazywany jest do bloku wnioskowania rozmytego. Zastosowanie logiki rozmytej [18], jako jednego z elementów procesu identyfikacji, podyktowane zostało naturalną niejednoznacznością wyników rekonstrukcji. Dowolnie wybrany punkt zrekonstruowanego obrazu, na kanwie logiki klasycznej, można interpretować jako „ciecz”, „gaz” lub „stan pośredni”. Ilościowa granica między tymi określeniami jest dyskusyjna a ogólnie narzucone wartości diametralnie wpływają na wynik identyfikacji. Logika rozmyta natomiast w naturalny sposób wykorzystuje niepewność rekonstrukcji, pozwalając na wyznaczenie przynależności danego punktu zarówno do pojęcia „gaz” jak i „ciecz”. Stan pośredni jest tutaj

„wbudowany” w pojęcie przynależności. Warto nadmienić, że choć przynależność i prawdopodobieństwo operują na zakresie jednostkowym [0;1], to fizyczna interpretacja jest całkowicie odmienna. Dla przykładu, jeśli dla przynależności punktu do zbiorów „gaz”/„ciecz” wynosi 0.5, to można powiedzieć, że zawiera równocześnie gaz i ciecz w podobnej ilości. Natomiast prawdopodobieństwo 0.5 oznacza, że punkt może być gazem lub cieczą.

Blok wnioskowania rozmytego rozpoczyna swoją pracę od pierwszej fazy – od rozmycia (ang. *fuzzification*) obrazu, tj. wyznaczenia dwóch zbiorów rozmytych, opisujących obraz wejściowy. Zbiory te, oznaczone odpowiednio gaz (G) i ciecz (C) prezentowane na rysunku 3 opisują stopień, w jakim każdy z punktów obrazu wejściowego można przypisać do kategorii gaz/ciecz.

Druga faza to rozmycie geometrii poprzez utworzenie stref, które można identyfikować wartościami lingwistycznymi, takimi jak: strefa górna (SG), strefa dolna (SD), strefa wewnętrzna (SW), strefa zewnętrzna (SZ). W przypadku czujnika poziomego wartość przynależności jest uwarunkowana procentową wartością składowej Y (wysokość) i przyjmuje wartość od 0 (nie górna strefa<sup>2</sup>) do 1 (górną strefa). Funkcje charakterystyczne zbiorów rozmytych zostały przedstawione na rysunku 4a wraz z wizualizacją zbioru strefa dolna (SD) na rysunku 4b. Widać na nim, że wartość przynależności przechodzi płynnie od pełnej przynależności (Y maksymalny) do zerowej przynależności (Y minimalny).



Rys. 3. Funkcje przynależności wykorzystane do rozmycia obrazu wejściowego

Podobnie wygląda rozmywanie geometrii dla czujnika pionowego, gdzie przykład takiego rozmycia został przedstawiony na rysunku 4c. W tym wypadku wartość przynależności do stref wewnętrznej i zewnętrznej zależy od procentowej odległości punktu, dla którego liczona jest przynależność, od środka ciężkości geometrii na płaszczyźnie XY. Wizualizacja 3D na rysunku 4d przedstawia strefę zewnętrzną czujnika.

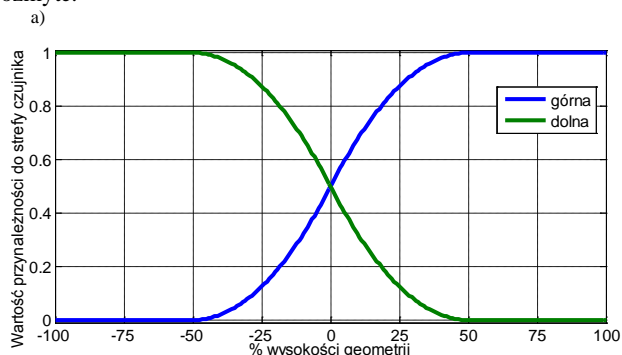
Po rozmyciu zarówno obrazu jak i geometrii, algorytm identyfikacji realizuje etap wnioskowania, wykorzystując do tego wygenerowane wcześniej zbiory rozmyte. Zaprojektowana baza

<sup>1</sup> przestrzenny piksel posiadający objętość - w przypadku opisywanego algorytmu jest czworoscianem

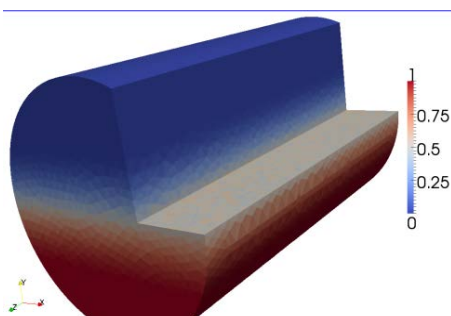
<sup>2</sup> pojęcie „nie górna strefa” wcale nie musi oznaczać strefy dolnej



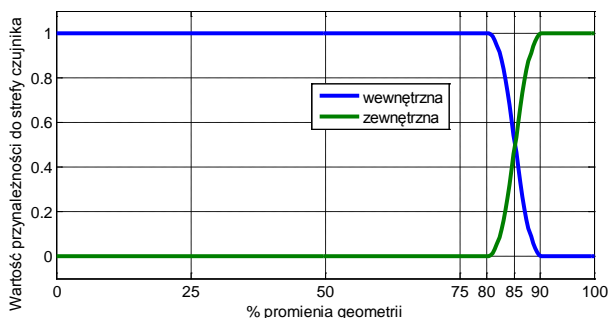
reguł modułu wnioskowania została przedstawiona w tabeli 1. Pogrubioną czcionką wyróżniono zbiory rozmyte generowane przez poszczególne reguły natomiast kursywą wejściowe zbiory rozmyte.



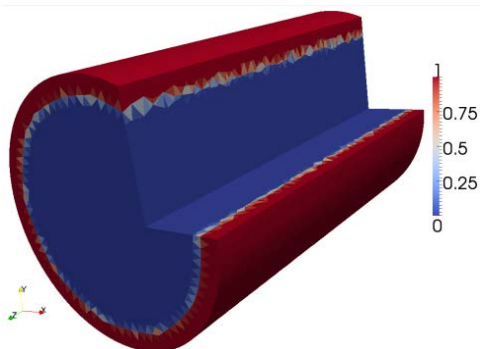
b)



c)



d)



Rys. 4. Rozmywanie geometrii: funkcja charakterystyczna stref: a) górnej i dolnej oraz b) wizualizacja strefy dolnej; c) wewnętrznej i zewnętrznej oraz d) wizualizacja strefy zewnętrznej

Dla tak otrzymanych zbiorów rozmytych wyznaczono wartości cech (zestaw cech), przy czym każdy zbiór oceniany był tym samym zestawem reguł. Oprócz ogólnie przyjętych cech oceny zbioru wartości (średnia, odchylenie standardowe) i zbiorów rozmytych [1] (moc zbioru rozmytego, wielkość nośnika, jądra oraz entropia) autorzy zaproponowali również własne cechy odpowiadające specyfice problemu identyfikacji struktur przepływu. Poniżej zamieszczono listę najważniejszych cech charakteryzujących uzyskane zbiory rozmyte, przy czym

czcionką pogrubioną oznaczono cechy zaproponowane przez autorów:

- Liczba kardynalna (moc zbioru) zbioru rozmytego A:

$$\text{card}(A) = \sum_x \mu_A(x) \quad (2)$$

gdzie A to zbiór rozmyty,  $\mu_A$  to funkcja przynależności (zwana również funkcją charakterystyczną) zbioru rozmytego A.

- Średnia lokalna entropia zbioru rozmytego A:

$$E_{SL}(A) = \frac{1}{|A|} \sum_{p \in A} \left( \frac{1}{|NB(p)|} \sum_{p \in NB(p)} -SE(\mu_A(p)) \right) \quad (3)$$

gdzie A to zbiór rozmyty,  $NB(\bullet)$  to lista sąsiadów a  $SE(\bullet)$  to miara entropii dla konkretnej wartości przynależności, wyrażona poprzez entropię Shannona:

$$SE(\mu) = \mu \log \mu + (1 - \mu) \log(1 - \mu) \quad (4)$$

- Entropia zbioru rozmytego A:

$$E(A) = \frac{1}{|A|} \sum_{p \in A} SE(\mu_A(p)) \quad (5)$$

- Entropia rozmyta „AnotA”:

$$F_{\overline{A}\overline{A}}(A) = \frac{\text{card}(A \wedge \overline{A})}{\text{card}(A \vee \overline{A})} \quad (6)$$

gdzie  $\overline{A}$  to dopełnienie zbioru rozmytego, najczęściej wyrażone poprzez  $\mu_{\overline{A}} = 1 - \mu_A$ .

- Jednorodność lokalna maksymalna przestrzennego zbioru rozmytego A:

$$H_{LM}(A) = \frac{1}{\sum_{p \in A} |NB(p)|} \text{std} \left( \bigcup_{p \in A} \max \{ |\mu_A(p) - \mu_A(q)| : q \in NB(p) \} \right) \quad (7)$$

gdzie  $\text{std}(\bullet)$  to odchylenie standardowe.

- Jednorodność lokalna przestrzennego zbioru rozmytego A:

$$H_L(A) = \sum_{p \in A} \frac{\text{std}(\{ \mu_A(q) : q \in NB(p) \})}{\{ \mu_A(q) : q \in NB(p) \}} \quad (8)$$

- Separacja zbiorów gazu i cieczy w przestrzeni:

$$S^{r,s}(G, C) = \frac{\sum_{p \in G} P_Y^r P_Z^s \mu_G(p)}{\text{card}(G)} - \frac{\sum_{q \in C} q_Y^r q_Z^s \mu_C(q)}{\text{card}(C)} \quad (9)$$

gdzie  $P_Y$  oraz  $P_Z$  to składowe Y oraz Z środka woksela p. W implementacji wykorzystano  $S^{1,0}$  dla przepływów poziomych i  $S^{0,1}$  dla przepływów pionowych.

Tabela 1. Baza reguł wnioskowania rozmytego i wyrażen akumulujących

<b>Blok 1 (wnioskowanie – zastosowana implikacja rozmyta)</b>
Jeśli strefa jest <i>górną</i> i obraz jest gazem to <b>gaz u góry (G-SG)</b> ;
Jeśli strefa jest <i>dolną</i> i obraz jest gazem to <b>gaz na dole (G-SD)</b> ;
Jeśli strefa jest <i>górną</i> i obraz jest cieczą to <b>ciecz u góry (C-SG)</b> ;
Jeśli strefa jest <i>dolną</i> i obraz jest cieczą to <b>ciecz na dole (C-SD)</b> ;
<b>Blok 2 (wnioskowanie – zastosowana implikacja rozmyta)</b>
Jeśli strefa jest <i>wewnętrzna</i> i obraz jest gazem to <b>gaz jest wewnątrz (G-SW)</b> ;
Jeśli strefa jest <i>zewnętrzna</i> i obraz jest gazem to <b>gaz jest na zewnątrz (G-SZ)</b> ;
Jeśli strefa jest <i>wewnętrzna</i> i obraz jest cieczą to <b>ciecz jest wewnątrz (C-SW)</b> ;
Jeśli strefa jest <i>zewnętrzna</i> i obraz jest cieczą to <b>ciecz jest na zewnątrz (C-SZ)</b> ;
<b>Blok 3 (akumulacja – zastosowany iloczyn rozmyty)</b>
<i>gaz u góry (G-SG) i ciecz u dołu (C-SD) →</i>
<b>gaz u góry, ciecz na dole (G-SG;C-SD)</b>
<i>gaz jest wewnątrz (G-SW) i ciecz jest na zewnątrz (C-SZ) →</i>
<b>gaz wewnątrz, ciecz na zewnątrz (G-SW;C-SZ)</b>
<i>gaz jest wewnątrz (G-SW) i ciecz jest na zewnątrz (C-SZ) i strefa jest dolna (SD) →</i>
<b>gaz wewnątrz, ciecz w strefie dolnej/zewnętrznej (G-SW;C-SZ,D)</b>

### 3. Blok klasyfikatorów

Mając wyznaczone wartości cech dla obrazów z przepływów eksperymentalnych, autorzy przystąpili do przygotowania zbiorów uczących oraz testujących klasyfikator. Analiza odbywała się poprzez indywidualny opis, wykonywany przez eksperta, poszczególnych obrazów zrekonstruowanych w ramach badań opisanych w [15]. W ramach analizy obrazów przestrzennych

wyróżniono szereg klas odpowiadających obserwowalnym strukturom przepływów. Zestaw klas został przedstawiony w tabeli 2. Każdy z obrazów został zakwalifikowany przez eksperta do jednej z klas.

Tabela 2. Lista klas rozpoznawanych struktur z podziałem na średnice i typy przepływów

Typ	Średnica	Klasy
Poziomy	90mm, 63mm, 40mm	Tylko ciecz (1), Warstwowy (2), Rzutowy (3), Pęcherzykowy (4)
Pionowy	90mm, 63mm, 40mm	Rzutowy (1), Pianowy (2), Pierścieniowy (3), Tylko ciecz (4)

Jako klasyfikator wykorzystano technikę wektorów podtrzymujących [6] SVM (ang. *Support Vector Machine*), znaną w polskim tłumaczeniu również jako Maszynę Wektorów Nośnych/Podpierających. Ideą klasyfikatora SVM jest rozdzielanie punktów, należących do dwóch różnych klas (etykiety 1 i -1), za pomocą hiperpłaszczyzny określonej równaniem (10). Punkty te, są obrazami opisanymi przez wektory cech o identycznej długości.

$$\bar{\mathbf{w}} \cdot \bar{\mathbf{x}} - b = 0 \quad (10)$$

gdzie wektor  $\bar{\mathbf{w}}$  jest normalnym do hiperpłaszczyzny a skalar  $b$  jej przesunięciem. Algorytm znajduje wartości wektora  $\bar{\mathbf{w}}$  i  $b$  poprzez znalezienie największego marginesu rozdzielającego, wyrażonego poprzez  $2/\|\bar{\mathbf{w}}\|$ . Odbywa się to poprzez znalezienie

minimum  $\|\bar{\mathbf{w}}\|^2$ , spełniającego warunek (11).

$$y_i(\mathbf{w} \cdot \mathbf{s}_i - b) \geq 1 \quad (11)$$

gdzie  $y_i$  to etykieta klasy  $\{-1, 1\}$ , a  $\mathbf{s}_i$  to  $i$ -ty wektor wspierający, na którym dodatnia bądź ujemna strona marginesu ma się opierać.

Ponieważ klasyfikator ten jest z natury dwuklasowy (etykiety klas to 1 i -1), w celu uzyskania klasyfikatora wieloklasowego, wykorzystano metodę *ONE-versus-ALL* [13]. Polega ona na utworzeniu  $K$  klasyfikatorów dla  $K$  klas, gdzie każdy z klasyfikatorów wyznacza hiperpłaszczyznę separującą swoją klasę od pozostałych punktów. Ostateczna decyzja polega na wybraniu klasy, dla której klasyfikowany punkt jest położony najdalej od hiperpłaszczyzny separującej, w kierunku normalnej do tej płaszczyzny.

Ze względu na dużą ilość wartości cech opisujących każdy z obrazów (302 elementy wektora), autorzy wykorzystali metodę automatycznego doboru cech SVM-RFE [9]. Jej celem jest wyeliminowanie cech nieznaczących i zwiększenie wydajności etapu klasyfikacji. Ograniczenie ilości cech istotnych, pozwoliło również na zmniejszenie nakładu obliczeniowego, a tym samym zwiększyło wydajność całego procesu.

Poza tym, implementując klasyfikator SVM dokonano porównania wyników klasyfikacji z FCM (ang. *Fuzzy C-Means*), będącym najczęściej stosowanym algorytmem grupowania rozmytego [7]. Podstawową różnicą między algorytmem FCM a SVM jest możliwość przypisania jednego punktu do różnych klas z odpowiednimi dla nich stopniami przynależności. W trakcie porównywania wyników przyjęto, że obraz należy do tej klasy, dla której jego wartość przynależności jest największa. Ideą algorytmu FCM jest minimalizacja funkcji celu, podana w wyrażeniu (12):

$$J(\mathbf{X}; \mathbf{U}, \mathbf{V}) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^{|\mathbf{X}|} \mu_{ik}^m (\mathbf{x}_k - \mathbf{v}_i)^T \mathbf{A} (\mathbf{x}_k - \mathbf{v}_i) \quad (12)$$

gdzie:

$\mathbf{U} - \mathbf{U} = \{\mu_{ik}\}$  – macierz podziału zbioru punktów  $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_k\}$ ,

$\mathbf{X}$  – zbiór punktów  $\mathbf{x}_k$ ,

$C$  – ilość grup,

$k$  – numer punktu,

$\mathbf{V} - \mathbf{V} = \{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_C\}$  – macierz przechowująca współrzędne

środków grup  $\mathbf{v}_i$ , zwanych również prototypami,

$(\mathbf{x}_k - \mathbf{v}_i)^T \mathbf{A} (\mathbf{x}_k - \mathbf{v}_i)$  – wyrażenie pozwalające obliczyć odległość

między punktem  $\mathbf{x}_k$  a środkiem grupy  $\mathbf{v}_i$ ,

$\mathbf{A} - \mathbf{A}$  jest macierzą indukującą miarę odległości. W przypadku algorytmu FCM jest to macierz jednostkowa.

#### 4. Klasyfikacja zbioru uczącego

Dysponując implementacjami powyższych elementów systemu oraz zbiorami danych uczących i testujących, autorzy przystąpili do etapu uczenia klasyfikatorów poszczególnych wzorców przepływów. Tabela 3 przedstawia wyniki uczenia i klasyfikacji wybranych obrazów uczących dla poszczególnych eksperymentów, przy czym proces ten był weryfikowany metodą *Minus jednego elementu* (ang. *Leave-One-Out*) [8].

Wyniki klasyfikacji testowej, otrzymane w trakcie uczenia, zarówno dla klasyfikatora SVM jak i FCM, zostały przedstawione w postaci macierzy pomyłek [10] (ang. *confusion matrix*). Jako dane uczące wykorzystano wyniki badań, opisane w [15]. Dane te były w postaci zrekonstruowanych obrazów dla przepływów różnego typu i zostały poddane ręcznej ocenie przez eksperta z dziedziny inżynierii procesowej a następnie wykorzystane jako dane uczące dla opisywanej metody.

Wiersze macierzy oznaczają spodziewany rezultat klasyfikacji, natomiast kolumny – rzeczywisty (uzyskany z algorytmów SVM/FCM). Każdy z wierszy posiada etykietę oraz identyfikator nadany przez eksperta.

Dla lepszej czytelności, identyfikatory posiadają tylko nazwy kolumn. Jakość klasyfikacji etapu uczenia (również etapu klasyfikacji testowej) dla obu klasyfikatorów określono przez trzy miary ewaluacji:

– czułość (ang. *sensitivity*), określona wzorem (12), oznaczająca prawdopodobieństwo klasyfikacji danego obrazu do klasy wyznaczonej przez eksperta (prawdopodobieństwo poprawnej klasyfikacji),

$$M_{czulosc} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (13)$$

– odrębność (ang. *specifity*) lub *swoistość*, określona wzorem (13), oznaczająca prawdopodobieństwo niezaklasyfikowania danego punktu do klasy, do której nie należy (według eksperta),

$$M_{specyficzosc} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (14)$$

– precyzja (ang. *total accuracy*) określona wzorem (14), oznaczająca prawdopodobieństwo prawidłowej klasyfikacji danego punktu,

$$M_{dokladnosc} = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (15)$$

gdzie wartości TP, TN, FP, FN w powyższych wyrażeniach wyznaczone są dla poszczególnych błędnych macierzy pomyłek. Ich znaczenia podano poniżej:

TP – (ang. *True Positive*) – ilość klasyfikacji punktów z klasy X do klasy X,

TN – (ang. *True Negative*) – ilość klasyfikacji punktów spoza klasy X do klas innych niż X,

FP – (ang. *False Positive*) – ilość klasyfikacji punktów spoza klasy X do klasy X

FN – (ang. *False Negative*) – ilość klasyfikacji punktów z klasy X do klas innych niż X.



Tabela 3. Wynik efektywności uczenia klasyfikatora (kolorem szarym oznaczono klasyfikator bliższy decyzjom eksperta; kolorem żółtym oznaczono te same poziomy prawdopodobieństwa dla obu klasyfikatorów)

Czujnik	Średnica	Ilość obrazów	Nazwa klasy (numer klasy)															Razem
			Określone przez eksperta	Klasyfikator SVM						Klasyfikator FCM								
				1	2	3	4	Czułość	Spec.	Dokład.	1	2	3	4	Czułość	Spec.	Dokład.	
Poziomy	d <sub>p</sub> =90mm	200	Tylko ciecz (1)	48	1	1	0	96.00%	99.33%	98.50%	34	1	0	15	68.00%	98.00%	90.50%	50
			Warstwowy (2)	0	48	2	0	96.00%	98.00%	97.50%	0	49	1	0	98.00%	88.67%	91.00%	50
			Rzutowy (3)	1	2	47	0	94.00%	98.00%	97.00%	3	16	31	0	62.00%	99.33%	90.00%	50
			Pęcherzykowy (4)	0	0	0	50	100.00%	100.00%	100.00%	0	0	0	50	100.00%	90.00%	92.50%	50
	d <sub>p</sub> =63mm	191	Tylko ciecz (1)	49	0	1	0	98.00%	97.87%	97.91%	49	0	1	0	98.00%	94.33%	95.29%	50
			Warstwowy (2)	0	48	2	0	96.00%	95.04%	95.29%	1	49	0	0	98.00%	92.20%	93.72%	50
			Rzutowy (3)	3	7	39	1	78.00%	96.45%	91.62%	7	11	27	5	54.00%	99.29%	87.43%	50
			Pęcherzykowy (4)	0	0	2	39	95.12%	99.33%	98.43%	0	0	0	41	100.00%	96.67%	97.38%	41
	d <sub>p</sub> =40mm	193	Tylko ciecz (1)	43	0	0	0	100.00%	99.33%	99.48%	37	1	5	0	86.05%	99.33%	96.37%	43
			Warstwowy (2)	1	49	0	0	98.00%	100.00%	99.48%	1	48	1	0	96.00%	99.30%	98.45%	50
			Rzutowy (3)	0	0	50	0	100.00%	100.00%	100.00%	0	0	50	0	100.00%	95.80%	96.89%	50
			Pęcherzykowy (4)	0	0	0	50	100.00%	100.00%	100.00%	0	0	0	50	100.00%	100.00%	100.00%	50
Pionowy	d <sub>p</sub> =90mm	200	Rzutowy (1)	32	13	3	2	64.00%	89.33%	83.00%	23	22	4	1	46.00%	84.00%	74.50%	50
			Pianowy (2)	11	39	0	0	78.00%	88.67%	86.00%	20	30	0	0	60.00%	83.33%	77.50%	50
			Pierścieniowy (3)	3	4	17	26	34.00%	79.33%	68.00%	4	3	20	23	40.00%	88.67%	76.50%	50
			Tylko ciecz (4)	2	0	28	20	40.00%	81.33%	71.00%	0	0	13	37	74.00%	84.00%	81.50%	50
	d <sub>p</sub> =63mm	200	Rzutowy (1)	37	1	12	0	74.00%	93.33%	88.50%	21	12	17	0	42.00%	76.00%	67.50%	50
			Pianowy (2)	2	43	5	0	86.00%	95.33%	93.00%	2	48	0	0	96.00%	89.33%	91.00%	50
			Pierścieniowy (3)	8	6	35	1	70.00%	86.67%	82.50%	33	4	13	0	26.00%	75.33%	63.00%	50
			Tylko ciecz (4)	0	0	3	47	94.00%	99.33%	98.00%	1	0	20	29	58.00%	100.00%	89.50%	50
	d <sub>p</sub> =40mm	186	Rzutowy (1)	20	9	13	8	40.00%	74.26%	65.05%	32	7	2	9	64.00%	66.91%	66.13%	50
			Pianowy (2)	14	20	4	12	40.00%	82.35%	70.97%	5	20	7	18	40.00%	83.09%	71.51%	50
			Pierścieniowy (3)	13	3	34	0	68.00%	87.50%	82.26%	40	0	10	0	20.00%	93.38%	73.66%	50
			Tylko ciecz (4)	8	12	0	16	44.44%	86.67%	78.49%	0	16	0	20	55.56%	82.00%	76.88%	36

Tabela 4. Wyniki klasyfikacji obrazów przeznaczonych do testowania klasyfikatora (kolorem szarym oznaczono klasyfikator bliższy decyzjom eksperta; kolorem żółtym oznaczono te same poziomy prawdopodobieństwa dla obu klasyfikatorów)

Czujnik	Średnica	Ilość obrazów	Nazwa klasy (numer klasy)															Razem
			Określone przez eksperta	Klasyfikator SVM						Klasyfikator FCM								
				1	2	3	4	Czułość	Spec.	Dokład.	1	2	3	4	Czułość	Spec.	Dokład.	
Poziomy	dz=90mm	4590	Tylko ciecz (1)	1570	0	0	6	99.62%	100.00%	99.87%	1574	0	0	2	99.87%	99.83%	99.85%	1576
			Warstwowy (2)	0	2280	146	1	93.94%	100.00%	96.80%	0	1034	1393	0	42.60%	100.00%	69.65%	2427
			Rzutowy (3)	0	0	170	2	98.84%	96.58%	96.67%	0	0	171	1	99.42%	67.22%	68.43%	172
			Pęcherzykowy (4)	0	0	5	410	98.80%	99.78%	99.69%	5	0	55	355	85.54%	99.93%	98.63%	415
	dz=63mm	2311	Tylko ciecz (1)	686	21	48	1	90.74%	99.55%	96.67%	656	9	87	4	86.77%	96.46%	93.29%	756
			Warstwowy (2)	0	1340	28	0	97.95%	96.29%	97.27%	34	1313	20	1	95.98%	95.02%	95.59%	1368
			Rzutowy (3)	7	14	122	3	83.56%	96.49%	95.67%	21	38	69	18	47.26%	95.06%	92.04%	146
			Pęcherzykowy (4)	0	0	0	41	100.00%	99.82%	99.83%	0	0	0	41	100.00%	98.99%	99.00%	41
	dz=40mm	1021	Tylko ciecz (1)	43	0	0	0	100.00%	98.06%	98.14%	37	1	5	0	86.05%	99.69%	99.12%	43
			Warstwowy (2)	16	550	0	0	97.17%	99.78%	98.33%	2	549	13	2	97.00%	99.56%	98.14%	566
			Rzutowy (3)	3	1	303	1	98.38%	100.00%	99.51%	1	1	306	0	99.35%	97.48%	98.04%	308
			Pęcherzykowy (4)	0	0	0	104	100.00%	99.89%	99.90%	0	0	0	104	100.00%	99.78%	99.80%	104
Pionowy	dz=90mm	894	Rzutowy (1)	133	19	24	10	71.51%	93.08%	88.59%	82	60	31	13	44.09%	81.36%	73.60%	186
			Pianowy (2)	34	193	10	0	81.43%	94.82%	91.28%	101	136	0	0	57.38%	88.74%	80.43%	237
			Pierścieniowy (3)	10	15	157	83	59.25%	82.51%	75.62%	25	14	115	111	43.40%	86.49%	73.71%	265
			Tylko ciecz (4)	5	0	76	125	60.68%	86.48%	80.54%	6	0	54	146	70.87%	81.98%	79.42%	206
	dz=63mm	748	Rzutowy (1)	187	8	23	0	85.78%	96.04%	93.05%	98	50	70	0	44.95%	80.94%	70.45%	218
			Pianowy (2)	1	83	1	0	97.65%	97.74%	97.73%	2	83	0	0	97.65%	90.95%	91.71%	85
			Pierścieniowy (3)	12	7	122	3	84.72%	93.38%	91.71%	93	10	41	0	28.47%	68.71%	60.96%	144
			Tylko ciecz (4)	8	0	16	277	92.03%	99.33%	96.39%	6	0	119	176	58.47%	100.00%	83.29%	301
	dz=40mm	240	Rzutowy (1)	55	4	6	7	76.39%	97.62%	91.25%	43	11	3	15	59.72%	70.83%	67.50%	72
			Pianowy (2)	3	67	2	9	82.72%	97.48%	92.50%	8	30	12	31	37.04%	83.02%	67.50%	81
			Pierścieniowy (3)	1	0	50	0	98.04%	95.77%	96.25%	41	0	10	0	19.61%	92.06%	76.67%	51
			Tylko ciecz (4)	0	0	0	36	100.00%	92.16%	93.33%	0	16	0	20	55.56%	77.45%	74.17%	36

#### 4.1. Wyniki klasyfikacji dla zbioru uczącego

W przypadku eksperymentów z klasyfikacją przepływów poziomych widać, że klasyfikator SVM jest odpowiednim narzędziem (dokładność klasyfikacji wyższa od FCM dla wszystkich średnic). Nie dyskwalifikuje to jednak klasyfikatora FCM, gdyż jego dokładność (poza przypadkiem przepływu rzutowego/ $d_z=63\text{mm}$ ) utrzymuje się powyżej 90%. Tak niski wynik dokładności klasyfikacji, na poziomie 87% można tłumaczyć podobieństwem obrazów tomograficznych przepływu rzutowego do warstwowego. Warto również zwrócić uwagę na bardzo dobre rozróżnienie przepływu pęcherzykowego od rury pełnej cieczy. Podczas przygotowywania danych testowych ekspert często nie mógł się zdecydować, do której z tych klas dany przepływ zaliczyć.

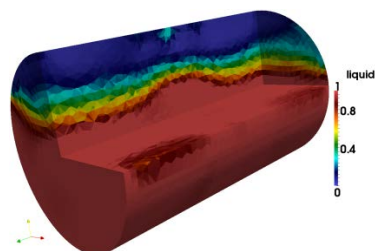
Widocznie niższą dokładność klasyfikacji w etapie nauki uzyskano dla przepływów pionowych. Tutaj ogromnym utrudnieniem okazał się efekt cofania się struktur. Również wiele obrazów zostało bez jakiegokolwiek klasyfikacji ze strony eksperta ze względu na brak wizualnej przynależności do jakiegokolwiek rozpoznawalnej struktury. W tym wypadku najniższą dokładność klasyfikacji uzyskał przepływ rzutowy dla czujnika o średnicy  $d_z=40\text{mm}$ . Ze względu na średnicę oraz naturę zjawiska praktycznie każdy obraz, uzyskany za pomocą tomografu, przypominał przepływ rzutowy

#### 4.2. Wyniki klasyfikacji zbioru testującego

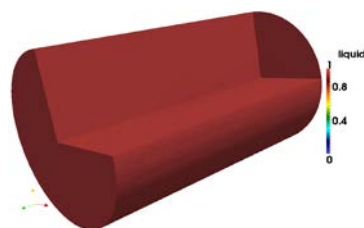
Tabela 4 przedstawia wyniki klasyfikacji obrazów testowych zidentyfikowanych przez eksperta. W przypadku identyfikacji na danych testujących autorzy uzyskali wyniki podobne do klasyfikacji danych uczących. Klasyfikator SVM okazał się dobrze wybranym narzędziem do identyfikacji przepływów z obu typów czujników. Tylko w jednym przypadku, dla czujnika poziomego  $d_z=40\text{mm}$  i identyfikacji rury wypełnionej glikolem, uzyskano dokładność 98.14% (o 0.8% mniejszą niż w przypadku zastosowania klasyfikatora FCM). Można to wyjaśnić efektem „napowietrzenia” glikolu, który ze względu na swoją lepkość tworzył zawiesinę gazu w cieczy. Efekt ten był również niekorzystny w procesie kalibracji i normalizacji pomiarów czujnika ze względu na zawsze istniejącą, resztkową ilość gazu w cieczy.

#### 4.3. Przykłady przepływów

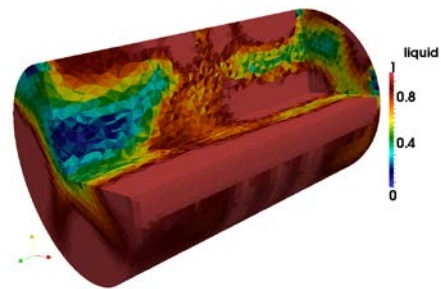
Na rysunku 5, zamieszczono przykładowe trójwymiarowe obrazy przepływów, analizowanych przez eksperta.



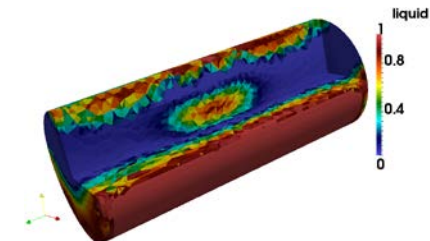
Przepływ warstwowy ( $d_z=90\text{mm}$ , sekcja pozioma)



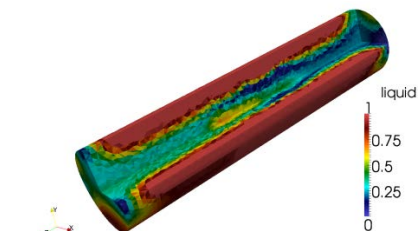
Czujnik zawierający tylko ciecz ( $d_z=90\text{mm}$ , sekcja pozioma)



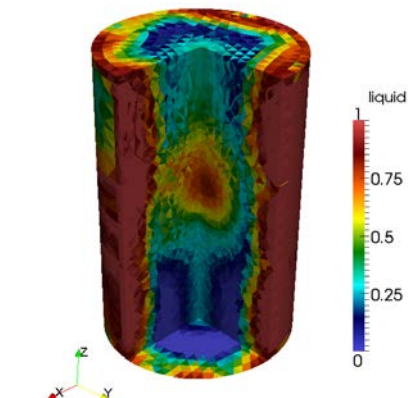
Przepływ rzutowy ( $d_z=90\text{mm}$ , sekcja pozioma)



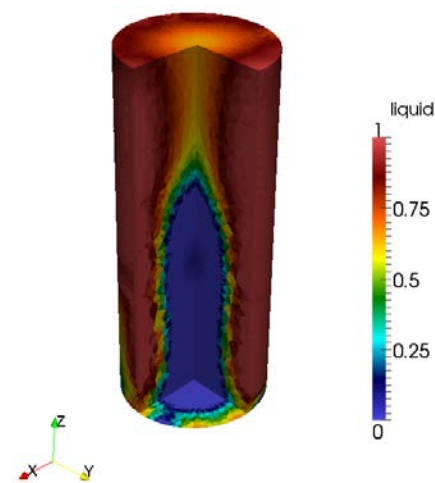
Przepływ pęcherzykowy ( $d_z=40\text{mm}$ , sekcja pozioma)



Przepływ pęcherzykowy ( $d_z=40\text{mm}$ , sekcja pozioma)



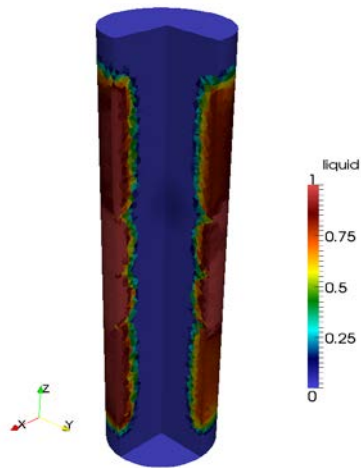
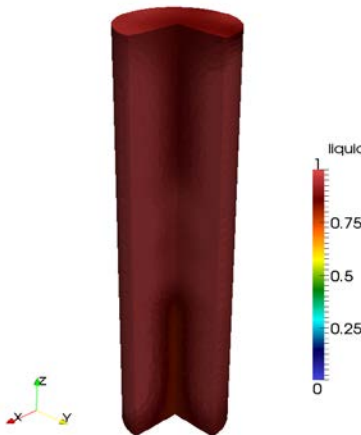
Przepływ rzutowy ( $d_z=90\text{mm}$ , sekcja pionowa)



Przepływ rzutowy ( $d_z=60\text{mm}$ , sekcja pionowa), widoczne czoło pęcherza

Rys. 5. Trójwymiarowe tomogramy struktur przepływów wraz z opisem uzyskanym przez eksperta

Rys. 5 (cd). Trójwymiarowe tomogramy struktur przepływów wraz z opisem uzyskanym przez eksperta

Przepływ pierścieniowy ( $d_z=40\text{mm}$ , sekcja pionowa)Przepływ pianowy ( $d_z=40\text{mm}$ , sekcja pionowa) z widocznymi zaburzeniami w górnej i dolnej części czujnika

Rys. 5 (cd). Trójwymiarowe tomogramy struktur przepływów wraz z opisem uzyskany przez eksperta

## 5. Eksploracja danych

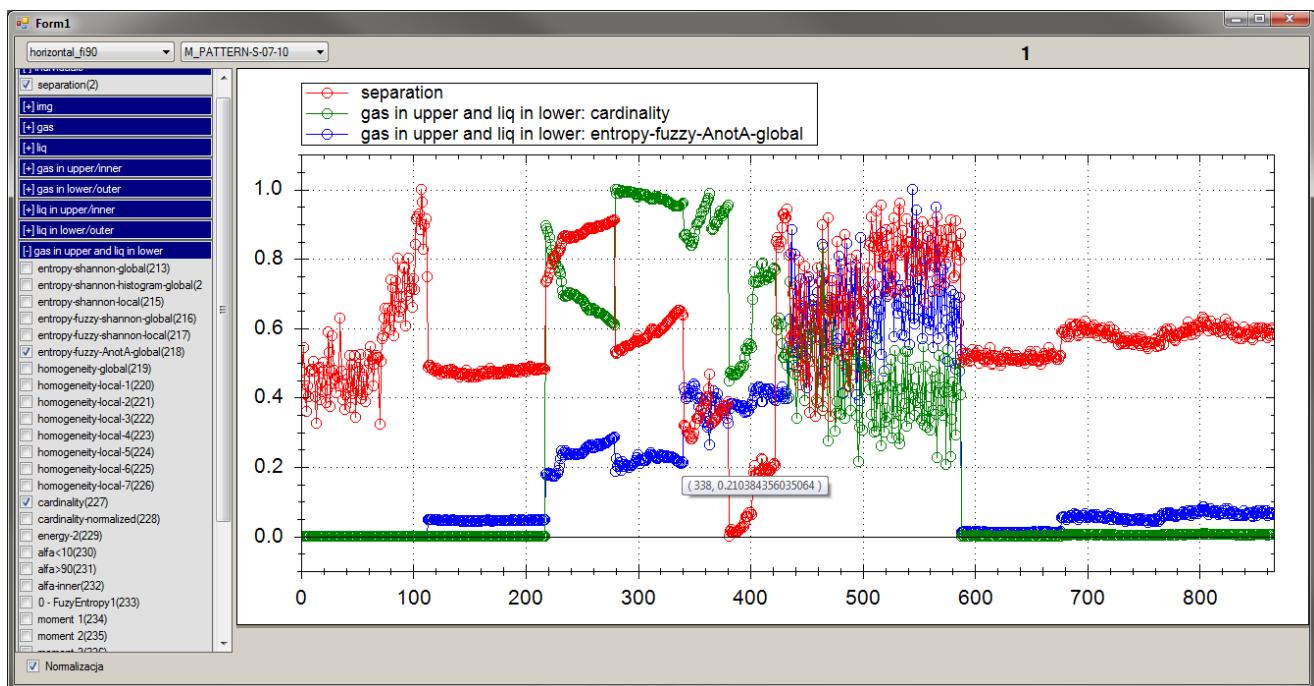
W trakcie prac badawczych autorzy stanęli przed istotnym problemem zarządzania znaczną ilością danych. W przypadku samego zagadnienia identyfikacji, całkowity rozmiar danych, zgromadzonych w trakcie realizacji prac badawczych, wyniósł około 121GB (rekonstrukcje trójwymiarowych obrazów, wyznaczone cechy, wizualizacje pakietu VTK). W tym celu dodatkowo opracowano i zaimplementowano autorskie oprogramowanie, pozwalające na szybki podgląd wyznaczonych wartości cech w postaci wykresów oraz łączenie cech w grupy. Widok głównego okna aplikacji został przedstawiony na rysunku 6.

Aplikacja okazała się niezwykle przydatna podczas wstępnej analizy wyników i zapoznawania się z charakterem poszczególnych cech. Wielokrotnie pomogła również w wychwytywaniu błędów wyznaczania poszczególnych cech.

## 6. Podsumowanie

W ramach prac badawczych zaprojektowano i wykonano system identyfikacji przepływu dwufazowego gaz-ciecz zarówno dla rurociągu poziomego jak i pionowego. W przypadku pomiarów przepływów poziomych niezbędny okazał się blok korekcji obrotu czujnika, aby płaszczyzna lustra cieczy odpowiadała lingwistycznemu pojęciu „poziomo”. Pozwoliło to na naturalnie brzmiące wyrażenia (wartości rozmytych w zmiennych lingwistycznych), a przez to większą kontrolę i przejrzystość bloku przetwarzania i wyznaczania cech obrazów przestrzennych.

W wyniku prac badawczych otrzymano dużą skuteczność identyfikacji struktur przepływów dwufazowych na bazie nieinwazyjnej tomografii pojemnościowej 3D ECT. Jednak złożoność problemu i skala możliwości daje perspektywy do dalszych prac badawczych nad wykorzystaniem zrekonstruowanych obrazów i ich geometrii.



Rys. 6. Widok okna głównego aplikacji do przeglądania wartości cech dla różnych eksperymentów



Opracowany algorytm może znaleźć zastosowanie w systemach diagnostyki i monitorowania procesów zachodzących w ramach przepływów w instalacjach przemysłowych. Może również stanowić cenne źródło informacji dla systemów automatycznej kontroli i regulacji wydajności instalacji przemysłowych. Uzyskane informacje o przepływach mogą przyczynić się do lepszej kontroli i zapobiegania awariom instalacji przesyłowych.

## Podziękowania

Prace opisane w ramach niniejszego artykułu są finansowane z rządowego projektu naukowo-badawczego NCN nr 4664/B/T02/2010/38.

## Literatura

- [1] Al-sharhan S., Karray F., Gueaieb W., Basir O.: Fuzzy entropy: a brief survey in Fuzzy Systems. The 10th IEEE International Conference on, vol. 3, 2001, pp. 1135-1139.
- [2] Banasiak R., Wajman R., Fidos H., Fiderek P., Jaworski T., Nowakowski J., Sankowski D.: System trójwymiarowej tomografii pojemnościowej w zastosowaniu do wyznaczania udziału faz oraz identyfikacji struktur w przepływach mieszanin gaz-ciecz. IAPGOS, 2013, nr 3, 28-31.
- [3] Caniere H., Bauwens B., T'Joel C., and Paeppe M. D.: Probabilistic mapping of adiabatic horizontal two-phase flow by capacitance signal feature clustering. International Journal of Multiphase Flow, vol. 35, no. 7, 2009, pp. 650 – 660.
- [4] Cho K.-H., Kim S., Lee Y.-J.: A fast eit image reconstruction method for the two-phase flow visualization. International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 26, no. 5, 1999, pp. 637 – 646.
- [5] Cho K. H., Kim S., Lee Y. J.: Impedance imaging of two-phase flow field with mesh grouping method. Nuclear Engineering and Design, vol. 204, no. 1-3, 2001, pp. 57 – 67.
- [6] Cortes C. and Vapnik V., Support-vector networks. Mach. Learn., vol. 20, Sept. 1995, pp. 273-297.
- [7] Dunn J. C.: A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact Well-Separated clusters. Journal of Cybernetics, vol. 3, no. 3, 1973, pp. 32-57.
- [8] Evgeniou T., Pontil M. and Elisseeff A.: Leave one out error, stability, and generalization of voting combinations of classifiers. Mach. Learn., vol. 55, Apr. 2004, pp. 71-97.
- [9] Guyon I., Weston J., Barnhill S., Vapnik V.: Gene selection for cancer classification using support vector machines. Mach. Learn., vol. 46, Mar. 2002, pp. 389-422.
- [10] Kohavi R. and Provost F.: Glossary of terms. Machine Learning, vol. 30, pp. 271-274, 1998. 10.1023/A:1017181826899.
- [11] Li H., Zhou Z., Hu C.: Measurement and evaluation of two-phase flow parameters. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol. 41, apr 1992, pp. 298-303.
- [12] Rahmat M. F., Kamaruddin N. S., Isa M. D.: Flow regime identification in pneumatic conveyor using electrodynamic transducer and fuzzy logic method. Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, vol. 2, 2009, pp. 396-416.
- [13] Rifkin R. and Klautau A.: In defense of one-vs-all classification. J. Mach. Learn. Res., vol. 5, Dec. 2004, pp. 101-141.
- [14] Tsoukalas L. H., Ishii M., and Mi Y.: A neurofuzzy methodology for impedance-based multiphase flow identification. Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 10, no. 6, 1997, pp. 545 – 555.
- [15] Wajman R., Banasiak R.: Nowa metoda tunelowego wyznaczania macierzy wrażliwości dla potrzeb procesu rekonstrukcji obrazów dla trójwymiarowej tomografii pojemnościowej. IAPGOS, 2013, nr 3, 32-37.

- [16] Wenyin Z. and Ningde J.: Improved local binary pattern based gas/liquid two-phase flow regimes analysis; in Proceedings of the 6th international conference on Fuzzy systems and knowledge discovery - Volume 1, FSKD'09, (Piscataway, NJ, USA), IEEE Press, 2009, pp. 202-206.
- [17] Xie D., Huang Z., Ji H., Li H.: An online flow pattern identification system for gas-oil two-phase flow using electrical capacitance tomography. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 55, no. 5, 2006, pp. 1833-1838.
- [18] Zadeh L.: Fuzzy sets. Information and Control, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, 1965. zasada rozszerzenia (extension principle).

**Mgr inż. Tomasz Jaworski**  
e-mail: tjaworski@kis.p.lodz.pl

Mgr inż. Tomasz Jaworski jest doktorantem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami związanymi z logiką rozmytą oraz przetwarzaniem obrazów.



**Mgr inż. Paweł Fiderek**  
e-mail: p.fiderek@kis.p.lodz.pl

Mgr inż. Paweł Fiderek jest doktorantem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami związanymi z tomografią komputerową, rozpoznawaniem obrazów oraz sztuczną inteligencją zwłaszcza logiką rozmytą.



**Dr inż. Radosław Wajman**  
e-mail: rwajman@kis.p.lodz.pl

Dr inż. Radosław Wajman jest adiunktem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. Prowadzone badania skupiają się nad zastosowaniem systemów trójwymiarowej tomografii pojemnościowej do nieinwazyjnego monitorowania, diagnozowania oraz automatycznego sterowania pracą przemysłowych instalacji przepływów dwu-fazowych.



**Dr inż. Robert Banasiak**  
e-mail: robert.banasiak@p.lodz.pl

Dr inż. Robert Banasiak jest adiunktem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. W swoich pracach zajmuje się przemysłowymi zastosowaniami elektrycznej tomografii procesowej, a w szczególności problematyką rekonstrukcji obrazów oraz modelowania numerycznego systemów tomografii pojemnościowej. Kierownik grantu 4664/B/T02/2010/38.



otrzymano/received: 25.03.2013

przyjęto do druku/accepted: 31.08.2013

**INFORMATYKA  
AUTOMATYKA  
POMIARY**  
W GOSPODARCE  
I OCHRONIE ŚRODOWISKA

Zapraszamy na naszą stronę internetową:

**WWW . IAPGOS . PL**

gdzie znajdziecie Państwo:

- informacje nt. zamieszczania reklam,
- wykaz prac opublikowanych w latach 2011 i 2012,
- procedurę recenzowania,
- wykaz recenzentów prac opublikowanych w poprzednich latach,
- aktualną formatkę artykułu oraz druk recenzji,
- dostęp on-line do artykułów (już wkrótce).



WWW.IAPGOS.PL



# OCENA METROLOGICZNA SYSTEMU POMIAROWEGO DLA POTRZEB WYZNACZANIA UDZIAŁU FAZ W PRZEPLYWIE MIESZANIN GAZ-CIECZ METODĄ TOMOGRAFII POJEMNOŚCIOWEJ 3D

Radosław Wajman<sup>1</sup>, Henryk Fidos<sup>2</sup>, Paweł Fiderek<sup>1</sup>, Tomasz Jaworski<sup>1</sup>, Jacek Nowakowski<sup>1</sup>, Dominik Sankowski<sup>1</sup>, Robert Banasiak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instytut Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej, <sup>2</sup>Katedra Inżynierii Chemicznej Politechniki Łódzkiej

**Streszczenie.** Przemysłowe systemy diagnostyki i monitorowania potrzebują nowych narzędzi oferujących możliwości nieinwazyjnej obserwacji i analizy procesów przepływów dwufazowych mieszanin gaz-ciecz. Opracowany system pomiarowy dedykowany jest dla potrzeb nieinwazyjnego wyznaczenia procentowego udziału faz oraz identyfikacji struktur w przepływach dwufazowych w rurociągach pionowych i poziomych. Artykuł prezentuje wybrane rezultaty prac badawczych, w wyniku których dokonano oceny własności metrologicznych prototypowego systemu trójwymiarowej tomografii pojemnościowej. Prace badawcze obejmowały między innymi: zagadnienie optymalizacji struktury czujnika ECT, a także metrologiczną ocenę dokładności rekonstrukcji obrazu oraz wyznaczenia procentowego udziału faz w porównaniu z innymi metodami. W wyniku przeprowadzonej analizy wykazano dużą przydatność systemu 3D ECT do nieinwazyjnego, szybkiego diagnozowania dynamicznych procesów przepływowych.

**Słowa kluczowe:** przepływ dwu-fazowy, tomografia pojemnościowa ECT, wizualizacja trójwymiarowa, struktury przepływów, przepływy przemysłowe

## METROLOGICAL EVALUATION OF MEASUREMENT SYSTEM FOR TWO-PHASE FLOW FRACTIONS DETERMINATION USING 3D ELECTRICAL CAPACITANCE TOMOGRAPHY

**Abstract.** The industrial diagnostic and monitoring systems require new methods offering the possibility of non-invasive observation and analysis of the two-phase gas-liquid mixtures flows. The designed new measurement system is dedicated for non-invasive percentage phase distribution calculation and flow structure identification in the vertical and horizontal pipelines. This paper presents some research results of the metrological validation of the designed three-dimensional capacitance tomography measurement system including: the 3D ECT sensor structure optimization, the metrological analysis of the image reconstruction process accuracy and the metrological analysis of the results of the phase distribution calculation method in comparison with other common technics. As a result of performed analysis the height capability of the 3D ECT measurement system for non-invasive real time dynamic flow processes identification was proved.

**Keywords:** two-phase flow, capacitance tomography ECT, three-dimensional visualization, flow structures, industrial flows

### Wprowadzenie

W ramach zrealizowanych w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej prac badawczych opracowane zostało narzędzie posiadające możliwości nieinwazyjnego monitorowania i diagnozowania procesów przepływów dwufazowych mieszanin gaz-ciecz, które znajdują szerokie zastosowania w przemyśle budowlanym, spożywczym, farmaceutycznym, chemicznym, rafineryjnym i wielu innych. Opracowany system pomiarowy dedykowany jest do wyznaczenia procentowego udziału faz oraz identyfikacji struktur w przepływach dwufazowych w rurociągach pionowych i poziomych [1]. Istota proponowanego rozwiązania polega na zastosowaniu nowatorskiej, trójwymiarowej struktury czujnika pojemnościowego o elektrodach wewnętrznych, systemu pomiarowego elektrycznej tomografii pojemnościowej ECT 3D oraz specjalizowanych algorytmów równoległego, szybkiego przetwarzania danych pomiarowych do wizualizacji wnętrza fragmentu przepływu mieszanin gaz-ciecz.

W artykule opisano rezultaty prac badawczych, w wyniku których dokonano oceny własności metrologicznych prototypowego systemu trójwymiarowej tomografii pojemnościowej. Prace badawcze obejmowały:

- optymalizację struktury czujnika pojemnościowego dla systemu ECT o przestrzennym rozkładzie elektrod pod kątem możliwości skanowania przepływu mieszanin gaz-ciecz;
- metrologiczną ocenę dokładności procesu rekonstrukcji obrazu na bazie rzeczywistych danych pomiarowych i symulacji;
- metrologiczną ocenę dokładności wyznaczenia procentowego udziału faz przepływu mieszanin gaz-ciecz w porównaniu z metodami: szybkozamykającymi się zaworów oraz identyfikacji struktury przepływu za pomocą kamery CCD.

### 1. Optymalizacja struktury czujnika pojemnościowego systemu ECT

Jednym z kluczowych elementów stanowiska diagnostyczno-monitorującego, opartego na systemie 3D ECT, jest czujnik pojemnościowy (określany często jako sonda pojemnościowa). Zbudowanie poprawnej struktury mechaniczno-elektrycznej czujnika pojemnościowego 3D jest zagadnieniem złożonym. Najczęściej rozkład elektrod, ich kształt i wymiary geometryczne, są określane względem użytecznego zakresu wrażliwości pomiarowej tomografu pojemnościowego oraz przewidywanego zakresu stałych elektrycznych badanego medium [6, 10].

W skład czujnika 3D dla systemu tomografii pojemnościowej weszły 32 elektrody. Oczywiście większa liczba elektrod, wyznaczająca większą liczbę niezależnych pomiarów, jest teoretycznie bardziej korzystna ze względu na jakość rekonstruowanego obrazu. W praktyce liczba elektrod musi być jednak ograniczona ze względu na określoną czułość urządzeń pomiarowych, która wymaga, aby mierzone wielkości i zmiany pojemności miały wartość – większą od możliwej do zmierzenia wartości minimalnej, co z kolei wymusza stosowanie elektrod z odpowiednio dużym polem aktywnej powierzchni. Dodatkowo, pojemności między elektrodami są redukowane przez ekranowanie układu przed oddziaływaniami zewnętrznymi i kształtujące pole elektryczne w pożądanym sposób. Na skutek tych ograniczeń wartości pojemności między elektrodami są bardzo małe, na ogół znacznie mniejsze od 1.0 pF i dodatkowo mierzone wraz z istniejącymi pojemnościami pasozytniczymi. Są one wnoszone przykładowo przez okablowanie i sprawiają, że bezpośredni pomiar pojemności międzyelektrodowych jest bardzo trudny, obarczony dużym błędem i niepraktyczny. Zamiast tego rozwiązania, powszechnie stosowaną metodą jest pomiar zmian pojemności, w którym bezwzględna wartość mierzonych pojemności jest obciążona dużym błędem, ale różnice pojemności mierzone są już z większą dokładnością.

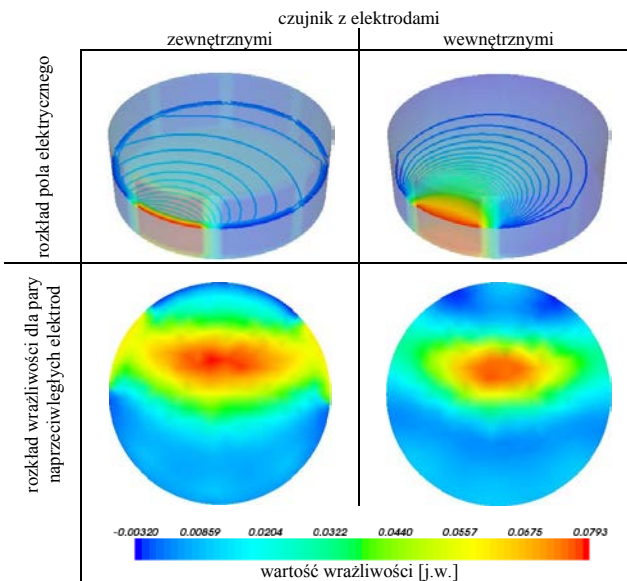
Czujnik ECT 3D budowany jest najczęściej na walcowym profilu zamkniętym. Kluczowymi elementami czujnika pojemnościowego, mającymi wpływ na pole elektryczne są: układ elektrod pomiarowych oraz system ekranów. Najczęściej stosuje się ekranowanie zewnętrzne, w postaci płaszcza miedzianego, uziemionego i odizolowanego od systemu elektrod, obejmującego swoim obszarem całą strefę pomiarową czujnika. Zastosowanie ekranu zewnętrznego umożliwia skuteczne odseparowanie układu pomiarowego czujnika od zakłóceń zewnętrznych oraz ograniczenie obszaru i zdolności detekcyjnych czujnika do obszaru profilu zamkniętego oraz jego bliskiego sąsiedztwa. Wyznaczono parametry geometryczno-mechaniczne trzech rodzajów trójwymiarowych czujników pojemnościowych, różniące się średnicą profilu montażowego. Parametry te, to przede wszystkim kształt i powierzchnia elektrod, odstęp międzyelektrodowy, szerokość ekranów wewnątrz-elektrodowych i brzegowych, oraz grubość izolacji ochronnej. Dotychczasowe doświadczenia praktyczne autorów w zakresie przemysłowych zastosowań elektrycznej tomografii procesowej pozwoliło stwierdzić, iż opracowanie analogicznej koncepcji czujników na rury o różnych profilach – dodatkowo, dedykowanych do badania cieczy o różnej wartości przenikalności elektrycznej - nie jest zadaniem polegającym na bezpośrednim „przeskalowaniu” geometrii. Pole elektryczne ma charakter silnie nieliniowy i dobór tych parametrów również musi być realizowany drogą eksperymentalną. Stąd też kluczowym etapem stało się zastosowanie w ramach badań wysoko precyzyjnego miernika impedancji (Agilent E4980A). W trakcie tych eksperymentów przestrzeń eksperymentalnego prototypu czujnika wypełniana była glikolem (reprezentantem mediów o dużej przenikalności elektrycznej) oraz powietrzem (reprezentantem mediów o małej przenikalności elektrycznej) i wykonywane były statyczne pomiary pojemności przy pomocy wspomnianego miernika.

Analiza działania testowanych w trakcie przeprowadzonych pomiarów różnych konfiguracji elektrod pozwoliła efektywnie dopasować dyskutowane powyżej parametry czujnika do zakresu pomiarowego stosowanego systemu tomografii pojemnościowej.

Dodatkowo, w ramach prac badawczych przeprowadzono numeryczną analizę rozkładu wrażliwości dla zaprojektowanych nowych struktur trójwymiarowych czujników pojemnościowych z elektrodami wewnętrznymi oraz dla czujników klasycznych z elektrodami zewnętrznymi – rysunek 1. Dla potrzeb analizy ich wstępnej przydatności do badań przepływów dwufazowych mieszanin gaz-ciecz, przeprowadzony został proces symulacji komputerowej. Należy tu podkreślić, iż przeprowadzona symulacja efektywnie wspomogła proces optymalnego doboru geometrii czujnika w kryterium rozkładu jego wrażliwości, dla potrzeb badań mieszanin z udziałem cieczy o wysokiej wartości względnej przenikalności elektrycznej. Na podstawie bezpośrednich pomiarów pojemności, uzyskanych przy pomocy miernika RLC oraz symulacji numerycznej, opracowane zostały projekty czujników dla odpowiednich średnic rurociągów. Na tej bazie, opracowano komputerowy model czujnika pojemnościowego, który zastosowano przy wyznaczaniu macierzy wrażliwości.

W przypadku czujnika z elektrodami zewnętrznymi całkowicie wypełnionego cieczą, uwagę zwróciło znikome wnikanie pola w środek czujnika. Pole elektryczne skupione było głównie na obrzeżach rury wewnętrznej, wykonanej z PMMA – Polimetakrylan metylu (Pleksi) – o względnej przenikalności elektrycznej ( $\epsilon_r = 2.8$ ) znacznie niższej, niż wartość przenikalności medium wypełniającego przestrzeń czujnika, np. glikolu ( $\epsilon_r = 37.0$ ). Takie zjawisko nie występuje w przypadku opracowanego prototypu czujnika z elektrodami wewnętrznymi również wypełnionego cieczą. W czujniku z elektrodami wewnętrznymi pole elektryczne równomiernie rozkłada się w całej przestrzeni czujnika. Z matematyczno-fizycznego punktu widzenia, macierze wrażliwości dla czujników pojemnościowych 3D wyznaczone są bezpośrednio z własności pola elektrycznego [8]. To sprawia, że opisane powyżej zjawisko

znikomego wnikania pola elektrycznego w głąb czujnika, charakterystycznego dla czujnika z elektrodami zewnętrznymi, przekłada się nie tylko na macierze wrażliwości i w konsekwencji na proces rekonstrukcji obrazów, ale również i na same pomiary pojemności.



Rys. 1. Przekroje poprzeczne rozkładu pola elektrycznego oraz rozkładu wrażliwości czujników dla pary elektrod naprzeciwległych zewnętrznych i wewnętrznych

## 2. Ocena dokładności procesu rekonstrukcji obrazu na bazie rzeczywistych danych pomiarowych i symulacji

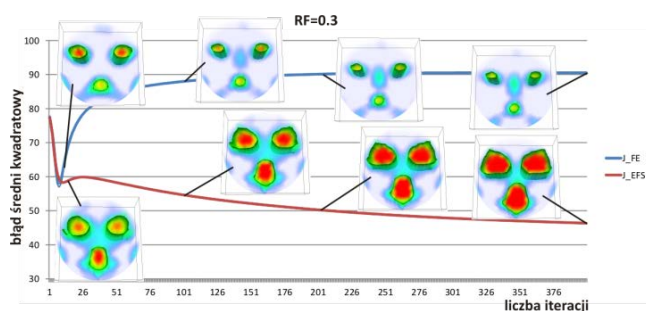
Mechanizm budowania obrazu dla potrzeb wizualizacji procesów przemysłowych przy użyciu elektrycznej tomografii pojemnościowej określany jest jako rekonstrukcja (bądź konstrukcja) obrazu. W praktyce proces ten może mieć charakter liniowy lub nieliniowy. W pierwszym przypadku rekonstrukcja obrazu jest wyznaczana bezpośrednio (deterministyczne metody projekcji wstecznej lub techniki regularyzacyjne [12]), bądź też na drodze optymalizacji iteracyjnej przy użyciu stałego symulowanego rozkładu wrażliwości w komputerowym modelu czujnika [2]. W drugim przypadku (rozważamy w ramach niniejszego artykułu) proces przebiega w schemacie iteracyjnym i uwzględnia nieliniowy charakter pola elektrycznego. Nieliniowość można aproksymować poprzez aktualizację modelu wrażliwościowego czujnika w oparciu o poprzednio zrekonstruowane obrazy 3D.

Macierz wrażliwości jest głównym czynnikiem wpływającym na finalną jakość wyników rekonstrukcji. Najbardziej znaną i stosowaną w praktyce metodą jej wyznaczania jest algorytm obliczania map wrażliwości w oparciu o zależności matematyczno-fizyczne wynikające z energii pola elektrycznego [7]. Algorytm ten daje w większości przypadków dobre 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. Do opracowanego systemu pomiarowego autorzy zaprojektowali istotną modyfikację procesu wyznaczania 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 [8]. W artykule tym opisano zrealizowane badania i przedstawiono wyniki działania macierzy wrażliwości wyznaczanych metodą tunelową w procesie rekonstrukcji obrazów w porównaniu z użyciem tradycyjnych macierzy wrażliwości wyznaczanych

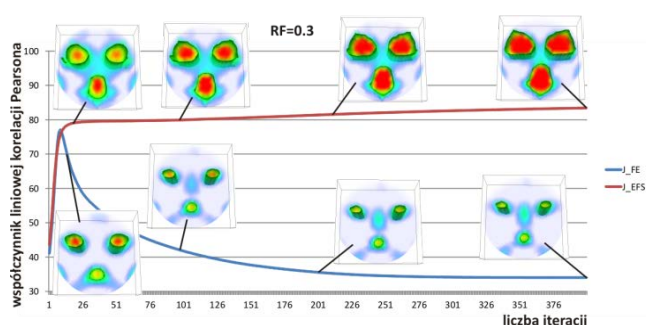
w oparciu o zależności matematyczno-fizyczne wynikające z równania Laplace'a. Do oceny obrazów zostały przyjęte następujące kryteria:

- znormalizowany średni błąd kwadratowy obrazu (NMSE – *Normalized Mean Square Error*), który pozwala wyznaczyć różnicę pomiędzy zadaną (fantom) i skonstruowaną wartością przenikalności elektrycznej dla danego woksela (obraz) - opisany jest zależnością [12],
- współczynnik liniowej korelacji Pearsona, który pozwala ocenić zależność liniową pomiędzy zadaną a skonstruowaną wartością przenikalności elektrycznej dla poszczególnych elementów obrazu - wyrażony wzorem [11, 12].

Aby możliwe było oszacowanie wartości błędów i zastosowanie powyższych kryteriów oceny, proces rekonstrukcji obrazów został przeprowadzony dla zasymulowanego przestrzennego rozkładu przenikalności elektrycznej. W przypadku pomiarów na rzeczywistych obiektach nie jest możliwe opracowanie wiarygodnego referencyjnego modelu rozkładu materiału, który należy podać do zdefiniowanych powyżej kryteriów oceny. Dla potrzeb eksperymentu wykorzystana została liniowa metoda iteracji Landwebera [13]. Za każdym razem przeprowadzonych zostało 400 iteracji przy czym w celu wykazania szybkości zbieżności metody, do prezentacji wyników wybierane były obrazy po 25, 100, 200 i 400 iteracjach. Jednocześnie, po każdej iteracji wyznaczane były: błąd średni kwadratowy oraz współczynnik korelacji liniowej. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów oraz wyznaczonych kryteriów zostały zaprezentowane na wykresach – rysunki 2 i 3.



Rys. 2. Wykres przebiegu wartości błędu średniego kwadratowego dla obrazów otrzymanych w wyniku zastosowania metody iteracji Landwebera przy  $RF = 0.3$  w funkcji liczby iteracji z użyciem klasycznych ( $J_{FE}$ ) i tunelowych ( $J_{EFS}$ ) macierzy wrażliwości



Rys. 3. Wykres przebiegu wartości współczynnika korelacji liniowej Pearsona dla obrazów otrzymanych w wyniku zastosowania metody iteracji Landwebera przy  $RF = 0.3$  w funkcji liczby iteracji z użyciem klasycznych ( $J_{FE}$ ) i tunelowych ( $J_{EFS}$ ) macierzy wrażliwości

Symbole/skróty na rysunkach oznaczają:

- $J_{FE}$  – w procesie rekonstrukcji zastosowano klasyczne macierze wrażliwości;
- $J_{EFS}$  – w procesie rekonstrukcji zastosowano tunelowe macierze wrażliwości;
- $RF$  – (ang. *relaxation factor*) współczynnik relaksacji (agresywności) metody rekonstrukcji obrazów.

W artykule zdecydowano się przedstawić tylko jeden spośród wielu przeprowadzonych eksperymentów [8]. Na wykresach

wykazana została zwiększona szybkość zbieżności w przypadku zastosowania tunelowych macierzy wrażliwości. Cecha ta uwydatnia się bardziej z chwilą zwiększania agresywności procesu rekonstrukcji (zwiększanie współczynnika relaksacji). Warto zauważyć, że dla dużej agresywności procesu w przypadku klasycznych macierzy wrażliwości ostatecznie metoda traci swoją zbieżność, a błędy rekonstrukcji z każdą iteracją powiększają się, co ma niekorzystny wpływ na dalszą analizę obrazów np. metodami logiki rozmytej [5].

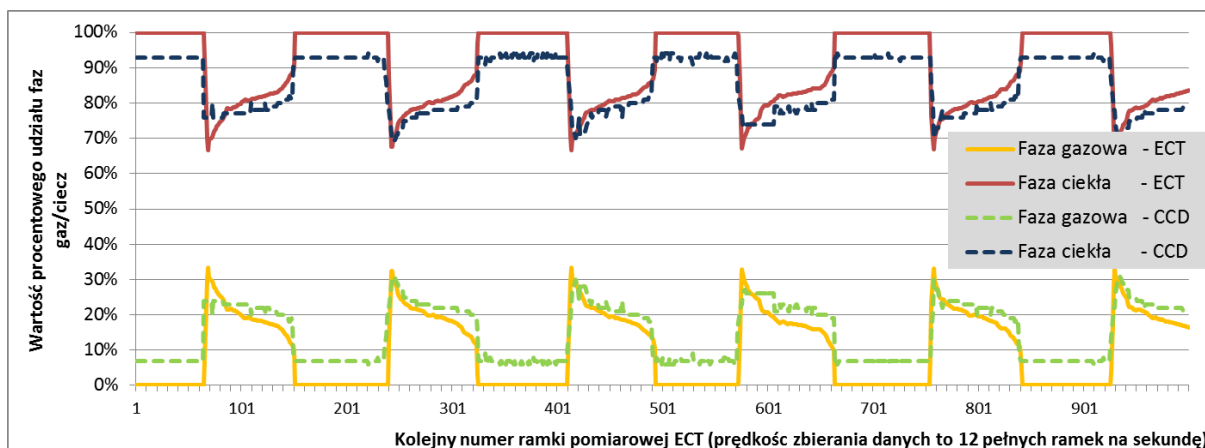
### 3. Pomiar procentowego udziału faz mieszanin gaz-ciecz

Algorytm metody wyznaczania procentowego udziału faz w mieszaninie dwufazowej gaz-ciecz w oparciu o system tomografii pojemnościowej bazuje na zidentyfikowanej strukturze przepływu i umożliwia wyznaczanie liczby trójwymiarowych struktur i ich objętości (informacją wejściową dla opracowanej metody są dane pochodzące z bloku wnioskowania rozmytego [5]). W rozdziale tym, poddany zostanie ocenie metrologicznej wynik działania metody. Zostanie on porównany z wynikami działania innych metod, jak tradycyjna metoda szybkozamykających się zaworów oraz metoda filmowania przepływu zrealizowana w oparciu o zbudowane stanowisko do automatycznej analizy przepływu z użyciem kamery CCD [3].

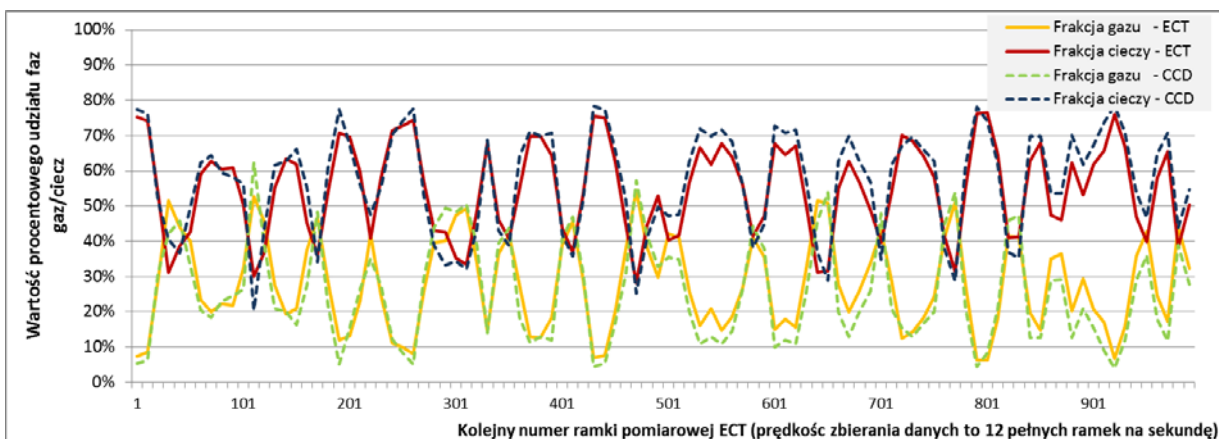
W celu weryfikacji metody wyznaczania udziału faz z wykorzystaniem trójwymiarowego systemu ECT, przeprowadzono złożony eksperyment polegający na jednoczesnej obserwacji przepływu techniką ECT, CCD oraz na pomiarze techniką szybkozamykających się zaworów. W trakcie trwania eksperymentu zapewnione były stałe warunki zasilania rurociągu cieczą oraz gazem. W konsekwencji tego uzyskany został niezmienny charakter przepływu, którego struktury były jednocześnie rejestrowane za pomocą komputerów pracujących z systemem tomografu oraz z kamerą CCD, przy zapewnieniu synchronizacji czasowej obu urządzeń (serwer oraz moduły klienckie usługi znaczników czasowych, dodawanych do każdego elementu pomiarowego opisano w [9]). Ponieważ przeważnie długość struktur przepływu (pęcherzy gazowych i następujących po nich rzutów cieczy), które mogą zostać jednoznacznie zidentyfikowane, a co za tym idzie może być poprawnie zmierzony udział faz - jest znacznie większa niż zakres pomiarowy czujnika ECT, jak i obszar skanowania kamery CCD, należało zebrać pewną ilość pomiarów i analizować całą ich sekwencję. Zatem rejestracja pomiarów trwała przynajmniej 90s. To gwarantowało, że w danej sekwencji pomiarów udało się zarejestrować do kilku - nawet najdłuższych, powtarzających się struktur przepływu. Poniżej zamieszczono przykład jednego z wielu zrealizowanych eksperymentów.

Rysunki 4 i 5 przedstawiają zarejestrowane systemem ECT i kamerą CCD przebiegi struktury przepływu rzutowego w sekcji poziomej. Na rysunku tym linią ciągłą zaznaczone zostały udziały fazy ciekłej i gazowej, wyznaczone na podstawie trójwymiarowych obrazów tomograficznych, zrekonstruowanych dla każdej zarejestrowanej ramki pomiarowej ECT (prędkość akwizycji danych to 12 ramek na sekundę; 1 ramka odpowiada 496 pomiarom pojemności). W dalszej kolejności udział fazy ciekłej / gazowej został wyznaczony w oparciu o dane pochodzące z bloku wnioskowania rozmytego. Na rysunku 4 widać powtarzające się z dość dużą regularnością cykle rzutów w okresie co 160-170 tomograficznych ramek pomiarowych. Z kolei linią przerywaną zaznaczono udziały obu faz (ciekłej i gazowej), wyznaczone tym razem na podstawie analizy przeprowadzonej dla całej sekwencji obrazów, zarejestrowanych kamerą CCD (pomiar rejestrowane z prędkością 30 obrazów na sekundę). Sekwencja obrazów CCD (w wyniku synchronizacji czasowej) dokładnie odpowiada pomiarom tomograficznym.





Rys. 4. Zarejestrowane systemem ECT i kamerą CCD przebiegi przepływu rzutowego w sekcji poziomej z zaznaczeniem fazy cieplej i gazowej



Rys. 5. Zarejestrowane systemem ECT i kamerą CCD przebiegi przepływu pęcherzykowo-rzutowego w sekcji pionowej z zaznaczeniem fazy cieplej i gazowej

Po zarejestrowaniu wyników opisanych pomiarów - wciąż utrzymując te same stałe warunki przepływu - zastosowano technikę szybkozamykających się zaworów. Warto tu nadmienić, że posiadana w Instytucie Informatyki Stosowanej instalacja badawcza [4] realizuje tę metodę bez konieczności zatrzymywania urządzeń zasilających rurociągi pomiarowe gazem i cieczą. Jest to zapewnione poprzez zamontowanie obejścia (tzw. by-pasu), które otwiera się automatycznie z chwilą zamknięcia dowolnej sekcji pomiarowej. W wyniku zamknięcia zaworów, w sekcji pomiarowej badanego rurociągu zostaje zatrzymana pewna objętość cieczy (odseparowanej od gazu), której objętość należy wyznaczyć, aby oszacować wartość procentowego udziału faz. W zależności od tego, czy jest to sekcja pionowa, czy pozioma, wykonuje się to na dwa sposoby. W sekcji poziomej należy opróżnić z cieczy odcinek pomiarowy rurociągu zawarty pomiędzy zamkniętymi zaworami i wyznaczyć masę pozyskanej cieczy. Na podstawie znanej gęstości cieczy można wyznaczyć objętość zatrzymanej cieczy, a co za tym idzie jej procentowy udział w przepływie (objętość i masa cieczy wypełniającej całą przestrzeń wewnątrz odcinka pomiarowego rurociągu, musi być wcześniej wyznaczona). W przypadku sekcji pionowej rzecz jest łatwiejsza, bo pomiar realizuje się już bez potrzeby opróżniania sekcji pomiarowej. Wystarczy - po odstawieniu zawartości sekcji pomiarowej, zmierzyć wysokość słupa cieczy. Porównując całkowitą długość odcinka pomiarowego i wysokość cieczy po jej zatrzymaniu i spłynięciu ze ścianek rurociągu, wylicza się procentowy udział faz. Niestety należy mieć na uwadze fakt, iż mimo znacznej długości zamykającej sekcji pomiarowej, wynik działania metody szybko zamykających się zaworów nie jest powtarzalny. Zostanie to wykazane przy okazji prezentacji wyników w dalszej części rozdziału. Problem polega na tym, że metoda daje wynik zależny od momentu, w którym zostają zamknięte zawory i od związanej z tym liczby uchwyconych

rzutów. Może się zdarzyć, że w sekcji pomiarowej zostaną „złapane” przykładowo: podczas pierwszego pomiaru - dwa, a w przypadku drugiego pomiaru - trzy rzuty, w wyniku czego za każdym razem uzyskamy inną wartość udziału faz. Uzyskane średnie wartości pomiarowe udziału faz dla przedstawionego na rysunku 4 eksperymentu wahały się od 88,35% do 91,41% udziału fazy cieplej. Niestety również próba wyliczenia jednej globalnej wartości niepewności pomiarowej dla metody zamykających się zaworów (dla wszystkich sekcji pomiarowych posiadanej instalacji badawczej), zakończyła się niepowodzeniem - z uwagi na fakt, iż metoda ta w przypadku każdej sekcji pomiarowej (pionowa, pozioma, różne średnice) i dla każdej odmiennej struktury przepływu, dostarczała innych wartości odchylenia standardowego wyników, które w żadnym przypadku nie przekraczały 2%.

Rzecz ma się zupełnie inaczej w przypadku pomiarów tomograficznych i kamery CCD. W każdym przypadku czas rejestrowania pomiaru wyniósł 90 sekund. To pozwoliło uśrednić wynik zmierzony procentowy udziału faz. W przypadku zaprezentowanego eksperymentu - dla badań tomografem wyniósł on 90,01% udziału cieczy, a dla badań za pomocą kamery CCD 85,14%. Pomiaru zostały zestawione w Tabeli 1. Należy tu również nadmienić, że zarówno za pomocą tomografu jak i za pomocą kamery w tym samym przedziale czasowym wykonano kilka jednoczesnych sekwencji pomiarowych, w celu wyznaczenia powtarzalności obu metod. Wyznaczone odchylenie standardowe dla uzyskanych wyników zamieszczono również w Tabeli 1

Podsumowując, technika trójwymiarowej elektrycznej tomografii pojemnościowej sprawdza się również w przypadku pomiaru procentowego udziału faz w przepływie dwufazowym, gwarantując znacznie większą powtarzalność pomiarów, niż tradycyjna technika szybkozamykających się zaworów

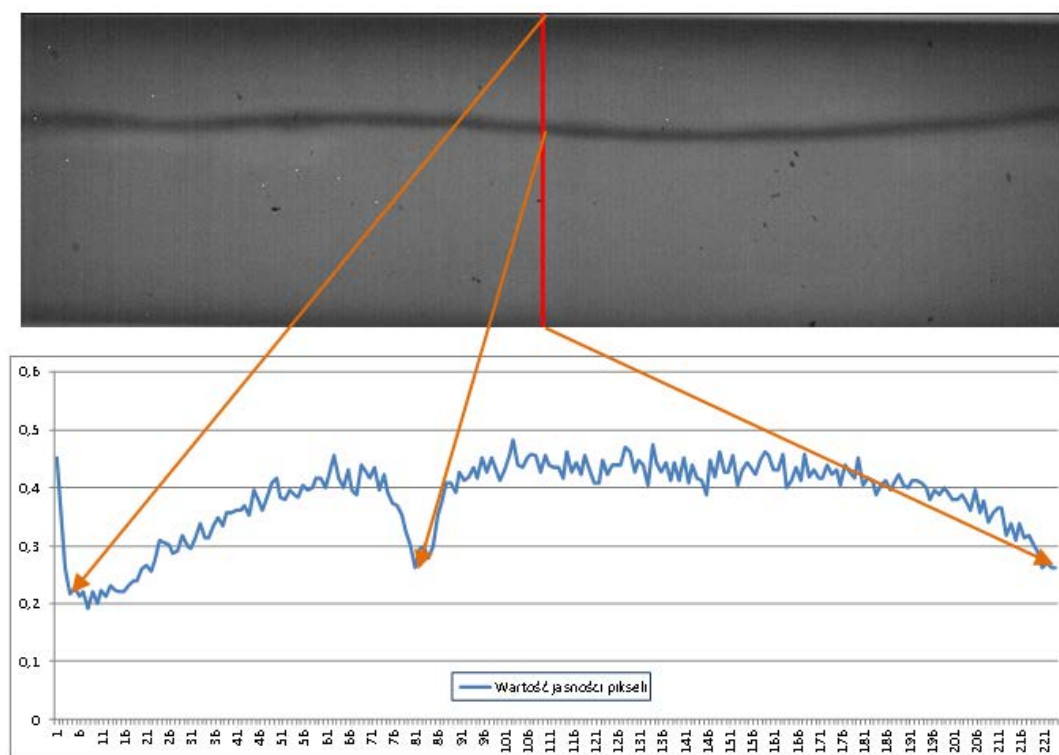


i zapewniając jednocześnie przeprowadzenie bezinwazyjnych pomiarów w czasie rzeczywistym. Podobnie jest w przypadku diagnostyki za pomocą kamery CCD, ale pomimo większej szybkości zbierania danych pomiarowych, kamera obserwuje przepływ tylko z jednej perspektywy (dostarcza obraz jednego przekroju przepływu). Ograniczenie rejestracji przepływu do obrazu dwuwymiarowego, na etapie rzutowania obiektu 2D z obrazu na obiekty trójwymiarowe powoduje powstawanie licznych błędów aproksymacji. Dodatkowo, gdy w analizowanym odcinku przepływu procentowy udział cieczy wynosi 100%, pojawia się (widoczny na wykresie – rysunek 4) problem błędnej analizy obrazu. System wizyjny CCD diagnozuje taki stan jako 93%. Błąd w tym przypadku spowodowany jest dodatkowo specyfiką materiału, z którego wykonana jest sekcja pomiarowa rurociągu oraz jej kolisty kształt. Na obrazie jasność rury zmniejsza się w kierunku jej górnej i dolnej krawędzi, co przy

pewnym poziomie jasności - podczas progowania jest błędnie interpretowane, jako granica międzyfazowa. Efekt ten zademonstrowano na rysunku 6.

Tabela 1. Zmierzony procentowy udział fazy ciekłej dla przepływu rzutowego w sekcji poziomej rurociągu o średnicy zewnętrznej  $f_i=90$

Metoda pomiaru	Procentowy udział fazy ciekłej
3D ECT (90 sekundowy eksperyment)	90,01% ± 0,13%
kamera CCD (90 sekundowy eksperyment)	85,14% ± 4,74%
metoda szybkozamykających się zaworów (3 pomiary)	88,35% ÷ 91,41% wartość średnia: 89,88%



Rys. 6. Wykres wartości jasności punktów obrazu rurociągu zarejestrowanego kamerą CCD

Wzdłuż zaznaczonej na obrazie linii zmierzono poziom jasności punktów i wartości zestawiono na wykresie. Widać, że poziom jasności punktu zaznaczonego strzałką jest podobny do jasności punktów odpowiadających krawędzi rurociągu. Ta cecha powoduje, że projekcja kamery CCD prostopadła do rurociągu, nie pozwala obserwować jego granicznych obszarów do łącznie 14% objętości.

Opisany spadek wartości jasności punktów na linii rozgraniczającej fazy wymusił zastosowanie algorytmu progowania adaptacyjnego [3], który niestety wprowadza dodatkowe obciążenia. Na niektórych obrazach istniejące szumy są błędnie rozpoznawane jako odrębne małe obiekty i mają one wpływ na wyznaczenie chwilowego położenia granicy międzyfazowej. Niewątpliwie zalety płynące z analizy przepływów za pomocą dedykowanego systemu wizyjnego, takie jak szybkość i powtarzalność, przewyższają jego wady. Jednakże w porównaniu z algorytmami analizy przepływów opartymi na technice ECT, rozwiązanie to nie jest już tak dokładne i nie daje tak jednoznacznych wyników. Tomograf pojemnościowy dostarcza pełnej przestrzennej informacji pomiarowej, która jest przydatna do zrekonstruowania obrazu całej powierzchni styku obu faz, a co za tym idzie przydatna do jeszcze dokładniejszego pomiaru udziału tych faz.

#### 4. Podsumowanie

Opracowany system pomiarowy do identyfikacji struktur i wyznaczania procentowego udziału faz przepływów mieszanin typu gaz-ciecz został poddany ocenie metrologicznej. W celach porównawczych zastosowano inne metody pomiarowe, takie jak: metoda obserwacji przepływu przy pomocy kamery CCD wraz z mechanizmami analizy informacji wizyjnej, metoda wykorzystująca aparaturę do pomiaru prędkości przepływu gazu oraz przemiennik częstotliwości (falownik) do sterowania prędkością obrotową silnika pompy wirowej oraz obserwacje ekspertów. Ocena metrologiczna polegała na wyznaczeniu niepewności pomiarowej opracowanego systemu przy obliczaniu procentowego udziału faz mieszanin gaz-ciecz.

W wyniku przeprowadzonej analizy wykazano dużą przydatność tomograficznego systemu 3D ECT do nieinwazyjnego, szybkiego diagnozowania dynamicznych procesów przepływowych.

Rosnące potrzeby przemysłu w zakresie nieskomplikowanej, relatywnie taniej, nieinwazyjnej i szybkiej metody sterowania procesami przepływów wielofazowych w rurociągach poziomych i pionowych, uzasadniają realizację podjętych tematów badawczych. Możliwość otrzymania obrazu struktury oraz

identyfikacji rodzaju przepływu dwufazowych mieszanin gaz-ciecz uzyskiwane automatycznie, w systemach czasu rzeczywistego jest bardzo istotna podczas monitorowania instalacji przemysłowych, a także w procesie badań numerycznych w celu weryfikacji wyników. Z kolei ciągłe monitorowanie i diagnozowanie zachodzących procesów przepływowych może stanowić istotną informację o ich przebiegu i ewentualnych nieprawidłowościach oraz umożliwić ich ciągłe automatyczne kontrolowanie i sterowanie. W konsekwencji dane te pozwolą zapobiegać ewentualnym awariom systemów przemysłowych.

## Podziękowania

Prace przedstawione w ramach niniejszego artykułu były finansowane z rządowego projektu badawczego nr 4664/B/T02/2010/38.

## Literatura

- [1] Banasiak R., Wajman R., Fidos H., Fiderek P., Jaworski T., Nowakowski J., Sankowski D.: System trójwymiarowej tomografii pojemnościowej w zastosowaniu do wyznaczania udziału faz oraz identyfikacji struktur w przepływach mieszanin gaz-ciecz. IAPGOS, 2013, nr 3, 28-31.
- [2] Banasiak R., Wajman R., Sankowski D., Soleimani M.: Three-dimensional non-linear inversion of electrical capacitance tomography data using a complete sensor model. Progress In Electromagnetics Research PIER, 100, 2010, pp. 219-234.
- [3] Fiderek P., Kucharski J.: A Computer Vision System for On-Line Two-Phase Gas-Liquid Flows Recognition Using Fuzzy Methods. Zeszyty naukowe AGH - Automatyka 15/3 2011, s. 505-519, ISSN: 1429-3447.
- [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. Zeszyty naukowe Automatyka 3/2010, AGH, Kraków.
- [5] Jaworski T., Fiderek P., Wajman R., Banasiak R.: Identyfikacja przepływu dwufazowego gaz-ciecz oparta na ocenie rozmytej obrazów tomograficznych 3D. IAPGOS, 2013, nr 3, 41-48.
- [6] Soleimani M., Wang H., Li Y., Yang W.: A Comparative Study Of Three Dimensional Electrical Capacitance Tomography. International Journal For Information Systems Sciences, 2007, Vol.3, No.2.
- [7] Wajman R.: Nowa metoda rekonstrukcji obrazów dla potrzeb pojemnościowej tomografii procesowej. Praca doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź, 2006.
- [8] Wajman R., Banasiak R.: Nowa metoda tunelowego wyznaczania macierzy wrażliwości dla potrzeb procesu rekonstrukcji obrazów dla trójwymiarowej tomografii pojemnościowej. IAPGOS, 2013, nr 3, 32-37.
- [9] Wajman R., Jaworski T., Fiderek P., Banasiak R.: Algorytmu dystrybucji znaczników czasowych dla potrzeb synchronizacji danych z różnych systemów pomiarowych. IAPGOS, 2013, nr 3, 38-40.
- [10] Warsito W., Marashdeh Q., Fan L-S. 2007 Electrical Capacitance Volume Tomography. IEEE Sensors Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 525-535.
- [11] Xie C.G., Huang S.M., Hayes D.G., Gregory I.A., Beck C.M.: Transputer/DSP-based capacitance tomography for real-time imaging and velocity profile measurement of oilfield flow pipelines. Parallel Computing and Transputer Appl., Edts. M.S. Beck u.a., 1994, pp. 123-134.
- [12] Yang W.Q., Peng L.: Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography. Meas. Sci. Technol. 2003, Vol. 14, No. 1, pp. R1-R13.
- [13] Yang W. Q., Spink D. M., York T. A., McCann H.: An image-reconstruction algorithm based on Landweber's iteration method for electrical capacitance tomography. Meas. Sci. Technol., 10, 1999, pp. 1065-1073.

**Dr inż. Radosław Wajman**  
e-mail: rwajman@kis.p.lodz.pl

Dr inż. Radosław Wajman jest adiunktem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. Prowadzone badania skupiają się nad zastosowaniem systemów trójwymiarowej tomografii pojemnościowej do nieinwazyjnego monitorowania, diagnozowania oraz automatycznego sterowania pracą przemysłowych instalacji transportu pneumatycznego materiałów sypkich oraz przepływu dwu-fazowego gaz-ciecz.



**Dr inż. Henryk Fidos**  
e-mail: henryk.fidos@p.lodz.pl

Dr inż. Henryk Fidos w roku 1975 ukończył studia w Instytucie Inżynierii Chemicznej Politechniki Łódzkiej. Jest adiunktem w Katedrze Inżynierii Chemicznej Wydziału Inżynierii Procesowej i Chroń Środowiska tej uczelni. Specjalność – inżynieria chemiczna i procesowa, mechanika płynów, przepływy wielofazowe, reologia i reometria płynów nielawtonowskich.



**Mgr inż. Paweł Fiderek**  
e-mail: p.fiderek@kis.p.lodz.pl

Mgr inż. Paweł Fiderek jest doktorantem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami związanymi z tomografią komputerową, rozpoznawaniem obrazów oraz sztuczną inteligencją zwłaszcza logiką rozmytą.



**Mgr inż. Tomasz Jaworski**  
e-mail: tjaworski@kis.p.lodz.pl

Mgr inż. Tomasz Jaworski jest doktorantem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami związanymi z logiką rozmytą oraz przetwarzaniem obrazów.



**Dr inż. Jacek Nowakowski**  
e-mail: jacnow@kis.p.lodz.pl

Dr inż. Jacek Nowakowski jest adiunktem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. Tematyka realizowanych prac naukowych obejmuje zagadnienia dotyczące pomiarów jak również sterowania przepływami wielofazowymi z wykorzystaniem wielomodalnych metod tomograficznych. W ramach grantu Maria Curie DENIDIA prowadził badania na Uniwersytecie w Bergen.



**Prof. dr hab. inż. Dominik Sankowski**  
e-mail: dsan@kis.p.lodz.pl

Prof. Sankowski jest dyrektorem Instytutu Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. W ramach prac badawczych zorganizował zespoły naukowe w dziedzinach: przetwarzania, rozpoznawania i analizy obrazów, tomografii procesowej, inżynierii oprogramowania, implementacji technik i metod sztucznej inteligencji, a także automatycznej identyfikacji i regulacji obiektów przemysłowych w systemach czasu rzeczywistego. Aktualna działalność naukowa prof. D. Sankowskiego obejmuje również tematykę związaną z informatyzacją jednostek administracji samorządowej.



**Dr inż. Robert Banasiak**  
e-mail: robert.banasiak@p.lodz.pl

Dr inż. Robert Banasiak jest adiunktem w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. W swoich pracach zajmuje się przemysłowymi zastosowaniami elektrycznej tomografii procesowej, a w szczególności problematyką rekonstrukcji obrazów oraz modelowania numerycznego systemów tomografii pojemnościowej. Kierownik grantu 4664/B/T02/2010/38.



otrzymano/received: 25.03.2013

przyjęto do druku/accepted: 31.08.2013

## HISTORY MANAGEMENT OF DATA – SLOWLY CHANGING DIMENSIONS

**Marek Wancerz, Pawel Wancerz**

Lublin University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science

**Abstract:** The article describes few methods of managing data history in databases and data marts. There are many types of dealing with the history of the data. This article will show us some examples, point advantages and disadvantages of each of the method and show us possible scenarios of use.

**Keywords:** managing data history, databases, data marts

### ZARZĄDZANIE HISTORIĄ DANYCH – SLOWLY CHANGING DIMENSIONS

**Streszczenie:** Artykuł opisuje sposób zarządzania historią tabel wymiarowych w bazach danych i hurtowniach danych. Istnieje kilka sposobów na archiwizowanie historii. Artykuł ma na celu przybliżenie ich funkcjonalności popartej przykładami, wskazanie zalet i wad oraz możliwych scenariuszy użycia.

**Słowa kluczowe:** zarządzanie historią, bazy danych, hurtownie danych

### Introduction

Nowadays, almost everyone use data in they lives. But how to understand word „data”? In IT, we can name it as a set of values or variables belonging to a set of items. It is very often represented in a tabular form (columns + rows), data tree (parent-child relationship) or in a graphical structure (tables models with graphical representation). The data we keep doesn't have to be in a text form. We can keep it as a number or even an image.

The data kept in our databases (or data marts) and its quality gives us a huge advantage for the data visualization and management.

But we have to remember that the dimensional data is not a stable entity and it might change over time. To manage the data history Slowly Changing Dimensions was invented.

### 1. Slowly Changing Dimensions overview

Slowly Changing Dimensions was invented by Ralph Kimball, who is regarded as one of the original architects of data warehousing. His methodology became a standard. Slowly Changing Dimensions is a set of methods to manage the data history in the Dimension tables.

Data might change over time and we should take it into account while developing our system (Fig. 1):

- Source data–source data should be delivered in a unified form,
- ETL (Extract Transform Load) – the ETL system should have the mechanism to operate with data incoming to the target system. All bigger ETL tools have the option SCD already implemented (as an option to use) – Informatica PowerCenter Tool, SSIS, Oracle Warehous Builder,
- Database structure – based on the method of history management, the database structure has to be adapted.

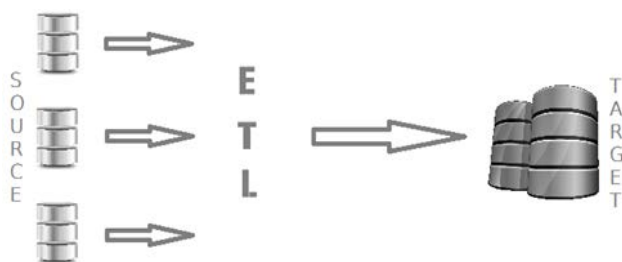


Fig. 1. Data mart load process

To understand the way of data history management we should take a look on the main methods.

### 2. Slowly Changing Dimensions – main types

The easiest way to discuss about the Slowly Changing Dimensions types is to go through all of them with some examples, pointing advantages and disadvantages and possible usage scenarios. We have 3 basic types of Slowly Changing Dimensions.

#### 1. SCD Type 1 – overwriting the old values

Figure (Fig. 2) shows the change of data for an item. The Category for an Item RoboticBook was Science Fiction in 2012. In 2013 the Item changed its Category to Reality.

##### 2012: Before the change

ID	Item Code	Item Description	Category
123	D86	RoboticBook	Science Fiction

##### 2013: After the change

ID	Item Code	Item Description	Category
123	D86	RoboticBook	Reality

Fig. 2. SCD Type 1 overview

The change of Category is a result of an error or a change of structure. Nevertheless it sometimes doesn't meet business requirements. The big advantage for such a method of development is the simplicity of database structure and ETL system. But main disadvantage of this kind of method is the fact that **we lose the data history!** We can only see descriptive attributes as they exist today. To give a better understanding of business requirements inaccuracy after such a change, please have a look the picture below (Fig. 3).

Person				Payments		
ID	PersonID	Name	City	ID_Person	Date	Payment
1234	2B77S	Smith	NewYork	1234	20/01/2013	300
8765	1C144	Brown	Chicago	8765	21/01/2013	400

Smith makes a new payment on 30/03/2013 at his new Texas Address!

Person				Payments		
ID	PersonID	Name	City	ID_Person	Date	Payment
1234	2B77S	Smith	NewYork	1234	20/01/2013	300
8765	1C144	Brown	Chicago	8765	21/01/2013	400
				1234	30/03/2013	200

Group By City: Texas 500 (300+200)  
Chicago 400

Fig. 3. SCD Type 1 example

There are 2 People in dimension Person with their payments in a separate fact table – Payments. Then on 30/03/2013 there is a new payment from the same person – Smith but under a new address (it was changed in the Dimensional table). When we analyze the Payments by City, we will see that Texas has 500 but in fact it has only 200 (300 was NewYork but it is no longer available!).



## II. SCD Type 2– new record in the dimension

Let's take the same example as in Type 1. The same sets of values were assigned to the Item, but with additional fields – Effective Date, Expiration Date, FlagCurrent (Fig. 4).

### 2012: Before the change

ID	Item Code	Item Description	Category	EffDate	ExpDate	Current?
123	D86	RoboticBook	Science Fiction	01/05/2012	31/12/5555	Y

### 2013: After the change

ID	Item Code	Item Description	Category	EffDate	ExpDate	Current?
123	D86	RoboticBook	Science Fiction	01/05/2012	31/01/2013	N
456	D86	RoboticBook	Reality	01/02/2013	31/12/5555	Y

Fig. 4. SCD Type 2 overview

As we can see, for Type 2 Dimension, we have 3 additional indicators which help us control the data. The dates show us the period of time when the Item is valid. The Current flag is giving us a fast information if the row is Valid (Y) or not (N). The huge advantage for this approach is that we keep all the history rows in the dimension and we track all the historical entries. On the other hand, this approach is more complicated for the end user (report developer). The dimension table growth has also been taken into account while development of the project schema.

Let's have a look again at the example from SCD Type 1. But here we will use SCD Type 2 for history data management. (Fig. 5)

Person				Payments		
ID	PersonID	Name	City	ID Person	Date	Payment
1234	2B77S	Smith	NewYork	1234	20/01/2013	300
8765	1C144	Brown	Chicago	8765	21/01/2013	400

Smith makes a new payment on 30/03/2013 at his new Texas Address!

Person				Payments		
ID	PersonID	Name	City	ID Person	Date	Payment
1234	2B77S	Smith	NewYork	1234	20/01/2013	300
8765	1C144	Brown	Chicago	8765	21/01/2013	400
8766	2B77S	Smith	Texas	8766	30/03/2013	200

Group By City: NewYork 300  
Chicago 400  
Texas 200

Fig. 5. SCD Type 2 example

This example shows us correct values grouped by Cities. This is because we created a new row for the changed Smith person with updated City.

## III. SCD Type 3– new dimension column

Let's have a look at the last primary SCD – Type 3. The same example will be taken into account while trying to visualize the method. (Fig. 6)

### 2005: Before the change

ID	Item Code	Item Description	Category
123	D86	RoboticBook	Science Fiction

### 2013: After the change

ID	Item Code	Item Description	Category	Prev Category
123	D86	RoboticBook	Reality	Science Fiction

Fig. 6. SCD Type 2 overview

In this method, a new dimension column is created to keep the historical value of the item. This kind of method is used relatively infrequently. Type 3 SCD is good for tracking soft changes, like item or business reorganization. It gives a good view of the situation today and prior the change. But in case of more frequent and important changes this method will lose the historical data, as only current and original values are retained. The history of changes can't be reproduced as it is done in SCD Type 2.

## 3. Conclusion

We have analyzed 3 types of managing historical data in Dimensional tables. Each of them has advantages and disadvantages and can be used in totally different business needs. It is up to the data modeler to set up such an environment to make it easy to implement, maintain and develop. The most popular method (from those 3) is definitely the SCD Type 2 which gives us a full history of a Dimension value and helps us to build reports not only on current but also on the historical data. The types we described together with the whole concept were invented in 90'. But after publish of SCD's 1, 2, 3 Kimball Group started working on modifications of methods, their fusions and new ones. The result is a new book The Data Warehouse Toolkit (Wiley, Jun/Jul 2013) where we can find 7 Types of SCD's! You can check the overview here on the Figure (Fig. 7). I will describe them in the next publication.

SCD Type	Dimension Table Action
Type 0	No change to attribute value
Type 1	Overwrite attribute value
Type 2	Add new dimension row for profile with new attribute value
Type 3	Add new column to preserve attribute's current and prior values
Type 4	Add mini-dimension table containing rapidly changing attributes
Type 5	Add type 4 mini-dimension, along with overwritten type 1 mini-dimension key in base dimension
Type 6	Add type 1 overwritten attributes to type 2 dimension row, and overwrite all prior dimension rows
Type 7	Add type 2 dimension row with new attribute value, plus view limited to current rows and/or attribute values

Fig. 7. New types of SCD [5]

## Bibliography

- [1] DataModelling: <http://www.learn-datamodeling.com>.
- [2] Dimensional Modeling in Depth (Kimball, Ross) – coursebook.
- [3] The Data Warehouse Toolkit (Wiley, 2013).
- [4] Informatica PowerCenter official: <http://www.informatica.com>.
- [5] Kimball Group webpage: <http://www.kimballgroup.com>.

Dr inż. Marek Wancerz  
e-mail: [m.wancerz@pollub.pl](mailto:m.wancerz@pollub.pl)

Mark Wancerz graduated from Faculty of Electrical Engineering of the Technical University of Lublin. He currently works in the Department of Network and Security. His research interests revolve around issues of system protection, power system security and the use of information technology and databases in the energy sector. Co-author of many national and international publications.



Mgr inż. Paweł Wancerz  
e-mail: [pwancerz@gmail.com](mailto:pwancerz@gmail.com)

Paweł Wancerz is an employee of Atos IT Solutions & Services Company located in Wrocław. He is currently attending PhD Studies at University of Technology in Lublin. His major interests in IT are Business Intelligence, Data Warehousing and ETL. He participated in many professional courses which enabled him to acquire in-depth knowledge in this field.





# SYSTEM IMPEDANCYJNEJ TOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ BAZUJĄCY NA PROCESORZE SYGNAŁOWYM O NISKIM POBORZE MOCY

**Daniel Olchowy**

Net-Art., ul. Lotnicza 3, 20-322 Lublin

**Streszczenie.** Artykuł zawiera opis rozwiązania systemu pomiarowego tomografii impedancyjnej bazującego na procesorze sygnałowym o niskim poborze mocy.

**Słowa kluczowe:** tomografia impedancyjna, procesor sygnałowy

## ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY HARDWARE SYSTEM BASED ON LOW POWER DIGITAL SIGNAL PROCESSOR

**Abstract.** Article contains description of the measurement system electrical impedance tomography solutions based on digital signal processor with low power consumption.

**Keywords:** electrical impedance tomography, digital signal processor

### Wstęp

Tomografia impedancja jest stosunkowo nową techniką obrazowania w inżynierii, w której wykorzystuje się właściwości elektryczne materiałów. Dany obiekt pobudzany jest ze źródła prądowego lub napięciowego, a następnie obserwuje się powstały na jego brzegu rozkład napięć.

Z matematycznego punktu widzenia impedancyjna tomografia komputerowa należy do zagadnień odwrotnych pola elektromagnetycznego. Zagadnieniem odwrotnym pola elektromagnetycznego nazywamy proces identyfikacji, w którym zmierza się do wyznaczenia parametrów opisujących dane pole, na podstawie posiadania niektórych, wybranych informacji charakterystycznych dla tego pola [1].

Numeryczną analizę problemu przeprowadza się z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Jest to obecnie najbardziej efektywna metoda numeryczna, służąca do przybliżonego rozwiązania zarówno płaskich i przestrzennych zagadnień polowych o skomplikowanej geometrii, w których ośrodek może wykazywać cechy niejednorodności prądów, konduktywności.

Algorytm komputerowej rekonstrukcji obrazu poszukuje iteracyjnie takiego rozkładu konduktywności, dla którego obliczone wartości napięć międzyelektrodowych są możliwie najbliższe odpowiednim wartościom pomiarowym. Wartości początkowe konduktywności w punkcie wyjściowym procesu iteracyjnego są dobierane doświadczalnie, aby otrzymać możliwie najlepszy wynik [3, 4].

### 1. Koncepcja rozwiązania sprzętowego

Aby sprostać wymaganiom stawianym przez algorytmy obliczeniowe, istotne jest zastosowanie odpowiedniego rozwiązania sprzętowego. W celu uzyskania odpowiedniej jakości rekonstruowanych obrazów konieczne jest, aby pomiary odbywały się z odpowiednią dokładnością, precyzją i częstotliwością. Duża ilość danych, jakie system musi przetworzyć, zdecydowała o wyborze układu z procesorem sygnałowym.

Procesor sygnałowy to układ wyspecjalizowany pod kątem przetwarzania i cyfrowej obróbki sygnałów. Charakterystyczną cechą procesorów sygnałowych jest pamięć zrealizowana w zmodyfikowanej architekturze harwardzkiej: rozdzielona wewnętrzna pamięć programu i danych oraz obszerny blok pamięci wspólnej, dający się mapować do dowolnej przestrzeni. Daje to możliwość równoczesnego dostępu do danych oraz odczytu instrukcji wykonywanych przez procesor. Szyna adresowa danych i adresowa dla pamięci zewnętrznych są natomiast wspólne [2].

Dodatkowo w procesorach sygnałowych lista instrukcji procesora zoptymalizowana jest pod kątem operacji przetwarzania sygnałów, w szczególności operacji najczęściej występujących podczas filtracji FIR i IIR oraz przy realizacji transformat Fouriera i kosinusowej. Wszystkie instrukcje procesorów są instrukcjami warunkowymi, co dodatkowo zwiększa ich możliwości oraz redukuje liczbę dodatkowych rozkazów. Ważną cechą, znacznie zwiększającą prędkość działania procesora, jest przetwarzanie potokowe.

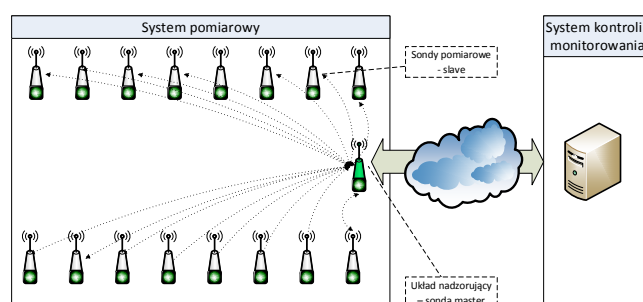
Przetwarzanie potokowe polega na rozbiciu każdej instrukcji na kilka części logicznych związanych z różnymi operacjami wykonywanymi przez procesor. Każda z tych części wykonywana jest w innej jednostce logicznej procesora, co umożliwia rozpoczęcie wykonywania kolejnej instrukcji już po wykonaniu pierwszego etapu instrukcji poprzedzającej, a nie dopiero po zakończeniu całej rozkazu, jak to ma miejsce w przypadku przetwarzania szeregowego.

Procesory sygnałowe bardzo często wykorzystywane są do przetwarzania sygnałów w czasie rzeczywistym. Prędkość wykonywania przez procesor operacji powinna być zatem zsynchronizowana z tempem odbierania i przesyłania danych. Częstotliwość ta jest zwykle ustalona ogólnie dla danej implementacji i zależy od przyjętej częstotliwością próbkowania w układzie.

### 2. Koncepcja komunikacji i przetwarzania danych systemu

Założenia pracy systemu zdeterminowane zostały przez obszar w którym system powinien działać. Pokrycie obszaru około 80m zapewnione jest przez 16 elektrod umieszczonych w równomiernie pełniących rolę elektrod pomiarowych oraz 1 elektrodę pełniącą funkcję nadrzędną w prezentowanym układzie. Cały układ pomiarowy łączy się z serwerem pełniącym funkcję kontroli i monitorowania.

Rozkład elektrod pomiarowych przedstawia poniższy schemat.



Rys. 1. Schemat komunikacji systemu

Głównym elementem wchodzącym w skład sondy pomiarowej jest układ RISC, który zarówno w sondzie pomiarowej jak i sondzie nadzorującej odpowiada zarówno za pomiar jak i zapewnienie komunikacji. Komunikacja pomiędzy elementami odbywa się poprzez sieć bezprzewodową realizowaną przez zintegrowany układ na każdej z elektrod.

Wybór architektury RISC jako bazy dla sond pomiarowych systemu podyktowany został przez to aby pobór prądu był minimalny. Ograniczenie poboru energii ma zapewnić ciągłą pracę układu nawet do roku pracy przy zasilaniu bateryjnym. Uśpiony układ potrzebuje mniej energii. Podstawowa idea zastosowania energooszczędnego układu sprowadza się do tego, by jak najdłużej trwać w stanie uśpienia, budzić się o ustalonej i zaprogramowanej porze w celu wykonania zadania pomiaru i przesłaniu uzyskanych danych, a w przypadku sondy nadzorującej do zebrania pomiarów, dokonania obliczeń i ponownego przejścia do stanu uśpienia.

W przypadku sondy nadzorującej głównym jej elementem jest procesor sygnałowy wraz z układem RISC. Dzięki wysokiemu poziomowi integracji sondy nadzorującej z urządzeniami peryferyjnymi (we/wy, moduł gsm), jak i obniżonemu poziomowi rozpraszania ciepła, rozwiązanie pozwala zapewnić wydłużony czas pracy na bateriach [5, 6].

Ponieważ układ pomiarowy wymaga precyzyjnej synchronizacji czasowej istotne jest aby poszczególne jego elementy pozwalały na odpowiednie działanie w trybie uśpienia co zapewni zgodność wykonywanych pomiarów. Kolejną istotną cechą układu jest możliwość zmiany w dowolnej chwili źródła sygnału taktującego i możliwość zmiany częstotliwości jego taktowania.

Poza dokonywaniem obliczeń w oparciu o zebrane przez sondy pomiarowe dane kolejnym istotnym zadaniem sondy master jest także wymuszenie i zebranie informacji o pierwotnym stanie badanego obiektu, zapewnienie diagnostyki układu pomiarowego poprzez test obecności ustalonych elektrod pomiarowych oraz odebranie i wysyłanie do systemu kontroli i monitorowania parametrów dotyczących częstotliwości dokonywania pomiarów oraz uzyskanych wyników przez układ pomiarowy.

System pomiarowy działa w sposób cykliczny. W pierwszym cyklu sonda master sprawdza obecność ustalonych elektrod pomiarowych. Po pozytywnym zweryfikowaniu obecności przesyła żądanie zebrania informacji o środowisku pierwotnym. Po odebraniu z poszczególnych elektrod pierwotnych pomiarowych danych elektroda master wysyła sygnał do rozpoczęcia pomiaru i cyklicznego przełączenia poszczególnych par elektrod.

System, ze względu na pełnione role, obejmuje przede wszystkim:

- źródło o zmiennej częstotliwości,
- multiplekser,
- system akwizycji danych,
- moduł sterujący z procesorem sygnałowym.

### 3. Podsumowanie

Platforma sprzętowa bazująca na procesorach o niskim poborze mocy firmy Texas Instruments TMS320C6742 oraz mikroprocesor rodziny ARM9x pozwalającą bardzo efektywnie wykorzystywać przetwarzanie potokowe realizowane w procesorze, które realizowane jest poprzez programowe zrównoleglenie pętli. Elementem większości algorytmów przetwarzania sygnałów są bowiem pętle o dużej liczbie iteracji, które stanowią najbardziej wymagający pod względem potrzebnej mocy obliczeniowej, a co za tym idzie najbardziej czasochłonny element programów. Szczególnie często występują one w filtrach cyfrowych i algorytmach FFT.

Aby przyspieszyć wykonywanie algorytmów i optymalnie wykorzystać możliwości procesora, kompilator wbudowany w środowisko programistyczne także posiada możliwość programowego zrównoleglenia pętli [5].

Wykorzystanie dostępnych zasobów układu ułatwione jest poprzez użycie narzędzi programowych, które dzięki dedykowanemu interfejsowi JTAG umożliwiają podłączenie odpowiedniego emulatora sprzętowego, przystosowanego do współpracy z procesorami rodziny TMS320 oraz ARM9x a przez to efektywnie jego wykorzystanie.

### Literatura

- [1] David S Holder.: Electrical Impedance Tomography Methods, History and Applications, Series in Medical Physics and Biomedical Engineering, London 2005.
- [2] Hoe Cher Wee.: Development of a Digital Signal Processing measurement platform for Biomedical Magnetic Induction Tomography and Spectroscopy, University of Glamorgan December 2010.
- [3] Filipowicz S. F., Nita K.: Porównanie wielokanałowych układów pomiarowych w tomografii impedancyjnej, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 230, Warszawa 2007.
- [4] Filipowicz S. F., Rymarczyk T.: Tomografia impedancyjna pomiary, konstrukcje i metody tworzenia obrazu, BelStudio, Warszawa 2003.
- [5] Texas Instruments Technical Documents TMS320C6742 Fixed/Floating Point Digital Signal Processor (Rev. C), Texas Instruments, 03 Oct 2011.
- [6] Texas Instruments Embedded Processors Wiki – <http://www.processors.wiki.ti.com> (ARM MPU Performance, Ultra Low Power DSP).

**Mgr inż. Daniel Olchowy**  
e-mail: daniel.olchowy@gmail.com

Daniel Olchowy ukończył studia magisterskie na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie oraz studia podyplomowe z rachunkowości zarządczej i controllingu na Wydziale Zarządzania Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

W pracy badawczej, koncentruje się nad zastosowaniem procesorów sygnałowych w przetwarzaniu danych w tomografii impedancyjnej.



otrzymano/received: 27.06.2013

przyjęto do druku/accepted: 21.09.2013

## VI KONGRES METROLOGII POD HASŁEM „METROLOGIA KRÓLOWĄ BADAŃ STOSOWANYCH”



W dniach 19 – 22 czerwca 2013 roku w Kielcach i Sandomierzu odbył się VI Kongres Metrologii pod hasłem „Metrologia królową badań stosowanych”. Miejsmem obrad była Sala Rycerska Zamku Kazimierzowskiego w Sandomierzu oraz Politechnika Świętokrzyska w Kielcach.

Organizatorem Kongresu był Komitet Metrologii i Aparatury Naukowej Polskiej Akademii Nauk oraz Politechnika Świętokrzyska pod patronatem Rektora Politechniki Świętokrzyskiej prof. dr. hab. inż. Stanisława Adamczaka.

Celem Kongresu była prezentacja zagadnień teoretycznych i praktycznych pojawiających się we współczesnej metrologii, interdyscyplinarnej dziedzinie wiedzy, która obejmuje większość obszarów działalności współczesnego człowieka.

Uroczyste otwarcie Kongresu nastąpiło w środę, 19 czerwca w głównej auli wykładowej Politechniki Świętokrzyskiej. Uczestników przywitani Przewodniczący Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej Polskiej Akademii Nauk prof. dr. hab. inż. Janusz Mroczka, członek korespondent Polskiej Akademii Nauk oraz Rektor Politechniki Świętokrzyskiej prof. dr. hab. inż. Stanisław Adamczak.

Obrady objęły trzy sesje plenarne.

Pierwszej sesji plenarnej przewodniczyli prof. dr. hab. inż. Janusz Mroczka oraz prof. dr. hab. inż. Stanisław Adamczak. W pierwszej sesji głos zabrali również Prezes Głównego Urzędu Miar pani Janina Maria Popowska oraz przedstawiciel Ministerstwa Gospodarki pan Maciej Dobieszewski, który wygłosił referat zatytułowany „Instytucjonalne aspekty reformy polskiej metrologii”.

Druga sesja plenarna odbyła się pod przewodnictwem prof. dr. hab. inż. Stanisława Adamczaka oraz prof. dr. hab. inż. Eugeniusza Ratajczyka.

Referaty w tej sesji przedstawili:

- Pani Elżbieta Michniewicz - Dyrektor Zakładu Elektrycznego GUM, „Misja, rola i zadania Głównego Urzędu Miar, jako NMI, w świetle dokumentów międzynarodowych i krajowych”.
- Prof. dr. hab. inż. Tadeusz Skubis - Redaktor Naczelny PAK, „Informacja Redaktora Naczelnego czasopisma Pomiary Automatyka Kontrola”.

Trzeciej sesji plenarnej przewodniczyli prof. dr. hab. inż. Janusz Mroczka oraz prof. dr. hab. inż. Zygmunt Kuśmierek.

Wygłoszone zostały następujące referaty:

Dr inż. Paweł Fotowicz, „Niepewność pomiaru – wczoraj i dziś”:

- 1) Historyczna droga kształtowania się teorii niepewności pomiaru.
- 2) Współczesne podejście dotyczące wyrażania niepewności pomiaru.

Dr Alicja Adamczak - prezes Urzędu Patentowego RP, „Ochrona patentowa w badaniach stosowanych”.

Uczestnicy Kongresu mieli również możliwość uczestnictwa w licznych obradach prowadzonych w następujących sekcjach tematycznych:

- 1) Sesja Głównego Urzędu Miar.
- 2) Pomiary wielkości geometrycznych.
- 3) Pomiary wielkości elektrycznych.
- 4) Wzorce jednostek miar, służba miar.
- 5) Systemy pomiarowe i transmisja danych.
- 6) Przetworniki pomiarowe i przetwarzanie sygnałów.
- 7) Pomiary wielkości mechanicznych.
- 8) Ocena dokładności pomiaru.
- 9) Pomiary technologiczne, inżynieria materiałowa.
- 10) Pomiary geodezyjne w geomatyce.
- 11) Pomiary chemiczne.
- 12) Pomiary w medycynie.

W trzecim dniu Kongresu, w trakcie części merytorycznej odbyło się Posiedzenie Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN. Posiedzeniu przewodniczył prof. dr. hab. inż. Janusz Mroczka, członek korespondent PAN, przewodniczący Komitetu Naukowego VI Kongresu Metrologii.

Kongres zakończony został przez prof. dr. hab. inż. Janusza Mroczkę oraz prof. dr. hab. inż. Stanisława Adamczaka podsumowaniem sesji i przedstawieniem najważniejszych wniosków wypływających z wygłoszonych referatów.

Tradycją jest, że Kongres Metrologii jest organizowany przez Komitet Metrologii i Aparatury Naukowej Polskiej Akademii Nauk przy współudziale uczelni posiadających zaplecze naukowe i warsztat doświadczalny w obszarze zastosowań metrologii. Dotychczasowe Kongresy Metrologii odbyły się przy współudziale Politechniki Gdańskiej (1998), Politechniki Warszawskiej (2001), Politechniki Wrocławskiej (2004), Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (2007), Politechniki Łódzkiej (2010) oraz Politechniki Świętokrzyskiej (2013).

Kolejny - VII Kongres Metrologii - odbędzie się w 2016 roku w Lublinie, a zorganizowany zostanie przez Komitet Metrologii i Aparatury Naukowej Polskiej Akademii Nauk oraz Politechnikę Lubelską, pod patronatem Rektora Politechniki Lubelskiej prof. dr. hab. inż. Piotra Kacejki.

*dr hab. inż. Piotr Kisala*



## IMPREZY SPECJALISTYCZNE

## IIPHDW 2013

Department of Theoretical and Experimental Electrical Engineering DTEE



The International Interdisciplinary PhD Workshop 2013 edition was held in Brno (Moravia, the Czech Republic) between the 8<sup>th</sup> to the 11<sup>th</sup> of September 2013. The Workshop was organized by the Department of Theoretical and Experimental Electrical Engineering of the Brno University of Technology (Czech Republic) in cooperation with Institute of Electronics and Information Technology of Lublin University of Technology (Poland) and Electrotechnical Institute in Warsaw (Poland). There were **65 participants (125 authors and coauthors) from different countries** presenting their research work and results.

The aim of the IIPHDW was to gather doctoral students and encourage them to discuss various problems associated with their research and scientific activities. The session chairs were among the most renowned experts in the fields covered by the Workshop. There were 65 articles considering the following branches of technology:

- Electrical Engineering
- Power Engineering
- Automation and Control
- Mechatronics
- Bioengineering
- Computer Sciences



dr inż. Maciej Pańczyk

## IMPREZY SPECJALISTYCZNE

## WDWEII 2013

W dniu 5 lipca 2013 r. odbyła się cykliczna konferencja pt. *Letnie Warsztaty Doktoranckie Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej*. Tematyka warsztatów obejmowała takie zagadnienia jak: elektrotechnika, automatyka i robotyka, informatyka, elektrotechnika, bioinżynieria, mechatronika, metrologia, elektroenergetyka, odnawialne źródła energii.

W warsztatach wzięli udział doktoranci z Politechniki Lubelskiej. Spotkanie rozpoczęło się od oficjalnego otwarcia, które poprowadzili prof. dr hab. inż. Henryka Stryczewska oraz dr hab. inż. Wojciech Jarzyna.

Pierwsza część warsztatów składała się z sesji poświęconej doktorantom otwierającym przewód doktorski. Doktoranci podczas swoich wystąpień zaprezentowali następujące tematy prac badawczych:

- mgr inż. Stanisław Słupski: Metody diagnozowania trudnych usterek w samochodach,
- mgr inż. Daniel Gajda: Badanie gęstości krytycznego prądu przewodów nadprzewodnikowych z NbTi oraz MgB<sub>2</sub>,
- mgr inż. Piotr Lipnicki: Własności dynamiczne algorytmów synchronizacji z siecią energoelektronicznych przekształtników,
- mgr inż. Adam Rzepecki: Wpływ jakości transmisji sygnałów pomiarowych na dokładność procesu estymacji stanu systemu elektroenergetycznego,
- mgr inż. Jarosław Kowaluk: Implementacje algorytmu dekorelacji parametrów wiązki termoelektronowej w spektrometrze mas do analiz izotopowych gazów szlachetnych.

W trakcie pierwszej części swoje wykłady wygłosili również zaproszeni goście, tj. dr hab. inż. Mariusz Malinowski oraz prof. dr hab. inż. Roman Barlik. Po krótkiej przerwie kawowej odbyła się druga część warsztatów podzielona na trzy sesje, podczas których swoje prelekcje wygłosili pozostali uczestnicy warsztatów. Poruszyli oni bardzo ciekawe tematy dotyczące m. in. poprawy efektywności energetycznej budynków, wykorzystania interaktywnego szkła w komunikacji czy możliwości zastosowania polimerów do budowy światłowodowych czujników pola magnetycznego. Sesjom przewodniczyli dr hab. inż. Janusz Partyka, dr hab. Elżbieta Jartych oraz dr hab. inż. Jarosław Sikora. Warsztaty zakończyły się uroczystą kolacją.

Patronat nad warsztatami objął JM Rektor Politechniki Lubelskiej prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko oraz Dziekan Wydziału Elektrotechniki i Informatyki prof. dr hab. inż. Henryka Stryczewska. Patronat Honorowy objęło *Polskie Towarzystwo Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej, Stowarzyszenie Elektryków Polskich*, natomiast patronat medialny czasopismo naukowe *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*.

mgr inż. Adam Rzepecki





## **Ze smutkiem żegnamy naszego kolegę Konrada, tragicznie zmarłego 9 lipca 2013 roku.**



Dr inż. Konrad Nita był wieloletnim pracownikiem Zakładu Systemów Pomiarowo-Diagnostycznych Instytutu Elektrotechniki. Pracę w Instytucie rozpoczął 1 października 2005r., na stanowisku inżyniera, później pracował jako asystent i adiunkt. Dyplom Doktora Nauk Technicznych uzyskał na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Rozprawa doktorska pt.: „Lokalizacja położenia autonomicznych źródeł wewnątrz obszaru metodą elementów brzegowych” dotyczyła badań elektrycznej czynności mózgowej EEG. Od roku 2008 pełnił funkcję Kierownika Pracowni Tomografii Komputerowej. Jednocześnie prowadził zajęcia dydaktyczne na studiach doktoranckich w Instytucie

Elektrotechniki. Był członkiem Rady Naukowej Instytutu Elektrotechniki.

Był niezwykle pracowitym i uczynnym kolegą. Pozostawił znaczny dorobek naukowy. Jest autorem i współautorem kilkudziesięciu publikacji naukowych i popularyzatorskich. Bardzo aktywnie działał jako Sekretarz Naukowy Międzynarodowych Interdyscyplinarnych Warsztatów Doktoranckich. Był członkiem Komitetu Organizacyjnego cyklu Krajowych Warsztatów Doktoranckich organizowanych wspólnie z Wydziałem Elektrycznym Politechniki Lubelskiej.

Osiągnął wysoki poziom badań w dziedzinie modelowania numerycznego i zastosowań tomografii impedancyjnej do diagnostyki obiektów budowlanych i wałów przeciwpowodziowych. Aktywnie uczestniczył w tworzeniu infrastruktury ładowania pojazdów elektrycznych.

Poświęcił swoje życie ratując inne. Pozostał w naszej pamięci jako nieprzeciętny człowiek, niezastąpiony kolega i przyjaciel.

**Zespół redakcyjny IAPGOS**

# WARSZTATY DOKTORANCKIE WD2013

## PORONIN 23 - 26 CZERWCA 2013r.



Siódma edycja Warsztatów Doktoranckich odbyła się w dniach 23-26 czerwca 2013r. w Poroninie. Tradycyjnie warsztaty skierowane były głównie do studentów studiów doktoranckich uczelni technicznych. W konferencji udział wzięło 77 uczestników będących doktorantami jednostek z całego kraju oraz kilkoro uczestników z zagranicy. Celem warsztatów było zgromadzenie doktorantów i zachęcenie ich do wspólnej dyskusji nad problemami związanymi z ich pracą naukową. Tematyka warsztatów obejmowała zagadnienia elektrotechniki, automatyki i robotyki, informatyki, elektroniki, bioinżynierii, mechatroniki, metrologii i normowania, elektroenergetyki, metod komputerowych w nauce oraz inżynierii materiałowej.

Poniższej w tabeli przedstawiono ilościowy udział doktorantów z poszczególnych uczelni i jednostek badawczych.

Lp.	Nazwa jednostki	Liczba art.
1.	Politechnika Gdańska	3
2.	Politechnika Poznańska	12
3.	Politechnika Śląska	4
4.	Politechnika Łódzka	4
5.	AGH	5
6.	Politechnika Częstochowska	1
7.	Uniwersytet Zielonogórski	4
8.	Politechnika Lubelska	4
9.	ZUT Szczecin	2
10.	IEL Warszawa	6
11.	Net-Art. Lublin	8
12.	Instytut Kolejnictwa	1
	<b>Sumaryczna liczba art.</b>	<b>54</b>

