

# INFORMATYKA AUTOMATYKA POMIARY



[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)



1964



WYDZIAŁU ELEKTROTECHNIKI  
I INFORMATYKI  
POLITECHNIKI LUBELSKIEJ

2014





## Witamy serdecznie

Serdecznie zapraszamy zainteresowanych na kolejne warsztaty doktoranckie WD2014 organizowane przez Instytut Elektrotechniki w Warszawie, Instytut Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Lubelskiej, Instytut Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej oraz Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo Hutniczej, które odbędą się w dniach 8 - 10 września 2014r. w Poroninie, Ośrodku Wypoczynkowym Limba.

# Warsztaty Doktoranckie WD 2014

Poronin

8 – 10 września 2014

Pod patronatem honorowym

Przewodniczącego Rady Naukowej IEL

prof. dr hab. inż. K. Zakrzewskiego

Dyrektora IEL dr hab. W. Wilczyńskiego, prof. IEL

ABB Sp. z o.o, Korporacyjnego Centrum Badawczego  
Starowiślna 13a, 31-038 Kraków, Polska

Instytut Elektrotechniki  
Warszawa



Politechnika Lubelska  
Instytut Elektroniki i Technik  
Informatycznych



Politechnika Łódzka  
Instytut Informatyki Stosowanej



Akademia Górniczo Hutnicza  
Wydział Elektrotechniki,  
Automatyki, Informatyki  
i Inżynierii Biomedycznej



ABB Sp. z o.o  
Korporacyjne Centrum Badawcze  
Starowiślna 13a, 31-038 Kraków  
Polska



Krajowa Reprezentacja  
Doktorantów





2/2014  
kwiecień-czerwiec  
WYDANIE

pod redakcją naukową  
prof. dr hab. inż. Waldemara Wójcika

# INFORMATYKA AUTOMATYKA POMIARY

## W GOSPODARCE I OCHRONIE ŚRODOWISKA

Informatics Control Measurement in Economy and Environment Protection

KWARTALNIK CZĘŚCIOWO DOTOWANY PRZEZ MINISTERSTWO NAUKI I SZKOLNICTWA WYŻSZEGO

ISSN 2083-0157

### SPIS TREŚCI || CONTENTS

str. || page

#### Grzegorz Koziel

Prace badawcze Instytutu Informatyki || Research made in Institute of Computer Science ..... 3

#### Wojciech Jarzyna, Dariusz Zieliński

Wdrożenia przemysłowe mottem prac badawczych Katedry Napędów i Maszyn Elektrycznych  
Industrial implementation as a research work keynote of the Electrical Drives and Electrical Machines Department ..... 5

#### Andrzej Kotyra

Optoelektroniczne systemy w zastosowaniach diagnostycznych i pomiarowych || Optoelectronic systems in diagnostic and measurement applications ..... 9

#### Andrzej Sumorek

Elektrotechnologie wspomagające przetwarzanie materiałów dielektrycznych pochodzenia roślinnego  
Electrotechnologies supporting of dielectric plant material processing ..... 11

#### Magdalena Borys, Edyta Łukasik

Wiedza studentów informatyki Politechniki Lubelskiej o platformach e-learningowych  
Computer science student at Lublin University of Technology knowledge of e-learning platforms ..... 13

#### Bożena Malesa, Mariusz Mazurek

Oddziaływania nadsubtelne w ceramice  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$  wytworzonej przez aktywację mechaniczną  
Hyperfine interactions in  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$  ceramics prepared by mechanical activation ..... 16

#### Paweł Tchórzewski

Oscylacje elektronowe w układzie złożonym z kropek kwantowych oraz doprowadzeń - analiza numeryczna  
Electron oscillations in a quantum dot system - numerical analysis ..... 20

#### Mateusz Krawczyk, Mikołaj Skowron

Oddziaływanie pola magnetycznego na płynącą ciecz o wybranych właściwościach magnetycznych  
Influence of the magnetic field on flowing liquid of selected magnetic properties ..... 24

#### Igor Kisil, Victor Bilischuk, Yuri Kuchirka, Olga Barna

Przyrząd do badania dynamicznego napięcia powierzchniowego wodnych roztworów substancji powierzchniowo czynnych  
Device for study of dynamic surface tension of aqueous surfactant solutions ..... 28

#### Alexander Gozhyi, Irina Kalinina

System informacji do analizy i modelowania poznawczego || Information system for a fuzzy cognitive analysis and modeling ..... 31

#### Vasyl Lytvyn, Ihor Rishnyak

Modelowanie i ocena ryzyka projektów w środowisku wieloprojektowym || Modeling and evaluation of project risks in multi-project environment ..... 34

#### Piotr Bogusławski

Ograniczający łącznik napięcia przemiennego || Current limiting switch of alternative voltage ..... 37

#### Adam Musiał, Piotr Szczepaniak

Optyczne rozpoznawanie znaków z użyciem sztucznej inteligencji || Optical character recognition using artificial intelligence technologies ..... 41

#### Paweł Karol Frankowski

Poziyskiwanie wiedzy z wyników badań wiroprowdowych || Knowledge extraction from the eddy current measurement data ..... 45

#### Michał Brasel

Adaptacyjny regulator LQR w układzie sterowania kątem kursowym i prędkością statku opisanego nieliniowym modelem dynamicznym MIMO  
Adaptive LQR course-keeping controller for the nonlinear MIMO model of a container vessel ..... 49

#### Maciej Szczepaniak

Optymalizacja geometrii głowicy tnącej obrabiarki Water-jet z wykorzystaniem metody elementów skończonych  
Geometry optimization of Water-jet machine cutting head using finite element method ..... 53

#### Anton Mykhailiuk, Andrii Pukach

Funkcjonalnie zorientowana metoda projektowania aplikacji specjalistycznych systemów edukacyjnych i inteligentnych  
The functionally-oriented method for specialized EI-systems design application ..... 57

#### Anton Mykhailiuk, Vasyl Teslyuk

Rozwój oprogramowania algorytmicznego i środków informatycznych dla ontologii językowej bazujących na metodzie tworzenia strukturalnego elektronicznego zasobu encyklopedycznego || Development of the algorithmic software and information supplies for the linguistic ontology based on structured electronic encyclopedic resource formation method ..... 62

#### Evgeniy Pistun, Natalia Yakymchuk

Rozwój automatycznych systemów sterowania stacją pomp zasilającą miasto w wodę  
Development of the automatic control system of pumping station for urban water supply ..... 68

#### Łukasz Gospodarek, Grzegorz Trzmiel

Wybrane aspekty techniczno-ekonomiczne lokalizacji farm wiatrowych || Some technical and economic aspects of the location of wind farms ..... 72

#### Dariusz Zieliński

Układ badawczy przeznaczony do analizy synchronizacji przekształtników sieciowych podczas zapadów napięcia  
The laboratory system to analyzing power inverters during voltage sag ..... 77

### KOLEGIUM REDAKCYJNE

redaktor naczelny  
z-ca redaktora naczelnego  
sekretarz redakcji

prof. dr hab. inż. Jan Sikora  
dr hab. inż. Tomasz Więcek  
dr inż. Paweł Komada

redaktor językowy (ang., ros.)  
skład i łamanie

Tatiana Kolesnikova  
mgr inż. Katarzyna Sobańska  
Reklama: okładki: II, III i IV

Wydawnictwo: Centrum Innowacji i Transferu Technologii LPNT Sp. z o. o., <http://www.citt.lublin.pl>

Redakcja: 20-262 Lublin, ul. Bohdana Dobrzańskiego 3, tel./fax: 81 479 09 17, e-mail: [redakcja@iapgosp.pl](mailto:redakcja@iapgosp.pl)

Skład i łamanie: Centrum Innowacji i Transferu Technologii LPNT Sp. z o. o. Druk: Drukarnia Rapida. Nakład: 600 egz.

Czasopismo indeksowane w bazach: BazTech ([baztech.icm.edu.pl](http://baztech.icm.edu.pl)) oraz IC Journals Master List ([www.journals.indexcopernicus.com](http://www.journals.indexcopernicus.com)).

## OD WYDAWCY

**Szanowni Czytelnicy,**

oddajemy w Państwa ręce drugi w 2014 roku numer wydawanego przez CITT LPNT kwartalnika IAPGOŚ.

Gorąco polecamy pięć pierwszych artykułów poświęconych Wydziałowi Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej, który w 2014 roku obchodzi jubileusz 50-lecia działalności. Jednostka ta powstała w 11. roku działalności pierwszej uczelni technicznej w Lublinie, ówczesnej Wieczorowej Szkoły Inżynierskiej, jako jej drugi wydział. Pragniemy nadmienić, że w zeszłorocznej ocenie parametrycznej wydział uzyskał kategorię A, jako jeden z trzech w Politechnice Lubelskiej.

Oprócz wspomnianych okolicznościowych artykułów proponujemy pracę zbiorową pracowników Iwano-Frankowskiego Narodowego Technicznego Uniwersytetu Nafty i Gazu z Ukrainy (IFNTUOG) na temat dynamicznego napięcia powierzchniowego wodnych roztworów substancji powierzchniowo czynnych. Zaprezentowano w nim schemat blokowy i wygląd urządzenia wykorzystującego prezentowaną metodę oraz wyniki badań dynamicznego napięcia międzyfazowego wodnych roztworów Tipolu i Savenolu dla różnych koncentracji stężenia używanych do intensyfikacji wydobywania ropy naftowej i gazu.

W numerze znajdują Państwo również artykuł prezentujący system informacji do analizy i modelowania poznawczego opartego na rozmytej mapie poznawczej, pozwalający na analizę informacji ekspertów w celu modelowania złożonych systemów i procesów, autorstwa dr Alexandra Gozhy i dr Iriny Kalininy.

Osoby zainteresowane tematyką sztucznej inteligencji na pewno nie pominą artykułu autorstwa prof. Piotra Szczepaniaka oraz mgr. inż. Adama Musiał, dotyczącego optycznego rozpoznawania znaków z użyciem sztucznej inteligencji.

**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, Kazakhstan), **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 Książek** (Uniwersytet Medyczny w Lublinie, Lublin, Polska), **prof. Piotr Lesiak** (Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny, Radom, Polska), **prof. Georgii Lysychenko** (National Academy of Sciences, Institute of Environmental Geochemistry, Kijów, Ukraina), **prof. Volodymyr Lytvynenko** (Kherson National Technical University, Chersoń, Ukraina), **mgr inż. Andrzej Łobzowski** (FirmaLAB-EL, Warszawa, Polska), **prof. Henryk Madura** (Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Polska), **dr Paweł 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. Wacław 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. Paweł 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, Almaty, Kazachstan), **prof. Valery Szmarnow** (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, Strasbourg, 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. Satoshi 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. Paweł Zhukowski** (Politechnika Lubelska, Lublin, Polska)



## PRACE BADAWCZE INSTYTUTU INFORMATYKI

### Grzegorz Koziel

Politechnika Lubelska, Instytut Informatyki, Zakład Ochrony Informacji

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono przegląd badań naukowych prowadzonych w Instytucie Informatyki. Wskazano obszary badawcze oraz uzyskane wyniki.

**Słowa kluczowe:** Instytut Informatyki, badania, akwizycja ruchu, ochrona informacji

## RESEARCH MADE IN INSTITUTE OF COMPUTER SCIENCE

**Abstract:** In the article the research made in the Institute of Computer Science is presented. The most important areas are presented. Obtained results are described.

**Keywords:** Institute of Computer Science, research, motion capture, information protection

### Wstęp

Historia Instytutu Informatyki sięga 1989 roku, kiedy to do życia powołany został Zakład Informatyki. Inicjatorem jego powstania był dr hab. inż. Andrzej Nafalski. Został on również pierwszym kierownikiem Zakładu. W kolejnych latach Zakład rozrastał się i został przekształcony w katedrę a w 2004 roku uzyskał statut instytutu. W tej formie kontynuuje dwudziestoletnią tradycję dydaktyczno-naukową w zakresie informatyki. Instytutem Informatyki obecnie kieruje dr hab. Stanisław Grzegórski, prof. PL.

Instytut Informatyki realizuje dydaktykę w dziedzinie Informatyki dla Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań informatyki w elektrotechnice, inżynierii oprogramowania, komputerowego przetwarzania obrazów, symulacji systemów dynamicznych oraz metod kryptografii. Dodatkowo Instytut prowadzi badania naukowe z różnych dziedzin informatyki. W ramach Instytutu Informatyki funkcjonują trzy koła naukowe. Pracownicy Instytutu Informatyki zaangażowani są w prowadzenie pięciu różnych projektów. Tak szeroko zakrojona działalność możliwa jest jedynie dzięki dużej liczbie profesjonalnych pracowników. Obecnie w Instytucie zatrudnionych jest 27 osób. Na rysunku 1 przedstawione zostało zdjęcie obecnych pracowników Instytutu Informatyki.



Rys. 1. Pracownicy Instytutu Informatyki

Ze względu na różnorodność prowadzonych badań, wyodrębnione zostały cztery zakłady:

- Zakład Programowania i Grafiki Komputerowej kierowany przez dr hab. inż. Jerzego Montusiewiczza,
- Zakład Podstaw Informatyki i Analizy Numerycznej kierowany przez dr hab. Stanisława Grzegórskiego prof. PL
- Zakład Inżynierii Oprogramowania i Systemów Baz Danych kierowny przez dr inż. Marka Miosza,
- Zakład Ochrony Infromacji kierowny przez dr inż. Grzegorza Koziela.

### 1. Prowadzone badania

Prace naukowe prowadzone w Instytucie Informatyki dotyczą szerokiego zakresu zastosowań informatyki. Do najważniejszych

prac prowadzonych w Instytucie Informatyki zaliczamy zagadnienia wymienione poniżej.

Opracowywanie nowych metod steganograficznych oraz badanie ich właściwości. Określanie zastosowań metod steganograficznych. Najnowszym rezultatem prac uzyskanym w tej dziedzinie jest autorska metoda steganograficzna ukrywająca informację w sygnale dźwiękowym opracowana przez dr inż. Grzegorza Koziela. W wyniku przeprowadzonych prac stworzony został algorytm, który pozwolił na osiągnięcie wysokiego poziomu odporności ukrytych danych na uszkodzenia oraz zniszczenie podczas kompresji, filtrowania, zmiany formatu zapisu oraz wielu innych popularnych przekształceń sygnałów[2]. Pojemność steganograficzna oferowana przez opracowaną metodę wynosi około 800 bitów na sekundę niezależnie w każdym kanale dźwięku. Wynik ten osiągnięto dzięki ukrywaniu wielu bitów w każdym fragmencie sygnału. Wcześniejsza wersja niniejszej metody pozwalała na ukrycie tylko jednego bitu we fragmencie sygnału. Zwiększenie pojemności steganograficznej uzyskano poprzez wykorzystanie maskowania częstotliwościowego. Wybrane prążki widma częstotliwościowego sygnału (będące maksimami lokalnymi w spektrum sygnału) pełnią rolę maskerów czyli powodują to, że wprowadzone zmiany są niewykrywalne zmysłami. W ich sąsiedztwie wybierane są prążki przeznaczone do ukrycia dodatkowej informacji, która dołączana jest poprzez modyfikację ich wartości.

Dr inż. Piotr Kopniak prowadzi badania nad metodą rejestracji ruchu za pomocą dwóch niezależnych urządzeń Kinect. Metoda pozwala na tworzenie i wizualizację mapy głębokości przestrzeni trójwymiarowej. Na podstawie opracowanej metody opracowana została aplikacja pozwalająca na rejestrację ruchu szkieletu postaci ludzkiej [1]. Do celów realizacji niniejszych badań autor opracował i wykonał układ sprzętowej synchronizacji kamer. Pozwala on na ich zastosowanie do akwizycji ruchu w przestrzeni trójwymiarowej.

Mgr inż. Marek Kamiński prowadzi badania z zakresu optymalizacji procesu doboru struktury i topologii sieci neuronowej wykorzystywanej do rozpoznawania wzorców w obrazie. Dotychczasowym efektem przeprowadzonych badań jest aplikacja pozwalająca na rozpoznawanie gestów człowieka zarejestrowanych przy pomocy kontrolera Nintendo Wii.

Badania te zaowocowały również opracowaniem algorytmów pozwalających na komunikację człowieka z komputerem za pomocą ruchu gałek ocznych. Obraz uzyskany z kamery obserwującej twarz człowieka przetwarzany jest tak, by wykryć oczy użytkownika oraz położenie źrenic. Wykrywane są cztery podstawowe ruchy gałki ocznej – spojrzenie w górę, w dół, w prawo oraz w lewo. Na bazie modułu rozpoznającego ruchy gałki ocznej opracowana została metoda wykrywania poszczególnych ruchów oraz opracowana została aplikacja pozwalająca na sterowanie oczami procesem wyświetlania dokumentów pdf.

Dr inż. Małgorzata Plechawska-Wójcik prowadzi badania z dziedziny bioinformatyki. Dotyczą one analizy danych spektrometrycznych otrzymanych w wyniku procesu spalania tkanek ludzkich. Widmo płomienia otrzymanego podczas spalania tkanek jest analizowane w celu wykrycia tkanek nowotworowych.

Analiza ta została uzupełniona o próby zastosowania rozkładów Lorentza oraz jego estymatorów do detekcji pików [6]. Usprawniono proces wstępnego przetwarzania danych, a w szczególności detekcję widm odstających – zarówno z punktu widzenia szumu jak i pola powierzchni pod krzywą opisującą pik. Zaimplementowano i przetestowano metody detekcji pików odstających w zbiorach danych próbek będących powtórzeniami technicznymi otrzymanymi dla jednego pacjenta. Prowadzone badania stanowią podstawę do rozwoju oprogramowania przeznaczonego do analizy danych spektrometrycznych dla potrzeb Instytutu Onkologii.

Mgr inż. Magdalena Borys prowadzi badania z zakresu badania użyteczności interfejsów aplikacji oraz ergonomii stron WWW. W wyniku prowadzonych badań zaimplementowana została autorska heurystyka do badania użyteczności oprogramowania klasy ERP.

W Instytucie Informatyki prężnie działa zespół przetwarzania obrazów. Poszczególni jego członkowie zajmują się różnymi aspektami analizy obrazów dwu i trój- wymiarowych oraz akwizycją i analizą ruchu (ang. motion capture).

W ramach niniejszego zespołu dr inż. Jakub Smółka oraz dr inż. Maria Skublewska-Paszkowska prowadzą badania nad uproszczonym modelem człowieka bazującym na kinematyce ruchu. W modelu tym odwzorowane są wszystkie stawy człowieka. Szkielet reprezentowany jest w postaci drzewa. Działanie szkieletu zostało przetestowane poprzez przeprowadzenie animacji ruchu rąk [7]. Przeprowadzono również porównanie dwóch metod opisu ruchu: kątów Eulera oraz kwaternionów. W wyniku przeprowadzonego porównania dokonano wyboru kwaternionów do dalszych badań, ze względu na brak efektu blokady przegubu, który występuje w przypadku zastosowania kątów Eulera. Dr inż. Jakub Smółka oraz dr inż. Maria Skublewska-Paszkowska opracowali również półautomatyczną metodę redukcji nadsegmentacji obrazów, która automatycznie wybiera poziom hierarchii podobieństwa otrzymanej z analizy skupień lub wskazuje najlepsze poziomy podziału z zadanego przedziału. Zastosowanie funkcji  $F(I)$ ,  $F'(I)$  oraz  $Q(I)$  do oceny jakości segmentacji dało w każdym analizowanym przypadku spójne wyniki. Oznacza to, że wszystkie funkcje wykazywały tę samą liczbę klas.

Dr inż. Maciej Pańczyk prowadzi badania nad analizą danych uzyskiwanych z tomografu komputerowego. W wyniku prowadzonych badań opracowana została autorska metoda implementacji elementów brzegowych nieskończonych z funkcjami zaniku w zastosowaniu do metody elementów brzegowych. Metoda ta została rozbudowana poprzez włączenie do niej elementów programowania równoległego i rozproszonego: OpenMP, MPI, CUDA i OpenCL.

Dr inż. Piotr Muryjas prowadzi badania z zakresu implementacji zaawansowanych technologii informatycznych do budowy systemów analitycznych, wspomagających funkcjonowanie współczesnych przedsiębiorstw. W ramach prowadzonych prac prowadzona jest identyfikacja możliwości adopcji business intelligence w małych i średnich przedsiębiorstwach. Określane są korzyści, bariery oraz kluczowe czynniki wdrożenia mobilnego business intelligence, stanowiącego rozwinięcie tradycyjnego business intelligence [5].

Dr inż. Marek Miłosz prowadzi badania z zakresu jakości interfejsów i systemów informatycznych, ze szczególnym wpływem na ekonomiczne aspekty ich eksploatacji. Autor zaproponował własną metodę oceny jakości wdrożenia systemów ERP, która może być stosowana równolegle z metodą ekspercką [4].

Dr inż. Edyta Łukasik oraz dr Beata Pańczyk prowadzą badania nad metodami całkowania symbolicznego w metodzie elementów brzegowych Fouriera. Metoda ta w przestrzeni Fouriera pozwala na wyznaczenie rozwiązań bez znajomości rozwiązania fundamentalnego. Odróżnia ją to od tradycyjnej postaci metody elementów brzegowych. Prace koncentrują się

przede wszystkim na opracowaniu i implementacji algorytmu do obliczania całek osobliwych, które występują w metodzie elementów brzegowych Fouriera. Na podstawie przeprowadzonych badań została wykonana implementacja metody całkowania całek nieoznaczonych, które występują w obliczeniach realizowanych za pomocą zmodyfikowanej metody elementów brzegowych w przestrzeni Fouriera [3]. Zagadnienie to jest o tyle istotne, że klasyczna metoda elementów brzegowych pozwala znaleźć rozwiązanie tylko w przypadkach, dla których znana jest postać rozwiązania fundamentalnego. Metoda elementów brzegowych Fouriera jest o wiele trudniejsza do implementacji, ale realizuje obliczenia bez informacji o rozwiązaniu fundamentalnym. W celu wykazania przewagi opracowanej metody prowadzone są eksperymenty numeryczne na przykładzie równania Poissona z wykorzystaniem stałych elementów brzegowych w przestrzeni dwuwymiarowej.

## 2. Wnioski

Instytut Informatyki jest jednostką prowadzącą szeroko zakrojoną działalność naukowo – dydaktyczną. W artykule przedstawiono jedynie główne kierunki badań. Instytut prowadzi również wiele innych interdyscyplinarnych projektów oraz współpracuje z wieloma zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Wyniki prac prowadzonych w Instytucie Informatyki na bieżąco publikowane są w czasopismach naukowych oraz monografiach. W 2013 roku pracownicy Instytutu opublikowali 57 artykułów w czasopismach naukowych, byli autorami lub redaktorami 14 monografii oraz opracowali 25 rozdziałów w monografiach.

## Literatura

- [1] Kopniak P.: Rejestracja ruchu za pomocą urządzenia Microsoft Kinect, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2012, nr 11, vol. 58, s. 1016-1018.
- [2] Kozieł G.: Steganographic algorithm of hiding information in sound based on Fourier transform and masking, *Control & Cybernetics*, 2011, Vol. 40, Issue 4, s. 1231-1247.
- [3] Łukasik E., Pańczyk B., Sikora J.: Calculation of the improper integrals for Fourier boundary element method, *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 2013, nr 3, s. 7-10.
- [4] Miłosz M.: Wdrożenie systemu ERP w ocenie użytkowników - studium przypadku, *Studies & Proceedings Of Polish Association For Knowledge Management*, 2011, vol. 49, s. 111-121.
- [5] Muryjas P., Wawer M.: Business Intelligence narzędziem budowy i realizacji strategii przedsiębiorstwa, *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego Ekonomiczne Problemy Usług*, 2011, nr 74, vol. 662, s. 373-386.
- [6] Plechawska-Wójcik M., Marczak L., Pietrowska M., Polańska J.: Gaussian mixture decomposition in the analysis of MALDI-TOF spectra, *Expert Systems*, 2012, nr 3, vol. 29, s. 216-231.
- [7] Skublewska-Paszkowska M., Smółka J.: Arms animation based on human hierarchical tree model, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014, nr 2, vol. 90, s. 128-131.

**Dr inż. Grzegorz Kozieł**  
e-mail: g.kozieł@pollub.pl

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Lubelskiej, gdzie również uzyskał tytuł doktora w 2011 roku, broniąc pracę „Zmodyfikowane metody cyfrowego przetwarzania sygnałów dźwiękowych w steganografii komputerowej”. Pracownik Instytutu Informatyki na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej, początkowo jako asystent, później jako adiunkt a obecnie zastępca dyrektora Instytutu ds. nauki.

Działalność naukowa obejmuje steganografię oraz analizę danych ruchu. Autor jest uczestnikiem projektu "Kwalifikacje dla rynku pracy - Politechnika Lubelska przyjazna dla pracodawcy" współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.



otrzymano/received: 17.05.2014

przyjęto do druku/accepted: 29.05.2014

## WDROŻENIA PRZEMYSŁOWE MOTTEM PRAC BADAWCZYCH KATEDRY NAPĘDÓW I MASZYN ELEKTRYCZNYCH

Wojciech Jarzyna<sup>1</sup>, Dariusz Zieliński<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Politechnika Lubelska, Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych, <sup>2</sup>Politechnika Lubelska, doktorant na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono aktualną ofertę badawczo wdrożeniową Katedry Napędów i Maszyn Elektrycznych Politechniki Lubelskiej. Ofertę tą przedstawiono na tle historycznej działalności Katedry kierowanej przez poprzednich kierowników. Podkreślono praktyczny charakter badań. Wyróżniono kierunki prac wdrożeniowych obejmujących m.in. napędy i sterowanie dźwigów osobowych, układy elektromaszynowe zasilane ze źródeł fotowoltaicznych i współpracę elektrowni wiatrowych z siecią elektroenergetyczną. Zaznaczono również aktywny udział pracowników i doktorantów katedry w dostosowywaniu oferty dydaktycznej do potrzeb rynku i kształcenie kadr na studiach podyplomowych.

**Słowa kluczowe:** napędy elektryczne, sterowanie, układy PV, kształcenie

### INDUSTRIAL IMPLEMENTATION AS A RESEARCH WORK KEYNOTE OF THE ELECTRICAL DRIVES AND ELECTRICAL MACHINES DEPARTMENT

**Abstract.** The paper presents current offer of the implementation research at Electrical Drives and Electrical Machines Department at Lublin University of Technology. The offer was presented on the background of the historic activity of Department led by former managers. The practical nature of the research was emphasized. Implementation directions including, i.e. drives and passenger lifts control, electromechanical systems powered by renewable solar and wind power cooperation to the grid were distinguished. The active participation of the department employees and PhD students in adapting the educational offer to the market needs, as well as postgraduate staff training were also noticed.

**Keywords:** electric drives, control, PV systems, education

### Historyczne podstawy działalności

Laboratoria obecnej Katedry Napędów i Maszyn Elektrycznych Politechniki Lubelskiej, w swojej ponad pięćdziesięcioletniej historii istniały w różnych strukturach organizacyjnych Politechniki. Początkowo należały one do Zespołu i Pracowni Maszyn i Napędów Elektrycznych, następnie do Zakładu Energetyki Przemysłowej, Zakładu Automatyzacji i Elektryfikacji Kopalń, Zakładu Maszyn i Napędów Górniczych aby ostatecznie przyjąć obecną nazwę Katedry Napędów i Maszyn Elektrycznych.

Charakterystyczną cechą prac badawczych prowadzonych w tym zespole był ich użytkowy charakter, polegający na rozwiązywaniu rzeczywistych problemów naukowo-technicznych. Jej podstawą była szeroka współpraca z zakładami przemysłowymi Regionu. Pierwszymi liderami zespołu byli między innymi doc. Romuald Krzywicki, mgr inż. Kazimierz Kawiak i doc. dr inż. Wiesław Lasocki (fot. 1, 2, 3).



Fot. 1. Doc. dr inż. R. Krzywicki



Fot. 2. Mgr inż. K. Kawiak



Fot. 3. Doc. dr inż. W. Lasocki



Fot. 4. Doc. dr hab. inż. J. Skwarna

Współpraca z przemysłem, z tego pierwszego okresu istnienia jednostki, obejmowała między innymi badania nad usprawnieniem wózków akumulatorowych produkowanych przez Hutę Stalowa Wola oraz doskonalenie małych napędów elektrycznych AGD dla Fabryki EDA w Poniatowej.

Ważną i rozpoznawalną w kraju specjalnością Zespołu były prace w zakresie maszyn szybkobieżnych, tzw. elektrowrzecion szlifierskich opracowywanych głównie we współpracy z Fabryką Łożysk Tocznych w Kraśniku. Pracami tymi kierował doc. dr hab.

inż. Jan Skwarna (fot. 4). Projekty te przyniosły liczne pozytywne efekty o charakterze badawczo-wdrożeniowym.

Postęp technologiczny w zakresie automatycznej regulacji i elektroniki przyczynił się w kolejnych latach do przesunięcia zainteresowań w kierunku zautomatyzowanych energoelektronicznych układów napędowych. Ten zwrot zainteresowań inspirowany był przez ówczesnych kierowników Zakładu, dra inż. Stanisława Tarasiewicza (fot. 5), dra inż. Waldemara Smołucha (fot. 6) i dra inż. Marka Różyckiego (fot. 7).



Fot. 5. Dr inż. St. Tarasiewicz



Fot. 6. Dr inż. W. Smoluch



Fot. 7. Dr inż. M. Różycki



Fot. 8. Prof. A. Horodecki

Poszukując nowych kierunków rozwoju, rozpoczęto prace nad niekonwencjonalnym wykorzystaniem napędów elektrycznych. Pod naukowym kierunkiem prof. dr hab. inż. Andrzeja Horodeckiego (fot. 8) i prof. dr hab. inż. Eugeniusza Kozieja (fot. 9) prowadzono prace, które na wiele lat ukształtowały zainteresowania naukowe Zespołu. Prof. A. Horodecki zainicjował badania w zakresie układów napędowych współpracujących z odnawialnymi źródłami energii oraz zaawansowanych technik wnioskowania wielowartościowego. Wspierał i uczestniczył w badaniach w zakresie współpracy generatorów elektrowni wiatrowych z siecią elektroenergetyczną oraz był jednym z prekursorów stosowania układów fotowoltaicznych w Polsce.

Zespół prof. Eugeniusza Kozieja zajmował się natomiast zagadnieniami projektowania maszyn reluktancyjnych i sterowaniem energooszczędnym silników elektrycznych.

Opracowane w Katedrze metody sterowania maszynami elektrycznymi zasilanymi z generatora fotowoltaicznego należały



do pionierskich badań w Polsce. Tutaj w Zespole broniona była pierwsza praca doktorska autorstwa Marka Niechaja z napędów prądu stałego i przemiennego zasilanych z generatorów PV. Tutaj również opracowano pierwszą monografię z systemów fotowoltaicznych zasilających układy napędowe, na podstawie której prof. Jan Kolano (fot. 10) uzyskał stopień doktora habilitowanego.



Fot. 9. Prof. E. Koziej



Fot. 10. Dr hab. inż. J. Kolano, prof. PL



Fot. 11. Dr hab. inż. W. Jarzyna, prof. PL

Szeroki wachlarz prowadzonych w tym okresie prac badawczych obejmował również systemy diagnostyczne napędów elektrycznych. Korzystając z nowoczesnych technik logiki wielowartościowej i rozmytej formułowano metody oceny techniczno-ekonomicznej napędów elektrycznych. Indywidualny wkład w ten kierunek badań miały prace dotyczące diagnostyki w czasie rzeczywistym napędów elektrycznych. Korzystając z technik obserwatorów odprzegających, Wojciech Jarzyna (fot. 11) opracował oryginalną metodę identyfikacji wybranych uszkodzeń układów elektromaszynowych, która opisana została w jego rozprawie habilitacyjnej.

W problematykę niekonwencjonalnych nowoczesnych wpisują się także badania dr inż. Radosława Machlarza prowadzone w zakresie konstrukcji i sterowania silników reluktancyjnych. Być może stanowią one przyszłość szerokiej grupy układów napędowych.

Praktyczne znaczenie mają również prace nad opracowaniem energooszczędnych metod sterowania maszynami indukcyjnymi. Prowadzi je dr inż. Henryk Banach, a jego rozprawa habilitacyjna dotycząca tego zagadnienia, to ciekawe dzieło naukowe, poparte szerokimi badaniami laboratoryjnymi [1].

Mimo, że działalność naukowo-badawcza pracowników Katedry znacząco różniła się na przestrzeni minionych pięćdziesięciu lat, śmiało można stwierdzić że skierowana ona była głównie na rozwiązywanie problemów praktycznych. Niekiedy proponowane rozwiązania wyprzedzały możliwości realizacji, a innym razem brak było instrumentów do ich praktycznego wprowadzania.

## 1. Warsztat badawczy

Umiejętności pracowników oraz wyposażenie laboratoriów i stanowisk badawczych stanowią podstawę dla efektywnego prowadzenia prac badawczo-wdrożeniowych. Zespół pracowników katedry reprezentuje szeroki zakres wiedzy, znacząco wykraczający poza ramy wykładanych przedmiotów:

- Zautomatyzowane układy napędowe,
- Maszyny elektryczne,
- Energoelektroniczne układy przekształtnikowe,
- Sterowanie i regulacja układów napędowych,
- Automatyka przemysłowa,
- Układy przekształtnikowe i napędowe współpracujące z odnawialnymi źródłami energii,

- Napędy elektryczne pojazdów samochodowych,
- Kształcenie kadry inżynierskiej z zakresu eksploatacji i projektowania systemów automatyki przemysłowej.

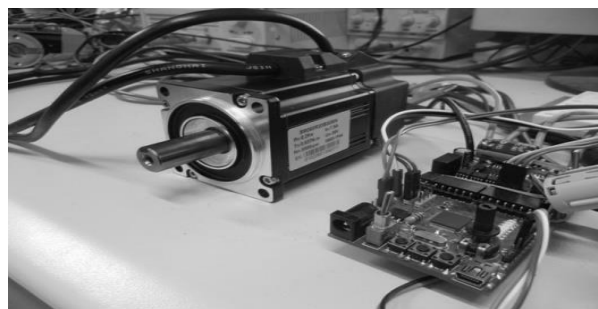
Na rozszerzenie badań naukowych w stosunku do wykładanych przedmiotów wpłynęły realizowane wcześniej liczne projekty badawcze finansowane z KBN. Obecnie realizowane projekty finansowane są z NCBiR, potwierdzając tym samym, że projekty dotyczą problemów zgłaszanych przez środowisko przemysłowe.

Samodzielnie zdobywane fundusze oraz uzyskane projekty aparaturowe sprawiły, że baza laboratoryjna znacząco się rozwinęła. Obecnie na wyposażenie stanowisk badawczych składają się między innymi:

- liczne stanowiska elektromaszynowe i przekształtnikowe,
- wyposażenie do przeprowadzania badań laboratoryjnych,
- specjalistyczne oprzyrządowanie pomiarowe,
- profesjonalny system prototypowania oparty o środowisko sprzętowo-programowe d'Space (fot. 12).

Szczególne znaczenie w rozwiązywaniu nowych, zaawansowanych rozwiązań ma wspomniany system d'Space. Stwarza on możliwość korzystania ze środowiska Matlab Simulink, korzystania z programów symulacyjnych własnych i dostępnych w bazach bibliotecznych.

Wykorzystanie układu d'Space znakomicie przyspiesza proces uruchamiania nowych rozwiązań. Z tego względu, opracowywane obecnie przez pracowników i doktorantów Katedry rozwiązania mogą być wykonywane zdecydowanie szybciej, mogą być szerzej przetestowane i sprawdzone pod kątem różnych zakłóceń, a dalsze możliwości modernizacji umożliwiają wprowadzanie najnowszszych rozwiązań technologicznych.



Fot. 12. Stanowisko uruchomieniowe układu napędowego z wykorzystaniem sprzętowo-programowego systemu prototypowania d'Space

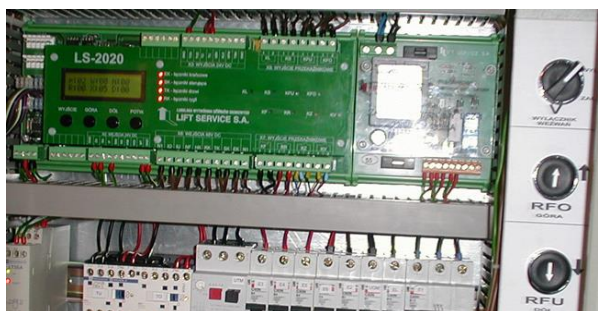
## 2. Wyniki ważniejszych prac badawczo-wdrożeniowych

Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat, prace badawczo-wdrożeniowe realizowane były we współpracy z wieloma przedsiębiorstwami. Początkowo, realizowane one były głównie w ramach ogólnej współpracy z firmami, by następnie zyskać formę badań realizowanych w ramach projektów finansowanych przez KBN a później NCBiR. Wśród ważniejszych wdrożeń są:

- System automatycznej kontroli pacy stanowisk badawczych opartych na rejestratorach TA11. Wdrożenie realizowane w oparciu o umowę z dnia 15.06. 1998 r. Zakończenie projektu 27.06. 2000r.
- Wdrożenie w Lubelskiej Wytwórni Dźwigów Osobowych nowoczesnego systemu mikroprocesorowego sterowania dźwigów nagrodzonego Nagrodą Gospodarczą Wojewody Lubelskiego w 2005r.
- Wdrożenie w firmie SOLNOWA Sp. z o.o. z Dąbrowy Górniczej opatentowanego wynalazku (umowa licenc. nr 1/2009).
- Wdrożenie w firmie AG Metall ITM Sp. z o.o. z Obornik Śląskich opatentowanego wynalazku (umowa licenc. 2/2009).
- Wdrożenie w firmie AG Metall Factory Sp. z o.o. z Obornik Śląskich opatentowanego wynalazku (umowa licenc. 3/2009).

## 2.1. Prace badawczo-wdrożeniowe w zakresie sterowników i napędów dźwigowych

Pod koniec lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku, zarysował się nowy kierunek prac badawczych, obejmujących sterowanie układów napędowych dźwigów osobowych. Po realizacji wstępnych prac, z których część miała charakter prac dyplomowych, współpraca z Lubelską Wytwórną Dźwigów Osobowych „Lift Service” rozwinęła się nadzwyczaj intensywnie. Uzyskano wówczas wsparcie ze strony KBN na opracowanie sterownika dźwigów osobowych. Zrealizowany w ramach projektu celowego „Uruchomienie produkcji mikroprocesorowego sterownika przeznaczonego do układów sterowania napędów dźwigów osobowych” sterownik LS2020 (fot. 13) stał się standardowym produktem Wytwórni. W uznaniu tych dokonań, zespół pracowników Katedry i LWDO otrzymał w 2005 r. nagrodę gospodarczą I stopnia Wojewody Lubelskiego w kategorii „Wynalazek w dziedzinie produktu lub technologii”.



Fot. 13. Sterownik dźwigów osobowych LS2020 wdrożony do produkcji w 2003r. w LWDO Lift Service

Od tamtej pory wdrożony do produkcji sterownik jest stale udoskonalany i produkowany w ilości kilkuset sztuk rocznie. Jego szczegółowe rozwiązania technologiczne są modernizowane, a funkcje pracy dostosowywane do bieżących wymagań eksploatacyjnych. Pracami tymi kieruje dr inż. Krzysztof Kolano, który jest również autorem kolejnego wdrożenia zrealizowanego ramach projektu INNOTECH, ścieżka Hi-Tech „bezreduktorowego napędu mikroprocesorowego SDK-2 z silnikiem BLDC” (fot. 14).



Fot. 14. Bezreduktorowy napęd drzwi kabinowych z silnikiem BLDC Laureat Międzynarodowych Targów Dźwigowych Kielce 2012

Opracowane rozwiązanie to kolejny znaczący sukces dr K. Kolano i osób z nim współpracujących. Rozwiązanie to dzięki wysokim parametrom pracy oraz rewelacyjnym wskaźnikom efektywności energetycznej nagrodzone zostało w 2012r. medalem Międzynarodowych Targów Dźwigowych w Kielcach.

## 2.2. Prace w zakresie systemów elektrowni fotowoltaicznych i wiatrowych

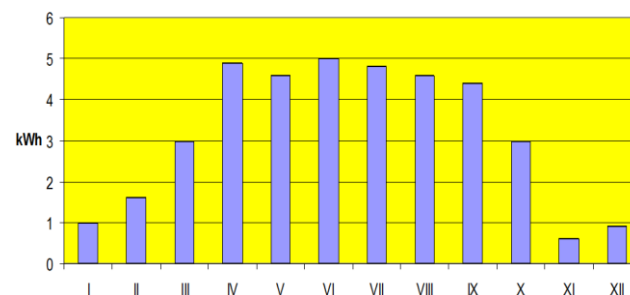
Wspomniane wcześniej prace badawcze w zakresie fotowoltaiki, pod względem praktycznym zaowocowały uzyskaniem kilku patentów. Dotyczyły one głównie sposobu zasilania z ogniw fotowoltaicznych odbiorów o wymagających

charakterystykach prądowo-napięciowych. Do odbiorów takich należą w szczególności układy napędowe prądu przemiennego i stałego, które podczas rozruchu wymagają znacznie większych mocy niż podczas pracy ustalonej. Przewymiarowywanie układu generatora fotowoltaicznego jest niecelowe, a zaproponowane procedury i sposób wykonania układów umożliwiają racjonalne wykonanie tego typu urządzeń. Takie rozwiązania są szczególnie korzystne w obecnie rozwijanych prosumenckich systemach energetycznych. Wykaz uzyskanych patentów z tego zakresu przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Wykaz patentów z zakresu niekonwencjonalnych energooszczędnych układów napędowych

Twórca patentu	Tytuł patentu	Numer i data uzyskania
M. Niechaj	Sposób poszukiwania mocy maksymalnej źródła energii	PL 191885 B1 31.07.2006
M. Niechaj	Sposób symulacji pracy generatora fotowoltaicznego	PL 193852 B1 14.05.2007
J. Kolano	Sposób i układ sterowania silnika indukcyjnego zasilanego z generatora fotowoltaicznego	PL 196130 05.11.2007
J. Kolano	Sposób i układ sterowania silnika prądu stałego zasilanego z generatora fotowoltaicznego	PL 197211 06.03.2008
J. Kolano	Sposób i układ maksymalizacji mocy silnika indukcyjnego zasilanego z generatora fotowoltaicznego	PL 196131 5.11.2007
J. Urbański	Sposób i układ obciążenia prądu prądu stałego z odzyskiem energii	P-390487 Przyznany w 2014

W Katedrze wykonywany jest stały monitoring warunków nasłonecznienia (rys. 1). Od blisko 20 lat działa system pomiarowy i badane warunki efektywności energetycznej układów fotowoltaicznych. Od początku badania te prowadzi dr inż. Marek Niechaj, który specjalizuje się między innymi w szacowaniu opłacalności energetycznej układów fotowoltaicznych.



Rys. 1. Przeciętna dzienna wartość energii możliwej do uzyskania z baterii PV o mocy 1kWp w 2003 z generatora zainstalowanego na dachu wydziału

Opracowane w zakresie układów fotowoltaicznych ekspertyzy dotyczyły szeregu opinii nt. innowacyjności inwestycji, ekonomicznej zasadności wykorzystania energii słonecznej, oszacowania szacunkowych kosztów budowy w Lublinie elektrowni fotowoltaicznej.

Podobny zakres mają wykonane opinie dotyczące elektrowni wiatrowych. Szczególnie ważne są przy tym prace, które dotyczyły oceny istniejących rozwiązań i wydania ekspertyz kłopotliwych dla dostawców, które negatywnie oceniały produkty.

Obecna oferta badawczo-wdrożeniowa Katedry w zakresie elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych obejmuje ponadto dynamiczne przekształtniki energoelektroniczne zapewniające wysoką jakość napięcia i możliwość aktywnego tworzenia inteligentnych sieci smart grid. Obecnie trwają zaawansowane badania nad opracowaniem układów synchronizacji przekształtników z siecią w obecności licznych zakłóceń napięcia w sieci elektroenergetycznej. Istniejący warsztat badawczy i realizacja tych zadań w międzynarodowym zespole badawczym stwarza na przyszłość dobre perspektywy również na praktyczne zastosowanie wyników badań. Kilka wniosków zastrzeżeń patentowych z tego obszaru zgłoszonych zostało w 2014 r. do rzecznika patentowego Politechniki Lubelskiej.

### 3. Kształcenie na studiach I, II i III stopnia oraz na studiach podyplomowych

Chociaż mottem pracy naukowej pracowników Katedry jest rozwiązywanie praktycznych problemów technologicznych, to w pierwszym rzędzie transfer wiedzy ma miejsce na poziomie pracownik naukowo-dydaktyczny – student. W Katedrze niekwestionowanym liderem jest w tym zakresie dr inż. Piotr Filipek, który z wielkim oddaniem pracuje ze studentami w ramach Koła Naukowego. Inspirując studentów zadaniami mającymi charakter innowacyjnych projektów inżynierskich, wzbudza w nich pasję poznawczą, które w sposób znaczący wpływają na kształtowanie zainteresowań i osobowości studentów.

Skonstruowany w Kole Naukowym pojazd elektryczny Elvic to udokumentowanie prac projektowo-badawczych pasjonatów pojazdów z napędem elektrycznym (fot. 15).



Fot. 15. Pojazd elektryczny Elvic 1 przygotowany na zawody Shell Eco Marathon

### 4. Puenta

Badania realizowane w Katedrze Napędów i Maszyn Elektrycznych Politechniki Lubelskiej mają w dużym stopniu praktyczny wymiar. Ich realizacja oparta jest na dobrych relacjach i współpracy z przedsiębiorstwami. Stąd znaczna część realizowanych zadań prowadzi do praktycznych rozwiązań.

Znaczącą wartością jest fakt, że dzięki stabilnej polityce personalnej, Katedra zapewnia długoterminowe wsparcie produkcji i unowocześnianie opracowanych rozwiązań przez cały okres ich produkcji i eksploatacji.

Największe z dotychczas prowadzonych prac badawczo-wdrożeniowych prowadzone były w ramach projektów współfinansowanych przez NCBiR, dawniej KBN oraz przedsiębiorstwa przystępujące do projektów. Dla uczestniczących w projektach przedsiębiorstw środki pozyskane z NCBiR ograniczają ryzyko wdrożeniowe oraz zdecydowanie ograniczają koszty przedsięwzięcia.

Ponieważ do rozwiązywania określonych zadań badawczych angażowani są również studenci i doktoranci, w ten sposób mogą oni zdobywać ważne doświadczenia przygotowujące ich do wejścia na rynek pracy. Z obserwacji losów dyplomantów Katedry można stwierdzić, że są oni niemal rozchwytywani przez pracodawców, znajdując pracę nawet na tak trudnym rynku zatrudnienia jakim jest Lubelskie.

Zdawać by się mogło, że tak różnorodna problematyka rozwijana przez kolejne pokolenia, w zmieniającym się zespole maszyn i napędów, nie wiąże się zbyt mocno. Specjalności naukowe i tematy badawcze zmieniały się bowiem znacząco, jednak zawsze były one ukierunkowane na praktyczne

rozwiązywanie problemów. I w tym kontekście upatrywać można istnienie szczególnej szkoły naukowej, szkoły tworzonej przez wybitnych i oddanych nauce i technice ludzi, których nazwiska wymienione zostały w niniejszym opisie.

Obecny zespół pracowników i doktorantów Katedry przedstawia fot. 16.



Fot. 16. Pracownicy i doktoranci Katedry Napędów i Maszyn Elektrycznych (2014), od lewej u dołu - H. Banach, W. Jarzyna, M. Zielińska, K. Kolano; II rzęd - A. Chmielowski, K. Jahotkowski, A. Kolodziejczyk, J. Kolano, M. Niechaj, J. Urbański, R. Machlarz; III rzęd - P. Filipek, L. Furgala, K. Kowalski, M. Boczek, D. Zieliński, Wang Chong

### Literatura

- [1] Banach H. Minimalizacja strat mocy w indukcyjnych silnikach trójfazowych pracujących ze zmiennym obciążeniem, Politechnika Lubelska, Lublin, 2013.
- [2] Jarzyna W.: Diagnostyka układu napędowego w czasie rzeczywistym. Zeszyt 50. Komitet Elektrotechniki PAN, Seria Wyd. Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki, Lublin, 2003.
- [3] Kolano J.: Systemy fotowoltaiczne zasilające układy napędowe. Zeszyt 47. Komitet Elektrotechniki PAN, Seria Wyd. Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki, Lublin, 2002.
- [4] Kolano K.: Praca układu napędowego drzwi kabinowych z silnikiem synchronicznym przy zasilaniu awaryjnym. Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe, nr 1, vol. 98, 2013.
- [5] Machlarz R.: Wybór metody sterowania DTC dla synchronicznego silnika reluktancyjnego. Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe, 2013, nr 1, vol. 98.

**Dr hab. inż. Wojciech Jarzyna, prof. PL**  
e-mail: w.jarzyna@pollub.pl

Od 1980 roku pracuje na Politechnice Lubelskiej. Przez cały okres zatrudnienia związany jest Katedrą Napędów i Maszyn Elektrycznych. Od 2012 roku pełni funkcję kierownika Katedry. Głównie zainteresowania koncentrują się wokół sterowania układów napędowych i systemów przekształtnikowych, warunków współpracy elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych z siecią elektroenergetyczną.

**Mgr inż. Dariusz Zieliński**  
e-mail: shadow031@gmail.com

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej (2013). Obecnie uczestnik studiów doktoranckich. Zainteresowania naukowe obejmują energoelektroniczne przekształtniki o wysokich parametrach dynamicznych. Stosowane techniki badawcze to m.in. prototypowanie z wykorzystaniem środowiska d'Space, Matlab-Simulink i szeregu innych narzędzi informatycznych i sprzętowych.



otrzymano/received: 17.05.2014

przyjęto do druku/accepted: 29.05.2014



## OPTOELEKTRONICZNE SYSTEMY W ZASTOSOWANIACH DIAGNOSTYCZNYCH I POMIAROWYCH

**Andrzej Kotyra**

Politechnika Lubelska, Instytut Elektroniki i Technik Informacyjnych

**Streszczenie.** W artykule dokonano krótkiego przeglądu optycznych metod diagnostyki procesów przemysłowych ze szczególnym uwzględnieniem procesu spalania pyłu węglowego oraz mieszanin z udziałem biomasy. Zaprezentowane rozwiązania są wynikiem szeregu badań prowadzonych w Instytucie Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Lubelskiej. Szczególną uwagę poświęcono rozwijającym metodom, które mogą być stosowane także w warunkach przemysłowych.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka techniczna, optoelektronika

### OPTOELECTRONIC SYSTEMS IN DIAGNOSTIC AND MEASUREMENT APPLICATIONS

**Abstract.** The article presents brief survey of optical diagnostic methods used especially in the case of pulverized coal combustion process as well as coal – biomass blends, that was developed in Institute of Electronic and Information Technology. Lublin University of Technology. Special attention was paid to the methods that can be applied in harsh conditions.

**Keywords:** technical diagnosis, optoelectronics

### Wstęp

Efektywny sposób prowadzenia wielu procesów przemysłowych, biorąc pod uwagę koszty, jak również potencjalnie niekorzystny wpływ na środowisko, wymaga stosowania rozwiązań, które pozwoliłyby na ich utrzymywanie w optymalnych warunkach. Powstaje zatem potrzeba pozyskania informacji o stanie w jakim znajduje się dany proces na podstawie właściwie wybranych, sygnałów diagnostycznych. Często preferowane są metody nieinwazyjne, zapewniające poprawne działanie często w warunkach wysokiej temperatury oraz zapylenia i wibracji a przy tym charakteryzujące się brakiem opóźnień i dobrą rozdzielczością przestrzenną.

Powyższe wymagania spełniają metody optyczne, które w przypadku diagnozowania procesów spalania są powszechnie stosowane, pomimo problemów w ich praktycznym stosowaniu związane niebezpieczeństwem zabrudzenia układu optycznego. Diagnostyka procesu spalania powinna obejmować zbieranie i następnie przetwarzanie wybranych informacji procesowych w czasie rzeczywistym w celu rozpoznania jego nieprawidłowych stanów, np. spalania niestabilnego. Dotyczy to tak informacji, których źródłem informacji jest płomień, jak i optycznych metod analizy składu atmosfery wewnątrz komory spalania [8], pozwalających m.in. na wykrycie zagrożenia tzw. korozją niskotlenową [9].

### 1. Wykorzystanie płomienia jako źródła informacji o procesie spalania

Istotnym elementem wchodzącym w skład optycznych układów diagnostycznych jest głowica umieszczona wewnątrz komory spalania, od którego w dużej mierze zależy niezawodne działanie całego systemu [12]. Stosowane rozwiązania obejmują jeden lub wiele torów optycznych, przy czym fotodetektor umieszczany jest często poza komorą spalania dzięki zastosowaniu włókien światłowodowych. Głowice jednokanałowe wyposażone są w układ optyczny o stosunkowo szerokim kącie akceptacji oraz pojedynczy fotodetektor. Rozwiązanie wielokanałowe, pozwala na selektywną i niezależną detekcję promieniowania w kilku strefach płomienia, przy czym kąt akceptacji w takim przypadku jest mniejszy niż w rozwiązaniu jednokanałowym. W takim przypadku możliwy jest wybór strefy najbardziej wrażliwej na zmiany warunków procesu spalania, spowodowany np. zmianą ilości powietrza wtórnego [12].

W przypadku diagnozowania procesu spalania pyłu węglowego bądź mieszanin węgla i biomasy źródłem informacji jest płomień pyłowy, a w szczególności [1, 2, 7]:

- promieniowanie, którego źródłem są rozgrzane cząstki stałe, znajdujące się w płomieniu: węgiel, koks, popiół i sadza, a ich koncentracja w przestrzeni płomienia nie jest jednakowa,
- promieniowanie emitowane przez gorące gazy znajdujące się w płomieniu pyłowym na skutek wzbudzenia termicznego, które tworzą przede wszystkim widma emisyjne rotacyjne głównych gazów występujących w płomieniu –  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,
- promieniowanie emitowane na skutek chemiluminescencji, związane z występowaniem wolnych rodników (m.in.  $OH^*$ ,  $CH^*$ ,  $C_2^*$ ,  $HCN^*$ ,  $NH^*$ ,  $NH_2^*$ ), których nie można traktować tak samo jak gazów gorących o podobnej zawartości składników głównych.

W widmie promieniowania emitowanego przez płomień pyłowy dominuje składowa ciągła pochodząca od rozgrzanych cząstek stałych ze stosunkowo niewielkim udziałem linii widmowych, pochodzących od składników gazowych, na które składają się gazowe produkty pirolizy węgla oraz produkty spalania, przede wszystkim para wodna i  $CO_2$ , ale także:  $NO$ ,  $SO_2$ ,  $CO$  oraz węglowodory. Całkowity udział w emisji promieniowania płomienia pyłowego gazów innych niż para wodna i  $CO_2$  jest niewielki i zazwyczaj może zostać pominięty [6]. W przypadku płomieni pyłowych, do konwersji sygnałów optycznych na elektryczne, najczęściej wykorzystuje się detektory krzemowe.

Kluczowym elementem optoelektronicznego systemu diagnostyki procesu spalania jest głowica pomiarowa transmitująca promieniowanie emitowane przez płomień do detektorów, usytuowanych na zewnątrz komory spalania. Opracowana w Instytucie Elektroniki i Technik Informacyjnych głowica światłowodowa pozwala na długotrwałą pracę (rzędu 4-7 tygodni) bez konieczności czyszczenia w warunkach wysokiego zapylenia i wibracji przy temperaturze czoła głowicy dochodzącej do  $400^\circ C$  [12]. Dzięki odpowiedniemu rozłożeniu światłowodów względem płaszczyzny czoła głowicy, możliwa jest selektywna transmisja promieniowania z określonych obszarów płomienia.



Rys. 1. Światłowodowa głowica pomiarowa

Wiązka światłowodów umożliwia umieszczenie fotodetektorów w stosunkowo niskiej, jak na warunki panującej w pobliżu pracującego palnika, temperaturze. Dodatkowo użycie światłowodów ułatwia montaż układu diagnostycznego. Ponieważ długość stosowanych światłowodów jest rzędu kilku metrów, w zakresie widma optycznego płomieni paliw pyłowych, tłumienie wnoszone przez światłowód jest do pominięcia. Ze względu na małą sprawność sprzężenia ze światłowodem, w układach monitorowania stosowane są grubordzeniowe światłowody PCS lub ze względu na możliwość pracy w wyższych temperaturach, światłowody HCS.

Rozszerzeniem możliwości sondy wielokanałowej jest zastosowanie obrazowodu zamiast wiązki światłowodowej oraz przetwornika obrazu w miejscu fotodiody. Takie rozwiązanie równoważne jest wielokanałowemu układowi monitorowania o bardzo dużej liczbie kanałów, którą ogranicza ilość pikseli matrycy obrazowej lub ilość włókien obrazowodu. Przewaga wizyjnych systemów przeznaczonych do diagnostyki procesu spalania uwidacznia się przede wszystkim w możliwości wyznaczania znacznie większej ilości parametrów płomienia, niż byłoby to możliwe z użyciem pojedynczego, czy też kilku fotodetektorów. Spośród nich należy wymienić np. parametry geometryczne kształtu płomienia (np. pole powierzchni, położenie środka ciężkości, momenty geometryczne, deskryptory Fouriera, itp.) oraz zmiany tych parametrów w czasie [10, 11]. Z drugiej strony bardzo duża ilość danych generowana przez system wizyjny wymaga stosowania metod redukcji wymiarowości analizowanych danych, np. analizy składowych głównych [4].

Wymienione wcześniej parametry geometryczne mogą zostać użyte do charakteryzowania procesu spalania, pozwalając w prosty sposób wykrywać stany awaryjne. Stabilność płomienia nie jest pojęciem jednoznacznym, dlatego trudno jest wskazać jeden wskaźnik, na podstawie którego jednoznacznie można byłoby stwierdzić wystąpienie takiej sytuacji [10, 11]. Należy rozpatrywać wiele wskaźników kształtu jednocześnie, tworząc wektor cech obszaru płomienia. W trakcie eksperymentów stwierdzono możliwość ich wyznaczania w czasie rzeczywistym, przy rozdzielczościach rzędu 800x800 pikseli i szybkości 25 fps. Pozwala to na wykorzystanie względnie tanich przetworników obrazowych.

Sygnały pochodzące z wielokanałowej sondy światłowodowej jak również obraz płomienia, dzięki odpowiednim modelom regresyjnym (np. k-NN, sieci neuronowe) mogą zostać wykorzystane do wyznaczania kluczowych wielkości wejściowych palników pyłowych, których określenie jest w praktyce trudne, jak np. wydatek paliwa lub stosunek nadmiaru powietrza ( $\lambda$ ). Zadawanie tych wielkości w kotłach energetycznych dotyczy grupy palników, zakładając równy rozdział strumienia paliwa oraz taką samą wartość  $\lambda$ , co nie zawsze ma miejsce w rzeczywistych warunkach.

## 2. Pomiar stężenia CO w komorze spalania

Innym przykładem wykorzystania metody optycznych w praktyce przemysłowej jest pasywny pomiar tlenu węgla w warstwie przyściennych kotłów energetycznych, którego zbyt duże stężenie powoduje przyspieszoną korozję ścian komory spalania [5].

Pomiar stężenia CO mimo istnienia wielu rodzajów analizatorów jest wciąż problemem bardzo aktualnym. Zastosowanie metod wykorzystujących przestrajalne lasery półprzewodnikowe (TDLAS - Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) pozwala na uzyskanie wyników w stosunkowo krótkim czasie, co jest ich przewagą nad innymi metodami absorpcyjnymi. Zdecydowana większość rozwiązań czujników optoelektronicznych wykorzystuje w swoim działaniu spektroskopię absorpcyjną, czyli opiera się na pomiarach transmisji światła o określonym widmie. W chwili obecnej największe zainteresowanie budzą czujniki pracujące w zakresach długości fal

wykorzystywanych przez telekomunikację światłowodową. W tym zakresie widma optycznego substancje wykazują stosunkowo niewielkie pochłanianie światła, jednak wysoka jakość i przystępna cena dostępnych elementów optoelektronicznych przemawiają na ich korzyść. Wykorzystanie słabych linii absorpcyjnych wymaga stosowania specjalnych technik pomiarowych.

Istota pomiaru TDLAS polega na analizie kształtu linii pochłaniania wyznaczanej za pomocą lasera o zmiennej długości fali. Ponieważ kształt linii zależy nie tylko od stężenia danego czynnika ale również od temperatury i ciśnienia mieszaniny, z reguły konieczna jest analiza tych parametrów [3]. TDLAS charakteryzuje się optymalnymi z punktu widzenia przemysłu cechami: pozwala na uzyskanie wyników o akceptowalnym w przemyśle błędzie pomiarowym jednocześnie wykazując niewielką wrażliwość na straty wynikające z zabrudzenia toru optycznego, nie występują przy tym opóźnienia transportowe i na kondycjonowanie próbki [3].

## 3. Podsumowanie

Przemysłowe wykorzystanie optoelektronicznych systemów diagnostycznych w dużej mierze ograniczone jest przez zabrudzenie części optycznych. Z drugiej jednak oferowana przez nie szybkość i rozdzielczość przestrzenna czyni je atrakcyjną alternatywą.

## Literatura

- [1] Gaydon A.G.: The spectroscopy of flames. Chapman and Hall, London, 1974.
- [2] Kojima J., Ikeda Y., Nakajima T.: Spatially resolved measurement of OH\*, CH\*, and C2\* chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane-air premixed flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 28, no. 2, 2000, s. 1757-1764.
- [3] Komada P., Ciężczyk S.: Application of multiple line integrated spectroscopy on CO concentration measurement, *Elektronika i Elektrotechnika*, nr 9, vol 12, 2013, s. 46-49.
- [4] Kotyra A.: Analiza składowych głównych sygnałów wielokanałowego układu monitorowania płomienia. *Przegląd Elektrotechniczny* 10/2010, s. 57-60.
- [5] Kruczek H.: Przydatność pomiaru warstwy przyściennej do oceny stopnia zagrożenia korozją wysokotemperaturową (niskotlenową), *Energetyka*, nr 6, 2002, s. 419-427.
- [6] Sarofim A., Hottel H.: Radiative Transfer in Combustion Chambers: Influence of Alternative Fuels. *Proceedings of the Sixth International Heat Transfer Conference*, vol. 6, Washington, 1978, s. 199-217.
- [7] Tabanfar S., Modest M.: Combined Radiation and Convection in Absorbing, Emitting, Nongray Gas-Particulate Tube Flow, *Journal of Heat Transfer*, vol. 109, no. 2, 1987, s. 478-485.
- [8] Wilk R.: Energetyka a ochrona środowiska. Materiały konferencyjne „Spalanie węgla '99”, 1999, s. 77-89.
- [9] Wójcik W., Komada P., Ciężczyk S., Manak I., Golec T.: Optoelectronic CO Concentration Analyser – Wavelength Selection. *Journal Electronics and Electrical Engineering*, No 1 (50), 2004, s. 5-8.
- [10] Wójcik W., Kotyra A., Golec T., Gromaszek K.: Vision based monitoring of coal flames. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 3/2008, s. 241-243.
- [11] Wójcik W., Kotyra A.: Wykorzystanie obrazu płomienia do oceny stabilności spalania mieszanin pyłu węglowego i biomasy. *Pomiary Automatyka Kontrola* wydanie specjalne Nr 3, 2005, s. 34-36.
- [12] Wójcik W.: Application of fibre-optic flame monitoring systems to diagnostics of combustion process in power boilers. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences*, 56(2), 2008, s.177-95.

Dr hab. inż. Andrzej Kotyra, prof. PL  
e-mail: a.kotyra@pollub.pl

Dr hab. inż. Andrzej Kotyra jest zatrudniony w Instytucie Elektroniki i Techniki Informatycznych Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. W 1991 r. ukończył studia na Wydziale Elektrycznym. Pracę doktorską obronił w 2002, a habilitacyjną w 2011. W swojej pracy naukowej zajmuje się analizą danych pomiarowych oraz diagnostyką spalania pyłu węglowego z wykorzystaniem analizy obrazu.



otrzymano/received: 17.05.2014

przyjęto do druku/accepted: 29.05.2014

# ELEKTROTECHNOLOGIE WSPOMAGAJĄCE PRZETWARZANIE MATERIAŁÓW DIELEKTRYCZNYCH POCHODZENIA ROŚLINNEGO

**Andrzej Sumorek**

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Inżynierii Komputerowej i Elektrycznej

**Streszczenie.** Opracowanie ma charakter przeglądowy. Zamieszczono w nim charakterystykę dwóch elektrotechnologii opracowanych w Katedrze Inżynierii Komputerowej i Elektrycznej tj.: suszenia konwekcyjnego w obecności pola elektrycznego oraz odpylania za pomocą filtrów bifilarnych. Artykuł zawiera wybrane wyniki opisujące oszczędności energii wynikające ze stosowania tych technologii.

**Słowa kluczowe:** Suszenie konwekcyjne, elektrofiltr bifilarny

## ELECTROTECHNOLOGIES SUPPORTING OF DIELECTRIC PLANT MATERIAL PROCESSING

**Abstract.** The article has a review character. The characteristics of the two electrotechnologies developed by Department of Computer and Electrical Engineering is described ie. convective drying in the presence of an electric field and dust removal using bifilar filters. This article presents selected results describing the energy savings resulting from the application of these technologies.

**Keywords:** Convective drying, bifilar electrostatic precipitator

## Wstęp

Katedra Inżynierii Komputerowej i Elektrycznej Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej powstała 22 stycznia 2004 roku z przekształcenia Katedry Elektrotechniki Ogólnej, utworzonej 1 października 1991 roku w ramach reorganizacji Wydziału Elektrycznego, poprzez wydzielenie z Zakładu Podstaw Elektrotechniki.

Bezpośrednie wykorzystanie energii elektrycznej w procesach obróbki materiałów pochodzenia organicznego prowadzi często do podniesienia sprawności, obniżenia energochłonności oraz zmian jakościowych procesów i materiałów. Przykładem takiej elektrotechnologii jest wspomaganie procesu suszenia konwekcyjnego za pomocą pola elektrycznego i wiatru jonowego. Innym opracowanym w Katedrze rozwiązaniem jest układ elektrofiltru usuwającego zanieczyszczenia gazów z uzwojeniem bifilarnym.

## 1. Wspomaganie suszenia konwekcyjnego

Już na początku dwudziestego wieku sygnalizowano teoretyczną możliwość istnienia wpływu pola elektrycznego i magnetycznego na przewodność cieplną gazów [7]. W ramach prac badawczych skupiono się na praktycznym badaniu wpływu pola elektrycznego na: strukturę wewnętrzną suszonego materiału dielektrycznego (tym samym modyfikację przebiegu procesu suszenia) oraz na transport ciepła w gazach.

O zmianie przebiegu procesu suszenia konwekcyjnego mogą decydować siły elektrostrykcyjne, usiłujące zdeformować pierwotną strukturę dielektryka warstwowego (poprzez ściskanie lub rozciąganie poszczególnych warstw). Deformacja prowadzi do zmiany gęstości dielektryka, co jest kolejną przyczyną zmiany jego przenikalności dielektrycznej. Możliwe jest wyznaczenie gęstości objętościowej sił elektrostrykcyjnych  $f_e$  [1, 5]:

$$f_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 \text{grad} \left( E^2 \rho \frac{\partial \epsilon_r}{\partial \rho} \right) \quad (1)$$

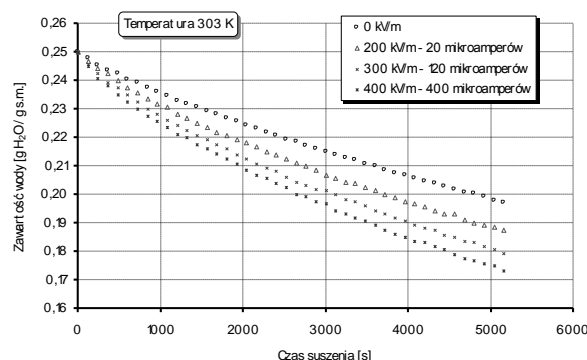
gdzie:  $f_e$  – gęstość objętościowa sił elektrostrykcyjnych,  $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $E$  – natężenie pola elektrycznego,  $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $\epsilon_0$  – przenikalność dielektryczna próżni,  $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $\epsilon_r$  – przenikalność elektryczna względna;  $\rho$  – masa właściwa,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Teoretycznie zakładano, że w dielektrykach warstwowych (np. ziarna zbóż) siły elektrostrykcyjne powodują ściskanie jednych słoików warstwowego dielektryka a rozciąganie innych. Wielkość siły zależy od przenikalności elektrycznej poszczególnych słoików obiektu, zaś ściskanie i rozciąganie słoików ziarniaki prowadzi do zmiany zdolności do zatrzymywania wilgoci [10].

Wyniki badań wpływu pola elektrycznego na zjawiska towarzyszące konwekcyjnemu usuwaniu wody z powierzchni ciał

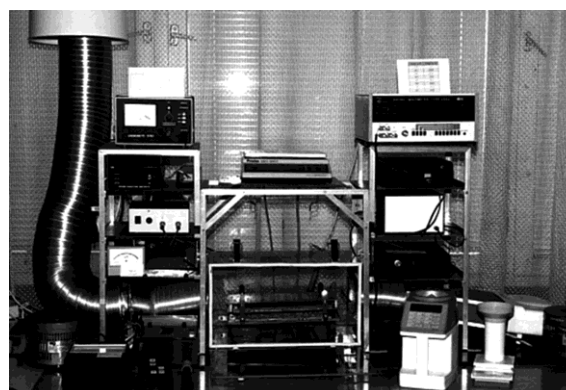
plaskich i o kształcie walcowym można znaleźć w pracach [6, 7]. Opisywane tam stanowiska badawcze były tak skonstruowane, że z góry stworzono warunki do występowania wyładowań niezupełnych. Dodatkowo oprócz napięcia pomiędzy elektrodami mierzony był prąd ulotu. Stanowisko z rys. 2 pozwala na obserwację procesu suszenia w sytuacji, gdy na suszony materiał działa pole elektryczne oraz pole elektryczne z wiatrem jonowym.

Na rys. 1 zamieszczono krzywe suszenia odzwierciedlające przebieg procesu, w trakcie którego wartość prądu ulotu utrzymywana była na stałym poziomie, zarejestrowane w zbudowanym stanowisku suszarniczym.



Rys. 1. Wybrane krzywe suszenia dla stałych wartości prądu ulotu

Dzięki stanowisku badawczemu z rys. 2 zweryfikowano negatywnie hipotezę o wpływie sił elektrostrykcyjnych na kinetykę suszenia. Układ pomiarowy z matrycą elektrod ostrzowych umożliwił wytworzenie pola wraz z wiatrem jonowym, co pozwoliło na praktyczną pozytywną weryfikację hipotezy o wspomaganie procesu suszenia konwekcyjnego przez wiatr jonowy [3, 8, 9].

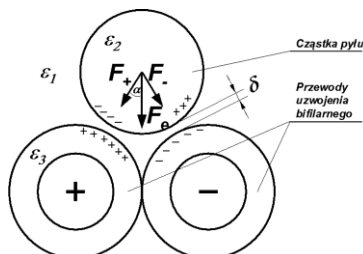


Rys. 2. Stanowisko do badania procesu suszenia konwekcyjnego



## 2. Filtr bifilarny

Innego rodzaju rozwiązaniem opracowywanym i testowanym w ramach zadań badawczych Katedry jest elektrofiltr bifilarny. Pyły organiczne zaliczane się do dielektryków. Wzajemne oddziaływanie pola elektrycznego wytworzonego przez elektrody uzwojenia bifilarnego oraz ładunków dielektrycznych pyłu wywołuje siłę przyciągającą cząstkę (rys. 3) [2, 5]. W przemiennym polu elektrycznym zmiany polaryzacji ładunków na powierzchniach cząstek pyłu i izolacji podążają za zmianami pola, dlatego kierunek siły pozostaje stały.



Rys. 3. Siła działająca na cząstkę pyłu w polu uzwojenia bifilarnego

Możliwe jest opisanie siły  $F_e$  oddziaływującej na cząstkę dielektryka przylegającego do uzwojenia bifilarnego [4]:

$$F_e = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 U^2 S_{ef} \cos \frac{\alpha}{2}}{\left( 2\delta + 2l_3 \sqrt{\frac{\gamma_1^2 + \omega^2 \varepsilon_0^2 \varepsilon_1^2}{\gamma_3^2 + \omega^2 \varepsilon_0^2 \varepsilon_3^2}} + l_2 \sqrt{\frac{\gamma_1^2 + \omega^2 \varepsilon_0^2 \varepsilon_1^2}{\gamma_2^2 + \omega^2 \varepsilon_0^2 \varepsilon_2^2}} \right)^2} \quad (1)$$

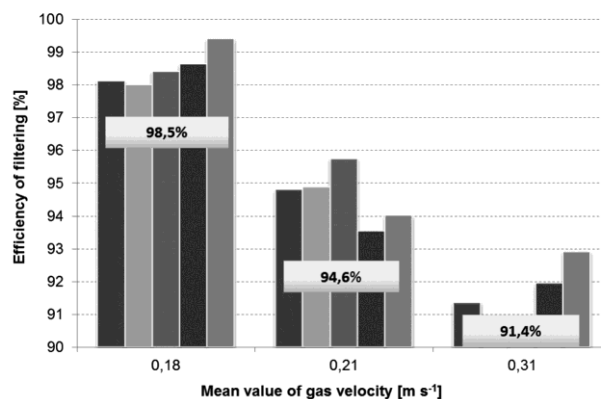
gdzie:  $F_e$  - siła przyciągania cząstki dielektryka, N;  $\varepsilon_0$  - stała dielektryczna ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  F m<sup>-1</sup>);  $\varepsilon$  - względna przenikalność dielektryczna: 1 - środowiska, 2 - cząstki, 3 - izolacji;  $\gamma$  - przewodność dielektryczna, 1 - środowiska, 2 - cząstki pyłu, 3 - izolacji uzwojenia, S m<sup>-1</sup>;  $\delta$  - wielkość szczeliny powietrznej pomiędzy cząstką a uzwojeniem, m;  $l_2$  - odległość pomiędzy punktami kontaktu cząstki z przeciwnymi przewodami uzwojenia, m;  $l_3$  - grubość izolacji uzwojenia bifilarnego, m;  $S_{ef}$  - średni przekrój efektywny przenikania strumienia indukcji elektrycznej przez cząstkę dielektryka, m<sup>2</sup>;  $\omega$  - pulsacja napięcia uzwojenia, s<sup>-1</sup>;  $\alpha$  - kąt (rys. 3);  $U$  - wartość napięcia zasilającego, V.



Rys. 4. Półtechniczna wersja odpylacza bifilarnego

Opracowany model odpylacza (rys. 4) bifilarnego filtruje ze skutecznością dochodzącą do 99 %. Pozwala to na pozytywne myślenie o możliwości przemysłowego zastosowania filtrów bifilarnych. Pożądane jest podniesienie dotychczasowej skuteczności usuwania pyłów z powietrza do uzyskiwanej przez elektrofiltry tj. 99,9% [2, 4] (rys. 5). Takie wartości można osiągnąć w wersji hybrydowej łącząc elektrofiltr bifilarny z filtrem tkaninowym lub cyklonowym.

Konstrukcja i zasada działania filtra bifilarnego umożliwia zastosowanie go w środowisku pyłów wybuchowych (młyny, kaszarnie, mieszalnie pasz itp.). Osiągnięte wartości skuteczności odpylania są porównywalne z elektrofiltrami wyładowczymi, które mogą pracować tylko w środowisku niepalnym (np.: pyły z kotłów węglowych). Minimalne zużycie energii przez uzwojenie, skutkuje małą energochłonnością całego układu filtra [2, 4].



Rys. 5. Skuteczność odpylania dla wybranych prędkości strumienia gazu (napięcie zasilania 13 kV, przekrój przewodu 0,5 mm<sup>2</sup>) [4]

## 3. Podsumowanie

Kontynuowane są prace z zakresu wykorzystania pola elektrycznego w przemyśle rolno-spożywczym (urządzenia suszarnicze i odpylające). Większe możliwości praktycznego zastosowania ma filtr bifilarny.

Komplementarną częścią prac jest badanie właściwości elektrycznych materiałów, które podlegają oddziaływaniu elektrycznemu w procesie technologicznym. W przypadku procesów suszarniczych jest to ziarno zbóż. Do badanych parametrów należą: rezystywność, przenikalność elektryczna, tangens kąta stratności. W procesie odpylania istotna jest znajomość takich właściwości elektrycznych pyłu jak rezystywność, przenikalność, wytrzymałość na przebicie.

## Literatura

- [1] Baran J.: Influence of some material properties on electrostrictive effects within a dielectric model of grain. Proc. of the 11th Congress on Agr. Eng., vol. 4 1989, Dublin.
- [2] Pietrzyk W. (red.): Elektrofiltr bifilarny do usuwania pyłów pochodzenia roślinnego. Wydawnictwo Naukowe FRNA, Lublin 2008.
- [3] Pietrzyk W., Grundas S., Horyński M., Sumorek A.: Wykorzystanie pola elektrostatycznego i ozonu do obniżania energochłonności procesu suszenia ziarna zbóż. Acta Agrophysica PAN, 16, Lublin 1998.
- [4] Pietrzyk W., Horyński M., Sumorek A., Ścibisz M., Walusiak S., Grundas S.: Uzwojenia bifilarne do odpylania w przemyśle rolno-spożywczym. Acta Agrophysica PAN, 43, Lublin 2001.
- [5] Pietrzyk W.: Electric field influence on grain. Acta Agrophysica, 5, Lublin 1996.
- [6] Sadek S.E., Fax R. G., Hurwitz M.: The influence of electric fields on convective heat and mass transfer from a horizontal surface under forced convection. Trans. ASME, 1972, p. 144-148.
- [7] Senftleben H., Braun W.: Der Einfluss elektrischer Felder auf den Wärmestrom in Gasen. Z. Phys., 102, 1936, s. 480-556.
- [8] Sumorek A., Pietrzyk W.: Influence of corona wind on the convective wheat grain drying course. International Agrophysics, 01/2001.
- [9] Sumorek A.: Wpływ pola elektrycznego na konwekcyjne suszenie ziarna zbóż. Acta Agrophysica PAN, 41, Lublin 2001.
- [10] Taruszk W.I.: Distribution of ponderomotive forces on grains during separation. M.i E.S.Ch., 12/1983, p. 35-39.

Dr inż. Andrzej Sumorek  
e-mail: a.sumorek@pollub.pl

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki. Tam w 1999 roku uzyskał tytuł doktora nauk technicznych. Aktualnie p.o. Kierownika Katedry Inżynierii Komputerowej i Elektrycznej. Kierunki prac badawczych i zainteresowań: zastosowanie technologii wykorzystujących pole elektromagnetyczne w urządzeniach przemysłowych, programowanie w środowisku graficznym (LV), administracja systemami operacyjnymi z rodziny Windows.



otrzymano/received: 17.05.2014

przyjęto do druku/accepted: 29.05.2014

## WIEDZA STUDENTÓW INFORMATYKI POLITECHNIKI LUBELSKIEJ O PLATFORMACH E-LEARNINGOWYCH

Magdalena Borys, Edyta Łukasik

Politechnika Lubelska, Instytut Informatyki

**Streszczenie.** W latach 2011-2012 realizowany był na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki (WEiI) Politechniki Lubelskiej projekt POKL „Absolwent na miarę czasu” skierowany do studentów studiów magisterskich kierunku Informatyka. Wśród celów realizowanego projektu ważne miejsce zajmuje utworzona platforma e-learningowa. W niniejszym artykule omówiono obecny stan wykorzystania platformy, zaprezentowano wyniki badań przeprowadzonych wśród studentów dotyczących: poziomu wiedzy studentów o nauczaniu na odległość, oceny stworzonej platformy oraz przydatności materiałów na niej umieszczonych.

**Słowa kluczowe:** e-learning, platforma e-learningowa, formy kształcenia

### COMPUTER SCIENCE STUDENT AT LUBLIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY KNOWLEDGE OF E-LEARNING PLATFORMS

**Abstract.** In 2011-2012 at the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science the project called "Graduate of our time" aimed for students of Master studies in Computer Science is realized. One of the most important objectives of the project is implementation of e-learning platform. The article discusses the current state of the use of the platform, presents the results of the survey conducted among students regarding: the level of students' knowledge of distance learning, assessment of created platform as well as assessment developed learning resources.

**Keywords:** e-learning, e-learning platform, learning methods

### Wstęp

Obecnie nauczanie na odległość staje się nieodłącznym elementem studiów na uczelniach wyższych. Jest ono ważnym aspektem, na który zwracają uwagę przyszli studenci. Politechnika Lubelska nie posiadała jeszcze platformy e-learningowej. W latach 2011-2012 realizowany był na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki (WEiI) Politechniki Lubelskiej projekt POKL „Absolwent na miarę czasu” skierowany do studentów studiów magisterskich kierunku Informatyka. Wśród celów realizowanego projektu ważne miejsce zajmuje utworzona platforma e-learningowa.

### 1. Koncepcja e-learningu na PL

Nie da się zaprzeczyć stwierdzeniu, iż obecne czasy to pokolenie e-społeczeństwa. Właśnie tworzenie i przetwarzanie informacji, a nie dóbr materialnych, jest jednym z określeń społeczeństwa informacyjnego (e-społeczeństwa) opartego na wiedzy, mądrości oraz nowoczesnej, ciągle rozwijającej się technologii informacyjnej. Studenci Politechniki Lubelskiej otrzymują szansę korzystania z narzędzia odpowiedniego na przygotowanie ich do stania się e-obywatelami w e-społeczeństwie. Aby nie byli oni obywatelami, którzy są zagrożeni wykluczeniem cyfrowym, wskazany jest ich kontakt i umiejętność posługiwania się jak najszerszą liczbą nowoczesnych technologii informatycznych [1]. E-obywatel w e-społeczeństwie powinien umieć sobie poradzić z takimi instytucjami jak e-urzędy, e-banki czy e-sklepy. Dobrym początkiem będzie więc dla każdego z nich kontakt z platformą e-learningową. Platforma ta będzie na początku skierowana głównie do studentów studiów dziennych stopnia drugiego na kierunku Informatyka. Korzyści dla uczelni także mają tu swój mocny punkt.

R. Tadeusiewicz wskazał na dwa możliwe kierunki rozwoju e-edukacji. Pierwszy z nich to kształcenie masowe, nastawione na minimalizację kosztów oraz drugi – kształcenie zindywidualizowane, zorientowane na wysoką jakość [2]. Autorzy projektu czyli wykładowcy mają nadzieję, iż stworzona platforma będzie przyczyniać się do realizacji tego drugiego kierunku rozwoju e-edukacji.

### 2. Wiedza studentów PL z zakresu e-learningu

Wśród studentów trzeciego roku studiów inżynierskich oraz pierwszego semestru studiów II stopnia magisterskich została

przeprowadzona ankieta dotycząca posiadanej przez nich wiedzy na temat e-learningu. Pytania w ankiecie dotyczyły: samego pojęcia e-learning, form nauczania zdalnego, znajomości platform e-learningowych już funkcjonujących (na innych uczelniach). Dzięki ankiecie jej autorki chciały poznać opinię studentów dotyczącą oceny efektywności nauczania przez Internet oraz zainteresowania uruchomieniem na macierzystej uczelni platformy e-learningowej. Poniżej omówione zostaną wyniki tej ankiety. W ankiecie brało udział 92 studentów.

Na pytanie dotyczące definiowanego pojęcia odpowiedź była dość optymistyczna, gdyż 80 na 92 ankietowanych odpowiedziało pozytywnie.

Tabela 1. Odpowiedzi ankietowanych na pytanie „Czy wiesz co to jest e-learning?”

Odpowiedź	Ilość odpowiedzi (%)
Wiem	87
Mniej więcej wiem	11
Nie wiem	2

Kolejne pytanie dotyczyło znajomości innych form nauczania zdalnego. Osiemnaście osób odpowiedziało twierdząco, ale w kolejnym pytaniu tylko jedna osoba wymieniła poprawne formy. Natomiast 10 osób wymieniało takie narzędzia jak: Google czy Wikipedia jako formy nauczania zdalnego, co świadczy o braku wiedzy na temat form nauczania zdalnego.

Jeżeli chodzi o korzystanie z platform e-learningowych innych uczelni, to 10% ankietowanych korzystało co najmniej jeden raz z takiej formy pomocy w nauce. To dosyć mała liczba studentów. Ale już ponad połowa ankietowanych stwierdziła, iż korzystała chociaż raz z kursów e-learningowych. Jednak pod znakiem zapytania pozostaje definicja kursu e-learningowego, jaką posiadają studenci. Tego w pytaniu już nie sprecyzowano. Dokładne odpowiedzi na pytanie dotyczące udziału w kursach e-learningowych pokazano w tabeli 2.

Tabela 2. Odpowiedzi ankietowanych na pytanie „Czy uczestniczyłaś/eś w jakimś kursie e-learningowym?”

Odpowiedź	Ilość odpowiedzi (%)
Tak	59
Nie	41

Tabela 3. Odpowiedzi ankietowanych na pytanie „Czy uważasz, że forma nauki poprzez platformę e-learningową daje dobre rezultaty?”

Odpowiedź	Ilość odpowiedzi (%)
Tak	8
Tak, ale tylko przy dużym zaangażowaniu ucznia	67
Nie wiem	21
Nie	4

Bardzo ważnym dla przeprowadzających ankietę było pytanie o efektywność nauki przy wykorzystaniu platformy e-learningowej. Nastawienie studentów wyraźnie uwypukliło tutaj aspekt przełożenia dużej części nauki na uczącego się. Aż 67% ankietowanych wskazało tę formę nauki, jako dającą dobre rezultaty, ale tylko przy dużym zaangażowaniu własnym studenta (tabela 3). Jest to często powtarzany element kursów e-learningowych. Tylko świadomy tego i zdolny do samodyscypliny student jest w stanie skorzystać z takiej formy nauki.

Ostatnie pytanie dotyczyło uruchomienia platformy na Politechnice Lubelskiej. Cieszy fakt, iż prawie 90% ankietowanych, a dokładnie 89%, chciało tego typu przedsięwzięcia na ich uczelni.

### 3. Miejsce platformy w procesie edukacji

Na kierunku Informatyka na WEiI PL w ramach Priorytetu IV realizowany jest projekt, którego jednym z efektów ma być uruchomienie wirtualnego kampusu, w skład którego wchodzi m.in. platforma e-learningowa. Do realizacji platformy e-learningowej zostało wybrane oprogramowanie Moodle (Modular Object Oriented Dynamic Learning Environment) w wersji 2.0.2 udostępniane na licencji GNU GPL [3]. Platforma ta została udostępniona pod adresem internetowym <http://moodle.cs.pollub.pl>.

Uruchomiona w ramach projektu platforma e-learningowa będzie stanowiła dla pewnej grupy studentów możliwość wyrównania wiedzy. Umieszczone na niej materiały będą uzupełnieniem zajęć odbywających się w formie tradycyjnej. Chodzi o studentów słabszych lub mających zaległości spowodowane np. nieobecnościami. Materiały na platformę będą przygotowywać wykładowcy danych przedmiotów prowadzący je w formie tradycyjnej. Nie ma więc niebezpieczeństwa, iż materiały na platformie i przekazane w salach wykładowych będą się dublowały albo znacznie odbiegały tematycznie od siebie. Kursy tutaj umieszczone będą kontynuacją zajęć przewidzianych programem nauczania na danych kierunku. Pewne zagadnienia będą wyjaśnione dogłębniej, będzie więcej ćwiczeń na temat przerabianych zagadnień. O tego typu zastosowaniach e-learningu pisał R. Tadeusiewicz już w 2005 roku [4].

Platforma ta będzie także dawała możliwości zdobycia studentom certyfikatów zewnętrznych. W ramach rozszerzeń konkretnych przedmiotów, umieszczonych na tej platformie, studenci będą mogli doprecyzować obszary wiedzy potrzebne do egzaminów z tych przedmiotów, które będą dawać im certyfikaty. Niewątpliwie zwiększy to wartość studentów na rynku pracy.

Na koniec listopada 2012 konta w systemie posiadało 675 studentów kierunku Informatyka I i II stopnia oraz 40 wykładowców realizujących przedmioty na kierunku Informatyka. Ponadto łączna liczba kursów wynosi 149.

W ramach projektu opracowane zostały dwa rodzaje materiałów dydaktycznych, które zostały umieszczone na platformie e-learningowej.

Pierwszy rodzaj stanowią materiały wykładowe oraz materiały do ćwiczeń, laboratoriów oraz zajęć projektowych. Materiały te, w postaci plików w formacie PDF, zostały pogrupowane według przedmiotów i umieszczone jako zasoby kursów na platformie. Dostęp studentów do poszczególnych kursów, a tym samym materiałów, został zrealizowany na zasadzie samodzielnej rejestracji z kluczem dostępu, który studenci otrzymują od wykładowców w czasie zajęć tradycyjnych.

Drugi rodzaj materiałów dydaktycznych stanowią kursy e-learningowe. Większość autorów zdecydowała się na stworzenie kursu w standardzie SCORM przy wykorzystaniu programu eXe Learning [5]. Obecnie na platformie umieszczonych jest 60 kursów e-learningowych.

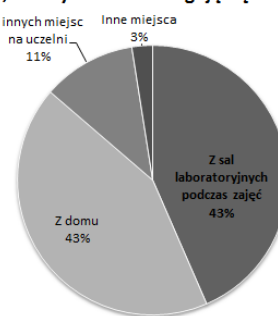
Platforma e-learningowa została także wykorzystana do rejestracji oraz umieszczania materiałów z innych aktywności w projekcie, takich jak: seminaria międzynarodowe, warsztaty prowadzone przez przedstawicieli przemysłu, zajęcia warsztatowe z umiejętności miękkich czy doradztwo personalne.

Dodatkowo na platformie znajdują się materiały do zajęć dydaktycznych dla studentów studiów I stopnia na kierunku Informatyka.

### 4. Opinie studentów na temat platformy

Po trzech semestrach korzystania z platformy jej użytkownicy (studenci) zostali zapytani o ocenę samej platformy, jak i korzyści z jej istnienia. Udział w ankiecie wzięło 95 studentów pięciu uruchomionych specjalności. Autorów interesowało miejsce, z którego korzystają z platformy. Ponad połowa ankietowanych korzysta z platformy poza zajęciami, co należy uznać za całkiem pozytywny wynik.

Miejsca, z których studenci logują się na platformę



Rys. 1. Odpowiedzi ankietowanych na pytanie o miejsce logowania

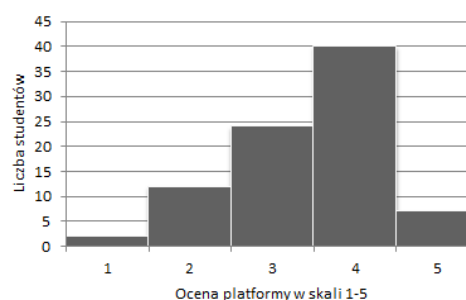
Następne pytanie dotyczyło celu, w jakim studenci logują się na platformę.

Cel wykorzystania platformy



Rys. 2. Odpowiedzi ankietowanych na pytanie o cel wykorzystania platformy

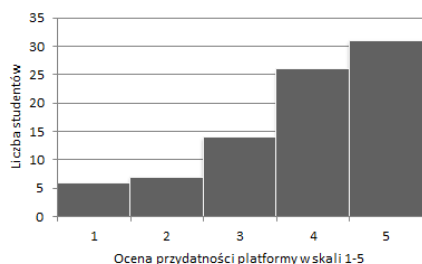
Przeciętna liczba kursów, na które student jest zapisany to 6-7 kursów. Ocena tych kursów przez ich uczestników jest dość przychylna dla ich autorów, a co za tym idzie najważniejszy cel uruchomienia platformy został osiągnięty. Studenci chętnie sięgają do materiałów umieszczonych na platformie.



Rys. 3. Ocena funkcjonalności platformy

Ocena funkcjonalności platformy wypadła dosyć korzystnie dla Wydziału. Zdaniem studentów, a jest ono kluczowe dla uczelni, funkcjonalność platformy uzyskała średnią ocenę 3,5; przy czym 8% wystawiło noty bardzo dobre i 47% dobre. Pełna skala ocen pokazana została na wykresie na rys. 3.





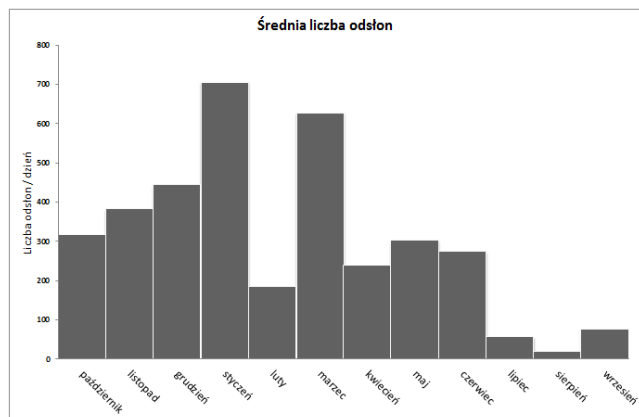
Rys. 4. Ocena przydatności platformy

Studenci docenili przydatność platformy w trakcie procesu kształcenia, co ukazano na rys. 4. Wystawienie 36% ocen bardzo dobrych i 31% dobrych jest wynikiem zadowalającym.

## 5. Wykorzystanie platformy

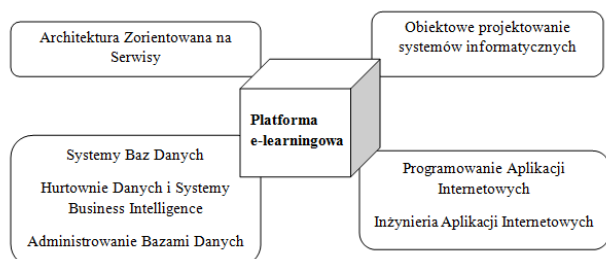
W terminie od 1 października 2011 do 30 września 2012 roku z materiałów umieszczonych na platformie skorzystało bardzo wielu studentów kierunku Informatyka. Na wykresie przedstawionym na rys. 5 zaprezentowano średnią dzienną liczbę logowań do systemu. Wyraźnie widać, iż zwiększona aktywność studentów jest w czasie zaliczeń końcowych przedmiotów i tuż przed sesją – styczeń oraz w sesji poprawkowej – marzec. Wynika więc z tej analizy jasno, iż w czasie natężonej nauki samodzielnej studenci chętnie sięgają do stworzonych dla nich dodatkowych materiałów będących źródłem wiedzy, nie poprzestają jedynie na samych wykładach i laboratoriach.

Wyniki zaprezentowane wyraźnie wskazują na fakt, iż platforma e-learningowa jest potrzebna na uczelni, studenci nie mają oporów by korzystać z zamieszczonej na niej wiedzy. Oszczędza im to czas na jej szukanie oraz stwarza dogodne warunki nauki w domu wpływające z zastosowania e-learningu.



Rys. 5. Wykorzystanie platformy od 01.10.2011 do 30.09.2012

Wśród materiałów do samodzielnej nauki umieszczonych na platformie największą popularnością cieszyły się kursy dotyczące bardzo aktualnych i ważnych zagadnień w technologiach informatycznych. Zostały one połączone w grupy tematyczne i przedstawione na rys. 6.



Rys. 6. Najpopularniejsze kursy na platformie

Wśród materiałów, z których najczęściej korzystali studenci są przedmioty z obu specjalności, które są uruchomione na drugim stopniu studiów na Informatyce na Politechnice Lubelskiej tj. Aplikacje Internetowe oraz Technologie Wytwarzania Oprogramowania. Podane przedmioty są kluczowymi zarówno dla kierunku, jak i specjalizacji. Program kształcenia dla tych przedmiotów został opracowany we współpracy z przedstawicielami przemysłu w oparciu o potrzeby regionu i branży IT, dlatego też przedmioty te decydują o jakości kształcenia na obydwu specjalnościach, a także definiują główne kompetencje absolwenta tych specjalności. Bardzo pozytywne jest zjawisko, że w dobie cyfryzacji i nieograniczonego dostępu do różnych źródeł „wiedzy” student wybiera to pewne, które firmuje jego uczelnia i wykładowcy.

## 6. Podsumowanie

Uruchomienie platformy e-learningowej, służącej jako wsparcie nauczania tradycyjnego, niewątpliwie jest docenione przez korzystających z niej studentów.

Obecnie możliwość dopasowania sobie czasu i miejsca nauki jest bardzo cenna, dlatego tego typu formy nauki zyskują w oczach uczących się. Chęć studentów do poszerzania wiedzy zdobytej na zajęciach kontaktowych z wykładowcami jest dość duża, czego wyrazem jest korzystanie z kursów poświęconych wysoce specjalistycznej wiedzy związanej z kierunkiem studiów. Mają oni dzięki temu wpływ na kształtowanie swojej wiedzy i kompetencji. Zadaniem uczelni jest stworzenie takiej możliwości poprzez uruchomienie platformy e-learningowej i umieszczenie na niej interesujących i przydatnych materiałów.

## Literatura

- [1] Chodacka B., Miłosz M.: E-obywatel – przezwyciężanie barier. E-mentor nr 2(24)/2008.
- [2] Tadeusiewicz R.: Dwa cele i dwa modele e-learningu. Materiały z konferencji E-learning w Społeczeństwie Wiedzy, AGH, Kraków, 2005.
- [3] Tadeusiewicz R.: E-learning szansą wzbogacenia oferty edukacyjnej Uczelni, BIP AGH 38 – luty 2005, [http://www.biuletyn.agh.edu.pl/archiwum\\_bip/archiwum\\_bip\\_pdf/pdf\\_138/04\\_138.pdf](http://www.biuletyn.agh.edu.pl/archiwum_bip/archiwum_bip_pdf/pdf_138/04_138.pdf) [20.10.2012].
- [4] Dokumentacja Exe Learning, <http://exelearning.org> [15.05.2012].
- [5] Dokumentacja Moodle, <http://moodle.org> [18.10.2012].

**Mgr inż. Magdalena Borys**  
e-mail: m.borys@pollub.pl

Magdalena Borys jest absolwentką Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej na kierunku Informatyka. Od 2008 roku pracownik naukowy Politechniki Lubelskiej, zatrudniona na stanowisku asystenta w Instytucie Informatyki PL. **Obszar zainteresowań naukowych to przede wszystkim inżynieria oprogramowania, aplikacje webowe, e-commerce oraz szeroko pojęta użyteczność aplikacji.**



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

Edyta Łukasik ukończyła studia matematyczne na UMCS w Lublinie. Stopień doktora uzyskała na Wydziale Matematyki, Fizyki i Informatyki UMCS w Lublinie w roku 2007. Od 1998 roku pracownik naukowy Politechniki Lubelskiej. Obecnie zatrudniona na stanowisku adiunkta w Instytucie Informatyki PL. Obszar zainteresowań naukowych to przede wszystkim języki programowania i algorytmizacja, struktury danych, metody numeryczne i metody optymalizacji oraz systemy e-learningowe.



otrzymano/received: 23.02.2014

przyjęto do druku/accepted: 30.03.2014

## ODDZIAŁYWANIA NADSUBTELNE W CERAMICE $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}\text{--}(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$ WYTWORZONEJ PRZEZ AKTYWACJĘ MECHANICZNĄ

Bożena Malesa<sup>1</sup>, Mariusz Mazurek<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Uniwersytet Medyczny w Lublinie, Katedra i Zakład Medycyny Nuklearnej, <sup>2</sup>Politechnika Lubelska, Instytut Elektroniki i Technik Informacyjnych

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań strukturalnych i magnetycznych dla ceramiki  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}\text{--}(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$  otrzymanej w procesie aktywacji mechanicznej. Badania struktury i oddziaływań nadsubtelnych przeprowadzono odpowiednio metodami dyfrakcji promieniowania X oraz spektroskopii efektu Mössbauera.

**Słowa kluczowe:** materiały multiferroiczne, aktywacja mechaniczna, oddziaływania nadsubtelne, spektroskopia mössbauerowska

### HYPERFINE INTERACTIONS IN $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}\text{--}(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$ CERAMICS PREPARED BY MECHANICAL ACTIVATION

**Abstract.** In this work the results of structural and magnetic investigations for  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}\text{--}(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$  ceramics prepared by mechanical activation are presented. The structural analysis and hyperfine interactions investigations were performed by X-ray diffraction and Mössbauer spectroscopy.

**Keywords:** multiferroic materials, mechanical activation, hyperfine interactions, Mössbauer spectroscopy

#### Wstęp

Materiały multiferroiczne stanowią tworzywa nowej generacji łączące w sobie co najmniej dwa stany uporządkowania np. ferroelektryczny oraz antyferromagnetyczny, a niekiedy również ferroelastyczny. Szczególne znaczenie mają materiały, które są jednocześnie ferroelektryczne i ferromagnetyczne, które pomagają występuje w nich wysoki współczynnik sprzężenia magnetoelektrycznego. Ze względu na swoje charakterystyczne cechy fizyczne, multiferroiki stały się w ostatnim okresie przedmiotem licznych badań zarówno teoretycznych jak i aplikacyjnych. Duży wpływ na rozwój tych badań miały nowe sposoby wytwarzania i charakteryzacji monokryształów i cienkich warstw, a także rozwój metod obliczeniowych, które pomagają projektować nowe materiały o szczególnych właściwościach [13].

Występowanie w obrębie jednego materiału uporządkowania ferroelektrycznego i ferromagnetycznego stwarza wiele możliwości zastosowań, np. w elementach pamięci masowych, przetwornikach energii, czujnikach, itp.. Jednak najbardziej spektakularnym wykorzystaniem praktycznym multiferroików jest zastosowanie tych materiałów do zapisu informacji. W porównaniu do standardowych materiałów magnetycznych lub ferroelektrycznych w multiferroikach istnieje możliwość zmiany zwrotu dwóch wektorów, tj. wektora namagnesowania i wektora polaryzacji, a więc możliwość realizacji 4 stanów logicznych. Inną metodą realizacji tej idei pamięci nowej generacji jest wykorzystanie materiałów multiferroicznych w złączach tunelowych, w których multiferroik stanowi barierę tunelową [14]. W literaturze istnieje wiele propozycji praktycznego wykorzystania unikatowych właściwości materiałów multiferroicznych. Najbardziej realne wydają się jednak zastosowania multiferroików jako sensorów pola magnetycznego [11].

Dobrze znanym, jednofazowym multiferroikiem jest żelazian bizmutu  $\text{BiFeO}_3$  (struktura romboedryczna), który posiada multiferroiczne właściwości w temperaturze pokojowej (przemiana ferroelektryczna zachodzi w  $T_C = 1123$  K, przemiana antyferromagnetyczna w temperaturze  $T_N = 643$  K) [9]. W materiałach tego rodzaju przy pomocy zewnętrznego pola elektrycznego można zmieniać magnetyzację zaś zewnętrznym polem magnetycznym sterować polaryzacją elektryczną. Do niekorzystnych cech związku  $\text{BiFeO}_3$  należy tendencja do tworzenia się wielofazowego składu podczas syntezy materiału oraz niestabilność struktury krystalicznej. Poprawę tych właściwości można uzyskać poprzez tworzenie roztworów stałych żelazianu bizmutu z ferroelektrykami o stabilnej strukturze, takimi jak np. tytanian baru  $\text{BaTiO}_3$  (struktura tetragonalna).

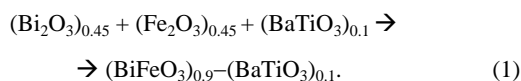
Standardowa technologia wytwarzania materiałów ceramicznych obejmuje takie etapy, jak: odważenie i zmieszanie

składników (odpowiednich tlenków metali, ziem rzadkich, itd.), prasowanie, syntezę wstępną w określonej temperaturze, mielenie produktów syntezy, kolejne prasowanie i spiekanie w temperaturze wyższej niż temperatura syntezy [10]. W celu przeprowadzenia badań strukturalnych i magnetycznych otrzymane spieki ceramiczne są ponownie sproszkowane. W niniejszej pracy proponowana jest inna technologia wytwarzania analogicznych materiałów, tj. aktywacja mechaniczna. W pierwszym etapie składowe tlenki są zmieszane w odpowiednich ilościach i poddane długotrwałemu mieleniu w kulowym młynie planetarnym. Otrzymany produkt proszkowy jest następnie poddawany obróbce termicznej, tj. stopniowemu nagrzewaniu od temperatury pokojowej do maksymalnej temperatury wynikającej z zastosowanego kalorymetru albo izotermicznemu wygrzewaniu w piecu oporowym. Jak wcześniej wykazano, proponowana technologia aktywacji mechanicznej pozwoliła otrzymać multiferroiczne związki Aurivilliusa [6].

Celem pracy było wytworzenie metodą aktywacji mechanicznej ceramiki  $(\text{BiFeO}_3)_{1-x}\text{--}(\text{BaTiO}_3)_x$ , dla koncentracji  $x = 0.1$  oraz poznanie jej właściwości strukturalnych i analiza parametrow oddziaływań nadsubtelnych. Badany związek jest roztworem stałym ferroelektryka-antyferromagnetyku ( $\text{BiFeO}_3$ ) i ferroelektryka ( $\text{BaTiO}_3$ ). Do badań strukturalnych użyto standardowej metody dyfrakcji promieni X. Do badań oddziaływań nadsubtelnych zastosowano spektroskopię efektu Mössbauera, która pozwala określić efekty oddziaływań jąder  $^{57}\text{Fe}$  z otaczającymi je polami elektrycznym i magnetycznym. Wyróżniamy trzy rodzaje oddziaływań nadsubtelnych: (1) elektryczne oddziaływanie monopole dodatniego ładunku jądra atomowego z elektronami typu  $s$ , (2) oddziaływanie kwadrupolowego momentu elektrycznego jądra z gradientem pola elektrycznego wytwarzanego przez elektrony powłok atomowych oraz (3) oddziaływanie momentu magnetycznego jądra z polem magnetycznym występującym w obszarze jądra [12]. Efektem powyższych oddziaływań są zmiany energii jądrowych poziomów energetycznych i ich rozszczepienia, które są odzwierciedlone w mierzonym widmie mössbauerowskim. Efekt oddziaływania monopole elektrycznego objawia się w widmie pojedynczą linią przesuniętą względem zera na skali prędkości, co pozwala wyznaczyć parametr zwany przesunięciem izomerycznym  $\delta$ . W wyniku oddziaływania kwadrupolego następuje rozszczepienie wzbudzonego poziomu jądrowego  $^{57}\text{Fe}$  na dwa podpoziomy – w widmie obserwujemy tzw. dublet i wyznaczamy parametr zwany rozszczepieniem kwadrupolowym  $\Delta$ . Trzeci typ oddziaływania prowadzi do rozszczepienia poziomów podstawowego i wzbudzonego jądra  $^{57}\text{Fe}$ , które w widmie ujawnia się jako sekstet. Ten rodzaj oddziaływania pozwala wyznaczyć wartość indukcji nadsubtelnego pola magnetycznego  $B_{\text{hf}}$  w obszarze jądra  $^{57}\text{Fe}$ .

## 1. Eksperyment

W celu otrzymania roztworu stałego  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$  wykorzystano tlenki  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  oraz  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  w postaci proszku o wysokiej czystości. Odpowiednie ilości składników zważono i zmieszano ze sobą, zgodnie z zachowaniem następującej stechiometrii:



Po odważeniu tlenków mieszaninę mielono przez 2h, 5h, 10h, 20h, 50h, i 100h w wysokoenergetycznym młynie kulowym typu Fritsch Pulverisette P5. Proces syntezy odbywał się w atmosferze ochronnej argonu z użyciem kul ze stali nierdzewnej. Po procesie mielenia przeprowadzono obróbkę termiczną mechanicznie aktywowanego roztworu stałego.

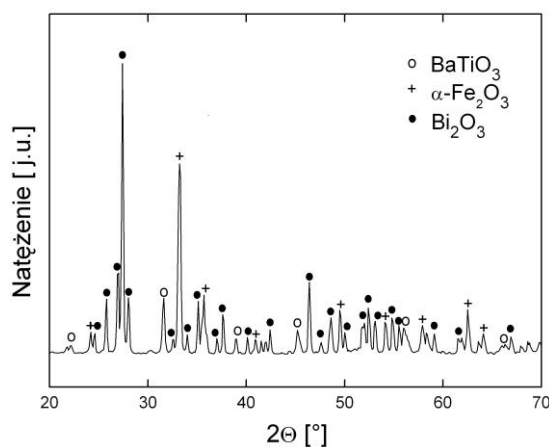
Nagrzewanie aktywowanej mechanicznie mieszaniny proszków odbyło się w zakresie temperatur od temperatury pokojowej do 993K w kalorymetrze Perkin Elmer DSC7. Szybkość wzrostu temperatury wynosiła 20K/min.. Wyrzwanie izotermiczne przeprowadzono w piecu oporowym w temperaturach 1073K i 1173K w ciągu 1 godziny. Obydwa procesy obróbki termicznej wykonano w powietrzu.

Pomiary metodą dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego wykonano stosując dyfraktometr RIGAKU Miniflex 2, pracujący w geometrii  $\Theta$ - $2\Theta$  z użyciem lampy Cu. Pomiary odbyły się w temperaturze pokojowej.

Pomiarów widm Mössbauera próbek dokonano przy użyciu spektrometru typu POLON pracującego w geometrii transmisyjnej w temperaturze pokojowej. Jako źródła promieniowania użyto izotopu  $^{57}\text{Co}$  osadzonego w matrycy chromowej lub rodowej. W celu przeprowadzenia pomiarów proszkowa próbka została umieszczona pomiędzy dwiema warstwami folii samoprzylepnej. Zarówno przed jak i po pomiarze próbki spektrometr został skalibrowany przy użyciu metalowej folii  $\alpha\text{-Fe}$  o grubości ok. 25  $\mu\text{m}$ .

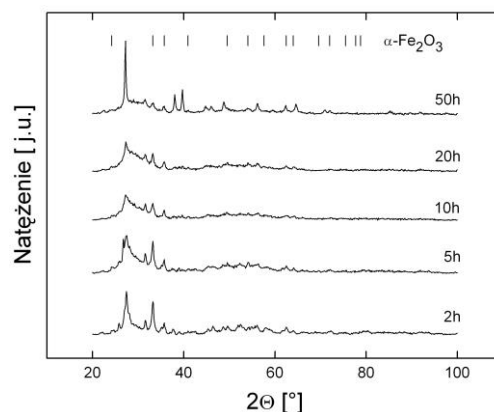
## 2. Wyniki badań i dyskusja

Wykonując pomiary dyfraktometryczne sukcesywnie po określonych okresach mielenia mieszaniny tlenków można obserwować proces przemian strukturalnych. Na rys. 1 przedstawiono dyfraktogram dla mieszaniny wyjściowej. Widoczne są wszystkie refleksy dyfrakcyjne charakterystyczne dla składowych tlenków  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  oraz  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ .



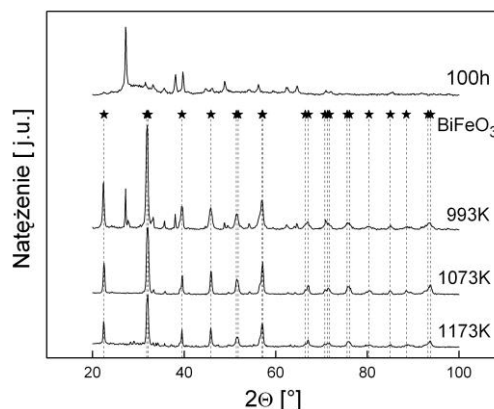
Rys. 1. Dyfraktogram dla mieszaniny wyjściowej składników ceramicznych  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$

Zestaw dyfraktogramów dla próbek pobranych z młyna po okresach mielenia od 2h do 50h przedstawia rys. 2. Można zaobserwować, że wraz ze wzrostem czasu mielenia niektóre refleksy dyfrakcyjne pochodzące od składowych tlenków zanikają, zmniejszają swoje natężenie, ulegają przesunięciu i poszerzeniu.



Rys. 2. Zestawienie dyfraktogramów ceramicznych  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$  dla próbek mielonych przez 2-50 h. Zaznaczono położenie linii dla  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$

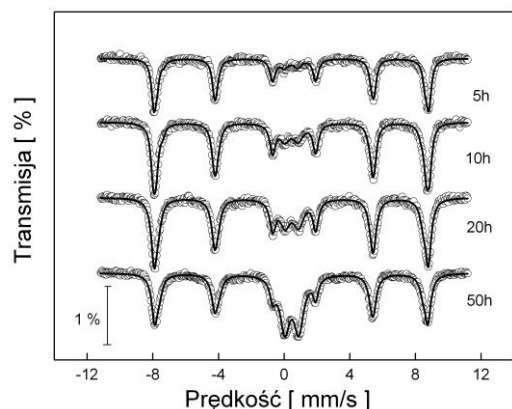
W dyfraktogramach dla próbek mielonych przez 5–50h widoczne jest rozmyte halo w zakresie kątów  $2\Theta$  od  $24^\circ$  do  $36^\circ$ , na tle którego wyodrębnione są refleksy pochodzące od hematytu oraz prawdopodobnie od fazy  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$  (najsilniejszy refleks przy  $2\Theta = 27^\circ$ ). Można przypuszczać, że zaobserwowane rozmycie jest związane z postępującym rozdrobnieniem i częściową amorfizacją prekursorów. Po 100 h mielenia (rys. 3) w dyfraktogramie oprócz wyraźnych refleksów związanych z fazą silenitową ( $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ ) występują także mniejsze refleksy pochodzące od rozdrobnionych substratów mielenia, tj.  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  oraz  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . Można zatem stwierdzić, że po 100-godzinnym procesie aktywacji mechanicznej pożądany roztwór stały  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$  nie utworzył się.



Rys. 3. Zestawienie dyfraktogramów ceramicznych  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$  dla próbki mielonej przez 100 h a następnie nagrzewanej do 993 K oraz wygrzewanej w 1073 K i 1173 K. Znakami \* zaznaczono położenie linii dla  $\text{BiFeO}_3$  (JCPDS PDF 20-0169)

Procesy termiczne powodują radykalną zmianę w strukturze mielonego materiału. Na dyfraktogramach próbek: nagrzewanej stopniowo do 993 K oraz wygrzewanych izotermicznie w 1073 K i 1173 K (rys. 3) można zaobserwować dobrze wykształcone refleksy. Ich położenia kątowe są w przybliżeniu zgodne z położeniem refleksów dyfrakcyjnych dla czystego związku  $\text{BiFeO}_3$ , co świadczy o tym, że otrzymany roztwór stały  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$  zachowuje strukturę romboedryczną. Wyznaczone z dyfraktogramów parametry sieci  $a = b = 5.5887(20) \text{ \AA}$ ,  $c = 13.7756(40) \text{ \AA}$  nieznacznie różnią się od parametrów dla czystego  $\text{BiFeO}_3$  ( $a = b = 5.581 \text{ \AA}$ ,  $c = 13.876 \text{ \AA}$ , [7]), tak więc 10% zawartość tytanu baru nie powoduje zmiany układu krystalograficznego a jedynie niewielkie zmniejszenie objętości komórki elementarnej. Można dodać, że proces nagrzewania zmielonego materiału do temperatury 993K nie pozwala otrzymać czystego roztworu stałego  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$  (na dyfraktogramie widoczne są nadal refleksy od hematytu i od fazy  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ , rys. 3). Natomiast w wyniku obróbki termicznej w wyższych temperaturach powstaje pożądany materiał z dużo mniejszą ilością zanieczyszczeń.

Badania wykonane przy pomocy spektroskopii Mössbauera potwierdziły wyniki otrzymane z analizy dyfraktogramów mierzonych próbek. Zestaw widm Mössbauera zarejestrowanych dla próbek pobranych po poszczególnych okresach mielenia przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Widma Mössbauera ceramicznych  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$  dla różnych okresów mielenia opracowane numerycznie metodą dyskretnych składowych

Można zauważyć, że wszystkie widma są superpozycją sekstetu linii oraz dubletu w centralnej części widma. Numeryczne opracowanie widma doświadczalnego polega na wpasowaniu w punkty doświadczalne linii teoretycznej. Jakość dopasowania określa współczynnik  $\chi^2$ . Widma otrzymane dla próbek materiału mielonego przez okres od 5h do 100h zostały opracowane metodą dyskretnych składowych. Do każdego z widm na rys. 4 i widma dla próbki mielonej przez 100h (rys. 5) dopasowano jeden dublet oraz jeden sekstet przy czym parametr dopasowania  $\chi^2$  mieścił się w zakresie 1,1 – 1,9. W wyniku obróbki numerycznej uzyskano zestaw parametrów oddziaływań nadsubtelnych charakteryzujących poszczególne składowe. W tabeli 1 zgromadzono wartości następujących parametrów oddziaływań nadsubtelnych: indukcji nadsubtelnego pola magnetycznego, przesunięcia izomerycznego względem  $\alpha\text{-Fe}$ , rozszczepienia kwadrupolowego oraz szerokości połówkowej linii widmowej. Można stwierdzić, że widoczny w analizowanych widmach sekstet jest związany z występowaniem nieprzereagowanego tlenku  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ . Wartości parametrów nadsubtelnych tej składowej są zbliżone do danych charakterystycznych dla hematytu ( $B_{\text{hf}} = 51,75\text{T}$ ,  $\delta = 0,37\text{ mm/s}$ ,  $\Delta = -0,197\text{ mm/s}$  [2]). Spadek wartości  $B_{\text{hf}}$  oraz rosnąca szerokość linii widmowych są związane z postępującym rozdrobnieniem i deformacjami struktury krystalicznej  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ . Składowa dubletowa o parametrach  $\delta \sim 0,32\text{ mm/s}$  i  $\Delta \sim 0,84\text{ mm/s}$  może świadczyć o występowaniu w otrzymanym materiale paramagnetycznego związku  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ , (wyznaczone parametry są w dobrej zgodności z opublikowanymi danymi [5]). Związek ten stanowi zanieczyszczenie, którego obecność potwierdza spektroskopia Mössbauera.

Wraz ze wzrostem czasu mielenia obserwowane jest zmniejszenie udziału sekstetu pochodzącego od hematytu (wielkość A w Tabeli 1). Po 100h procesu aktywacji mechanicznej w widmie Mössbauera nie zaobserwowano składowej związanej z roztworem stałym  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$ . O ile w dyfraktogramach rentgenowskich widoczne są refleksy od nieprzereagowanych składników wyjściowych, o tyle spektroskopia Mössbauera nie pozwala zaobserwować składowych pochodzących od związków, które nie zawierają żelaza, np.  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaTiO}_3$ . Można dodać, że szerokości połówkowe linii widmowych dla składowych sekstetów i dubletów są większe od szerokości naturalnej ( $\sim 0,12\text{ mm/s}$ ), czego przyczyną są deformacje strukturalne, takie jak: rozdrobnienie ziaren, odkształcenia sieci krystalicznej, wysoki stopień naprężeń w mielonym mechanicznie materiale itp.

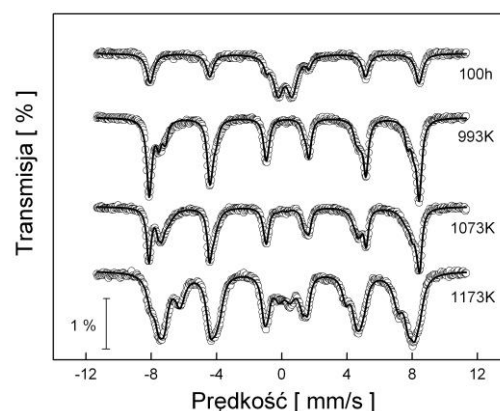
Na rys. 5 zestawiono widma Mössbauera dla badanego materiału po 100h mielenia oraz po poddaniu go obróbce termicznej. Analizując kształt poszczególnych widm można

stwierdzić, że w próbce mielonej przez 100h oraz nagrzewanej do 993K i wygrzewanej w 1073K składowa pochodząca od hematytu stanowi znaczący wkład w widmie.

Tabela 1. Wartości parametrów oddziaływań nadsubtelnych wyznaczone w opracowaniu numerycznym widm Mössbauera dla różnych okresów mielenia:  $B_{\text{hf}}$  – indukcja nadsubtelnego pola magnetycznego,  $\delta$  – przesunięcie izomeryczne względem  $\alpha\text{-Fe}$ ,  $\Delta$  – rozszczepienie kwadrupolowe,  $\Gamma$  – szerokość połówkowa linii widmowej, A – udział składowej w widmie; niepewności pomiaru są podane w nawiasach dla ostatniej znaczącej cyfry; D – dublet, S – sekstet.

Okres mielenia	Składowa w widmie	$B_{\text{hf}}$ [T]	$\delta$ [mm/s]	$\Delta$ [mm/s]	$\Gamma$ [mm/s]	A [%]
5 h	D	--	0,27(2)	0,82(2)	0,31(3)	9
	S	51,8(1)	0,38(1)	-0,18(1)	0,21(1)	91
10 h	D	--	0,31(1)	0,82(1)	0,40(2)	15
	S	51,7(1)	0,37(1)	-0,18(1)	0,23(1)	85
20 h	D	--	0,32(1)	0,82(1)	0,39(1)	21
	S	51,7(2)	0,38(1)	-0,18(1)	0,24(1)	79
50 h	D	--	0,32(1)	0,84(1)	0,35(1)	39
	S	51,5(2)	0,38(1)	-0,18(1)	0,26(1)	61
100 h	D	--	0,32(1)	0,84(1)	0,36(1)	46
	S	51,3(3)	0,37(1)	-0,18(1)	0,25(1)	54

Proces wygrzewania w wyższej temperaturze (1173K) pozwala na otrzymanie bardziej jednorodnego materiału, tzn. hematyt w większym stopniu ulega rozpuszczeniu w strukturze badanego roztworu stałego  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$ . Z tego powodu w widmie Mössbauera sekstet pochodzący od hematytu nie jest wyraźnie wyodrębniony, lecz ukryty w widmie.



Rys. 5. Widma Mössbauera ceramicznych  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$  otrzymanej w procesie aktywacji mechanicznej po 100 h oraz poddanej obróbce termicznej w różnych temperaturach

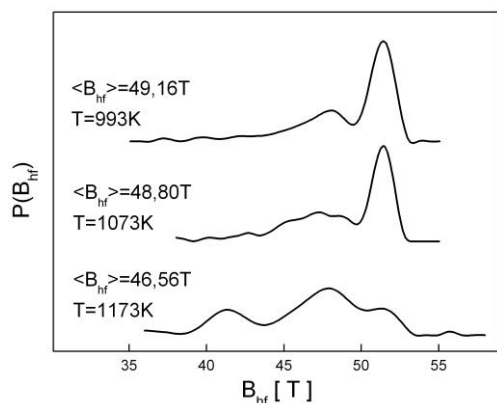
Opracowanie numeryczne widm dla próbek mielonego przez 100h materiału a następnie poddanego procesom obróbki termicznej zostało najpierw wykonane metodą dopasowywania dyskretnych składowych. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości parametrów oddziaływań nadsubtelnych wyznaczone w opracowaniu numerycznym widm Mössbauera dla próbek poddanych obróbce termicznej w różnych temperaturach, T – temperatura procesu.

T [K]	Składowa w widmie	$B_{\text{hf}}$ [T]	$\delta$ [mm/s]	$\Delta$ [mm/s]	$\Gamma$ [mm/s]	A [%]
993	S1	51,5(7)	0,37(1)	-0,22(1)	0,16(1)	45
	S2	47,9(4)	0,38(1)	-0,01(2)	0,37(1)	55
1073	S1	51,7(9)	0,37(1)	-0,22(1)	0,15(1)	34
	S2	47,9(3)	0,38(1)	0,10(2)	0,35(1)	66
1173	D	-	0,29 (9)	0,66(8)	0,38 (2)	8
	S1	51,5(3)	0,36(1)	-0,18(1)	0,17(1)	7
	S2	48,0(3)	0,36(1)	0,06(2)	0,38(1)	68
	S3	41,5(3)	0,36(1)	0,40(2)	0,28(1)	17



Poszczególne składowe oznaczają odpowiednio: S1 – sekstet pochodzący od hematytu, S2 i S3 – sekstety pochodzące od docelowego roztworu stałego  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$ , natomiast D – dublet od fazy silenitowej. Kształt widm Mössbauera uzasadnia także użycie metody quasi-ciągłego rozkładu pól nadsubtelnych do opracowania numerycznego [3]. W wyniku tego opracowania uzyskano rozkłady prawdopodobieństwa wystąpienia nadsubtelnego pola magnetycznego o danej wartości, które przedstawia rys. 6.



Rys. 6. Rozkłady pól nadsubtelnych w ceramice  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$  otrzymanej w procesie aktywacji mechanicznej przez 100 h oraz poddanej obróbce termicznej w różnych temperaturach

Tworzenie się roztworu stałego tytanianu baru w żelazanie bizmutu polega na różnych zmianach strukturalnych, m.in. w miejsca jonów Fe podstawiają się jony Ti, jony Bi są zastępowane jonami Ba. Proces taki jest przypadkowy i jony  $^{57}\text{Fe}$  będące sondami Mössbauera reagują na wszelkie zmiany w ich najbliższym sąsiedztwie. Zmiany te manifestują się zaś w kształcie widma Mössbauera. Wyznaczone rozkłady (rys. 6) świadczą o tym, że w badanym roztworze stałym  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$  występują nadsubtelne pola magnetyczne w szerokim zakresie zmian indukcji, tj. od 40T do 54T. Każde pole o danej wartości indukcji i prawdopodobieństwa jego wystąpienia odpowiada określonej konfiguracji atomowej w strefie najbliższego otoczenia  $^{57}\text{Fe}$ . W rozkładach dla próbki nagrzewanej do 993K i wygrzewanej w 1073K widoczny jest wyraźnie wierzchołek w okolicy 51,5T potwierdzający obecność hematytu. Poza nim występuje rozkład pól nadsubtelnych z maksimum w pobliżu 47–48T o znacznie mniejszym prawdopodobieństwie. W rozkładzie otrzymanym dla próbki wygrzewanej w 1173K widoczne są 3 maksima dla 41,3T, 48T i 51,5T. Wartości średnie nadsubtelnego pola magnetycznego obliczone z rozkładu wynoszą odpowiednio 49,16T dla próbki nagrzewanej do 993K, 48,80T dla próbki wygrzewanej w 1073K oraz 46,56T dla próbki wygrzewanej w 1173K.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że tylko w przypadku procesu wygrzewania w temperaturze 1173K powstał pożądany roztwór stały z niewielką ilością zanieczyszczeń paramagnetycznym związkem  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$  oraz nieprzereagowanym hematytem. Parametry oddziaływań nadsubtelnych otrzymanego roztworu stałego  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$  można porównać z analogicznymi parametrami dla czystego związku  $\text{BiFeO}_3$  (tj.  $B_{\text{hf}} = 49,68\text{T}$ ,  $\delta = 0,38\text{ mm/s}$ ,  $\Delta = -0,057\text{ mm/s}$  [1]). Znaczne obniżenie wartości indukcji pola nadsubtelnego w badanym roztworze stałym odzwierciedla osłabienie energii oddziaływań magnetycznych tkwiących w materiale. Podobny efekt zaobserwowano w  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$  otrzymanym metodą soli stopionych [8] oraz standardową technologią ceramiczną [4].

### 3. Wnioski

Stosując metodę aktywacji mechanicznej otrzymano materiał ceramiczny w postaci roztworu stałego  $(\text{BiFeO}_3)_{0.9}-(\text{BaTiO}_3)_{0.1}$ . Proces tworzenia się ceramiki był monitorowany przy pomocy

dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego i spektroskopii Mössbauera. W oparciu o wyniki badań dyfraktometrycznych i Mössbauera można stwierdzić, że tytanian baru wbudowuje się w strukturę żelazianu bizmutu tworząc roztwór stały posiadający strukturę romboedryczną. Technologia aktywacji mechanicznej z późniejszą obróbką termiczną pozwala uzyskać nowy typ materiału ceramicznego, jednak ze względu na wytworzone w procesie fazy zanieczyszczające wymaga dalszych modyfikacji, np. zmiana materiału kul mielących. Pomimo dodania 10% tytanianu baru do żelazianu bizmutu zachowany jest układ krystalograficzny  $\text{BiFeO}_3$ . Proces aktywacji mechanicznej powoduje różne deformacje strukturalne (naprężenia, odkształcenia sieci, defekty, itp.). Deformacje te oraz przypadkowe obsadzenie przez jony Fe, Ti, Ba, Bi położonych w sieci krystalograficznej wpływają na właściwości magnetyczne wytworzonej ceramiki, m.in. na wartość indukcji nadsubtelnego pola magnetycznego.

### Literatura

- [1] Blaauw C., van der Woude F.: Magnetic and structural properties of  $\text{BiFeO}_3$ . *Journal Physics C: Solid State Physics* 6/1973, s. 1422-1431.
- [2] Cornell R.M., Schwertmann U.: The iron oxides. Structure, properties, reactions, occurrence and uses. VCH, Weinheim-New York-Basel-Cambridge-Tokyo 1996.
- [3] Hesse J., Rübartsch A.: Model independent evaluation of overlapped Mössbauer spectra, *Journal of Physics E: Scientific Instruments* 7/1974, s. 526-532.
- [4] Kowal K., Jartych E., Guzdek P., Stoch P., Lisińska-Czekaj A., Czekaj D.: X-ray diffraction, Mössbauer spectroscopy, and magnetoelectric effect studies of  $(\text{BiFeO}_3)_x-(\text{BaTiO}_3)_{1-x}$  solid solutions. *Nukleonika* 1/2013, s. 57-61.
- [5] MacKenzie K.J.D., Dougherty T., Barrell J.: The electronic properties of complex oxides of bismuth with the mullite structure. *Journal of the European Ceramic Society* 28/2008, s. 499-504.
- [6] Mazurek M., Jartych E., Oleszak D.: Structure and hyperfine interactions of multiferroic  $\text{Bi}_{m+1}\text{Ti}_3\text{Fe}_{m-3}\text{O}_{3m+3}$  ceramics prepared by mechanical activation. *Nukleonika* 1/2013, s. 143-147.
- [7] Palewicz A., Szumiata T., Przeniosło R., Sosnowska I., Margiolaki I.: Search for new modulations in the  $\text{BiFeO}_3$  structure: SR diffraction and Mössbauer studies. *Solid State Communications* 140/2006, s. 359-363.
- [8] Park T.J., Papaefthymiou G.D., Viescas A.J., Lee Y., Zhou H., Wong S.S.: Composition-dependent magnetic properties of  $\text{BiFeO}_3$ - $\text{BaTiO}_3$  solid solution nanostructures *Physical Review B* 82/2010, s. 024431/1-10.
- [9] Sosnowska I., Peterlin-Neumaier T., Steichele E.: Spiral magnetic ordering in bismuth ferrite. *Journal Physics C: Solid State Physics* 15/1982, s. 4835-4846.
- [10] Surowiak Z.: *Elektroceramika ferroelektryczna*, Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2004.
- [11] Surowiak Z., Bochenek D.: Ferroikowe materiały inteligentne. *Elektronika* 6/2007, s. 50-60.
- [12] Thosar B.V., Srivastava J.K., Iyengar P.K., Bhargava S.C.: *Advances in Mössbauer Spectroscopy: Applications to Physics, Chemistry and Biology*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York 1983.
- [13] Xu Y.: *Ferroelectric materials and their application*. North Holland, Amsterdam 1991.
- [14] Yin Y-W., Raju M., Hu W-J., et al.: Multiferroic tunnel junctions. *Frontiers of Physics* 7/2012, s. 380-385.

**Mgr Bożena Malesa**

e-mail: bozena\_malesa@wp.pl

Absolwentka Wydziału Matematyki, Fizyki i Informatyki UMCS w Lublinie, gdzie w 2010 roku ukończyła studia magisterskie na kierunku Fizyka. Od roku 2011 doktorantka Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Od listopada 2012 roku pracuje na stanowisku starszego technika w Katedrze i Zakładzie Medycyny Nuklearnej Uniwersytetu Medycznego w Lublinie.



**Mgr Mariusz Mazurek**

e-mail: mariusz.mazurek@pollub.pl

W roku 2007 ukończył studia magisterskie w Katolickim Uniwersytecie Lubelskim w zakresie filozofii przyrody nieożywionej ze specjalizacją z fizyki. W 2008 r. został zatrudniony na stanowisku asystenta w Politechnice Lubelskiej, obecnie pracuje w Zakładzie Elektroniki i Fizyki Technicznej Instytutu Elektroniki i Technik Informatycznych. W działalności naukowej zajmuje się spektroskopią Mössbauera i jej zastosowaniami, m.in. w badaniu właściwości strukturalnych, elektrycznych i magnetycznych związków Aurivilliusa.



otrzymano/received: 04.02.2014

przyjęto do druku/accepted: 30.03.2014

# OSCYLACJE ELEKTRONOWE W UKŁADZIE ZŁOŻONYM Z KROPEK KWANTOWYCH ORAZ DOPROWADZEŃ - ANALIZA NUMERYCZNA

**Paweł Tchórzewski**

Net-Art, ul. Lotnicza 3, 20-322 Lublin

**Streszczenie.** W niniejszej pracy analizowane jest zjawisko oscylacji elektronowych w układzie, który składa się z dwóch kropek kwantowych oraz dwóch doprowadzeń. Elementy te są ze sobą sprzężone szeregowo. Model matematyczny rozważanego systemu opiera się na metodzie równania ruchu dla odpowiednich funkcji korelacyjnych. W obliczeniach uwzględniono oddziaływania kulombowskie pomiędzy elektronami zlokalizowanymi na kropkach kwantowych oraz spin elektronu. Zbadany został wpływ wybranych parametrów układu na czasową zależność prawdopodobieństwa obsadzenia poziomów energetycznych kropek kwantowych.

**Słowa kluczowe:** mechanika kwantowa, kropki kwantowe, oscylacje elektronowe, metody numeryczne

## ELECTRON OSCILLATIONS IN A QUANTUM DOT SYSTEM – NUMERICAL ANALYSIS

**Abstract.** Electron oscillations phenomena in a system composed of two quantum dots and two leads coupled in series has been analysed. The mathematical model of the discussed system is based on the equation of motion method for appropriate correlation functions. The Coulomb interactions between electrons localised on quantum dots and electron spin have been taken into account in the calculations. The influence of the selected system parameters on a time-dependent probability of quantum dot energy level occupation has been researched.

**Keywords:** quantum mechanics, quantum dots, electron oscillations, numerical methods

### Wstęp

Wiele różnorodnych zjawisk zachodzących w układach zbudowanych z kropek kwantowych było w ostatnich latach przedmiotem intensywnych badań. Przykładowo bardzo wiele uwagi poświęcono zjawisku transportu elektronowego dla przypadków stacjonarnych [2, 3]. Zasadność badań systemów niskowymiarowych często jest motywowana możliwością praktycznego wykorzystania zdobytych informacji na przykład w spintronice do zbudowania komputera kwantowego lub innych urządzeń.

W niniejszej pracy rozważamy zjawisko oscylacji elektronowych. Aby wyjaśnić jego istotę weźmy pod uwagę następujący przykład. Załóżmy, że w układzie złożonym z dwóch jednopoziomowych kropek kwantowych, który bywa nazywany kubitem znajduje się tylko jeden elektron. Ponadto zakładamy, że w chwili początkowej elektron był zlokalizowany na jednej z kropek. Wykonując obliczenia analityczne można wykazać [1], że prawdopodobieństwo znalezienia elektronu na dowolnej z kropek kwantowych zmienia się okresowo z czasem. Okres takich oscylacji wynosi:

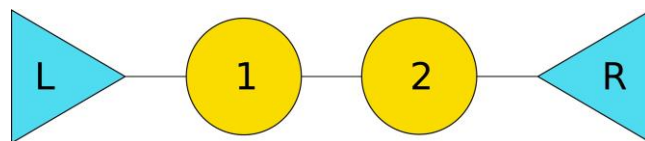
$$T_o = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + 4|V_{12}|^2}}, \quad (1)$$

gdzie  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  to energie poziomów jednocząstkowych, natomiast parametr  $V_{12}$  oznacza element macierzy, którego wartość zależy od kształtu i rozmiarów bariery potencjału między kropkami.

Używając formalizmu drugiej kwantyzacji oraz metody równania ruchu dla odpowiednich funkcji korelacyjnych badamy wpływ sprzężenia pomiędzy elementami układu, a także wpływ oddziaływań kulombowskich na przebieg zjawiska oscylacji elektronowych zachodzących w kubicie. Każda z dwóch kropek kwantowych w badanym układzie dla czasu  $t > 0$  jest sprzężona z metalicznym doprowadzeniem, które stanowi pewnego rodzaju rezerwuar elektronowy (rysunek 1). Zakładamy, że w chwili czasu  $t = 0$  poszczególne elementy systemu nie są ze sobą połączone. Zastosowana przez nas metoda pozwala na wyznaczenie

prawdopodobieństwa obsadzenia poziomów energetycznych kropek kwantowych w zależności od czasu.

W kolejnych częściach artykułu został przedstawiony zastosowany do opisu zjawiska oscylacji model matematyczny oraz zaprezentowano wyniki obliczeń numerycznych wraz z ich dyskusją.



Rys. 1. Schemat reprezentujący badany układ. Trójkąty oznaczają doprowadzenia, natomiast koła reprezentują kropki kwantowe

### 1. Formalizm teoretyczny

Na wstępie wybieramy taki układ jednostek, aby  $e = \hbar = 1$ , gdzie  $e$  jest wartością bezwzględną ładunku elektronu, natomiast  $\hbar$  oznacza zredukowaną stałą Plancka. Wybór ten podyktowany jest względami praktycznymi.

Rozważany układ przedstawia schematycznie rysunek 1. Operator energii całkowitej tego układu w reprezentacji liczb obsadzeń przyjmuje postać:  $H = H_{DQD} + H_{LR} + H_C$ , gdzie

$$H_{DQD} = \sum_{j=1,2} \sum_{\sigma} \varepsilon_{j\sigma} n_{j\sigma} + \sum_{\sigma} (V_{12} c_{1\sigma}^+ c_{2\sigma} + V_{12}^* c_{2\sigma}^+ c_{1\sigma}) + \sum_{j=1,2} U_j n_{j\uparrow} n_{j\downarrow} + U_{12} \sum_{\sigma, \sigma'} n_{1\sigma} n_{2\sigma'}, \quad (2)$$

$$H_{LR} = \sum_{\alpha=L,R} \sum_{\mathbf{k}, \sigma} \varepsilon_{\alpha\mathbf{k}\sigma} n_{\alpha\mathbf{k}\sigma}, \quad (3)$$

$$H_C = \sum_{j=1,2} \sum_{\alpha=L,R} \sum_{\mathbf{k}, \sigma} [V_{\alpha\mathbf{k}}^{(j)} c_{j\sigma}^+ c_{\alpha\mathbf{k}\sigma} + (V_{\alpha\mathbf{k}}^{(j)})^* c_{\alpha\mathbf{k}\sigma}^+ c_{j\sigma}], \quad (4)$$

oraz  $V_{Lk}^{(2)} = V_{Rk}^{(1)} \equiv 0$ . Wyraz  $H_{DQD}$  opisuje dwie połączone ze sobą kropki kwantowe,  $H_{LR}$  odnosi się do elektrod, natomiast  $H_C$  odpowiada za sprzężenie pomiędzy kropkami kwantowymi, a elektrodami. Operatory kreacji oraz anihilacji elektronu

w odpowiednich stanach właściwych dla doprowadzeń reprezentowane są odpowiednio przez  $c_{\alpha\mathbf{k}\sigma}^+$  oraz  $c_{\alpha\mathbf{k}\sigma}$ ,  $\mathbf{k}$  oznacza wektor falowy elektronu, natomiast rzut spinu oznaczono symbolem  $\sigma$  ( $\sigma = \uparrow, \downarrow$ ).  $\varepsilon_{\alpha\mathbf{k}\sigma}$  reprezentuje energię elektronu w doprowadzeniu  $\alpha$  w określonym stanie tej cząstki. Operatory kreacji oraz anihilacji dla stanów kropek kwantowych to odpowiednio  $c_{j\sigma}^+$  i  $c_{j\sigma}$ . Energie dla tych stanów oznaczono jako  $\varepsilon_{j\sigma}$ . Parametry  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_{12}$  odpowiadają za intensywność oddziaływań kulombowskich. Współczynnik  $V_{\alpha\mathbf{k}}^{(j)}$  opisuje sprzężenie pomiędzy doprowadzeniem  $\alpha$ , a  $j$ -tą kropką kwantową. Niezerowa wartość parametru  $V_{12}$  oznacza, że elektrony mogą tunelować pomiędzy kropkami kwantowymi. Operatory liczby cząstek zostały oznaczone jako  $n_{j\sigma}$  oraz  $n_{\alpha\mathbf{k}\sigma}$ .

Dla danego w obrazie Heisenberga operatora  $A(t)$ , który w obrazie Schrödingera jawnie nie zależy od czasu, równanie ruchu może być zapisane jako

$$i \frac{dA(t)}{dt} = [A(t), H(t)]. \quad (5)$$

Na podstawie metody równania ruchu dla odpowiednich funkcji korelacyjnych otrzymujemy następujące równanie różniczkowe na prawdopodobieństwo obsadzenia stanu o spinie  $\sigma$  w pierwszej kropce kwantowej

$$\begin{aligned} \frac{d\langle n_{1\sigma}(t) \rangle}{dt} = & 2 \operatorname{Im} \left[ V_L^{(1)}(t) \sum_{\mathbf{k}} \exp \left( -i \int_0^t \varepsilon_{L\mathbf{k}\sigma}(t_1) dt_1 \right) \langle c_{1\sigma}^+(t) c_{L\mathbf{k}\sigma}(0) \rangle \right] \\ & + 2 \operatorname{Im} \left[ -\frac{i}{2} \Gamma_L(t, t) \langle n_{1\sigma}(t) \rangle + V_{12}(t) \langle c_{1\sigma}^+(t) c_{2\sigma}(t) \rangle \right], \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie symbol  $\langle \dots \rangle$  oznacza wartość średnią w rozumieniu kwantowo-statystycznym,  $\Gamma_L(t, t) = 2\pi \rho_L |V_L^{(1)}(t)|^2$  przy czym  $\rho_L$  jest gęstością stanów dla doprowadzenia L. Ponadto zostało przyjęte założenie, że elementy macierzowe  $V_{\alpha\mathbf{k}}^{(j)}$  nie zależą od wektora falowego  $\mathbf{k}$ , to znaczy  $V_{\alpha\mathbf{k}}^{(j)} \equiv V_{\alpha}^{(j)}$ . W celu określenia prawdopodobieństwa obsadzenia poziomów kropek kwantowych należy wyznaczyć funkcje  $\langle c_{j\sigma}^+(t) c_{\alpha\mathbf{k}\sigma}(0) \rangle$  oraz  $\langle c_{1\sigma}^+(t) c_{2\sigma}(t) \rangle$ . Aby tego dokonać po raz kolejny posługujemy się równaniem ruchu operatora (5). Procedurę wyznaczania kolejnych równań na funkcje korelacyjne należy powtarzać dotąd, aż otrzymany układ równań różniczkowych zwyczajnych będzie układem zamkniętym. W przypadku rozważanego systemu występują dwa typy funkcji korelacyjnych. Pierwsza grupa to funkcje zbudowane tylko z operatorów kreacji oraz anihilacji dla stanów kropek kwantowych. Druga grupa obejmuje funkcje, które można zapisać w ogólnej postaci:

$$\langle f_1(c_{j\sigma}^+(t), c_{j'\sigma'}(t)) c_{\alpha\mathbf{k}\sigma}(0) \rangle,$$

gdzie  $f_1(c_{j\sigma}^+, c_{j'\sigma'})$  jest daną funkcją operatorów  $c_{j\sigma}^+$  oraz  $c_{j'\sigma'}$ . Funkcje pierwszego typu tworzą zamknięty układ równań różniczkowych. Równania te zawierają jednak wyrazy stanowiące sumy funkcji drugiego rodzaju. Ponieważ równania różniczkowe na funkcje korelacyjne takiego typu nie tworzą zamkniętego układu równań, więc konieczne staje się dokonanie przybliżeń.

Funkcje korelacyjne zbudowane z dwóch operatorów wziętych dla  $t = 0$  zostały przybliżone w następujący sposób:

$$\begin{aligned} & \langle f_1(c_{j_1\sigma_1}^+(t), c_{j_2\sigma_2}(t)) c_{\alpha\mathbf{k}\sigma}(0) c_{\alpha'\mathbf{k}'\sigma'}(0) \rangle \\ & \approx \langle f_1(c_{j_1\sigma_1}^+(t), c_{j_2\sigma_2}(t)) \rangle \langle c_{\alpha\mathbf{k}\sigma}(0) c_{\alpha'\mathbf{k}'\sigma'}(0) \rangle \\ & \equiv \delta_{\alpha\alpha'} \delta_{\mathbf{k}\mathbf{k}'} \delta_{\sigma\sigma'} \langle f_1(c_{j_1\sigma_1}^+(t), c_{j_2\sigma_2}(t)) \rangle \langle n_{\alpha\mathbf{k}\sigma}(0) \rangle, \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie  $f_1(c_{j_1\sigma_1}^+, c_{j_2\sigma_2})$  jest daną funkcją operatorów  $c_{j_1\sigma_1}^+$  oraz  $c_{j_2\sigma_2}$ , natomiast  $\delta_{ww'}$  oznacza deltę Kroneckera. Ponieważ w chwili początkowej układ znajduje się w stanie równowagowym, więc średnia  $\langle n_{\alpha\mathbf{k}\sigma}(0) \rangle$  reprezentuje rozkład Fermiego-Diraca.

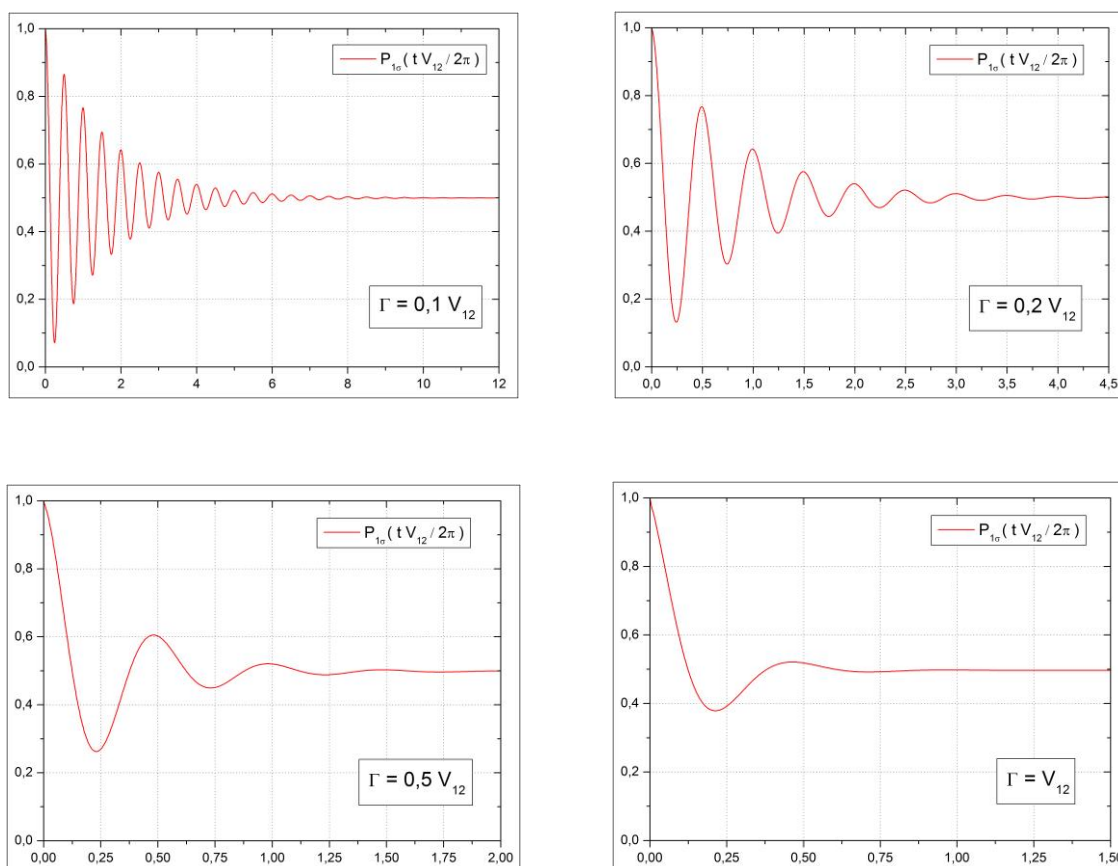
Powyższa procedura przybliżeń nie łamie najbardziej istotnych korelacji między elektronami. Otrzymany w przedstawiony sposób układ równań różniczkowych zwyczajnych był dla wybranych parametrów rozwiązywany numerycznie za pomocą metody Rungego-Kutty czwartego rzędu.

## 2. Wyniki obliczeń numerycznych

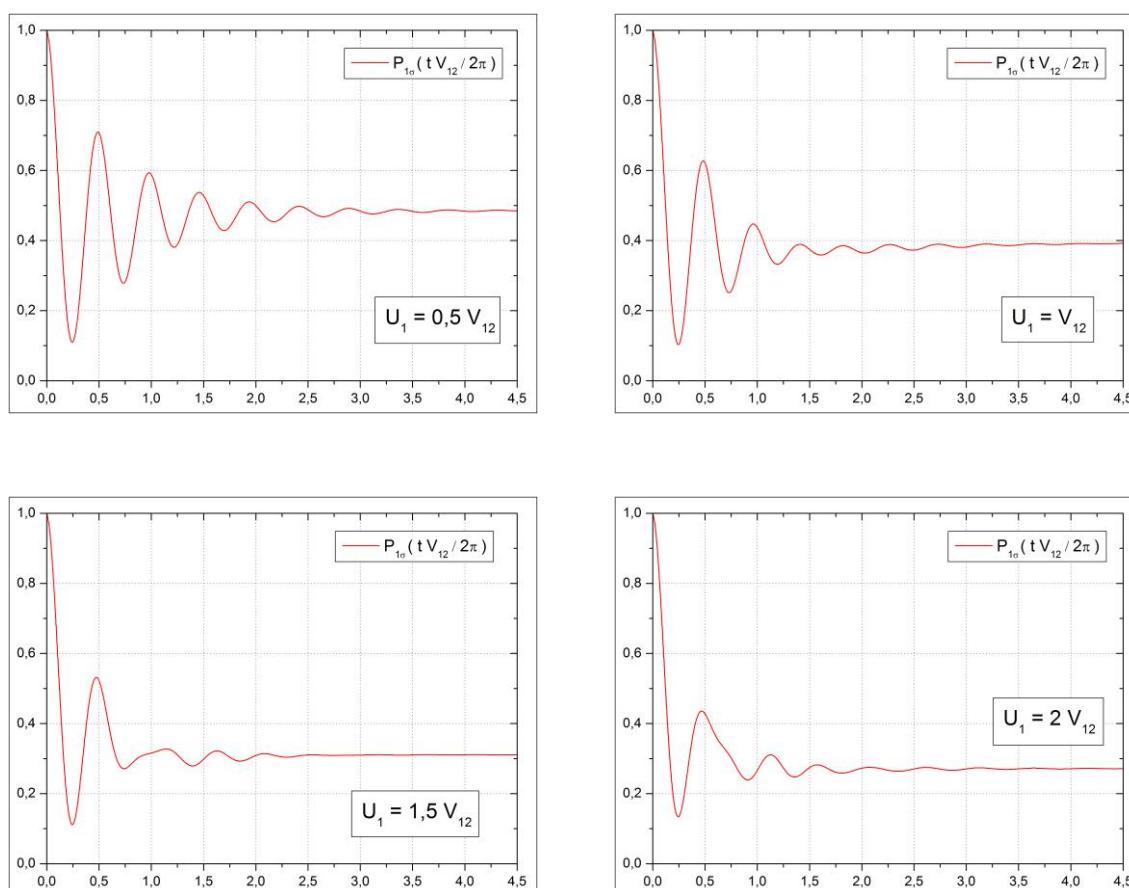
Na potrzeby obliczeń numerycznych zostało przyjęte założenie  $\Gamma_L = \Gamma_R = \Gamma$ . Za jednostkę energii wybieramy  $V_{12}$ , natomiast jednostką czasu jest  $(2\pi)/V_{12}$ . Potencjały chemiczne elektrod i energie poziomów kropek kwantowych wynoszą odpowiednio  $\mu_L = \mu_R = 0$  oraz  $\varepsilon_{j\sigma} = 0$ . Iloczyn stałej Boltzmanna i temperatury układu jest równy  $k_B T = 10^{-4} V_{12}$ . Między parametrami opisującymi intensywność oddziaływań kulombowskich zachodzi relacja  $U_1 = U_2 = 2U_{12}$ .

Wykresy obecne na rysunku 2 pokazują nam, że im większa jest wartość parametru  $\Gamma$ , to tym szybciej następuje tłumienie oscylacji. Jednak za każdym razem prawdopodobieństwo znalezienia elektronu o wybranym rzucie spinu na pierwszej kropce kwantowej jest w stanie równowagowym takie samo i wynosi w przybliżeniu  $P_{1\sigma} = 0,5$ . Zgodnie ze wzorem (1) okres oscylacji elektronowych w kubicie nie podłączonym do elektrod ( $\Gamma = 0$ ) wynosi  $0,5 \cdot (2\pi)/V_{12}$ . Przy zaniedbaniu oddziaływań między elektronami wyniki obliczeń numerycznych pokazują, że dla  $\Gamma = 0,1 V_{12}$  i  $\Gamma = 0,2 V_{12}$  nie jest widoczny wpływ tego parametru na okres oscylacji. Gdy  $\Gamma = 0,5 V_{12}$  i  $\Gamma = V_{12}$  to ten wpływ jest stosunkowo niewielki.

Na podstawie rysunków 3 oraz 4 wyciągamy wniosek, że warunki początkowe mają istotne znaczenie dla przebiegu oscylacji w realnych układach, w których mamy obecność oddziaływań kulombowskich. W pierwszej kolejności weźmy pod uwagę przypadek  $U_1 = 0,5 V_{12}$ . Widzimy, że czas po którym następuje wytłumienie oscylacji jest słabo zależny od wyboru warunków początkowych. Dla  $U_1 > 0,5 V_{12}$  prawidłowość ta przestaje już obowiązywać. Gdy w chwili początkowej w kubicie na jednej z kropek kwantowych znajdują się dwa elektrony, to stosunkowo szybko układ przechodzi do stanu równowagowego. Odmienna sytuacja ma miejsce gdy w chwili  $t = 0$  w kubicie mamy tylko jeden elektron. Wówczas po czasie równym kilku okresom oscylacji następuje ich zanik. Ponadto w tym przypadku wzrost wartości parametrów związanych z oddziaływaniami kulombowskim prowadzi do zwiększenia się czasu relaksacji. Śledząc położenia ekstremów funkcji, których wykresy omawiamy widzimy, że oddziaływania między elektronami mają pewien wpływ na okres zmian prawdopodobieństwa. Nie jest on jednak zbyt znaczący.

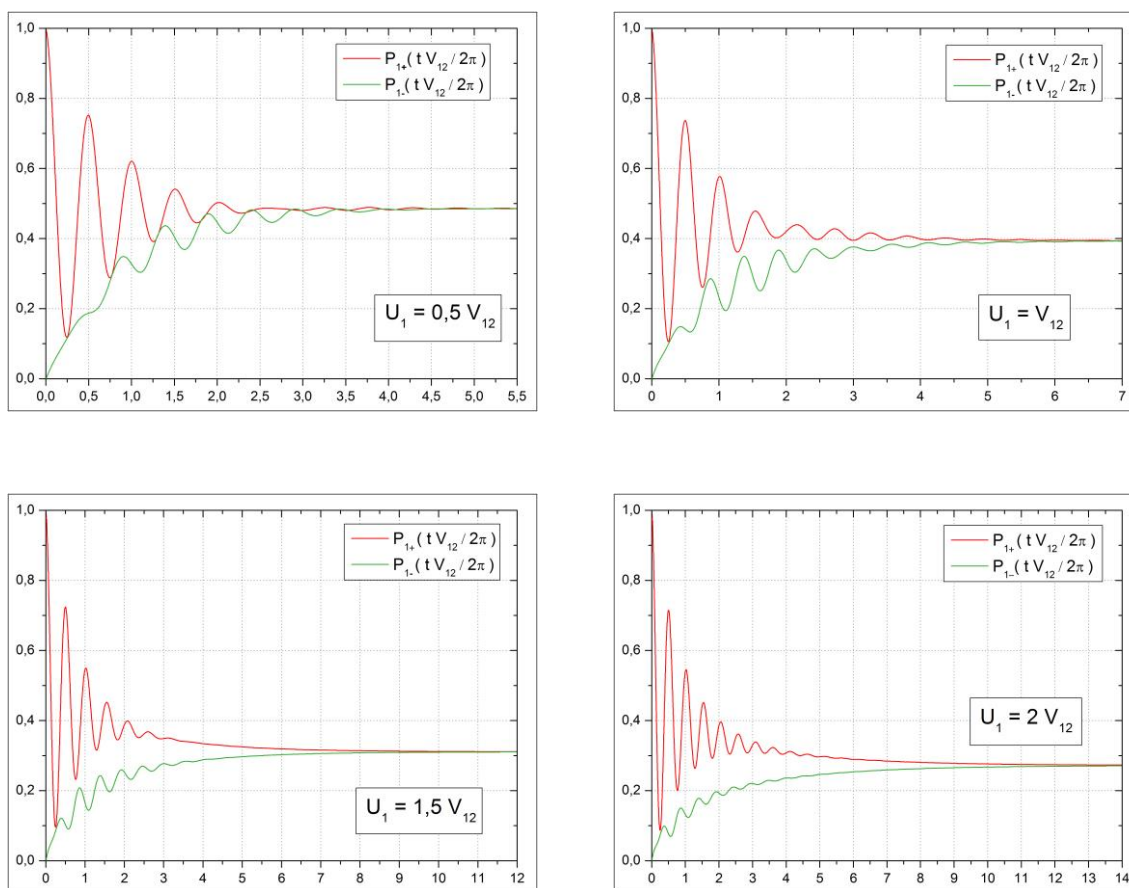


Rys. 2. Wykresy przedstawiają prawdopodobieństwo znalezienia elektronu o dowolnym rzucie spinu na pierwszej kropce kwantowej w zależności od czasu. Zakładamy, że w chwili czasu  $t=0$  poziomy energetyczne pierwszej kropki kwantowej są obsadzone, natomiast poziomy kropki drugiej są puste. W obliczeniach zostało przyjęte założenie, że oddziaływania kulombowskie są zanedbywalnie małe ( $U_1=0$ )



Rys. 3. Prawdopodobieństwo detekcji elektronu o dowolnym rzucie spinu na pierwszej kropce kwantowej w funkcji czasu. Współczynnik odpowiadający za sprzężenie kropek z doprowadzeniami wynosi  $\Gamma=0,2 V_{12}$ . Warunki początkowe na obsadzenia są takie, jak to zostało podane w opisie rysunku 2





Rys. 4. Prawdopodobieństwo detekcji elektronów na pierwszej kropce kwantowej w zależności od czasu. We wszystkich czterech przypadkach  $\Gamma = 0,2 V_{12}$ . Krzywe oznaczone kolorem czerwonym oraz zielonym odpowiadają stanom dla których rzut spinu jest odpowiednio dodatni ( $\uparrow$ ) oraz ujemny ( $\downarrow$ ). W chwili początkowej w kubicie znajdował się tylko jeden elektron, a rzut jego spinu był dodatni

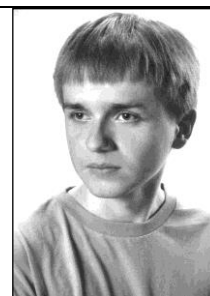
## Literatura

- [1] Cohen-Tannoudji C., Diu B., Laloë F.: Quantum mechanics, Wiley-Interscience, New York, 1977.
- [2] Jauho A. P., Wingreen N. S., Meir Y.: Time-dependent transport in interacting and noninteracting resonant-tunneling systems, Phys. Rev. B, Vol.: 50, 1994.
- [3] Sun Z. Z., Zhang R. Q., Fan W., Wang X. R.: Resonance and antiresonance effects in electronic transport through several-quantum-dot combinations, J. Appl. Phys., Vol. 105, 2009.

Mgr Paweł Tchórzewski

e-mail: pawel.tchorzewski87@gmail.com

W 2011 roku Paweł Tchórzewski ukończył studia na kierunku fizyka (specjalność: fizyka teoretyczna) na Wydziale Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie. Aktualnie jest zatrudniony w lubelskiej firmie Net-Art, gdzie realizując swoje zainteresowania wykonuje prace o charakterze rozwojowo-badawczym głównie w dziedzinie numerycznych metod rozwiązywania równań różniczkowych.



otrzymano/received: 19.06.2013

przyjęto do druku/accepted: 16.02.2014

**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 - 2013,
- procedurę recenzowania,
- wykaz recenzentów prac opublikowanych w poprzednich latach,
- aktualną formatkę artykułu oraz druk recenzji,
- dostęp on-line do artykułów.



WWW.IAPGOS.PL

# ODDZIAŁYWANIE POLA MAGNETYCZNEGO NA PŁYNĄCĄ CIECZ O WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCIACH MAGNETYCZNYCH

Mateusz Krawczyk, Mikołaj Skowron

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań oddziaływania pola magnetycznego na płynącą ciecz o właściwościach paramagnetycznych. W obszarze działania stałego w czasie pola magnetycznego indukują się w płynącej cieczy prądy wirowe. Indukowane prądy wpływają na rozkład pola magnetycznego w obszarze w którym przepływa ciecz. Wzajemne oddziaływanie indukowanych prądów i pola magnetycznego wpływa na zmiany kierunku ruchu cieczy oraz zmiany ciśnienia w cieczy. W artykule zaprezentowano wyniki obliczeń rozkładu pola magnetycznego, zmiany kierunku prędkości w przepływającej cieczy, a także zmiany ciśnienia w modelowanej cieczy. Obliczenia wykonano w programie Comsol Multiphysics.

**Słowa kluczowe:** pole magnetyczne, ciecz paramagnetyczna, prądy wirowe

## INFLUENCE OF THE MAGNETIC FIELD ON FLOWING LIQUID OF SELECTED MAGNETIC PROPERTIES

**Abstract.** This paper presents the results of the effect studies of the magnetic field on the paramagnetic, flowing liquid. In the area of direct magnetic field the eddy currents in flowing liquid are induced. The induced currents affect the distribution of the magnetic field in the area where the liquid flows. The interaction of induced currents and magnetic fields affect changes in the direction of movement of the liquid and pressure changes in the liquid. The article presents the results of the calculations of the magnetic field, changes of the direction of flowing liquids, and pressure changes in the modelled liquid. Calculations were run in the Comsol Multiphysics.

**Keywords:** magnetic field, paramagnetic fluid, eddy currents

### Wstęp

Oddziaływanie sił, występujących w obszarze niejednorodnego pola magnetycznego na cząsteczki magnetyczne zawarte np. w przepływającym płynie, ma wiele zastosowań w procesach przemysłowych. Przykładem takiego użycia jest wysoko gradientowa separacja magnetyczna HGMS, stosuje się ją m.in. do przeróbki minerałów o bardzo małej podatności magnetycznej i wylapywania z nich zanieczyszczeń, cząstek o większej podatności magnetycznej [4-6]. Separacja magnetyczna może mieć również zastosowanie przy oczyszczaniu ścieków z cząstek które posiadają właściwości magnetyczne [12].

Cząstki magnetyczne mają również wiele zastosowań w biomedycynie, np. do leczenia hipertermii, rozdzielania komórek mających różne właściwości magnetyczne, jako środki kontrastowe do obrazowania w rezonansie magnetycznym MRI lub też miejscowe kierowanie leków o właściwościach magnetycznych MDT [1, 8, 11, 14]. W tym ostatnim zastosowaniu, miejscowej aplikacji chemioterapeutyków, można zwiększyć skuteczność ich działania, poprzez połączenie leku z cząstkami magnetycznymi. W konsekwencji cząstki z chemią będą przyciągane poprzez zewnętrzne pole magnetyczne przyłożone w miejsce schorzenia.

Znajomość trajektorii cząstek w przyłożonym polu magnetycznym może pomóc oszacować jaka część cząsteczek została zatrzymana w konkretnym obszarze co pozwala na oszacowanie skuteczności leczenia. W ciągu ostatnich lat nastąpił duży postęp tych badań nie tylko teoretycznych i obliczeniowych ale również eksperymentalnych [7, 13, 15, 17, 18].

Najnowsze badania, oddziaływania sił na cząstki magnetyczne, dotyczą m.in. immunomagnetycznej separacji: DNA, komórek, organelli, białka itp. rozdzielanie płynów o różnych właściwościach magnetycznych wykorzystane może być np. na potrzeby diagnostyki medycznej [2, 3, 19].

We wszystkich wymienionych aplikacjach, szczegółową znajomość trajektorii cząsteczek jest potrzebne do projektowania i odpowiedniego stosowania urządzeń. Ze względu na geometryczną złożoność, zarówno przepływów jak i rozkładu pola magnetycznego, do przewidywania trajektorii wykorzystuje się symulacje numeryczne.

Zanim jednak wyznaczy się trajektorie cząstek, warto obliczyć rozkład ciśnienia przepływającej cieczy, zmiany kierunków prędkości tej cieczy, aby określić w jakim obszarze występują największe zakłócenia ww. wielkości. Czasem takie informacje

wystarczą do weryfikacji poprawności przeprowadzanych badań. Oczywiście wszystkie obliczenia analityczne czy też numeryczne są obarczone błędami wynikającymi z zastosowanych założeń upraszczających.

### 1. Opis matematyczny modelu

#### 1.1. Równania pola magnetycznego

Magnetyczna część modelu została przyjęta jako statyczna więc prawo Ampera dla pola magnetycznego  $\mathbf{H}$  (A / m) i gęstości prądu  $\mathbf{J}$  (A/m<sup>2</sup>) przyjmuje następującą postać:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

oraz zależność wynikająca z prawa Gaussa:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

W modelu występują trzy rodzaje obszarów w których występują zależności konstytutywne między  $\mathbf{B}$  oraz  $\mathbf{H}$  opisane w następujący sposób [9, 10, 20]:

$$\mathbf{B} = \begin{cases} \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r \\ \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}_f(\mathbf{H})) \\ \mu_0 \mathbf{H} \end{cases} \quad (3)$$

Opisując magnetyczny potencjał wektorowy zależnościami:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad \nabla \cdot \mathbf{A} = 0 \quad (4)$$

W konsekwencji otrzymuje się równanie pozwalające na obliczanie pola magnetycznego w układzie 2D:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{M} \right) = 0 \quad (5)$$

Z równania tego wynika, że wektor  $\mathbf{A}$  posiada niezerową składową tylko wzdłuż osi z.

#### 1.2. Siła magnetyczna

Cząsteczki powyżej rozmiaru krytycznego (kilkadziesiąt nanometrów dla najczęściej stosowanych materiałów) zawierają kilka domen magnetycznych.

Dla takich cząsteczek magnetyzacja (do pewnej wartości) może być przyjęta jako wprost proporcjonalna do zewnętrznego pola magnetycznego.

Powyżej tej wartości (magnetyzacji nasycenia) dalszy wzrost nie jest możliwy ponieważ wszystkie składowe dipole są ułożone zgodnie z polem magnetycznym.

$$\mathbf{M} = \begin{cases} \chi \mathbf{H} & H < M_{nas} / |\chi| \\ M_{nas} \mathbf{H} & H > M_{nas} / |\chi| \end{cases} \quad (6)$$

gdzie  $M_{nas}$  jest magnetyzacją nasycenia,  $\chi$  jest podatnością magnetyczną materiału. W niniejszym modelu zastosowano ciecz o podatności  $\chi = 0,3$ .

Na podstawie wcześniej wyprowadzonych wzorów i przyjęciu liniowej magnetyzacji cieczy, magnetyzacja dla odpowiednich składowych przedstawiona jest następująco:

$$\begin{cases} M_x = \frac{\chi}{\mu_0} \frac{\partial A_z}{\partial y} \\ M_y = \frac{\chi}{\mu_0} \frac{\partial A_z}{\partial x} \end{cases} \quad (7)$$

Siła magnetyczna, zwana też siłą magnetoforezy działająca na namagnesowany materiał na jednostkę objętości, przedstawiona jest zależnością:

$$\mathbf{F} = \mu_0 \mathbf{M} \nabla H \quad (8)$$

Wykorzystując powyższy model (6) otrzymujemy:

$$\mathbf{F}_m = \begin{cases} \mu_0 \chi \nabla H^2 / 2 & H < M_{nas} / |\chi| \\ \mu_0 M_{nas} \nabla H & H > M_{nas} / |\chi| \end{cases} \quad (9)$$

Użyto własności:

$$\nabla H^2 / 2 = \mathbf{H} \times (\nabla \times \mathbf{H}) + (\mathbf{H} \cdot \nabla) \mathbf{H} \quad (10)$$

gdzie:

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – przenikalność magnetyczna próżni [H/m],

$\mathbf{M}$  – magnetyzacja materiału,

$\mathbf{H}$  – natężenie zewnętrznego pola magnetycznego [A/m], założono wirowość pola  $\mathbf{H}$

### 1.3. Równania ruchu

Do opisu ruchu cieczy w modelu skorzystano z równania Naviera–Stokesa dla nieściśliwego płynu:

$$\mathbf{F} = \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \eta (\nabla^2 \mathbf{u}) + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p \quad (11)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (12)$$

gdzie:

$\eta$  – lepkość dynamiczna [kg/(m·s)],

$\mathbf{u}$  – prędkość [m/s],

$\rho$  – gęstość [kg/m<sup>3</sup>],

$p$  – ciśnienie [N/m<sup>2</sup>],

$\mathbf{F}$  – siła działająca na objętość cieczy, siła magnetyczna [N/m<sup>3</sup>].

Po przekształceniu otrzymujemy wyrażenia na składowe siły:

$$F_x = \frac{\chi}{\mu_0 \mu_r^2} \left( \frac{\partial A_z}{\partial x} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial A_z}{\partial y} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x \partial y} \right) \quad (13)$$

$$F_y = \frac{\chi}{\mu_0 \mu_r^2} \left( \frac{\partial A_z}{\partial x} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x \partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial y} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right)$$

Aby otrzymać całkowitą siłę działającą na ciecz należy pomnożyć powyższe równania przez masę cząsteczki płynu.

## 2. Numeryczna analiza oddziaływania pola magnetycznego na przepływającą ciecz

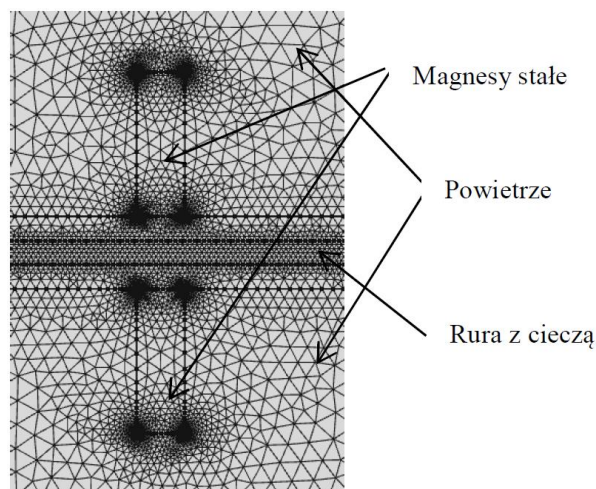
### 2.1. Opis i założenia do modelu

W zaproponowanym przez autorów modelu do generowania pola magnetycznego użyto dwa magnesy trwałe. Rurkę szklaną, w której przepływa ciecz o właściwościach paramagnetycznych. Układ umieszczony jest w powietrzu. Obszar obliczeniowy został zdyskretyzowany siatką trójkątną. Zastosowano różnorodne zagęszczenie siatki. Największą gęstość siatki użyto w obszarach oddziaływania pola magnetycznego na przepływającą ciecz, czyli tam gdzie obliczenia powinny być najbardziej dokładne.

W celu uproszczenia bardzo skomplikowanych obliczeń w przedstawionym modelu przyjęto kilka założeń. Pominięto siły wspólnego oddziaływania nanocząsteczek na siebie, pominięto również siły tarcia przepływającej cieczy o rurkę.

W zaproponowanym modelu do generowania pola magnetycznego użyto magnesów trwałych o wartości indukcji pola 1T, ustawionymi jednoimiennymi biegunami względem siebie

rys. 1. Gęstość cieczy badanej cieczy miała wartość 1000 kg/m<sup>3</sup>, a lepkość dynamiczną 0,005 Pa·s, podatność magnetyczna cieczy 0,3. Kierunek prędkości cieczy jest wzdłuż osi 0x.



Rys. 1. Zdyskretyzowana geometria układu

Przepływ cieczy przedstawiona jest za pomocą następującej zależności:

$$v_0 = 2v_m s(1-s)(\sin(\omega t) + \sqrt{\sin(\omega t)^2}) \quad (14)$$

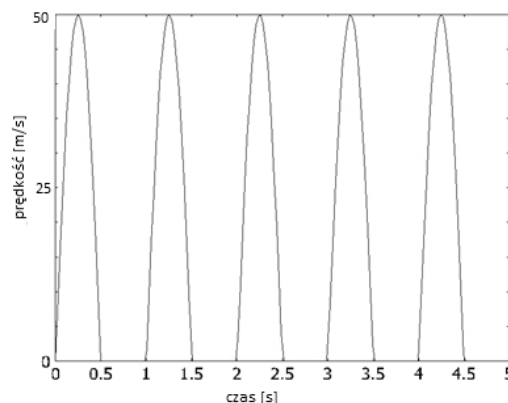
gdzie:

$v_m$  – amplituda prędkości 50 [m/s],

$t$  – czas [s],

$s$  – parametr zmieniający się wzdłuż odcinka wlotowego od 0 do 1,

$\omega$  – prędkość kątowa [rad/s].



Rys. 2. Wykres zmian prędkości cieczy

### 2.2. Analiza wyników

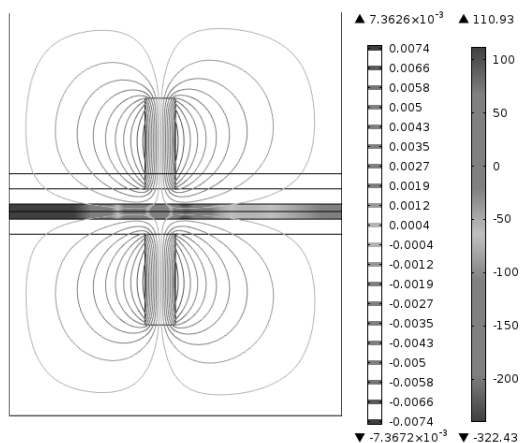
Obliczenia wykonano w programie COMSOL Multiphysics który wykorzystuje Metodę Elementów Skończonych. Modelowanie oddziaływania pola magnetycznego na przepływającą ciecz o paramagnetycznych właściwościach magnetycznych, jest bardzo skomplikowane. Aby uprościć obliczenia autorzy pracy pominieli w modelu siły wspólnego oddziaływania nanocząsteczek na siebie. Pominięto siły tarcia przepływającej cieczy o rurkę.

W prezentowanym modelu pole magnetyczne wpływa na rozkład ciśnienia cieczy w kanale. W obszarze działania pola magnetycznego dla czasów  $t = 0,4$  s i  $t = 0,8$  s przedstawione zostały rozkłady ciśnienia oraz prędkości przepływającej cieczy.

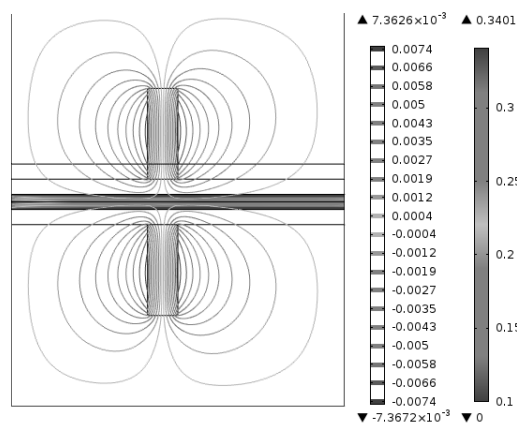
Zmiany ciśnienia tworzą zawirowania w przepływającej cieczy. Zawirowania są tym większe im większa jest indukcja pola magnetycznego oraz gradient pola w danym obszarze. Na wielkość zawirowania ma również prędkość wlotowa cieczy. Im mniejsza prędkość przepływu tym mniejsze zawirowania. Zaobserwować jednocześnie można iż pole magnetyczne powoduje zmniejszenie prędkości przepływu płynu, oprócz składowej 0x prędkości, pojawia się składowa 0y.

W kanale, ciśnienie przepływającej cieczy zmienia się w czasie, największe zmiany występują w obszarach dużego gradientu pola magnetycznego rys. 3, 7, różnice ciśnienia sięgają wartości 350 Pa. Zmiany ciśnienia determinują zakłócenia w prędkości przepływającej cieczy. Zmiany występują dla składowej  $x$  prędkości rys. 4, 8, jednocześnie pojawia się

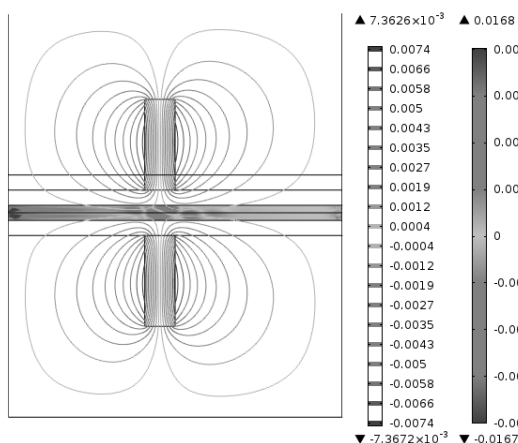
składowa  $y$  rys. 5, 9, która wcześniej nie występowała. W przepływającej cieczy zaczynają się tworzyć wiry które spowalniają przepływ cieczy rys. 6, 10. Zawirowania powodują dłuższy czas oddziaływania pola magnetycznego na ciecz, skutkować to może aglomeracją cząsteczek o większej podatności magnetycznej.



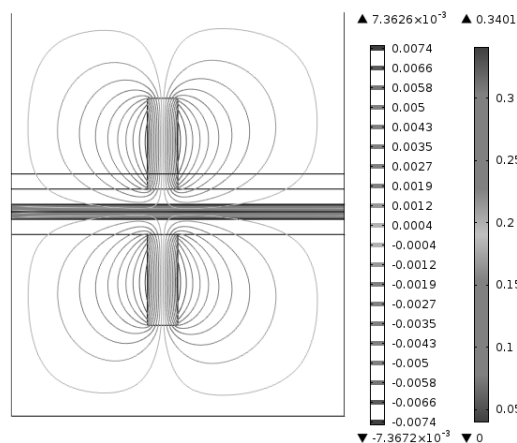
Rys. 3. Rozkład ciśnienia przepływającej cieczy w rurze oraz linie potencjału magnetycznego w chwili  $t=0,4s$



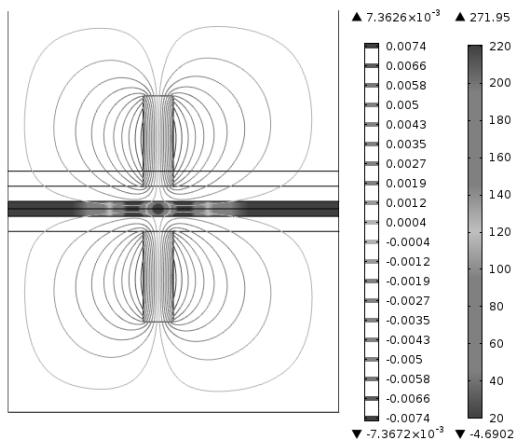
Rys. 4. Rozkład składowej  $x$  prędkości przepływającej cieczy oraz linie potencjału magnetycznego w chwili  $t=0,4s$



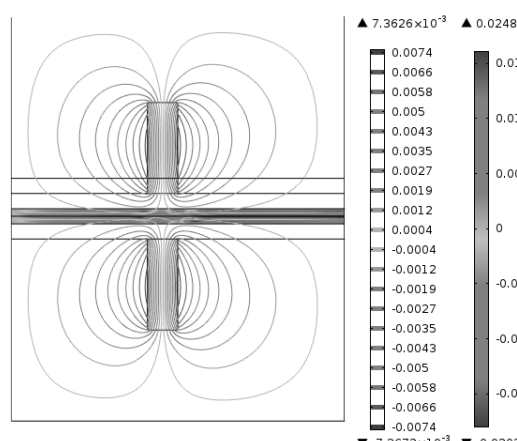
Rys. 5. Rozkład składowej  $y$  prędkości przepływającej cieczy oraz linie potencjału magnetycznego w chwili  $t=0,4s$



Rys. 6. Rozkład prędkości przepływającej cieczy oraz linie potencjału magnetycznego w chwili  $t=0,4s$

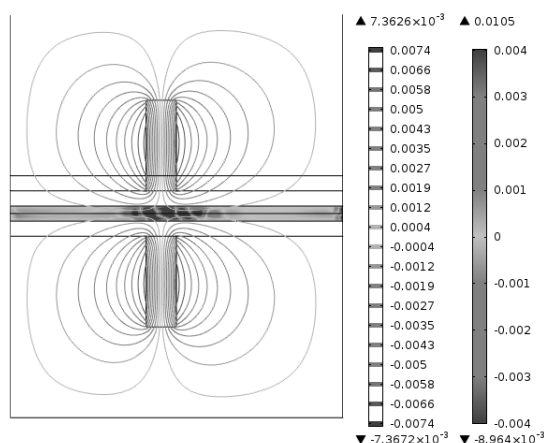


Rys. 7. Rozkład ciśnienia przepływającej cieczy w rurze oraz linie potencjału magnetycznego w chwili  $t=0,8s$

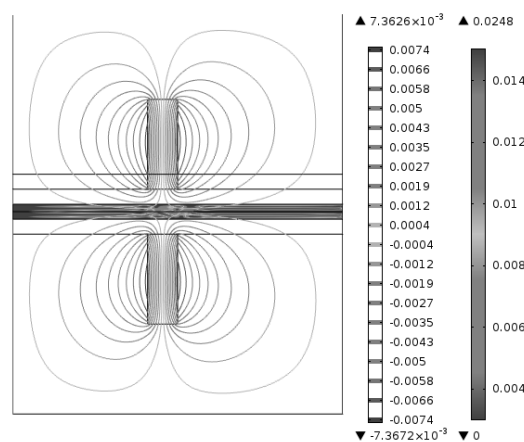


Rys. 8. Rozkład składowej  $x$  prędkości przepływającej cieczy oraz linie potencjału magnetycznego w chwili  $t=0,8s$





Rys. 9. Rozkład składowej y prędkości przepływającej cieczy oraz linie potencjału magnetycznego w chwili  $t=0,8s$



Rys. 10. Rozkład prędkości przepływającej cieczy w chwili  $t=0,8s$

### 3. Wnioski

Zaprezentowane obserwacje przepływającej cieczy o właściwościach paramagnetycznych w polu magnetycznym mogą być użyte w układach gdy potrzebne jest spowolnienie przepływu cieczy i wprowadzenie zawirowań. W przypadku gdyby ciecz nie była jednorodna, będą znajdowały się cząstki o różnych właściwościach magnetycznych, cząstki o większej podatności magnetycznej mogłyby aglomerować na ściankach naczyń w obszarze działania pola magnetycznego o największej wartości gradientu tego pola. Takie właściwości, można zastosować m.in. w medycynie. Wykorzystując paramagnetyczne właściwości leków, można wymusić za pomocą pola magnetycznego zwiększoną koncentrację czynnika leczącego w określonym miejscu np. tam gdzie jest nowotwór. Zwiększenie koncentracji leku w obszarze który należy leczyć, może polepszyć skuteczność leczenia. Jednocześnie może uchronić przed nadmiernym, niepożądanym oddziaływaniem leku na inne organy. Przedstawione właściwości cieczy w polu magnetycznym, a w szczególności zachowanie się krwi, może być wykorzystywane do leczenia np. przewlekłych bólów, niedokrwienia tkanek i gojenia się wrzodów [16].

### Literatura

- [1] Alexiou Ch., Arnold W., Klein R. J., et al.: Locoregional Cancer Treatment with Magnetic Drug Targeting Cancer Research 60, 2000, p. 6641-6648.
- [2] Avilés M., Chen H., Ebner A., et al.: In vitro study of ferromagnetic stents for implant assisted-magnetic drug targeting, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 311, Issue 1, 2007, p. 306-311.
- [3] Chen H., Ebner A., Bockenfeld D., et al.: A comprehensive in vitro investigation of a portable magnetic separator device for human blood detoxification, Physics in Medicine And Biology 52, 2007, p. 6053-6072.
- [4] Cieśla A.: Field distribution in separator's working space for various winding configuration, Przegląd Elektrotechniczny, 87 nr 7, 2011, s. 99-103.
- [5] Cieśla A.: Magnetic separation of kaolin clay using free helium superconducting magnet, Przegląd Elektrotechniczny, 88 nr 12b, 2012, s. 50-53.
- [6] Cieśla A.: Superconducting magnet of free helium type used for the filtration in environmental processing, Przegląd Elektrotechniczny, 86, nr 5, 2010, s. 181-184.
- [7] Furlani E. P.: Magnetophoretic separation of blood cells at the microscale, Journal of Physics D: Applied Physics 40, 2007, p. 1313-1319.
- [8] Ganguly R., Gaiand A., et al.: Analyzing ferrofluid transport for magnetic drug targeting Journal of Magnetism and Magnetic Materials 289, 2005, p. 331-334.
- [9] Haverkort J. W., Kenjeres S., Kleijn C. R.: Computational Simulations of Magnetic Particle Capture in Arterial Flows, Annals of Biomedical Engineering 2009.
- [10] Haverkort J. W., Kenjeres S., Kleijn C. R.: Magnetic particle motion in a Poiseuille flow Physical Review E 80, 016302, 2009.
- [11] Johannsen M., Thiesen B., Jordan A.: Magnetic fluid hyperthermia (MFH) reduces prostate cancer growth in the orthotopic Dunning R3327 rat model The Prostate 64, 3, 2005, p. 283-292.
- [12] Kakihara Y., Fukunishi T., Takeda S., Nishijima S., Nakahira A.: Superconducting high gradient magnetic separation for purification of wastewater from paper factory Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 14, Issue: 2, 2004, p. 1565 - 1567.
- [13] Laurent S., Dutz S., Häfeli U., Mahmoudi M.: Magnetic fluid hyperthermia: Focus on superparamagnetic iron oxide nanoparticles Advances in Colloid and Interface Science Volume 166, Issues 1-2, 2011, p. 8-23.
- [14] Lübke A. S. et al.: Preclinical Experiences with Magnetic Drug Targeting: Tolerance and Efficacy Cancer Research 56, 1996, p. 4694-4701.
- [15] Nishijima S., Takeda S., Mishima F., et al.: A Study of Magnetic Drug Delivery System Using Bulk High Temperature Superconducting Magnet IEEE Transactions on applied superconductivity, vol. 18, no. 2, 2008.
- [16] Odenbach S.: Recent progress in magnetic fluid research, Journal Of Physics: Condensed Matter 16, 2004, p. 1135-1150.
- [17] Pamme N.: Continuous flow separations in microfluidic devices Lab Chip, 2007, 7, p. 1644-1659.
- [18] Pamme N.: Magnetism and microfluidics Lab Chip, 2006, 6, p. 24-38.
- [19] Skowron M.: Modelowanie i analiza pola magnetycznego w nietypowych układach współrzędnych, Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska, 1, 2013, s. 47-48.
- [20] Tartaj P., Puerto Morales M., Veintemillas-Verdaguer S., Gonzalez-Carreño T., Serna C. J.: The preparation of magnetic nanoparticles for applications in biomedicine, Journal of Physics D: Applied Physics 36, 2003, p. 182-197.
- [21] Vander Sloten J., Verdonck P., Nyssen M., Hauelsen J.: Optimizing drug delivery using non-uniform magnetic fields: a numerical study ECIFMBE 2008, IFMBE Proceedings 22, 2008, p. 2623-2627.

**Mateusz Krawczyk**  
e-mail: mateusz.krawczyk6@gmail.com

Student Elektrotechniki na Wydziale Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo – Hutniczej. Członek koła naukowego elektroenergetyków „Piorun”. W pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami oddziaływania pola magnetycznego na materię.



**Dr inż. Mikołaj Skowron**  
e-mail: mskowron@agh.edu.pl

Ukończył studia magisterskie w 2004 r. w Akademii Górniczo – Hutniczej na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki na kierunku Elektrotechnika o specjalności Elektroenergetyka. W 2011 r. obronił pracę doktorską na tym samym Wydziale. Od września 2011r. jest adiunktem w Katedrze Elektrotechniki i Elektroenergetyki. W pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami wpływu pola magnetycznego na organizmy żywe oraz zastosowaniem nadprzewodników.



otrzymano/received: 22.02.2014

przyjęto do druku/accepted: 30.03.2014

## DEVICE FOR STUDY OF DYNAMIC SURFACE TENSION OF AQUEOUS SURFACTANT SOLUTIONS

Igor Kisil, Victor Bilischuk, Yuri Kuchirka, Olga Barna

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Department of Methods and Devices of Quality Control and Product Certifications

**Abstract.** Theoretical bases of fixed spinning drop method for the study of dynamic interfacial tension of aqueous surfactant solutions on the border with other immiscible liquids in water are considered. The block diagram and appearance of the device, which implements the method of fixed spinning drop are given. There are provided the results of research of the dynamic interfacial tension between the base oil and aqueous solutions of surfactants Tipol and Savenol of different concentrations used for intensification of oil and gas extraction.

**Keywords:** spinning drop method, surfactant, dynamic interfacial tension, aqueous solution, device

### PRZYRZĄD DO BADANIA DYNAMICZNEGO NAPIĘCIA POWIERZCHNIOWEGO WODNYCH ROZTWORÓW SUBSTANCJI POWIERZCHNIOWO CZYNNYCH

**Streszczenie.** Rozpatrzono podstawy teoretyczne metody stałych kropli wirujących w badaniu międzyfazowego dynamicznego napięcia wodnych roztworów środków powierzchniowych czynnych na granicy ich zetknięcia z innymi płynami. Zaprezentowano schemat blokowy i wygląd urządzenia wykorzystującego prezentowaną metodę oraz wyniki badań dynamicznego napięcia międzyfazowego wodnych roztworów Tipolu i Savenolu dla różnych koncentracji stężenia używanych do intensyfikacji wydobywania ropy naftowej i gazu.

**Słowa kluczowe:** metoda kropli wirujących, substancja powierzchniowo czynna, dynamiczne napięcie na granicy faz, roztwór wodny, przyrząd

### Introduction

The essence of the classical spinning drop (SD) method for measuring interfacial tension (IT)  $\sigma$  at the interface of two immiscible liquids is measuring of the appropriate size of easier liquid drop that is placed in a horizontal tube that rotates around its axis [2, 7]. Thus IT  $\sigma$  is calculated as follows [2]:

$$\sigma = \Delta\rho\omega^2 R^3 / 4, \quad (1)$$

where  $\Delta\rho$  – difference of contacting liquids densities,  $\omega$  – angular velocity,  $R$  – largest radius SD.

Method SD is the one of known methods for measuring low values IT (up to 1 mN/m) [7], that may occur on the interface between aqueous surfactants solutions (SS) – base oil in oil and gas extraction technology [6], production of surfactants [1] etc.

However, the dependence (1) has already methodological error of about 1%, even assuming that the length of SD is greater than its radius  $R$  in four times or more [2]. In addition the drop constantly moves along the horizontal axis of the rotating glass tube and measurement of  $R$  is made only in one point of SD. The situation influences on the accuracy of the measurement  $\sigma$ .

Note that IT  $\sigma$  decreases during the time  $t$  of the interface presence between the aqueous SS – other studied liquid phases. Such dependence IT  $\sigma$  vs.  $t$  is called dynamic IT (DIT) and the result of its study makes possible to determine the time and concentration of surfactant in some technological process. It effects on the quality of the process.

The reservations about the classical method of SD significantly complicate receipt of the DIT at the border of two immiscible liquids and lead to significant errors in the results of this study. The purpose of this paper is to substantiate the modified SD method for study the DIT, namely fixed spinning drop method (FSD).

### 1. Theoretical part

The FSD method is that in a sealed horizontal glass tube with a heavier fluid (aqueous surfactant solution) is injected an easier drop of liquid. The one end of the drop is fixed to the surface of the cork tube. Then the tube is put in rotation mode around of its horizontal axis and the full or partial contour of the FSD is experimentally obtained.

Calculated theoretical contour of the FSD should vary with the minimal deviation from the experimental contour. It is assumed, that parameters of theoretically calculated contour (including rotating capillary constant  $c = \sqrt[3]{\sigma/\Delta\rho\omega^2}$ ) correspond to the parameters of experimental contour. Therefore the IT calculated

using of theoretical contour is equal to the IT between the studied liquids with known values of  $\omega$  and  $\Delta\rho$ .

The SD is fixed by its one side on the end of corresponding cork. Moreover, the wetting angle of the cork surface by oil in the medium of aqueous surfactant should be equal zero.

In the proposed method, the FSD is formed in the process of tube rotating with heavier fluid (fig. 1). Glass tube 1 is divided into two parts by cork 3 with a hole. The tube is filled by heavier fluid 2 and is rotated with frequency  $\omega$ . The drop 4 is injected through the hole in the cork 3 into rotated tube with the liquid 2, which is heavy that the liquid of drop 4. One end of drop 4 is fixed on the front wall of cork 3. This makes impossible drop moving along the axis of rotation tube under the influence of destabilizing factors. In rotation of the strictly horizontal tube the FSD 4 takes the position along the axis of rotation of the tube 1. The edge of the drop is held on a solid front surface of cork due to the forces of adhesion. In such case the spinning drop of the lighter liquid has shape like as shown on Fig. 1.

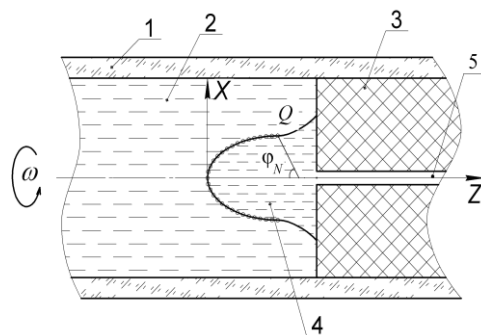


Fig. 1. The shape of FSD of lighter liquid on a solid end of cork inside the rotating tube with heavier liquid: glass tube (1); heavier liquid (2); cork (3); drop of base oil (4); hole (5)

Determination of the IT on the border of two liquids  $\sigma$  is done by following basic procedures:

- getting a set of coordinates of the FSD's contour from of its experimental photography;
- calculation of the set of theoretical contours of FSD using of some dependencies, taking into account known physical, chemical, and other parameters which effect on these contours;
- development of similarity criteria for theoretical and experimental obtained contours of the FSD;
- choosing theoretical contour which has the smallest deviation from the experimental contour of the FSD.

Calculation of theoretical contours of FSD is based on the following system of differential equations solution [5]:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dl_c} = K_c - \frac{x_c^2}{2} - \frac{\sin \varphi}{x_c}, \\ \frac{dx_c}{dl} = \cos \varphi, \\ \frac{dz_c}{dl} = \sin \varphi, \end{cases} \quad (2)$$

where  $x_c = x_1/c$ ,  $z_c = z_1/c$  – are the dimensionless points of coordinates of theoretical contours of the FSD;  $x_1, z_1$  – are the dimension points of coordinates of theoretical contour of the FSD;  $K_c = K_1 \cdot c$ ,  $K_1$  – are dimensionless and dimension surface curvatures of the FSD on its apex;  $l_c = l_1/c$ ,  $l_1$  – are dimensionless and dimension lengths of the arches of the meridian profile of FSD from its apex to the point on the FSD surface;  $\varphi$  – is the angle between the normal to the surface of FSD and the axis Z.

The solution of the system (2) is provided by one of the numerical methods (of Runge-Kutta and Adams–Moulton). This method allows to get values  $x_c$  and  $z_c$  for different values of angle  $\varphi$  and given contour shape parameter  $K_c$  corresponding to experimentally obtained contour of the FSD. While measuring the IT  $\sigma$  by FSD method,  $K_c$  parameter can vary in a range from 0 to  $3/\sqrt[3]{4}$ .

It should be noted that we calculate the real coordinates ( $x, z$ ) of the FSD contour taking into account the optical zoom factor  $M$ , which is created by glass tube with a test liquid, thus:

$$\begin{cases} x = \frac{x_v}{M(x_v)}, \\ z = z_v, \end{cases} \quad (3)$$

where  $x_v, z_v$  – are the coordinates of theoretical contours of spinning drop obtained from its experimental image. The dependence of  $M(x_v)$  is calculated according to the procedure described in [4].

Calculation of theoretical contours of the FSD is performed by iterative method of “golden section” [3]. In this case two theoretical contours are calculated with given the initial values of curvature  $K_c$  for each type of contour:

$$K_{c1} = B - 0,61(B - A), K_{c2} = A + 0,61(B - A), \quad (4)$$

where  $A$  and  $B$  are the limits of change  $K_c$  on each iteration.

On the first iteration value  $A$  is equal to 1, and  $B$  is equal to  $3/\sqrt[3]{4}$ . During following calculation of the theoretical contours, values of  $A$  and  $B$  should be changed in order to get theoretical contour that is the closest to the experimental one. These calculated theoretical contours are compared with experimental contour by the method of calculating the mean arithmetic value of the differences parameters  $Q$  for each theoretical contour as follows:

$$Q_{(1,2)} = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{x_i}{z_i} - \frac{x_{(1,2)j}}{z_{(1,2)j}} \right|}{N}, \quad (5)$$

where  $i, j$  are the points numbers of experimental and theoretical contours respectively,  $i=1 \div N$ ,  $j=1 \div T$ ;  $N$  is the number of experimental points;  $T$  is the number of theoretical contour points. Indices (1, 2) indicate that the couple of coordinates are used for the 1st and 2nd theoretically calculated contours of FSD.

Parameter  $Q$  is calculated only for points for which the condition is valid:

$$\frac{z_{1i}}{z_{1N}} - \frac{z_j}{z_T} \rightarrow \min. \quad (6)$$

Using (5) we calculate the parameters of deviations of two theoretical contours from the experimental contour  $Q_1$  and  $Q_2$ . The values  $K_{c1}$  and  $K_{c2}$  are calculated as follows:

$$B = K_{c2}, K_{c2} = K_{c1}, K_{c1} = A + 0,3(B - A), \text{ if } Q_1 < Q_2, \quad (7)$$

$$A = K_{c1}, K_{c1} = K_{c2}, K_{c2} = A + 0,6(B - A), \text{ if } Q_1 > Q_2. \quad (8)$$

The procedure of calculating and comparing theoretical contours of fixed spinning drop with the experimental contour is repeated till the parameter  $Q$  reaches its minimal value.

The arithmetic average of interfacial tension for 10 points of the spinning drop contour is recommended to be taken as IT calculation result:

$$\sigma = \frac{\Delta \rho \omega^2}{10} \sum_{i=1}^{10} \left( \frac{x_{Nt}}{x_{cTi}} \right)^3, \quad (9)$$

where  $x_{Nt}$  and  $x_{cTi}$  – are points of corresponding experimental and theoretical contours of FSD, which are defined on profiles of these drops at a distance  $(0,6 \div 0,8)z_N$  from their apexes for the same values of the angle  $\varphi$ ;  $z_N$  – is the total length of experimental or theoretical contour.

In order to study the DIT of contacting liquids, described above the measuring procedure for IT is repeated within the required time interval.

The functional diagram of the device VMN-2, which realizes the proposed method of FSD is shown in Fig. 2.

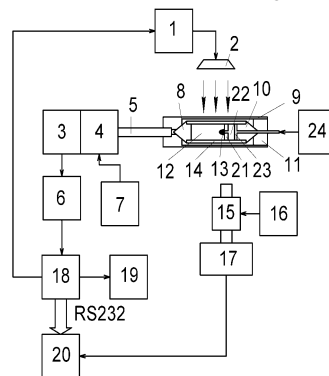


Fig. 2. Functional diagram of the device VMN-2: 1 – electronic key; 2 – illuminator; 3 – rotation sensor; 4 – engine; 5 – shaft of the engine; 6 – Schmitt trigger; 7 – engine control unit; 8, 10 – corks; 9 – patron; 11 – screw; 12 – heavier liquid; 13 – a drop of lighter liquid; 14 – a glass tube; 15 – lens; 16 – focusing unit; 17 – camera; 18 – microcontroller; 19 – display; 20 – PC; 21 – cork with a hole; 22 – lighter fluid; 23 – piston; 24 – unit of displacement piston rod

## 2. Experimental part

External view of the device VMN-2 for the study DIT, is shown in Fig. 3.

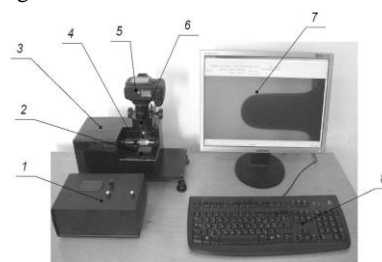


Fig. 3. The external view of device VMN-2: 1 – electronic unit; 2 – lighting unit; 3 – mechanical unit; 4 – patron; 5 – camera; 6 – focusing unit; 7 – PC monitor; 8 – keyboard

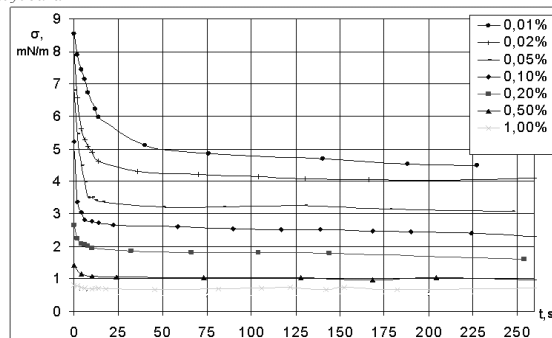


Fig. 4a. Research results of DIT of aqueous solutions of Tipol with different concentrations on border with the base oil of Perekopivsk's field of company "Okhtyrkanafogas"

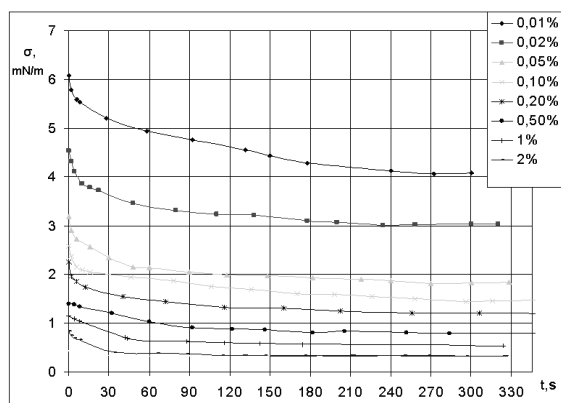


Fig. 4b. Research results of DIT of aqueous solutions of Savenol with different concentrations on border with the base oil of Perekopivsk's field of company "Okhtyrkanaftegaz"

The testing of the VMN-2 device was conducted by research of the DIT at the interface of aqueous solutions of Tipol and Savenol with the base oil from Perekopivsk's field by oil and gas extraction company "Okhtyrkanaftegaz".

The results of research of DIT of those SS for different concentrations are shown on Fig. 4.

### 3. Discussion

The time dependences of IT (Fig. 4) can be used to estimate the time required to achieve the desired value of tension at the interface of aqueous SS - investigated base oil. It allows more efficiently using surfactants in the relevant technical process for intensification of oil and gas extraction. As results show, the time required to establish equilibrium value of interfacial tension depends on the type of surfactant and its concentration in the aqueous solution and properties of the contacting base oil. For aqueous SS of low concentrations (0.01 ÷ 0.05)% time to set the equilibrium IT is 150 ÷ 300 s, and for solutions of higher concentration (1 ÷ 5)% it is equal 10 ÷ 60 s.

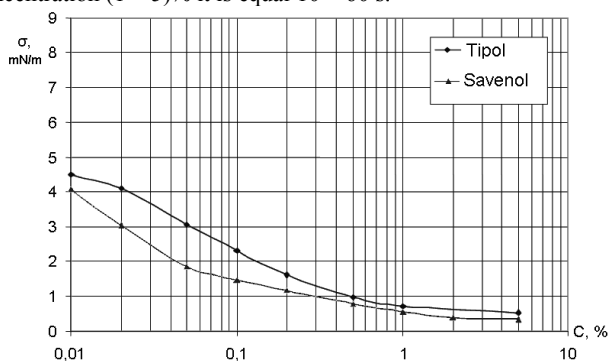


Fig. 5. Dependence of the equilibrium interfacial tension between aqueous solutions of Tipol and Savenol and the base oil of Perekopivsk's field of company "Okhtyrkanaftegaz" on the concentration of surfactant in solution

Based on the results shown above (Fig. 4) there were graphically obtained dependencies of equilibrium IT of aqueous SS on their concentration, which are shown on Fig. 5. These dependencies are used to evaluate the surface activity of the investigated surfactants and to determine the optimal concentration of surfactants in solution. As shown on Fig. 5, equilibrium value of IT of Savenol is lower for the same concentration Tipol and Savenol. It indicates higher surface activity of Savenol.

### 4. Conclusions

The method of fixed spinning drop for interfacial tension determination at the interface between two liquids has been proposed. This method can be used for the optimal choosing of type of surfactant and its concentration in aqueous solution for

various technological processes. Using the method of fixed spinning drop and the device that implements this method, dynamic interfacial tension of aqueous surfactants solutions has been studied at various concentrations, at the interface with the base oil of Perekopivsk field. Experimental studies have shown that the surfactant Savenol has higher surface activity in comparison with the surfactant Tipol.

### References

- [1] Abramson A.A.: Surface phenomena and surfactants, Chemistry, Leningrad 1984.
- [2] Drelich J., Fang, Ch., White C. I., Measurement of Interfacial tension in fluid-fluid systems. Encyclopedia of Surface and Colloid Science, A. Hubbard, Ed., 3152-3166. CRC Press (2002).
- [3] Kiefer J.: Sequential minimax search for a maximum. Proceedings of the American Mathematical Society, 4/1953, p. 502-506.
- [4] Kisil I., Bilischuk V.: Determination optical system magnification in the measurement of the interfacial tension by rotating drop method. Proceedings of the Luhansk branch of the International Academy of Informatization, 19/2009, p. 82-87.
- [5] Kisil R., Chekhovskyy S.: The improved method and device for measuring the interfacial tension by rotating drop method. Methods and devices of quality control, 4/1999, p. 36-39.
- [6] Mikhailuk V.D.: Use of surfactants in the process of oil production in the fields of OJSC "UkrNafta", Galician printing PLUS, Ivano-Frankivsk, 2009.
- [7] Rusanov A. I., Prokhorov V. A. Interfacial Tensiometry, Elsevier, Amsterdam 1996.

**Prof. Ph.D., Igor Kisil**  
e-mail: zarichna@nunge.edu.ua

Head of the Department of Methods and Devices of Quality Control and Product Certification, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (IFNTUOG), Ukraine.

Igor Kisil is Academician of the Ukrainian Oil and Gas Academy, State Prize of Ukraine in Science and Technology in 2010, the author of about 240 scientific papers and one monograph.

Research interests: environmental impacts of shale gas extraction, including hydraulic fracturing; measuring surface tension of surfactants solutions.



**Ph.D. Victor Bilischuk**  
e-mail: zarichna@nunge.edu.ua

Lecturer of the Department of Methods and Devices of Quality Control and Product Certification, IFNTUOG, Ukraine.

Research interests: measuring interfacial tension of different liquids; mathematical modeling of physical processes; collection, processing and interpretation of measured data, electronics.



**Ph.D. Yuriy Kuchirka**  
e-mail: kuchirka.wsins@gmail.com

Assistant of Department of methods and instruments of quality control and product certification, IFNTUOG, Ukraine

Research interests: environmental impacts of shale gas extraction, including hydraulic fracturing; development of automatic measuring instruments; mathematical modeling of physical processes; measuring surface tension of surfactants solutions; collection, processing and interpretation of measured data; measuring the characteristics of ionizing radiation and nuclear constants.



**M.Sc. Olga Barna**  
e-mail: osbarna@gmail.com

Ph.D. student of the Department of Methods and Devices of Quality Control and Product Certification, IFNTUOG, Ukraine.

Research interests: measuring surface tension of surfactants solutions, environmental impacts of oil and gas extraction; mathematical modeling of physical processes; collection, processing and interpretation of measured data.





# INFORMATION SYSTEM FOR A FUZZY COGNITIVE ANALYSIS AND MODELING

Alexander Gozhyi, Irina Kalinina

Petro Mohyla Black Sea State University, Department of Information Technologies and Program Systems

**Abstract.** The paper presents the information system for the cognitive analysis and modeling based on fuzzy cognitive map. The system allows to analyze the information of the experts to model complex systems and processes. Describes the structure of the system and the features of the functioning and implementation.

**Keywords:** fuzzy cognitive map, the cognitive analysis, the concept

## SYSTEM INFORMACJI DO ANALIZY I MODELOWANIA POZNAWCZEGO

**Streszczenie.** Przedstawiono system informacji do analizy i modelowania poznawczego opartego na rozmytej mapie poznawczej. System pozwala na analizę informacji ekspertów w celu modelowania złożonych systemów i procesów. Opisano strukturę systemu oraz cechy funkcjonowania i realizacji.

**Słowa kluczowe:** rozmyta mapa poznawcza, analiza poznawcza, pomysł

### Introduction

Development of methods of cognitive analysis and modeling is substantially caused by need of research of semistructured problems, systems and situations which include a set of elements of the various nature, and dependences between which elements carry both quantitative, and qualitative character. Cognitive approach to research of poorly structured situations was offered by R. Axelrod and F. Roberts [1, 9] because of limitation of applicability of exact models for creation of models of semistructured systems and research of behavior of studied system, preparation and adoption of administrative decisions on permission of semistructured problems and the situations, arising during the functioning and development of such systems. [4, 6, 7]. At such approach at the heart of creation of models of semistructured system or a situation the subjective understanding and idea of the subject of management of parameters of operated system and communications between them lies. The cognitive map as an image of internal representations of the subject serves as the tool for formation and specification of a hypothesis of functioning of studied object which is considered as difficult system. To understand and analyse behavior of difficult system, it is expedient to construct the block diagram cause – follow relationship. The cognitive map is especially useful to the analysis of action of the hardly formalizable factors which measurement often is very complex problem in the analysis of difficult systems. Analyzing personal and others' cognitive maps, the researcher can quickly deepen understanding of a problem, improve quality and validity of made decisions.

### 1. Exposition

Now some types of the cognitive analysis on the basis of cognitive maps which differ with ways a problem of cognitive maps and methods of their analysis [2, 3, 4, 8] are known.

The most widespread types of cognitive maps:

- Sign cognitive maps;
- Kosko's fuzzy cognitive maps;
- Kosko's modified fuzzy cognitive maps;
- fuzzy relational cognitive maps;
- fuzzy productional cognitive maps;
- Silov's fuzzy cognitive maps.

All types of cognitive maps are given in the form of a directed graph and represent the modeled system as a set of concepts that reflect the system variables are related by cause - follow relationship of exposure. These relationships can be positive, negative or neutral concepts characterizing the corresponding impact on each other. Thus it is possible to analyze the entire system, and changing the input parameters to solve and understand how and what kind of concept will be most affected by the system and other concepts.

The goal of this work is to develop a modeling system implements all types of fuzzy cognitive maps. As a result of the analysis of algorithms and techniques to support strategic decision-making based on fuzzy cognitive map has been designed and developed a software framework for analysis and modeling of complex processes or systems based on a variety of fuzzy cognitive map. The main problem is solved by the system is to support the construction of fuzzy cognitive map correctly describing a given subject area or situation, carrying out statistical modeling based on the obtained fuzzy cognitive map, the generation of alternatives (scenarios, plans) based on static analysis and modeling.

Figure 1 shows the structure of the software framework.

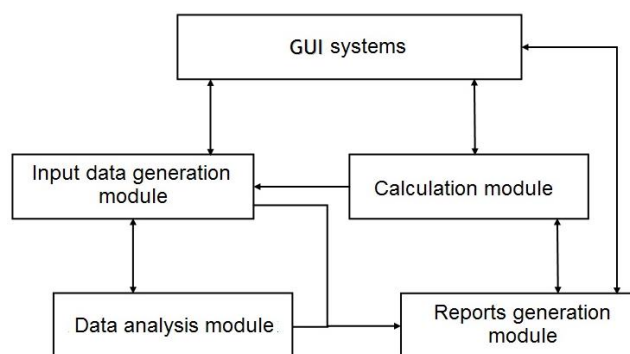


Fig. 1. The structure of the software framework

The software framework consists of four main modules:

- Input data generation module;
- Data analysis module;
- Calculation module;
- Reports generations module.

#### Input data generation module

The module provides the possibility of building a fuzzy cognitive models. To ensure the efficiency of the process of creating and editing the FCM (fuzzy cognitive map) and to reduce the degree of subjectivity of experts implement methods of indirect jobs weight of the connections in the FCM and provides the ability to direct the task of weight with the help of the adjacency matrix or a visual representation of the FCM in the form of a graph.

#### Data analysis module

This module implements algorithms for static and dynamic analysis FCM. This module incorporates a full function of the static modeling based on FCM using fuzzy causal algebra. To present the results of modeling an analyst uses the mode with the maximum information content, as well as a visual mode.

### Calculation module

The module performs the calculation and visualization of concepts (the construction of the graph), monitoring the values of concepts, charting the interaction of concepts, calculation of the values of consonance and dissonance.

### Reports generation module

The module performs all the calculations and reporting on the results of analysis and simulation.

The program was written in the Java, using the core of JUNG, to use a large built-in Java API, as well as other existing third-party Java libraries. There was created a separate library, which provides the general and extensible means for modeling, analysis and visualization of data that can be represented as a graph or network. Architecture library of visual representations of graphs is designed to support a variety of representations of entities and their relations, such as directed and undirected graphs, multi-modal graphs and hypergraphs. This facilitates the creation of analytic tools for complex data sets that can examine the relationship between the objects and the metadata attached to each object and their relationships. The JUNG library and the kernel includes a number of algorithms for graph theory, data mining and analysis, such as clustering algorithms, decomposition, optimization, the generation of random graphs, statistical analysis

and calculation of distances in the network, streaming algorithms. JUNG kernel makes it easy to create tools for the interactive exploration of different graph models.

Figure 2 shows the diagram classes of the software framework.

For example, consider the simple of the cognitive model the impact of industrial emissions on the population of the city. Identification of concepts:

BK - harmful substances;  
CM - direction of the wind;  
SS - industrial facility;  
MK - state treatment facilities;  
SV - the city's population;  
MZ - modernization of treatment facilities;  
CP – the public health.

Cognitive map is presented in figure 3. Figure 3 shows an example of constructing fuzzy cognitive map for the problem of ecological forecasting. Figure 4 shows a fuzzy cognitive map in the form of a graph (Data analysis module).

Figure 4 shows the transitive closed cognitive matrix for the representation of fuzzy cognitive map (Calculation module).

Figure 5 shows the results of calculations (system indicators).

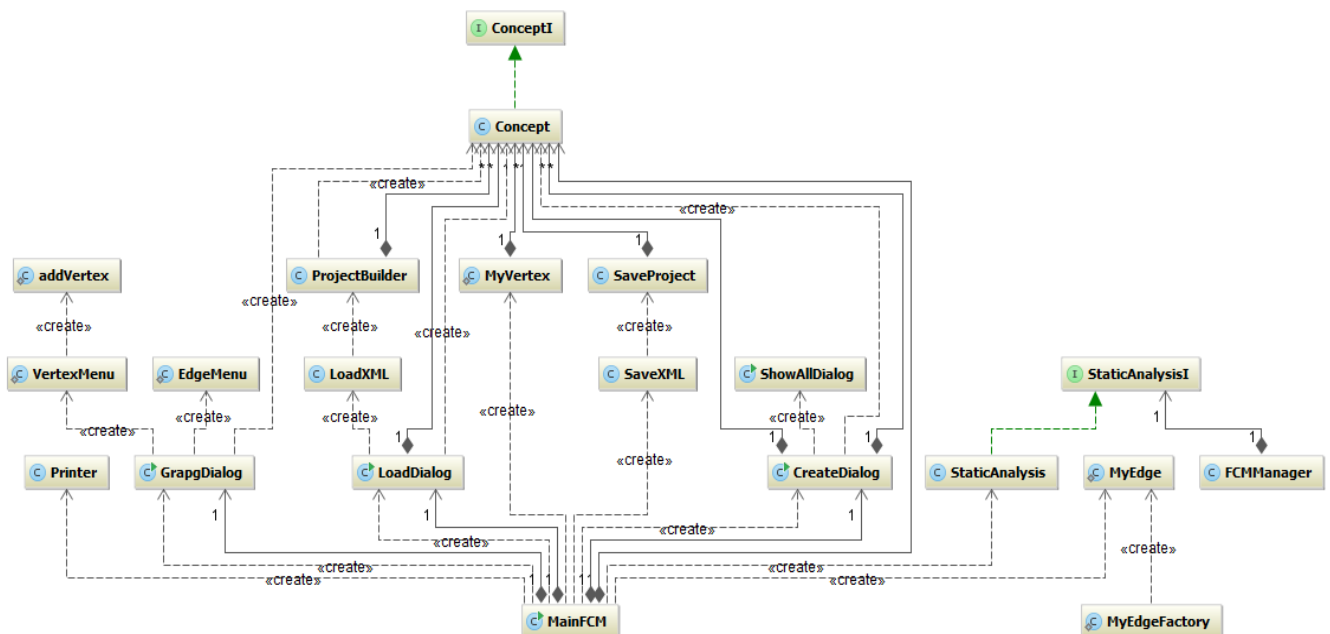


Fig. 2. The diagram classes of the software framework

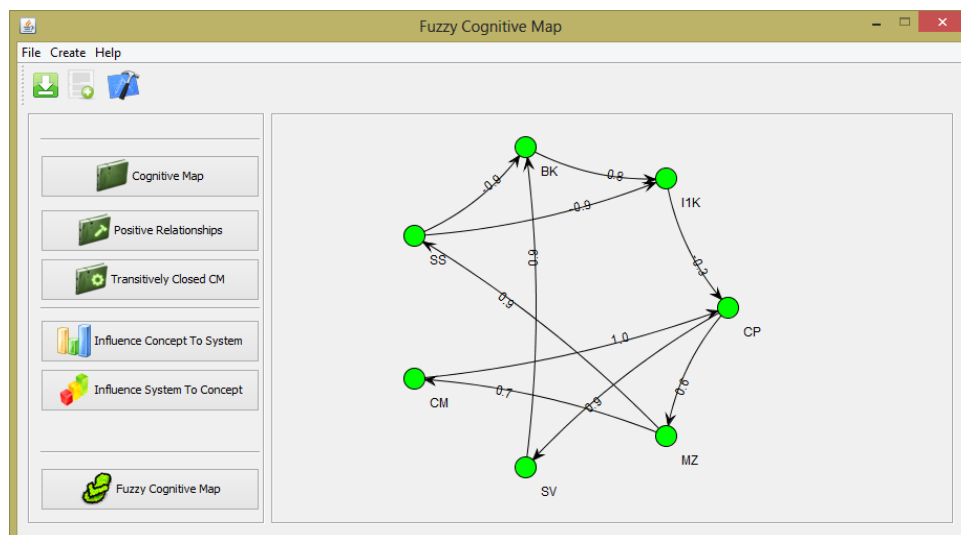


Fig. 3. The fuzzy cognitive map

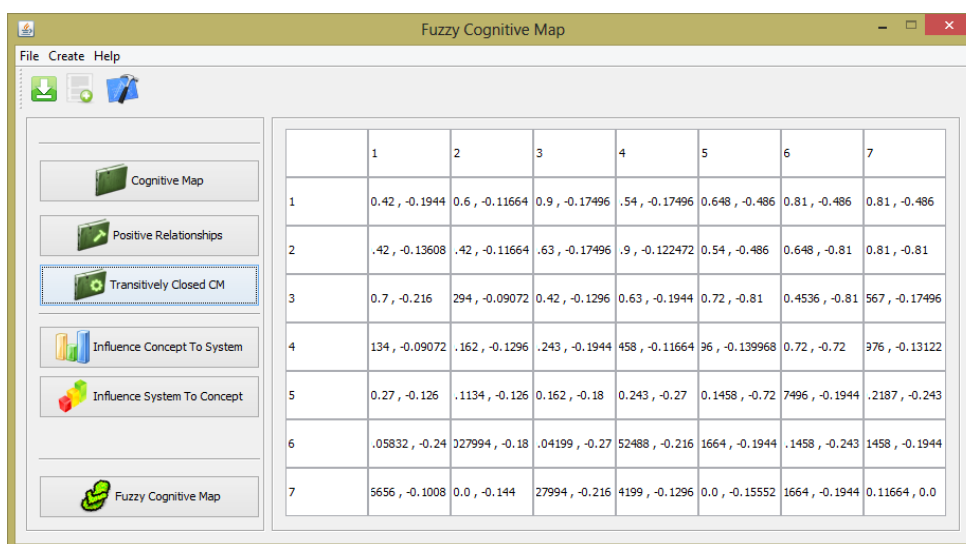


Fig. 4. The transitive closed cognitive matrix

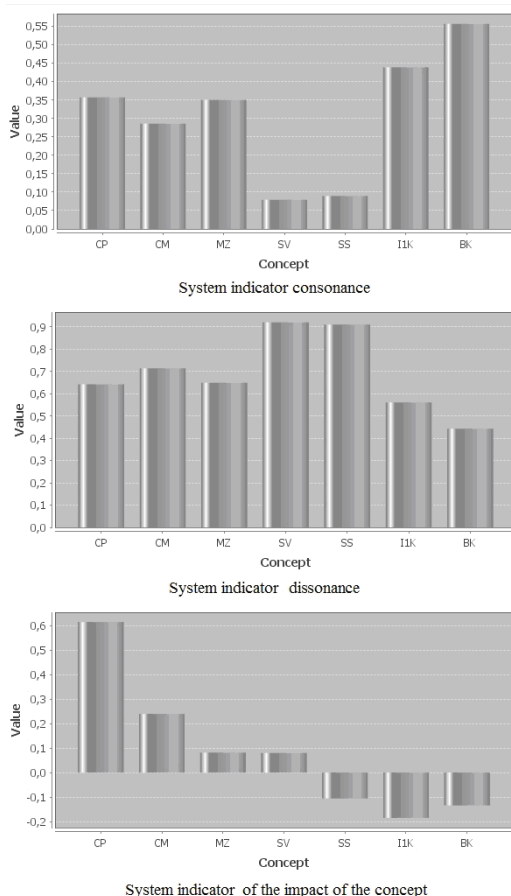


Fig. 5. The results of calculations (system indicators)

Figure 5 shows the results of calculations of system performance that set key indicators problem to be solved.

## Conclusion

The developed program can be used by experts and analysts in all subject areas. Their main task is, on the basis of domain knowledge to identify the main factors influencing the behavior of the system, and establish a connection between them. The task of analysts is to provide advice to decision-making. They work directly with the system, and their requirements are taken into account by analysts in the dynamic modeling. The program is used to solve the problems of dynamic planning and decision-making in the field of ecology and industry.

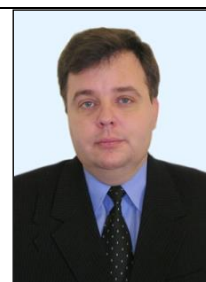
## References

- [1] Axelrod, R.: The Structure of Decision: Cognitive Maps of Political Elites, Princeton University Press, 1976.
- [2] Carlsson C., Fuller R.: Adaptive fuzzy cognitive maps for hyperknowledge representation in strategy formation process, Budapest, 1996
- [3] Kosko B.: Fuzzy Cognitive Maps, International Journal of Man- Machine Studies, Vol. 1, 1986, p. 65-75.
- [4] Kosko B.: Fuzzy systems as universal approximators, IEEE Transactions on Computers. Vol. 43, No. 11, 1994, p. 1329-1333.
- [5] Papageorgiou E.I., Markinos, Ath. Gemtos, Th.: Application of fuzzy cognitivemaps for cotton yield management in precision far-ming, Expert Systems with Applications, vol. 36, no.10, 2009, pp. 12399-12413.
- [6] Papageorgiou E.I., Stylios C.D.: Fuzzy Cognitive Maps, in book: Handbook of Granular Computing, editors: Witold Pedrycz, Andrzej Skowron and Vladik Kreinovich, Chapter 34, John Wiley & Sons, Ltd, 2008, pp. 755-775.
- [7] Pedrych W.: Relevancy of fuzzy models. Information Sciences. V. 52. 1990, p. 285-302.
- [8] Rajaram T., A. Das.: Modeling of interactions among sustainability components of an agro-ecosystem using local know-ledge through cognitive mapping and fuzzy inference system, Expert Systems with Applications, vol. 37, no. 2, 2009, pp. 1734-1744.
- [9] Roberts F.: Dyskretnye matematicheskie modeli s prilozheniyami k socialnym biologicheskim i ekologicheskim zadacham. Nauka, 1986.

### Ph.D. Alexander Gozhyi

e-mail: mailto:alex\_daos@mail.ru

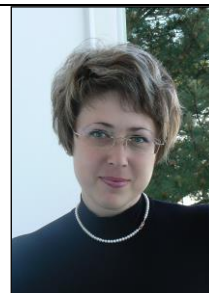
Associate professor, Ph.D., in 1994 defended Ph.D. thesis "Application of mathematical methods in scientific research." Dean of Faculty of Computer Science at Petro Mohyla Black Sea State University. Currently his research interests include multicriteria optimization, functional programming, fundamentals of Artificial Intelligence systems, theory of dynamical planning



### Ph.D. Irina Kalinina

e-mail: kio1612@mail.ru

Associate professor, Ph.D., in 1997 defended Ph.D. thesis "Geometric modeling flow turbomachinery parts" Currently his research interests include gtimetric modeling, fundamentals of Artificial Intelligence systems, theory of decision making.



## MODELING AND EVALUATION OF PROJECT RISKS IN MULTI-PROJECT ENVIRONMENT

Vasyl Lytvyn, Ihor Rishnyak

Lviv Polytechnic National University, ISN Department

**Abstract.** The article describes risk model of the project that operates in the multi-project environment. A formal assessment of project risks was presented. Approaches to risk assessment on various criteria are given.

**Keywords:** project management, project risk, risk model, multi-project environment, risk assessment

### MODELOWANIE I OCENA RYZYKA PROJEKTÓW W ŚRODOWISKU WIELOPROJEKTOWYM

**Streszczenie.** W artykule opisano model ryzyka projektu, który funkcjonuje w środowisku wieloprojektowym. Przedstawiono formalną ocenę ryzyka projektów. Rozpatrzono podejścia do oceny ryzyka wg. różnych kryteriów.

**Słowa kluczowe:** zarządzanie projektem, ryzyko projektu, model ryzyka, środowisko wieloprojektowe, ocena ryzyka

### Introduction

The goal is to identify risk modeling algorithm for optimal decision making, adequate specific situation. This aspect can be seen as static and dynamic models, which in turn describe deterministic or stochastic informational situation accordingly. However, with the project activity, when the decision affects a large number of factors, it is advisable to pay attention to dynamic models only.

Dynamic models suggest the presence of stochastic uncertainty and allow decision making in a shortage of information. Algorithm for dynamic model must include planned and adaptive parts. Adaptive approach involves an analysis of the planned phases, a quantitative assessment of reliability and risk rejection of actual values of the target. The algorithm of optimal decision making by a person deciding (PD) in this situation would be as follows (Fig. 1).

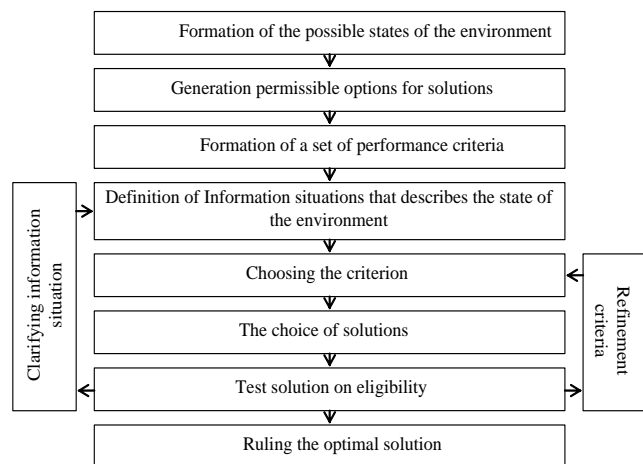


Fig. 1. Block diagram of dynamic risk model [1]

### 1. Formal model of risk

Coming from definition of the risk given in [3], the risk  $r$  depends on the following factors: decision which is accepted  $a$ , undefined situation  $s$ , in the conditions of which decision is made, and the expected result  $d_0$ :  $r = \langle a, s, d_0 \rangle$

We will consider correlation between these factors.

Let's assume that  $S$  is set of all possible situations;  $A$  is set of all possible decisions;  $D$  is set of all possible results. If in the situation  $s \in S$  decision  $a \in A$  is made, then this decision leads to the result  $d \in D$ , which essentially is the value of reflection  $\Psi$ :

$$\Psi: S \times A \rightarrow D$$

Thus on the set of results  $D$  such an order or relation of advantage is set, that for any pair of results  $d_1, d_2 \in D$  we can with

confidence say whether  $d_1$  takes advantage over  $d_2$ , or vice versa,  $d_2$  takes advantage above  $d_1$ , or they are equivalent.

If any decision  $a \in A$  causes the concrete expected result  $d_0 \in D$ , then for any pair of decisions  $a_1, a_2 \in A$  it would be possible to choose the best decision according to the expected result. But in reality except the decision, the result is also influenced by the vagueness of situation in the conditions under which the decision is made. Consequently there is the risk, that at decision making  $a \in A$  in the situation  $s \in S$  the achieved result  $d$  will differ from the expected one:  $\forall d, d_0 \in D: d \neq d_0$  [1].

The situation  $S$  appears as definite composition of the state of a multi-project environment (MPE)  $V$  and the state of project  $W$ , that are fixed in the definite moment of time  $t \in T$  [2, 4].

$$S = \{T; V; W\}$$

We will describe constituents  $V$  and  $W$  as the dynamic systems. We will represent their models as well-organized sets.

In particular for project status:

$$\langle T; W; X; Y; Q; H \rangle$$

where:  $T$  - set of moments of time;  $W$  - set of the states of project,  $X$  - set of input factors;  $Y$  - set of output factors;  $Q$  - operator of transitions, which reflects the mechanism of changes of the project state upon condition of external and internal indignations;  $H$  - operator of outputs, which describes the mechanism of forming of output factors as reaction to external and internal indignations;

Operators  $Q$  and  $H$  realize the reflection:

$$Q: T \times X \times W \rightarrow W$$

$$H: T \times X \times W \rightarrow Y$$

In Fig. 2 shows the structure of relations in the system «MPE-project- PD».

Factors influencing the project is the composition of several factors:  $X = X' \times X'' \times A$ .

They are formed from control (predicted) MPE action for the project  $X' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_i)$ , uncertain impacts on project  $X'' = (x''_1, x''_2, \dots, x''_j)$ , which can be active or passive, and making  $A = (a_1, a_2, \dots, a_i)$ , filed by the PD.

Under the active factors of influence on the external environment we imply conscious purposeful activity aimed at achievement of concrete changes in an external environment with the subsequent mediated influence on the state of project. The passive factors of influence are the natural changes of background of external environment. Influence of passive factors can be modelled by means of probabilistic methods which are fully described in literature. Influence of active components is determined by means of gaming simulation and strategy, taking into account the social, psychological, emotional and other personal aspects of the opponent. Feedback sets of factors influence the output  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_k)$ , which are produced during the project life cycle, the state of the MPE and solutions PD.



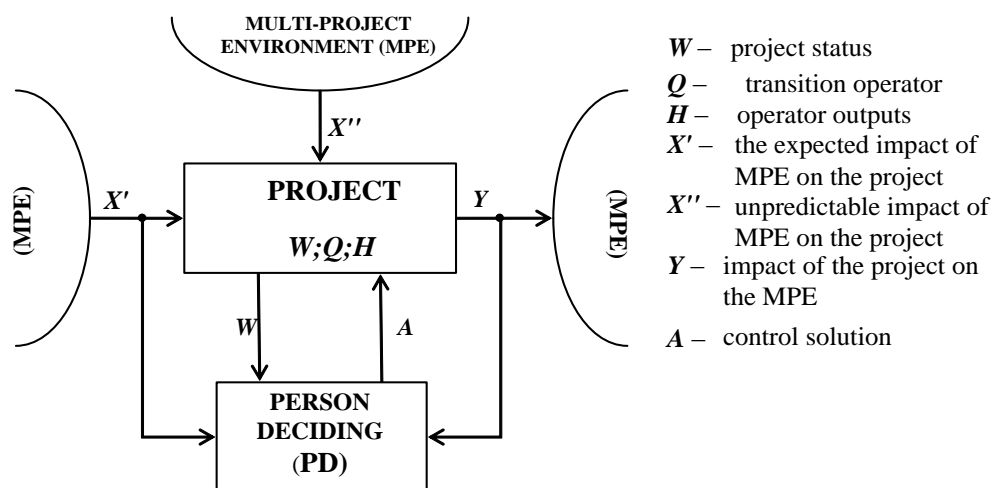


Fig. 2. The structure of relations in the system « MPE-project- PD »

## 2. Risk assessment

Risk assessment, in respect of which some decisions are made, depends on the certainty or uncertainty of the situation and the importance of the losses that arise in this situation [1, 3, 4, 5, 6].

The importance of losses is represented by two variables: the size of certain losses  $g \in G$  ( $G$  - set of all possible losses), which is actually the difference between the result and the expected value and  $\theta$ , which characterizes the individual's attitude to risk. The uncertainty of the situation depends on the uncertainty of parameters or factors that create this situation of uncertainty and the value of each parameter in particular. So the first step in risk assessment is the selection of the parameters defining the situation, change of the values of which radically changes the situation and influences the decision. This problem is usually solved by the method of analogy with the assistance of experts. The next step is solving uncertainty values of the assigned parameters. This problem should be addressed with the use of probabilistic methods and the factor of the potential situation should be included in the formalized description of the risk assessment  $p \in P$  ( $P$  - probability set of situations).

Formalized risk assessment model will be presented as [1, 6]:

$$O = \{P; G; \theta\},$$

where:  $O$  - risk assessment;  $P$  - probability of the set of situations;  $G$  - set of possible losses;  $\theta$  - individual attitude to risk.

We consider two approaches to risk assessment: the two and the three criteria. And for default values of these criteria we will use qualitative parameters (a situation that occurs most often). One specifies the metrics and quality of objectives and the criteria will determine  $\theta$  (individual's attitude to risk).

## 3. Evaluation according to the two criteria

Use assessment of the two factors: the probability of the risk event occurrence and the magnitude of losses due to occurrence of the event. In general it can be presented by the formula:

$$\text{RISK} = [\text{probability events}] * [\text{price losses}]$$

First, set the appropriate scale and metric. For example:

- Subjective scale of probability of risk events:
  - $A$  - an event almost never happens;
  - $B$  - event is rare;
  - $C$  - the likelihood of the event 50/50;
  - $D$  - an event likely to happen;
  - $E$  - an event almost certain to occur.

- Subjective severity scale losses:
  - Negligible* - impact events can be neglected;
  - Minor* - a minor impact;
  - Moderate* - moderate impact;
  - Serious* - impact of the serious consequences associated with significant costs;
  - Critical* - effect leads to critical consequences, can not solve the problem.
- Subjective scale of risk:
  - low risk (LR);
  - medium risk (MR);
  - high risk (HR).

The risk associated with a specific event, determined as (see Table 1).

Table 1. Defining risk based on the two criteria

		SERIOUSNESS OF THE CONSEQUENCES OF				
		<i>Negligible</i>	<i>Minor</i>	<i>Moderate</i>	<i>Serious</i>	<i>Critical</i>
CHANCE EVENTS	$A$	LR	LR	LR	MR	MR
	$B$	LR	LR	MR	MR	HR
	$C$	LR	MR	MR	MR	HR
	$D$	MR	MR	MR	HR	HR
	$E$	MR	HR	HR	HR	HR

Scale of risk factors can be defined differently and have a different number of gradations determined by individual's attitudes towards risk. However, it is important for the value scales to be clearly defined and equally perceived by all the participants of the peer review procedures.

## 4. Evaluation of the three criteria

Evaluation is carried out according to the following criteria: a threat is a set of conditions and factors that may have negative consequences, vulnerability is a definite weakness of the protection system, which makes it possible to implement the threat, the value of losses as a result of the threat.

In this case, the probability of the event depends on the level (probability) of the two components (threat and vulnerability) and therefore the risk assessment formula for the two criteria is transformed as follows:

$$\text{RISK} = [\text{probability of threat}] * [\text{probability vulnerability}] * [\text{price losses}]$$

For example, to determine the scale and grading criteria as follows:

- The level of threat and vulnerability levels:
  - low (L);
  - medium (M);
  - high (H).
- Subjective severity scale losses in the previous example:
  - Negligible* - impact events can be neglected;
  - Minor* - a minor impact;
  - Moderate* - moderate impact;
  - Serious* - impact of the serious consequences associated with significant costs;
  - Critical* - the effect leads to critical consequences, can not solve the problem.
- Determine the risk weight on a scale from 0 to 8 with defined risk levels:
  - 0 - no risk,
  - 1 - the risk is extremely small,
  - ...
  - ...
  - ...
  - 8 - the risk is extremely high.

Then the matrix risk assessment will be as follows (see Table 2).

Table 2. Defining risk based on the three criteria

SEVERITY LOSSES	THREAT LEVEL								
	L			M			H		
	POSURE			POSURE			POSURE		
	L	M	H	L	M	H	L	M	H
<i>Negligible</i>	0	1	2	1	2	3	2	3	4
<i>Minor</i>	1	2	3	2	3	4	3	4	5
<i>Moderate</i>	2	3	4	3	4	5	4	5	6
<i>Serious</i>	3	4	5	4	5	6	5	6	7
<i>Critical</i>	4	5	6	5	6	7	6	7	8

To assess the level of threat and vulnerability different methods are used, which are based on expert opinions, statistical data, taking into account factors that affect the level of threat and vulnerability. The most effective method is complex - expert assessment based on the previously collected statistics and factors influencing the level of threat and vulnerability.

## 5. Quantitative risk assessment

Quantitative risk assessment of the project can be presented as follows [4]:

$$R = \sum_{i=1}^m w_i \cdot p_i$$

where:  $R$  - risk;  $m$  - number of risk factors;  $p_i$  - probability of the  $i$ -th risk factor, as measured in fractions of a unit;  $w_i$  - the proportion of the significance of  $i$ -th risk factor in the totality of the factors adopted by the unit.

First, we determined the proportion of risk factors with the lowest priority as follows:

$$w_{\min} = \frac{2}{m(f+1)}$$

where  $f$  - the priority of the first factor related to the  $m$ -th;

The share of other risk factors is given by:

$$w_i = w_{\min} \frac{(m-1) \cdot f + i - 1}{(m-1)}$$

The significance of the  $i$ -th risk factor is determined on the basis of expert opinion. In this case, a number of experts is chosen. Based on the accepted grading system, experts assign

priority (importance) of each risk factor in points. Experts determine the probability of each group and individual factors in the adopted notation.

Probabilities are set by law or determined by the empirical distribution for each possible value (value range) of a random variable. In the first case, the uncertainty is modeled according to specific mathematical principles and the second is simply stated on the grounds of subjective assessments.

## 6. Conclusions

In the majority of cases, in order to set the probability of the set of elements of events an analytical method is used, that is giving the law of the distribution of the random variable. Among its advantages is the absolute probability of formalization and ordering of certain values of a random variable depending on the two main factors that are taken into account when modeling uncertainty: dispersion of possible values of a random variable from its expected value and the deviation of a random variable values from the expected value. When asking probabilities analytically, the choice of the distribution of the random variable is crucial.

The risk is a difficult objective- subjective category, influenced by both external circumstances and internal parameters of the project and the subjective perception of the risk of a person who makes a decision.

Depending on the specific conditions, the availability of information and the goals of the project risk can vary significantly. Therefore, the risk estimates are useful methods, sensitivity analysis, alternative methods of decision making. Using on the obtained results we can achieve a corresponding prediction, compare it with the intended purpose of and shape administering information and the necessary action.

## References

- [1] Project Management Institute. A guide to the project management body of knowledge - PMBOK Guide. Newtown Square: PMI, 2004.
- [2] Rishnyak I. Model of Project Risk, Materials of International Conference CADSM'2005, Lviv, 2005, p.413-414.
- [3] Rishnyak I. Model of project risk management, Computer systems design. Theory and Practice, 2004, p.155-160.
- [4] Rishnyak I. Systems analysis of categories of risk and uncertainty, Information Systems and Networks, 2003, p.263-275.
- [5] Veres O., Rishnyak I.: Assessment of project risks, Computer Science and Information Technologies (CSIT'2013): VIIIth International Scientific and Technical Conference, Lviv, 2013, p. 90-91.
- [6] Veres O., Rishnyak I.: Risk project assessment, Materials of International Scientific Conference: Information Management Systems and Technologies, Odessa, 2013, p. 148-149.

**Ph.D. Lytvyn Vasyli**  
e-mail: vasyli17.lytvyn@gmail.com

Associate professor of Information Systems Institute of Computer Science and Information Technology at National University "Lviv Polytechnic".  
Research interests: modeling the behavior of intelligent agents, ontology development methods, Intelligent Decision Support Systems.



**M.Sc. Rishnyak Ihor**  
e-mail: rishnyak.iv@gmail.com

Senior lecturer of Department of Information Systems Institute of Computer Science and Information Technology at National University "Lviv Polytechnic".  
Research interests: Project management, Project management, Intelligent Decision Support Systems.



## OGRANICZAJĄCY ŁĄCZNIK NAPIĘCIA PRZEMIENNEGO

Piotr Bogusławski

Instytut Elektrotechniki Oddział w Gdańsku

**Streszczenie.** Na podstawie znanej koncepcji tyrystorowego ogranicznika prądu zwarciovego przedstawiono modyfikację tego układu do zastosowania także jako łącznik niewielkich prądów roboczych. Zaproponowano przekształtniki DC/DC sterujące działaniem łącznika i pośrednio zmniejszające wpływ temperatury oraz przedstawiono orientacyjnie symulowane przebiegi w obwodzie z łącznikiem jednofazowym. W podsumowaniu wskazano pokrótce na konsekwencje jego zastosowania.

**Słowa kluczowe:** ogranicznik prądu zwarciovego, łącznik tyrystorowy, napięcie przewodzenia, przekształtnik DC/DC

### CURRENT LIMITING SWITCH OF ALTERNATIVE VOLTAGE

**Abstract.** Based on literature study of known thyristor limiters and the modification providing of a low current switch function was presented. The proposed DC/DC inverters for control and temperature indirect independency was described. Preliminary results of one phase switch circuit simulation are included. In summary succession problems of application was shortly pointed out.

**Keywords:** short circuit current limiter, thyristor switch, forward on-state voltage, DC/DC inverter

### Wstęp

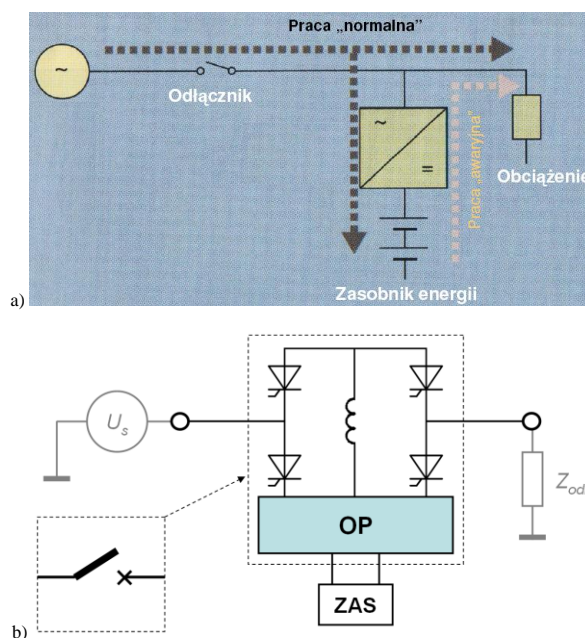
Przeciwdziałanie skutkom zwarć w systemie elektroenergetycznym polega typowo na czasowym wyłączeniu zasilania linii. Innym sposobem zabezpieczenia przed zwarciami może być ograniczanie prądu w celu zapobieżenia osiągnięciu wartości spodziewanej prądu zwarciovego, zwykle znacznej w sieciach dystrybucyjnych średniego napięcia (SN). Ograniczniki prądów zwarciovych realizowane są w postaci dławików powietrznych. W pracy [4] rozważa się koncepcję ograniczników z dławikami nie wnoszącymi strat mocy biernej i nie prowadzącymi do generowania lokalnych przepięć ani zapadów napięcia w odległych częściach systemu.

Koncepcja opisywanego łącznika ograniczającego jest interesująca ze względu na powiązanie w jednym urządzeniu funkcji łączeniowej z pożądaną cechą użytkową, polegającą na zdolności do ograniczania prądu podczas zwarć w obciążeniu, przy zachowaniu prostoty konstrukcji i sterowania urządzeniem. Łącznik stanowi aparat zaliczany do rodziny ograniczników prądu FCL (ang. Fault Current Limiter), których działanie polega na szybkim i samoczynnym włączeniu do obwodu zwarciovego reaktancji w układzie jednofazowym lub trójfazowym [2, 3, 5]. Inne znane i od lat rozwijane techniki FCL polegają m.in. na zastosowaniu nadprzewodnictwa [1] lub nasycanych rdzeni ferromagnetycznych [9]. W pełni tyrystorowy wyłącznik ograniczający [5] powstał jako rozwinięcie idei układu hybrydowego, w którym funkcje ograniczania i przerywania prądu były rozdzielone. Wyłącznik hybrydowy o strukturze szeregowej z dwoma dławikami ograniczającymi [2] opracowano na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej. Podjęta tematyka wpisuje się w widoczny od szeregu lat trend stosowania półprzewodnikowej aparatury FCL [8].

### 1. Zastosowanie i struktura łącznika ograniczającego

Ograniczniki tyrystorowe [2] i [5] wymagają stosowania wielkogabarytowych dławików i odznaczają się znacznymi stratami mocy w stanie przewodzenia, jednak w szczególnych sytuacjach korzyści z ich zastosowania przeważają nad wadami, np.: podczas badań laboratoryjnych modeli lub prototypów urządzeń z przekształtnikami energoelektronicznymi. Na tym etapie uruchamiania istnieje duże ryzyko wysokich kosztów nieudanych prób. Omawiany ogranicznik nie generuje podczas normalnej pracy zmiennego pola magnetycznego, które występuje w rozwiązaniach tradycyjnych.

Przewidywane właściwości łączeniowe ogranicznika stwarzają możliwość wykorzystania aparatu w projektowanym Systemie Bezpiecznego Zasilania (SBZ) z lokalnym przekształtnikiem typu off-line i baterią superkondensatorów [7] w roli odłącznika, jak na rysunku 1a. Jego zadaniem jest szybkie wykonywanie cykli samoczynnego powtórnego załączenia (SPZ) przy zachowaniu wysokiej trwałości. Na rysunku 1b przedstawiono schemat blokowy łącznika spełniającego funkcję odłącznika (ang. recloser [9]). Składa się on z bloku półprzewodników wielkiej mocy o komutacji naturalnej z zaciskami wysokiego napięcia, silnopiędowego bloku polaryzacji i sterowania prądem stałym małej mocy (OP) oraz układu zasilania z lokalnym zasobnikiem energii (ZAS). Pomiędzy wymienionymi blokami zaznaczono kreskami liczbę dwukierunkowych torów prądowych. Nie uwidoczniiono obwodów sterowania i komunikacji oraz źródła energii bilansującej ZAS.



Rys. 1. Kompensator typu off-line (a) oraz ogólna struktura odłącznika (b)

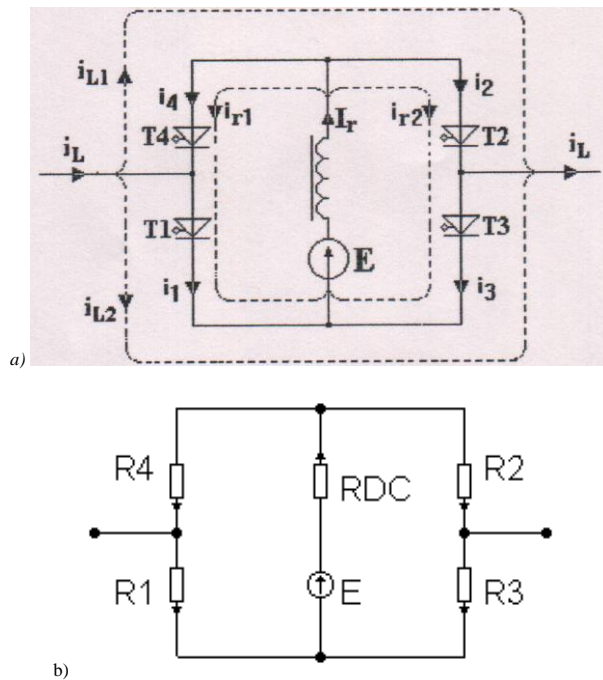
Wymienione bloki łącznika ograniczającego wymagają izolacji galwanicznej od zewnętrznych systemów zasilania i sterowania nadrzędnego. Wytrzymałość tej bariery rzutuje na kluczowe parametry łącznika – dopuszczalne napięcie robocze w stanie zamkniętym i napięcie blokowania w stanie otwartym.

## 2. Budowa i działanie ogranicznika

Przedstawiony na rysunku 2a ogranicznik to tyrystorowy układ Graetza o silnie indukcyjnym obciążeniu. Mostek posiada własne źródło energii  $E$ , dzięki któremu, w stanie zamkniętym łącznika i w zakresie obciążeń prądami o amplitudzie poniżej ustalonej wartości progowej, wszystkie tyrystory przewodzą. Na podstawie uproszczonego schematu zastępczego z rysunku 2b przy założeniu braku przepływu prądu zmiennego ( $i_L=0$ ) napięcie  $U$  na zaciskach mostka, można wyrazić zależnością:

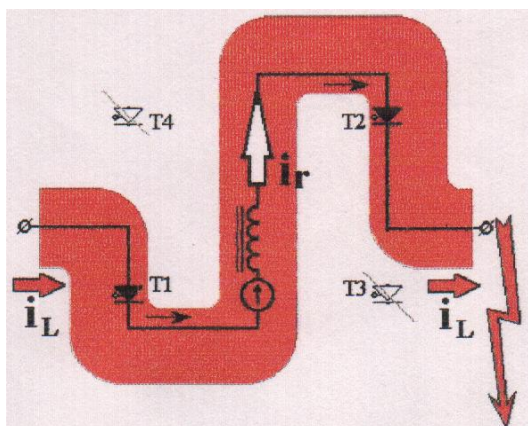
$$U = I_r \frac{R_1 R_2 - R_3 R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (1)$$

gdzie  $I_r$  jest prądem źródła  $E$ , a rezystancje  $R1-R4$  są zastępczymi rezystancjami przewodzenia tyrystorów. W stanie równowagi łącznik nie wnosi do łączonego obwodu spadku napięcia.



Rys. 2. Schemat rozpyły prądów w mostku ogranicznika: a) superpozycja prądów b) wyidealizowany stan przewodzenia łącznika

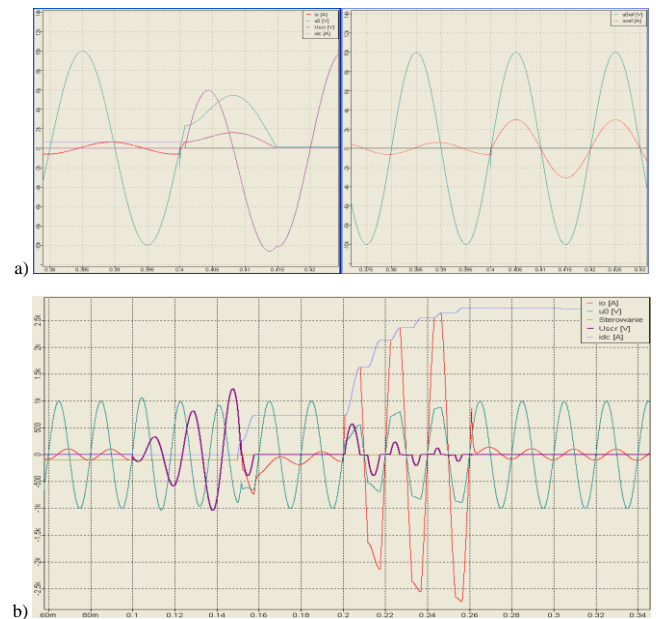
Przy założeniu liniowości obwodu łącznika w stanie załączenia, z zasady superpozycji prądów  $i_L$  i  $I_r$  (rys. 2a) wynika, że podczas przeciążenia w łączonym obwodzie lub tylko w wyniku zmniejszenia prądu źródła  $E$  poniżej wartości granicznej, jedna z przewodzących par tyrystorów (T1-T2 lub T3-T4) wyłączy się. Przy braku wyzwalania pozostałych tyrystorów zostaną stworzone warunki do naturalnego wyłączenia podczas pierwszego przejścia prądu obciążenia przez zero, co przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Elementy przewodzące podczas ograniczania prądu wg [5]

W wynikach symulacji działania przedstawionych na rysunku 4 łącznika przyjęto, że wszystkie tyrystory są identyczne i modelowane szeregowym połączeniem rezystancji i napięcia progowego. Przebiegi napięcia i prądu obciążenia ( $i_o$ ,  $u_o$ ) są wynikiem arbitralnie przyjętego skoku obciążenia na wyjściu łącznika, co połączone jest ze zmianą charakteru obciążenia (rys. 4a). Ograniczanie prądu przez układ polega na samoczynnym włączaniu do obwodu AC dławika podczas przeciążenia w chwili  $t=0,4s$ . Napięcie na łączniku ( $U_{scr}$ ) pojawia się w momentach ograniczania prądu. Po pierwszym półokresie przepływu prąd obciążenia zostaje wyłączony.

Przy założeniu ciągłego wyzwalania tyrystorów w stanie zwarcia lub przeciążenia widoczny jest wzrost prądu stałego ( $i_{dc}$ ) w kolejnych cyklach przewodzenia (rys. 4b). W celu uniknięcia uszkodzeń i rozłączenia łącznika, konieczne jest zablokowanie wyzwalania tyrystorów i rozładowanie energii dławika, np. poprzez wyłączenie lub zmianę polaryzacji źródła zasilania  $E$  (praca inwersyjna).



Rys. 4. Przebiegi z łącznikiem bez rezystancji dodatkowych (obc. RLC): a) brak wyzwalania tyrystorów - ograniczanie prądu przez łącznik podczas przeciążenia (po lewej), dla porównania przebiegi w tym samym obciążeniu połączonym bezpośrednio ze źródłem zasilania (po prawej), b) różne stany pracy – obejście klucza (do 0.1s), otwieranie (do 0.15s), przewodzenie robocze (do 0.2s), przeciążenie bez wyłączenia tyrystorów (do 0.26s), ustąpienie przeciążenia

Inny sposób rozładowania energii dławika polega na wtrąceniu do obwodu zmiennych rezystancji  $R1-R3$  lub  $R2-R4$ . Przykład realizacji tych rezystancji za pomocą przekształtników DC/DC przedstawiono poniżej.

## 3. Stan przewodzenia elementów półprzewodnikowych

Złącza diodowe dla niewielkich prądów przewodzenia wykazują silną nieliniowość charakterystyk prądowo-napięciowych. Przybliżona formuła na napięcie na złączu diodowym w zależności od prądu  $I$  ma postać:

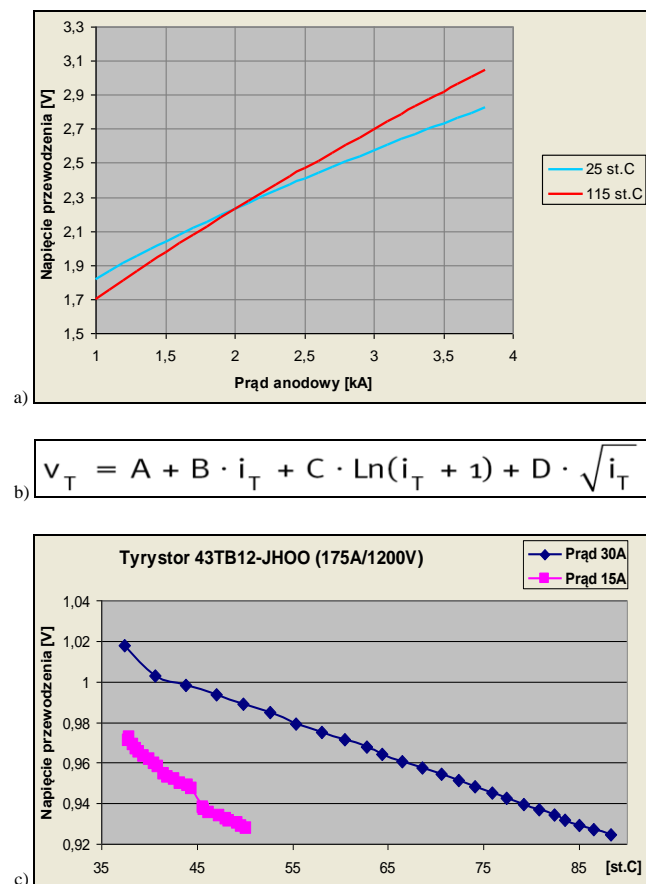
$$U \approx 0.05916 \log_{10}(I/I_{sat}) \quad (2)$$

gdzie  $I_{sat}$  – prąd nasycenia dla złącza krzemowego. Napięcie przewodzenia w danym punkcie pracy jest zależne od technologicznego rozrzutu charakterystyk złączy oraz od temperatury (dla krzemu ok.  $-2,3mV/K$ ).

Ujemną zależność napięcia przewodzenia od temperatury wykazują także tyrystory. Na rysunku 5a porównano przebiegi uzyskane z zależności analitycznej napięcia przewodzenia (rys. 5b) od prądu przewodzenia tyrystora w temperaturze  $25^\circ C$  i  $115^\circ C$ . Zależność napięcia przewodzenia od temperatury staje się dodatnia dopiero dla dużych prądów przewodzenia za sprawą większego udziału rezystancji w całkowitym spadku napięcia na



strukturze. Współczynniki A-D modelu określone są empirycznie i podawane przez producentów [10, 11]. Modele tego typu nie obejmują zakresu najmniejszych prądów przewodzenia, gdzie wpływ temperatury na spadek napięcia jest także bardzo wyraźny (rys. 5c).



Rys. 5. Wpływ temperatury na napięcie przewodzenia tyrystorów: a) w zależności od prądu przewodzenia (dane katalogowe, tyrystor 2kA/8500V), b) wyrażenie analityczne (model) napięcia przewodzenia, c) pomiar laboratoryjny dla niewielkich prądów przewodzenia (tyrystor 175A/1200V).

Realizacja równego podziału prądów w ograniczniku dla niewielkich prądów przewodzenia może stwarzać trudności wynikające z właściwości termicznych tyrystorów. Ujemny współczynnik zależności napięcia przewodzenia od temperatury oznacza, że w warunkach złego chłodzenia wystąpi dodatnie ciepłe sprzężenie zwrotne prowadzące do skupiania prądu (ang. current hogging) w bardziej nagrzaną gałąź. W opisywanym łączniku zjawisko skupiania prądu dotyczy równolegle połączonych grup mostka T1-T4 lub T2-T3 (rys. 2a). Niweczy to ideę równego podziału prądów DC konieczną dla symetrii działania łącznika ograniczającego.

Do sieci AC wprowadzana jest ponadto składowa stała wynikająca z rozrzutu charakterystyk prądowo-napięciowych tyrystorów i nierównoważenia mostka (rys. 2b). Znajomość dokładnego przebiegu napięcia przewodzenia od prądu dla tyrystorów, jak na rysunku 5a dla szerokiego zakresu temperatury, może pozwolić na określenie tego nierównoważenia we wszystkich punktach pracy. Wartość tego nierównoważenia jest jednak znikoma w porównaniu z amplitudą łączonych napięć.

#### 4. Źródła stabilizujące stan przewodzenia łącznika

Wobec niepełnych danych katalogowych opisujących napięcie przewodzenia tyrystorów dla małych prądów, w celu wymuszenia równego podziału prądów stałych można zastosować rezystory wyrównawcze włączone jak na rysunku 6a. W danym punkcie pracy napięcie nierównoważenia mostka będzie określone głównie różnicą rezystancji grup anodowych tyrystorów i prądem źródła E wg zależności (1). Rezystancje  $R_{p1}$  i  $R_{p2}$  pracują w

układzie zadajników prądu źródeł I1 i I2. Współczynnik  $k$  oznacza wzmocnienie źródeł prądu sterowanych prądem ustalających wypadkową wartość rezystancji równą  $R_p/(k+1)$ . Zakładając równość rezystancji  $R_{p1} = R_{p2} = R_p$ , rezystancję dławika  $R_{DC}$  oraz pomijając rezystancje zastępcze przewodzących tyrystorów (rys.2b), moc źródła E wynosi:

$$P_E = \frac{E^2}{R_{DC} + R_p / (2k + 2)} \quad (3)$$

Przy założeniu, że  $R_p \gg R_{DC}$  i stałości napięcia E, moc tego źródła może być regulowana w szerokich granicach poprzez zmianę wzmocnienia  $k$  źródeł prądowych. Ze względu na ograniczoną sprawność źródeł stabilizujących I1 i I2 i straty w pozostałych elementach obwodu, moc źródła E będzie nieznacznie większa od określonej wzorem (3).

Konieczność ograniczenia mocy źródeł stabilizujących I1 i I2 w stanie roboczym i stanie ograniczania rzutuje na dopuszczalne wartości napięć na zaciskach bloku OP z rysunku 1b (zaznaczony linią przerywaną na rys. 6a). Dopuszczalna wydajność prądowa źródeł E, I1 i I2 wynika z maksymalnej amplitudy prądu  $i_{MAX}$  jaki może wystąpić po zwarcu w obciążeniu. W najmniej korzystnym przypadku:

$$i_{MAX} = \frac{2\sqrt{2}U_s}{\omega L_{DC}} \quad (4)$$

gdzie  $\omega$  - pulsacja napięcia sieci o wartości skutecznej napięcia  $U_s$ . Z zależności (4) można obliczyć także wymaganą minimalną wartość indukcyjności ograniczającej LDC [3]. Dotyczy to przebiegów w pierwszym półokresie po wejściu w zakres ograniczania jak na rysunku 4a.

Rezystancje dodatkowe  $R_p$  decydują o minimalnej do uzyskania stałej czasowej L/R obwodu DC, która rzutuje na szybkość ustalania wymaganej wartości prądu dławika LDC. Ma to znaczenie podczas pracy układu w roli łącznika prądów roboczych, gdyż sterowanie wyłączeniem łącznika w dowolnym momencie polega na zmniejszeniu prądu  $I_L$  do wartości granicznej wynikającej z chwilowej wartości prądu obciążenia  $i_L$  (rys. 3). Nastąpi wówczas samoczynne wyłączenie jednej z par tyrystorów, a w dalszej kolejności pełne wyłączenie prądu zgodnie z ideą opisaną w [5].

#### 4.1. Realizacja rezystancji aktywnych

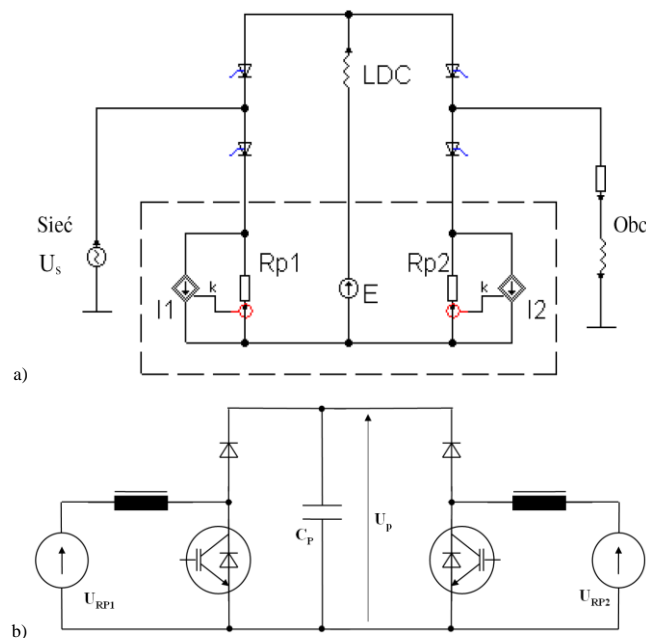
Źródła stabilizujące I1 i I2 można zrealizować jako tranzystorowe przekształtniki DC/DC typu podwyższającego (boost) przetwarzające spadki napięcia  $U_{RP1}$  i  $U_{RP2}$  na rezystancjach pomiarowych na napięcie  $U_p$  wydzielonego obwodu pośredniczącego. Przykładowe rozwiązanie układowe przedstawiono na rysunku 6b. Uwzględniając parametry tranzystorów, wartość indukcyjności LDC i zakres zmian jej prądu podczas działania ogranicznika, przyjęta pojemność  $C_p$  obwodu powinna umożliwić pracę w bezpiecznym zakresie napięć  $U_p$ . Obciążalność prądowa przekształtników wynika z dopuszczalnej amplitudy  $i_{MAX}$  określonej zależnością (4). Można więc zapisać poniższą nierówność:

$$i_{MAX}^2 L_{DC} \leq U_p^2 C_p \quad (5)$$

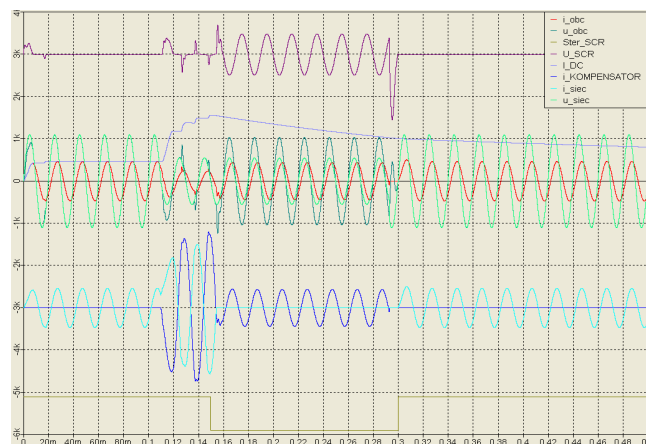
Sterownik tranzystorów powinien zabezpieczać przed osiągnięciem niedopuszczalnej wartości napięcia  $U_p$  i mocy wyjściowej źródła napięcia E określonej równaniem (3). Dynamika źródeł I1 i I2, zależna od wewnętrznej indukcyjności przekształtników i sposobu ich sterowania, nie powinna ograniczać szybkości zmian prądu w obwodzie AC łącznika w stanie przewodzenia. Nieuwidoczny na rysunku 6b przekształtnik stanowiący źródło E może mieć topologię taką jak przekształtniki I1 i I2. Po zmianie topologii przetwornic z rys. 6b ma podwyższająco-obniżającą (buck-boost) możliwa jest eliminacja źródła E.

Sterownik przekształtników stabilizujących powinien także uwzględniać różne stany pracy łącznika mogące wystąpić podczas współpracy w układzie z dwoma źródłami napięcia (rys.1a).

Wynik symulacji pracy łącznika ze stałymi rezystancjami dodatkowymi w systemie SBZ przedstawiono na rysunku 7. Proces kompensacji napięcia dotyczy przedziału czasu od 0.1 s do 0.3 s. Przebiegi prądów ujawniają możliwość wystąpienia przetężeń w źródle kompensatora ( $i_{\text{KOMPENSATOR}}$ ).



Rys. 6. Dodatkowe źródła łącznika ograniczającego: a) umiejscowienie w mostku tyrystorowym, b) rozwiązanie układowe przetwornic DC/DC



Rys. 7. Przebiegi w układzie łącznika z rezystancjami (obc, RLC), w stanach: przewodzenia, nieprzewodzenia (kompensacja zapadu) i przewodzenia. Powiększone 100x rezystancje przewodzenia tyrystorów grupy katodowej ( $R_{p1} = R_{p2} = 0.1\Omega$ )

## 5. Podsumowanie i perspektywy dalszych prac

W pracy prowadzonej w ramach projektu INNOTECH IN1/56/158978/NCBR/12 (SBZ) przedstawiono tyrystorowy wyłącznik zwarcia bazujący na istniejącym patencie oraz koncepcję jego rozbudowy do pracy w roli łącznika niewielkich prądów. W sposób uproszczony zobrazowano równowagę mostka

i opisano właściwości elementów półprzewodnikowych w stanie załączenia. Zaproponowano dodanie przekształtników DC/DC mogących aktywnie wpływać na zmiany stanu układu w szerokim zakresie temperatury i prądów roboczych.

Oczekuje się, że zmodyfikowany układ:

- pozwoli na weryfikację koncepcji łącznika ograniczającego bez konieczności wdrażania złożonych algorytmów sterujących,
- wdrożony w systemie SBZ ułatwi prowadzenie prób i podniesie ich bezpieczeństwo poprzez radykalne zmniejszenie mocy zwarcia instalacji laboratoryjnej,
- pozwoli na zebranie doświadczeń z modelową siecią odbiorczą w celu rewizji i opracowania nowych mechanizmów zabezpieczeń oraz wytycznych odnośnie parametrów ruchowych odbiorów.

Rozwiązania i komercjalizacja zarysowanej problematyki będą mogły poszerzyć ofertę Instytutu Elektrotechniki i jego Partnera w projekcie SBZ jako innowacyjne uzupełnienie lub alternatywa dla istniejących na rynku rozwiązań w zakresie systemów zasilania wysokiej jakości.

## Literatura

- [1] Boenig H.J.: Fault current limiter using a superconducting coil, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.19, No.3, 1983.
- [2] Czucha J.: Hybrid inductance-thyristor short-circuit current limiting device, Tenth International Conference on Switching Arc Phenomena, Łódź 2005.
- [3] Gang Chen, Daozhuo Jiang, Zhengyu Lu, Zhaolin Wu: A New Proposal for Solid State Fault Current Limiter and Its Control Strategies, conference publications, Power Engineering Society General Meeting 2004.
- [4] Hempowicz P.: Metoda obrony przed efektem domina i blackoutu powodowanym przez efekt domina, Przegląd Elektrotechniczny 08/2010.
- [5] Hempowicz P.: Wyłącznik ograniczający prądów zwarcia AC z możliwością bardzo szybkiego i wielokrotnego SPZ wyłączający bez przepięć – praca niepublikowana.
- [6] Hempowicz P.: Regulowany ogranicznik prądów zwarcia AC z regulacją wartości skutecznej ograniczanych prądów, Zgłoszenie P-388045, Urząd Patentowy RP, 2010.
- [7] Iwaszkiewicz J., Perz J., Wolski L., Donsiń M.P.: A case study on high power compensator of the power grid irregularities for industrial appliances, ICREPQ 2013.
- [8] Smith R., Slade P., Sarkozi M., Stacey E., Bonk J., Mehta H.: Solid State Distribution Current Limiter and Circuit Breaker: Application Requirements and Control Strategies, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No.3, 1993.
- [9] Zarudi M., Friedman A.: Core losses of the 'saturated core' FCL, [http://superconductivity.biu.ac.il/files/superconductivity/shared/alex\\_eucas\\_paper\\_242friedman.pdf](http://superconductivity.biu.ac.il/files/superconductivity/shared/alex_eucas_paper_242friedman.pdf), dostęp 21-01-2013.
- [10] Karta katalogowa, Phase Control Thyristor 5STP20Q8500, ABB Switzerland Ltd. Semiconductors Doc. No. 5SYA1073-01 Nov.11.
- [11] Karta katalogowa, Phase Control Thyristor T8KC\_3203, Powerex Inc., 2004.

Mgr inż. Piotr Bogusławski

e-mail: piotr.boguslawski@iel.gda.pl

Studia wyższe ukończył w roku 1994 na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej na kierunku Przetwarzanie i Użytkowanie Energii Elektrycznej. Pracuje jako asystent w Oddziale Instytutu Elektrotechniki w Gdańsku. Zajmuje się technologią i problematyką współpracy układów energoelektronicznych z odnawialnymi źródłami oraz zasobnikami energii. Współautor wyróżnionego systemu sterowania pompowni na Żuławach oraz projektu kompensatora z zasobnikiem superkondensatorowym.



otrzymano/received: 07.06.2013

przyjęto do druku/accepted: 31.01.2014

# OPTICAL CHARACTER RECOGNITION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES

Adam Musiał, Piotr Szczepaniak

Lodz University of Technology, Faculty of Technical Physics, Information Technology and Applied Mathematics

**Abstract.** The article represents results of the research of an Optical Character Recognition system. Proposed OCR system is able to convert a raster image into the text string, which represents the text shown on the input image. The main innovation is the fact that the system was created without following any strict rules. It was more an innovative research rather than simple programming using ready guidelines.

**Keywords:** character recognition, artificial intelligence, feature extraction, clustering algorithms

## OPTYCZNE ROZPOZNAWANIE ZNAKÓW Z UŻYCIEM SZTUCZNEJ INTELIGENCJI

**Streszczenie.** Celem projektu opisywanego w artykule było przygotowanie działającego systemu do optycznego rozpoznawania znaków, tj. zdolnego przekształcić rastrowy obraz wejściowy w łańcuch znaków odpowiadający zapisanemu tekstowi na obrazie. Nowością jest m.in. fakt wykonania tego systemu bez podążania za z góry znaną architekturą aplikacji, a przygotowanie go w sposób bardziej doświadczalny, czyli wykorzystując podejście nowatorskie.

**Słowa kluczowe:** rozpoznawanie znaków, sztuczna inteligencja, ekstrakcja cech, algorytmy klastrowania

## Introduction

The aim of this article is to describe one of the complex method of implementing a working Optical Character Recognition System. Specified system was the source project for the master's thesis [2] and was thoughtfully described. It uses some of the Artificial Intelligence Technologies, Fourier Transform, a lot of own graphic methods for image pre-processing purposes and even some heuristic approaches.

Another advantage of presenting such system is the fact of showing all components of a working system together on one diagram. Because of that, the presented article may be treated as an overview or an introduction to such systems. Because of the limited volume this article will be an overview rather than full specification. That may even help readers in creating similar working systems using abstract data processing tools. Those systems may be original and not a copy.

## 1. Approach

The main program was composed using many functional layers. Every layer contains different algorithms and is responsible for another processing stage.

Whole system may be described as a black box which receives True-Color bitmap image on the input and produces text string on the output (Figure 1).

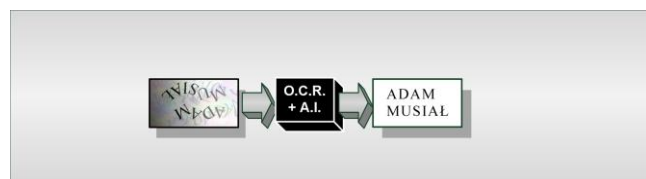


Fig. 1. OCR system in form of black-box model

Several different methods were analyzed. The important assumption was that the module should only analyze boundaries of the letters instead of analyzing their complete image. Another assumption was that the only serif font will be used and that only a subset of uppercase letters, numbers and some special symbols will be used. To make the program more useful recognition of Polish national letters was marked as the demanded feature. It was a quite interesting part because in Polish language a dot symbol may be a standalone symbol of period, may be a half of the colon symbol or even a part of Polish national letter "Ż".

At the beginning of the processing procedure the input image is filtered and preprocessed. Next step is to trace boundaries and to extract all features. Another layer is responsible for classifying shapes. After that, a lot of geometric algorithms and custom expert

system is used to join letter shapes into letters. Recognized letters are merged into text lines and text lines are joined into whole page. To clarify the description, each module will be discussed in its own chapter. After that a short summary will be presented.

## 2. Image preprocessing

The first application layer in this project was the image pre-processing layer. That layer is responsible for converting True-Color bitmap image into an equivalent monochromatic image representation. There was the assumption that every letter contour should be accurately represented on the monochromatic image in form of black pixels. Every background pixel should be represented in form of white pixels. At that time, the system assumed that text is generally darker than the background.

There were two feature requirements. The first was that the program should be as noise-proof as possible. The second was that the program never knows what the source of the image is. During experimental tests two main sources of test images were used including scanned images.

First step was to maximize the contrast of image. To do that task a simple histogram analysis was used. Thanks to that even images with low contrast, with dark background or light text were optimized.

Next step was to convert the True-Color image with three color channels into grayscale. There were three versions of the conversion subroutine. First version was a simple equation with sum and division by the number of color channels. Rest two versions were using various equations of luminosity calculating purposes.

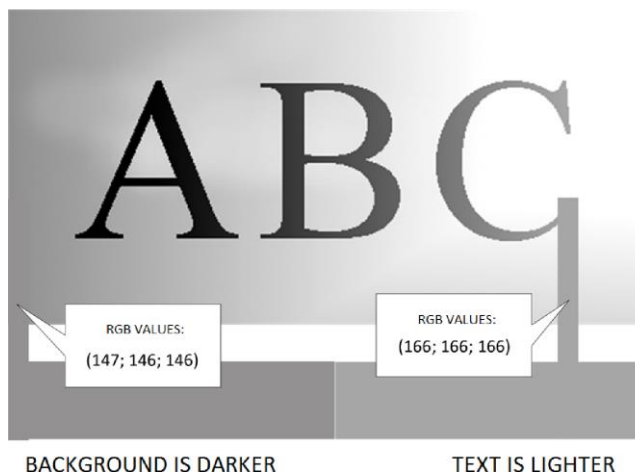


Fig. 2. Non trivial example image

The last step was to decompose the grayscale image into a black and white equivalent image. The simplest and the quickest method was to use simple binarisation technique. Such method may be enough for most high-quality input images. Another method is to use adaptive binarisation technique which searches for the optimal threshold level value.

Interesting example of non-trivial image is shown on the Figure 2. The main difference between usual trivial images is that some parts of text are lighter than some parts of the background. That thing is visible when analyzing the histogram because both classes overlaps themselves.

It is impossible to successfully preprocess that non-trivial image using plain nor the adaptive binarisation. The main problem is that the optimal value of the threshold simply does not exist (Figure 3).

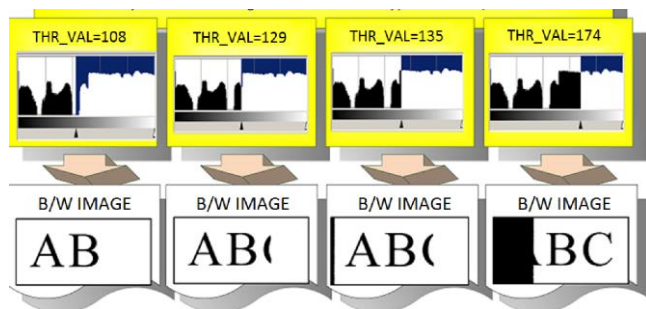


Fig. 3. Results of trying to process non-trivial image using optimized binarisation technique

To overcome that problem, own algorithm was developed. It combines custom histogram analysis and custom region growing method. It uses two indexes that are going together starting from the boundaries. Every time a small amount of the histogram values is processed. Usually the text index selects a part of the letter and the background index selects a part of the background. At this stage we assume that the text index does not mix text with the background, but on the other hand only a part of the text is selected. To complete the selection custom version of the region growing procedure is used. It selects all pixels with similar luminosity value. Usually the letter is represented by a strong pattern, so we may assume that the whole part of the letter will be selected even when only one pixel of that letter will be selected by the text index. After running some iterations of the proposed algorithm, whole image is successfully processed (Figure 4).

Very promising approach is to transform image into another color model that is less sensitive to noises and to cluster pixels with color-aware algorithm. Such approach may be very useful when trying to process colored text on colored background. Such approach was used in [1] on similar field of science with very good results.

### 3. Boundary tracing

At the beginning of the research, several edge filters were analyzed. Their main disadvantage was the possible ambiguity of represented shape. Even morphological operations were not enough to ensure that the boundary may be deterministically traced. Sometimes boundaries could not be closed and that was the signal of failure.

After many tests own deterministic algorithm was developed. It may be shortly described as a deterministic boundary tracer because it analyses every boundary as a path. In case of arriving the ambiguous cross it guesses the proper direction by following the preceding direction.

Another advantage is that it is possible to extract additional information about the shape. Proposed algorithm is able to determine if the traced boundary is the external or internal boundary. This is the essential information when trying to differentiate between for ex. period and internal parts of the letter.

Moreover, it is possible to classify external shapes and internal shapes separately.

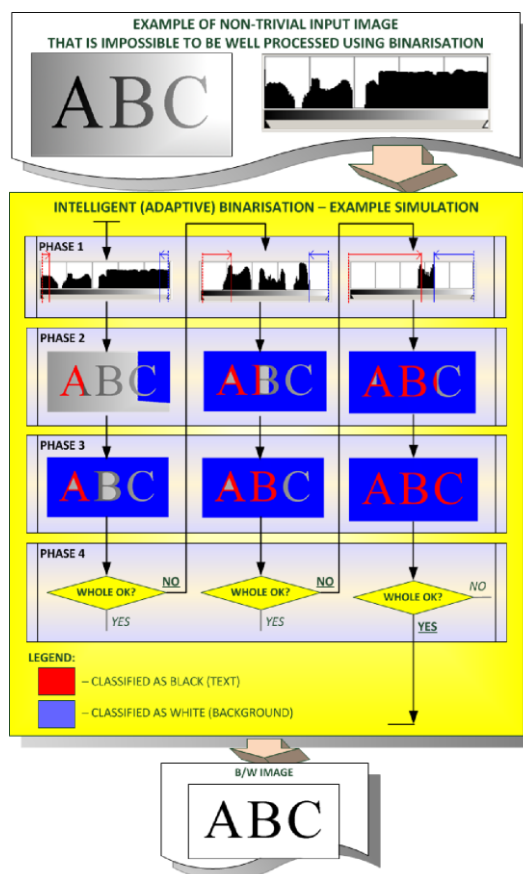


Fig. 4. Results of trying to process non-trivial image using own method

### 4. Fourier descriptors and feature extraction

For the feature extraction purposes Fourier descriptors and some geometric algorithms were used.

After smooth normalization each shape is represented in the frequency domain by the Fourier descriptors. Usage of Fourier descriptors is helpful because they are invariant against translation, scale, rotation and their starting point.

Some example of such data is shown on Figure 5.

Each shape is also represented by some geometrical features that are computed and passed as the additional information together with the Fourier descriptors.

### 5. Classification modules

There is a set of two classifier modules, one for internal and one for external shapes. Every classifier module may be Feedforward Neural Network, SVM, k-NN, RBF or even another module that may be implemented.

Training set consists of letter images that are dynamically changed to add more abstract information to the classifier. That change includes rotation and scaling. Such changes may be helpful with the ability of differentiating between the shape itself and plain pixels raster.

### 6. Letter extraction module

After recognizing contours, another module was responsible for joining them into letters. The main problem was the ambiguity. Such ambiguity is defined by very similar or exact shapes that may be parts of different letters or even symbols. Plain example when using Polish national letters is the similarity of the "C" and the "Ć" letter which use common shape. Another example is the similarity of the period symbol and the "O" letter.



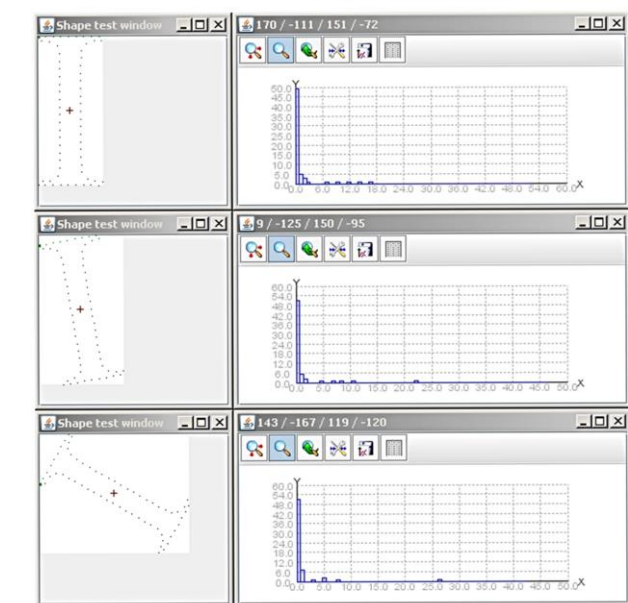
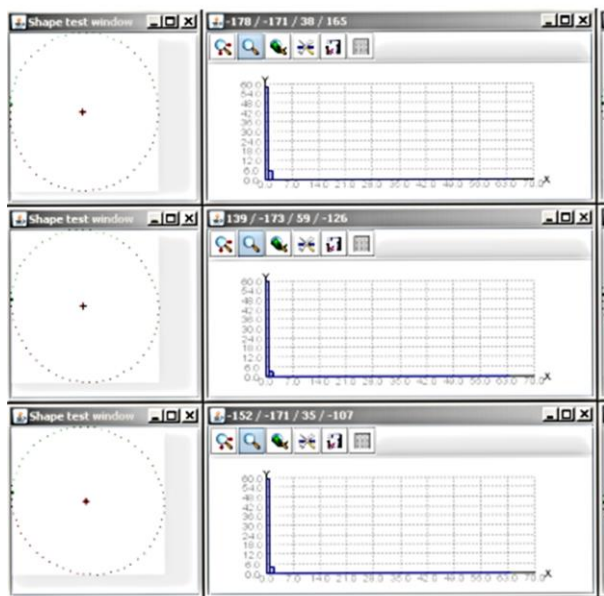


Fig. 5. Results of transforming shapes into Fourier Descriptors

Ambiguity problem is shown on an example Figure 6.

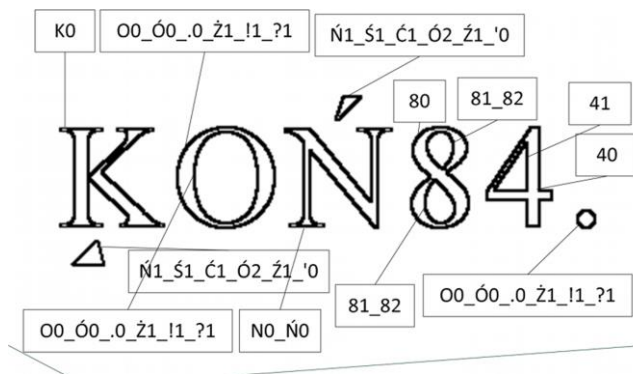


Fig. 6. Explanation of ambiguity of shapes

To overcome that problem, shapes are ordered into groups and processed using own expert system. The main cure is to extract more unambiguous shapes at the beginning of processing. Some geometric computations are helpful to determine which symbol may be treated as a part of a letter.

## 7. Concatenation modules

Recognizing letters does not finish the recognition procedure. Additional effort must be done to concatenate all letters into words and lines. That layer uses mainly some sorts of geometric equations to extract information about letter locations.

To make the algorithm more automatic, the k-NN method was used. That method clusters data into two or three sets: letters within one word, letters delimited with space, letters delimited with longer space or tabulator.

Similar algorithm was used to merge lines of text into whole page. Such algorithm also uses automatic functions to make the program more flexible and noise-proof.

## 8. Results

During the research a complete OCR system which uses Artificial Intelligence technologies was created. Another important achievements were for example own graphics algorithms for the image optimization purposes. A lot of time was spent on the test experiments. They were essential to retrieve the valid parameter values.

Interesting things are the example images with 100% recognition accuracy ratios shown on Figures 7, 8, 10, 11 and 12. Another nice feature is that some example images were recognized with 100% accuracy when using my system and in the same time they were recognized with the lower accuracy when using some of paid systems.

780 4E.  
0HŁŁ ÓŁŻ

Fig. 7. Example image with 100% recognition accuracy ratio

ADAMUS TEST

Fig. 8. Example image with 100% recognition accuracy ratio

## 9. Future works

The cost of automation of the complex process is the additional time needed to find the optimal or suboptimal solution. On the other hand, the main advantage is that the presented system is able to recognize a lot of non-trivial images.

Future works may be done in terms of upgrading classifier modules with Genetic Algorithms to add the ability of self-optimizing. Another very promising approach is the fusion with other graphic methods used in [1] to improve the ability of recognizing full color texts. An example image that contains text and background with the same luminosity is presented on Figure 9. While classic approach will thread such image as simple solid fill, approach proposed in [1] would be able to perfectly segment that image into 2 classes.

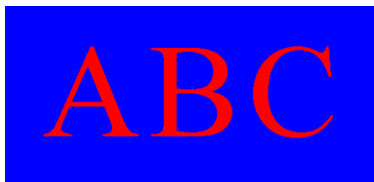


Fig. 9. Example of colorful image with the same luminosity of text and background

Of course the system could be able to recognize more characters including ligatures or even graphically concatenated ones. Unfortunately some of them may be time consuming.

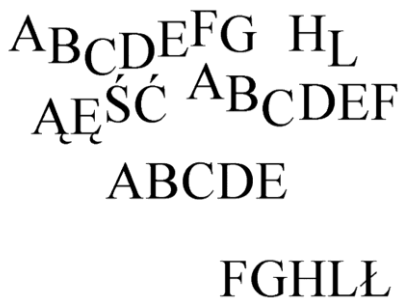


Fig. 10. Example image with 100% recognition accuracy ratio

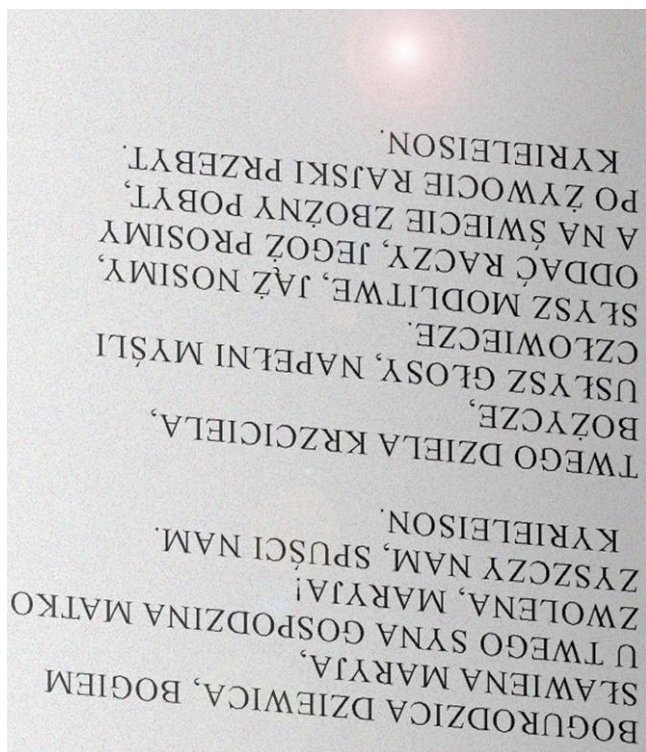


Fig. 11. Example image with 100% recognition accuracy ratio

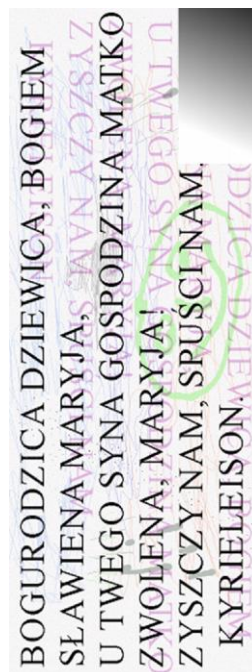


Fig. 12. Example image with 100% recognition accuracy ratio

## 10. Acknowledgements

Author would like to express his gratitude to Prof. Peter Szczepaniak, Ph.D. Eng. – H.M. Vice-Rector for University Development for proposing the very interesting field of expertise for the Master's Thesis creation purposes and for his very significant additional, invaluable help during researches. He would also thank to Kamil Stokfiszewski, Ph.D. Eng. and Dariusz Puchała, Ph.D. Eng. for his additional help with that project. He would also express his thanks to Jagoda Lazarek, M.Sc. Eng. for her help with proposing very promising improvement approaches.

## References

- [1] Lazarek J., Szczepaniak P.: Detection of Semantically Significant Image Elements Using Neural Networks. Computer Recognition Systems 4, Tom 4.
- [2] Musiał A., Szczepaniak P.: Optical Character Recognition using Artificial Intelligence Technologies. Master's Thesis at the Institute of Information Technologies. Lodz University of Technology.
- [3] Puchała D., Yatsymirskyy M.: Neural Network in Fast Adaptive Fourier Descriptor Based Leaves Classification. Artificial Intelligence and Soft Computing – ICAISC 2008.
- [4] Szczepaniak P.: Obliczenia inteligentne, szybkie przekształcenia i klasyfikatory. Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, 2004.

**M.Sc. Eng. Adam Musiał**

e-mail: adam.musial.ftims@gmail.com

Ph.D. student at The Faculty of Technical Physics, Information Technology and Applied Mathematics at Lodz University of Technology. Presented information are mainly the results of his research for Master's Thesis purposes. There are some new theoretical improvements achieved during the PhD studies.



**Prof. Piotr Szczepaniak**

H.M. Vice-Rector for University Development at Lodz University of Technology. General manager of the The Faculty of Technical Physics, Information Technology and Applied Mathematics. Major advisor of the Master's Thesis which is the base source of this paper.



otrzymano/received: 01.10.2013

przyjęto do druku/accepted: 30.03.2014



# POZYSKIWANIE WIEDZY Z WYNIKÓW BADAŃ WIROPRAĐOWYCH

**Paweł Karol Frankowski**

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki

**Streszczenie.** Celem artykułu jest przedstawienie metod pozyskiwania użytecznych wzorców z danych pomiarowych. W artykule opisano metodologię pozyskiwania wiedzy umożliwiającą sformułowanie reguł asocjacji, oraz techniki pozwalające na zwiększenie poprawności identyfikacji podstawowych parametrów struktur żelbetonowych. Zaprezentowane algorytmy zostały zaimplementowane w nowym, wiroprowadowym systemie służącym do identyfikacji grubości otuliny, średnicy oraz właściwości fizycznych prętów zbrojeniowych.

**Słowa kluczowe:** analiza danych, reguły asocjacji, prądy wirowe, struktury żelbetowe

## KNOWLEDGE EXTRACTION FROM THE EDDY CURRENT MEASUREMENT DATA

**Abstract.** The purpose of this paper is to present methods, dedicated for extract useful patterns from the eddy current measurement data. The paper presents a methodology of knowledge extraction, an association rule learning algorithm and the methods used to improve quality of the data collected by electromagnetic systems. Presented solutions were implemented in the new eddy current system used to evaluation of steel bars in reinforced concrete structures.

**Keywords:** data analysis, association rules, eddy currents, reinforcement concrete structures

## Wstęp

Metoda prądów wirowych jest jedną z najczęściej stosowanych metod wśród badań nieniszczących (NDT). Charakteryzuje się ona dużą czułością, uniwersalnością i prostotą wykonywania pomiarów. Pomimo wspomnianych zalet implementacja tejże metody do nowych zagadnień przysparza często trudności związanych z zaszumieniem i interpretacją wyników. W artykule przedstawiono algorytmy analizy i przetwarzania otrzymywanych w czasie badań przebiegów napięcia, mogących w znacznym stopniu zredukować oba te problemy.

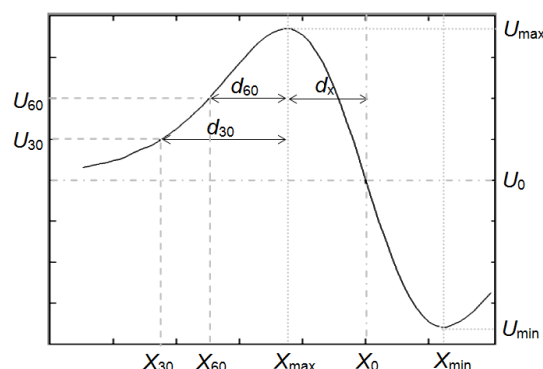
Od ponad stu lat żelazobeton pozostaje jednym z podstawowych materiałów budowlanych. Zbrojony beton łączy w sobie wiele zalet, takich jak twardość, elastyczność, czy zbliżona rozszerzalność cieplna komponentów. Warto jednak odnotować, że aby zapewnić odpowiednią trwałość, obiekty żelbetowe wymagają relatywnie częstych zabiegów konserwacyjnych. Nie bez znaczenia w kwestii trwałości obiektów są, jakość wykonania oraz poprawność zastosowanych komponentów. Optymalną byłaby sytuacja, w której identyfikacja struktury odbywałaby się bez konieczności jej naruszania. Z tego względu za celowy należy uznać rozwój NDT zarówno w diagnostyce nowych jak i starych obiektów budowlanych. W przypadku struktur nowych testy powinny obejmować identyfikację parametrów takich jak: grubość otuliny (warstwy betonu nad prętem) oraz położenie, średnica i klasę prętów zbrojeniowych (termin klasy prętów wprowadzają normy budowlane, symbolizuje ona wytrzymałości i plastyczności stopu, rozróżniamy cztery klasy). W przypadku obiektów starszych najistotniejszą kwestią jest oszacowanie pozostałego, dopuszczalnego czasu eksploatacji, czyli poziomu karbonatyzacji betonu i skorodowania prętów zbrojeniowych. Problem kompleksowej i nieinwazyjnej identyfikacji struktur żelbetonowych jest zagadnieniem złożonym. Badania powinny obejmować znaczną ilość parametrów. Pożądanymi cechami urządzenia służącego do testowania żelbetu są, zatem: wysoka czułość i rozdzielczość przestrzenna, niska waga, oraz przenośność (małe gabaryty). Autorowi nie jest znane ani jedno dostępne na rynku urządzenie spełniające wszystkie te wymagania. Co więcej, stosowane obecnie metody nieniszczące i małoszczące nie umożliwiają identyfikacji wszystkich wymienionych wcześniej parametrów [3, 5].

## 1. Opis eksperymentu

W badaniach wykorzystano różnicowy przetwornik wiroprowadowy w kształcie litery E. Na dwóch skrajnych kolumnach rdzenia ferromagnetycznego nawinięto uzwojenia wzbudzenia, zaś na środkowej kolumnie rdzenia umieszczono cewkę pomiarową.

Generowane przez cewki wzbudzenia przemienne pola elektromagnetyczne były w przybliżeniu równe pod względem amplitudy, ale przesunięte w fazie o  $180^\circ$ . Przetwornik przesuwano nad strukturą z krokiem 0,61 mm.

Dla próbek, w których badana struktura była jednorodna wskazania woltomierza podłączonego do cewki pomiarowej były stałe. Wartość napięcia ulegała zmianie, gdy przetwornik zbliżał się do obszarów niejednorodnych, czyli w omawianym przypadku do pręta zbrojeniowego w obiekcie betonowym. Zgodnie z prawem Ampera i regułą Lenza amplituda SEM wyindukowanej na cewce pomiarowej, ulegała zmianie spowodowanej przez wtórne pole elektromagnetyczne indukowane wskutek powstania prądów wirowych w prętach. Otrzymywany w ten sposób sygnał był podawany na wzmacniacz fazoczuły. Na jego wyjściu otrzymywano napięcie o wartości zależnej od położenia pręta i przetwornika. W efekcie jednorazowego przejazdu przetwornika wiroprowadowego nad próbką z pojedynczym prętem, otrzymywano przebieg napięcia składający się z dwóch impulsów symetrycznych względem punktu o współrzędnych  $X_0$  i  $U_0$ , zatem analizie wystarczy poddać tylko jeden z nich (rysunek 1).

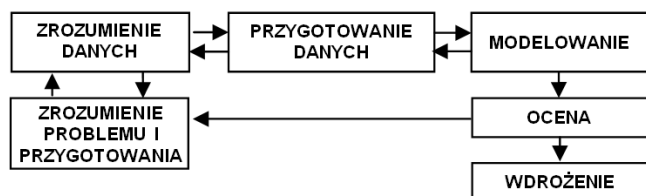


Rys. 1. Przykład analizowanej części przebiegu wraz z zaznaczonymi odcinkami charakterystycznymi  $d_{30}$  i  $d_{60}$

Badania dowiodły, że zmiana każdego z badanych parametrów struktury (grubości otuliny  $h$ , poziomu skorodowania, średnicy  $D$ , czy klasy pręta) prowadzi do zmiany wartości amplitudy otrzymywanego przebiegu napięcia w funkcji odległości. Sygnał został opisany zmiennymi  $d$ , oraz wartością maksymalną amplitudy  $U_{max}$ . Atrybuty  $d$  tworzą poprzez pomiar różnicy współrzędnych:  $X_{max}$  odpowiadającej położeniu przetwornika, w którym amplituda otrzymywanego przebiegu była największa oraz współrzędnej  $X$ , w której amplituda osiągała zadany procent  $U_{max}$ . Przykładowo współczynnik  $d_{30}$  zdefiniowano, jako różnicę  $X_{max}$  i  $X_{30}$ , czyli współrzędnych punktów, dla których napięcie osiąga odpowiednio wartości  $U_{max}$  i  $U_{30}=30\% \cdot U_{max}$  [2].

## 2. Metodyka badań

Do analizy wyników pomiarów wykorzystano standardowy model CRISP-DM (z ang. Cross Industry Standard Model for Data Mining) [4]. Model ten został stworzony pod koniec lat dziewięćdziesiątych, w celu pozyskiwania wiedzy z baz danych o tematyce biznesowej. Cieszy się on obecnie dużą popularnością wśród analityków i jest uznawany za standard pozyskiwania informacji z obszernych baz danych (tzw. Data Mining). Klasyczny algorytm CRISP-DM został poddany niezbędnym uzupełnieniom. Umożliwiły one wierne odzwierciedlanie procesu pozyskiwania wiedzy z danych pomiarowych. Schemat modelu przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Metodyka pozyskiwania wiedzy z pomiarów, na bazie modelu CRISP-DM

Na rysunku 2 zaznaczono tylko najczęściej spotykane sprzężenia zwrotne. Model ma charakter iteracyjny i w zależności od zagadnienia i potrzeb analityka umożliwia swobodne wracanie do zakończonych już etapów. W CRISP-DM pierwszym krokiem jest zrozumienie problemu, oraz przygotowanie próbek i pierwszej wersji stanowiska laboratoryjnego. Jest to etap w głównej mierze koncepcyjny. W następnym kroku wykonywane są pierwsze pomiary, a z nich uzyskuje się ogólne zależności. Bardzo przydatne w tym procesie są badania statystyczne, wizualizacje zależności oraz algorytmy wyszukiwania reguł asocjacji. W wyniku pierwszych analiz często konieczne jest dokonanie zmian sprzętowych na stanowisku laboratoryjnym, co symbolizuje sprzężenie zwrotne. Kolejnym krokiem jest przygotowanie danych. Wiąże się ono z zabiegami przygotowawczymi takimi jak: usunięcie wyników odstających, normalizacja, dyskretyzacja, i wygładzenie przebiegów. Również po tym etapie istnieje sprzężenie do poprzedniego kroku. Jest ono niezbędne, gdyż o ile usunięcie wyników odstających może ukazać nowe, wcześniej niewidoczne zależności, o tyle wygładzanie przebiegów może te zależności zarówno uwypuklić jak i zamazać. Kolejnym krokiem jest modelowanie, w którym następuje dostosowanie i dobór atrybutów dla konkretnych klasyfikatorów oraz dobór najlepszych algorytmów klasyfikacyjnych. Ocena, to krok przedostatni, w którym badacz dysponuje już w pełni sprawnym modelem. Na tym etapie należy rozwiązać ewentualne wątpliwości i zweryfikować poprawność działania modelu. Ostatnim punktem metodyki jest wdrożenie algorytmu.

## 3. Wyszukiwanie reguł asocjacji

Asocjacja jest procesem kojarzenia co najmniej dwóch zjawisk z których pojawienie się jednego powoduje wystąpienie pozostałych. W omawianym przypadku zjawiska można podzielić na dwie grupy: zmiany w strukturze i odpowiadające im zmiany w otrzymywanym przebiegu. Opisać je można trzema klasami: wzrost (↑), spadek (↓), brak zmian (0). Tworzenie bazy danych zawierającej tego typu relacje wymaga porównania wektorów atrybutów z różnych rekordów (pomiarów). Najbardziej użyteczne okazują się być porównania rekordów, w których struktura różniła się tylko jednym parametrem. W ogólnym przypadku regułę zapisujemy jako:

JEŻELI (poprzednik) WTEDY (następnik) [wsparcie, pewność]

Poprzez określenie poprzednik rozumie się zmiany parametrów struktury, zaś następnikiem nazwano zmianę atrybutów opisujących kształt przebiegu napięcia otrzymywanego

wskutek pomiaru. Jakość reguły opisują dwa wskaźniki: wsparcie (support) i pewność (confidence). Wsparcie odpowiada częstości występowania danej relacji w bazie danych. Odczytuje się je, jako proporcję liczby rekordów, w których reguła występuje do liczby wszystkich rekordów w bazie danych (1).

$$\text{supp}(A) = \frac{\#\{d \in D : A \subset d\}}{\#D} \approx P(A) \quad (1)$$

Pewność określa prawdopodobieństwo wystąpienia reguły pod warunkiem wystąpienia poprzednika A (2). Wzory należy wstawiać do tekstu jako element zdania, czyli:

$$\text{conf}(A \rightarrow B) = \frac{\text{supp}(A \cup B)}{\text{supp}(A)} \approx P(B | A) \quad (2)$$

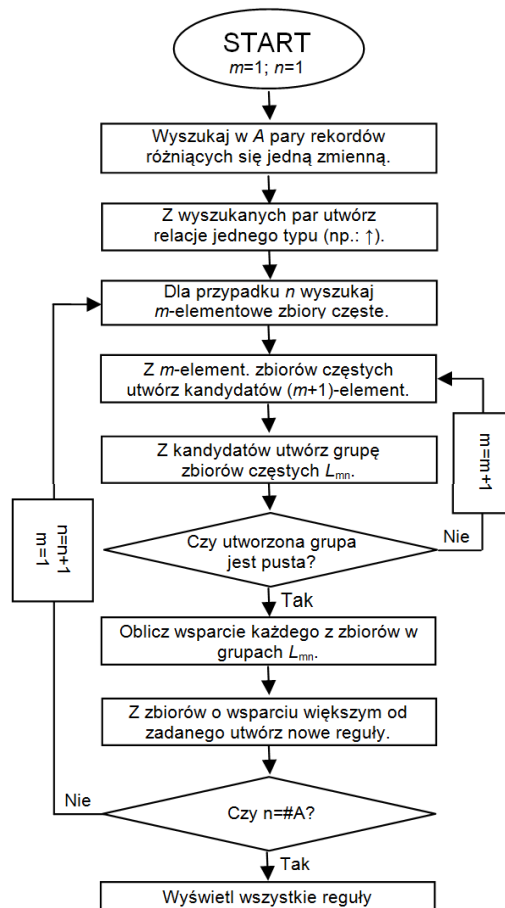
gdzie:

A – poprzednik – parametry opisujące zmiany w badanej strukturze,

B – następnik – atrybuty opisujące zmiany w kształcie przebiegu napięcia na wyjściu układu,

D – rekordy znajdujące się w bazie danych.

W celu odszukania interesujących reguł asocjacji zastosowano algorytm przypominający algorytm Apriori.[1] Bazuje on na spostrzeżeniu, że interesujące reguły powstają tylko ze zbiorów częstych, czyli takich, dla których wsparcie jest większe od minimalnego wsparcia zadanego przez badacza.



Rys. 3. Uproszczony schemat blokowy zaimplementowanego algorytmu wydobywania reguł asocjacji z danych

W przeciwieństwie do pierwowzoru przedstawiony na rysunku 3 algorytm działa na relacjach obiektów, nie zaś na samych obiektach. Ponadto zmienne w bazie danych zostały podzielone na dwie grupy, a reguły asocjacji wyszukiwane były jedynie pomiędzy relacjami w ramach jednej zmiennej z grupy A, a relacjami powstającymi pomiędzy rekordami w poszczególnych atrybutach z grupy B. Podział na dwie grupy, pomiędzy którymi wyszukiwane są reguły znacząco zmniejszył liczbę możliwych



kombinacji (z  $2^{X-1}$  do  $\#A \cdot 2^{\#B-1}$ ; gdzie  $X=\#A+\#B$  i oznacza liczbę atrybutów). Należy również zauważyć, że w regule poprzednik zawsze jest zbiorem jednoelementowym, zaś następnik jest zbiorem  $m$ -elementowym, gdzie  $m$  może przyjmować wartości od 1 do  $\#B$ . Poprzez liczbę  $n$  oznaczono na rysunku 3 liczbę badanych parametrów struktury. Algorytm umożliwił wykrycie zmian zachodzących w przebiegu napięcia pod wpływem zmiany poszczególnych parametrów struktury. Jednak, co równie istotne dostarczył danych liczbowych (w postaci wsparcia i pewności), które umożliwiają oszacowanie, jak częsta i jak pewna jest dana reguła. Przykłady najważniejszych z reguł zostały przedstawione w tabelach 1÷3. Ze względu na dużą liczbę współczynników kształtu  $d$  są one reprezentowane przez zaledwie 5 atrybutów. W praktyce wszystkie atrybuty  $d$  zmieniały się w podobny sposób.

Tabela 1. Wpływ zwiększenia średnicy pręta na poszczególne atrybuty

$\Delta D=2\text{mm}$ ( $\uparrow$ )	$d_x$ [%]	$d_{80}$ [%]	$d_{50}$ [%]	$d_{30}$ [%]	$d_{10}$ [%]	$U_{\max}$
Zmiana	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
Pewność	90,3	58,1	80,6	87,9	80,6	70,6
Wsparcie	4,5	2,9	4,0	4,4	4,0	3,5

Ogólną regułę dotyczącą wszystkich atrybutów na podstawie reguł zapisanych w tabeli 1 można zapisać następująco:

Jeżeli ( $D \uparrow [\Delta D=2\text{mm}]$ ) Wtedy (wszystkie atrybuty  $d \uparrow$  i  $U_{\max} \downarrow$ )  
[supp=2,9%, conf=58,1%]

Na podstawie powyższego przykładu można zauważyć, że pewność zarówno reguł szczegółowych zawartych w tabeli 1 jak i reguły ogólnej nie jest duża. W przypadku reguły ogólnej spowodowane jest to faktem, że jej wsparcie i pewność nie mogą być większe niż wsparcie i pewność najsłabszej z reguł szczegółowych. W przypadku reguł szczegółowych drugą, co do siły regułą jest brak zmian wartości współczynników kształtu  $d$  wraz ze wzrostem średnicy. Prawdopodobieństwo, że ich wartość zmaleje jest dla wszystkich współczynników  $d$  bliskie zeru. W związku z powyższym przyjęto, że niewielka pewność reguł była spowodowana zbyt dużym posuwem przy wykonywaniu pomiarów (0,61 mm). Niedoskonałość tę można poprawić zarówno sprzętowo jak i programowo. Pierwszym sposobem jest zastosowanie przetwornika o większej rozdzielczości przestrzennej. Kolejnym, zmniejszenie kroku posuwu. Problem ten można również w pewnym stopniu zostać zniwelować w trakcie etapu przygotowywania danych. W tym celu stworzono szereg sztucznych atrybutów, które powstały poprzez proste zsumowanie wartości kilku atrybutów  $d$ . Dzięki czemu zmiany się sumują, a siła reguł i poprawność klasyfikacji wzrasta.

Na podstawie pomiarów zaobserwowano również, że przy niewielkim  $h$  (do 30 mm), wartość napięcia maksymalnego zmienia się przeciwnie do zmian średnicy pręta. Jednakże, wraz ze wzrostem grubości otuliny wartość zmian napięcia stopniowo maleje, aż przy  $h > 45$  mm można przyjąć, że wartość amplitudy zmienia się w sposób chaotyczny, lub nawet wzrasta wraz ze wzrostem średnicy.

Badając skorodowane próbki zaobserwowano, że otrzymywane reguły są zbliżone do reguł otrzymywanych przy zmniejszaniu średnicy prętów. Można, zatem zaawansowaną korozję potraktować, jako redukcję średnicy pręta.

Tabela 2. Wpływ zwiększenia grubości otuliny na poszczególne atrybuty

$\Delta h=5\text{mm}$	$d_x$ [%]	$d_{80}$ [%]	$d_{50}$ [%]	$d_{30}$ [%]	$d_{10}$ [%]	$U_{\max}$
Zmiana	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
Pewność	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Wsparcie	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0

W przypadku zmiany grubości otuliny o 5 mm wszystkie reguły są jednoznaczne, co przedstawia tabela 2.

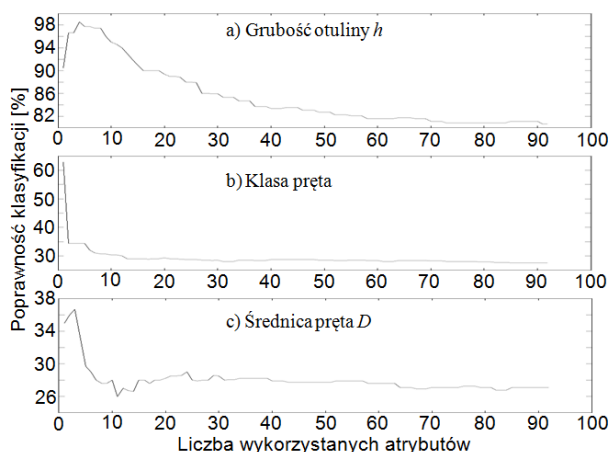
Tabela 3. Wpływ klasy pręta na poszczególne atrybuty

$\Delta K_{\text{klasy}}=1$	$d_x$ [%]	$d_{80}$ [%]	$d_{50}$ [%]	$d_{30}$ [%]	$d_{10}$ [%]	$U_{\max}$
Zmiana	0	0	0	0	0	$\downarrow$
Pewność	93,3	66,7	66,7	60,0	46,7	100,0
Wsparcie	2,3	1,6	1,6	1,5	1,1	2,4

W tabeli 3 przedstawiono wpływ klasy pręta na kształt badanego przebiegu. Dla większości atrybutów otrzymywana pewność reguł jest niska i w niektórych przypadkach wynosi zaledwie 46%. Należy jednak zauważyć, że reguły wskazują na brak wpływu klasy pręta na wartości atrybutów  $d$ . Główną różnicą jest wartość amplitudy maksymalnej. Niska pewność reguł wynika z wpływu szumu. Tezę tą potwierdzono badając odchylenie standardowe i wzrost wartości atrybutów  $d$  dla próbek różniących się jedynie klasą pręta.

#### 4. Modyfikacja i selekcja atrybutów

W poprzednim rozdziale zauważono, że w niektórych przypadkach niedoskonałości w wykonywaniu pomiarów mogą zostać zniwelowane poprzez utworzenie i dodanie do bazy danych atrybutów sztucznych, powstających poprzez proste zsumowanie kilku innych. Należy jednak pamiętać, że w przypadku znacznej części klasyfikatorów zwiększanie liczby atrybutów, przy stałej liczbie rekordów prowadzi do obniżenia poprawności klasyfikacji. Zjawisko to nazywane jest „przekleństwem wymiarowości” (z ang. curse of dimensionality). Jednym z podstawowych sposobów radzenia sobie z tym problemem jest wybór tylko najpotrzebniejszych atrybutów i usunięcie pozostałych z bazy danych. W celu doboru optymalnego zestawu atrybutów posłużyć się można dwoma grupami metod. Pierwszą z nich są tzw. wrappery - algorytmy testujące kolejno wszystkie możliwe kombinacje zestawów atrybutów i wybierające zestaw najlepszy dla danego modelu. Metoda ta, choć bardzo skuteczna, ze względu na swoją złożoność obliczeniową w praktyce jest używana tylko przy bardzo małych bazach danych, lub po wcześniejszej selekcji atrybutów z użyciem filtrów. Filtrami nazywa się grupę metod, służących do tworzenia rankingów atrybutów (od najbardziej do najmniej użytecznych). Jednym z najczęściej stosowanych filtrów jest InfoGain wykorzystujący tzw. dywergencję Kullbacka-Leibera. Jego działanie przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Poprawność klasyfikacji Naïwnego Klasyfikatora Bayesa w funkcji liczby atrybutów; atrybuty dobierane kolejno według rankingu InfoGain

Bardzo typowy przebieg ilustrujący „zjawisko przekleństwa wymiarowości” uzyskano w przypadku klasyfikacji grubości otuliny. Poprawność klasyfikacji wzrastała wraz ze wzrostem liczby atrybutów, a po osiągnięciu optimum zaczęła spadać. W badaniach brano pod uwagę dziesięć różnych wartości grubości otuliny.

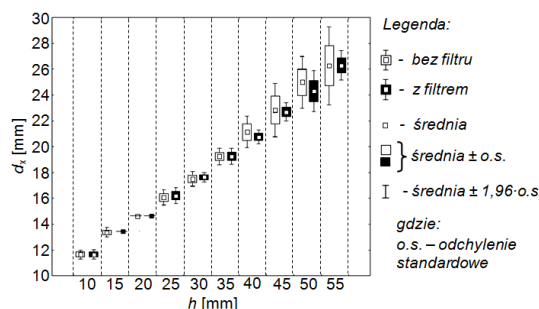
W przypadku identyfikacji klasy pręta zaobserwowano, że klasyfikator działał najlepiej przy jednym tylko atrybucie ( $U_{max}$ ). Dodanie każdego kolejnego powodowało znaczny spadek poprawności klasyfikacji. Potwierdza to wynik uzyskany podczas wydobywania reguł asocjacji, według których wartość współczynników kształtu  $d$  była niezależna od klasy pręta. Sama poprawność klasyfikacji nie była satysfakcjonująca. Podczas badań testowano trzy różne klasy prętów.

Bardzo słabe wyniki uzyskano podczas identyfikacji średnicy. Podczas badań posłużono się prętami o czterech różnych średnicach (8, 10, 12 i 14 mm). Zauważono, że reguły asocjacji w przypadku wzrostu średnicy pręta i grubości otuliny są takie same, co stanowiło utrudnienie podczas identyfikacji. Porównując jednak wykresy i dokonując podstawowych analiz statystycznych można zauważyć, że zmiany amplitudy napięcia w przypadku zmiany grubości otuliny są znacznie większe, niż w przypadku zmiany średnicy pręta. Również kształt uzyskiwanych przebiegów różni się nieznacznie.

Bardzo istotnym elementem modelu jest klasyfikator. Dążąc do podniesienia poprawności klasyfikacji warto posłużyć się kilkoma różnymi metodami klasyfikacji w kilku różnych konfiguracjach. Podczas badań w pierwszej kolejności wykorzystano proste algorytmy probabilistyczne: 0-R, który zawsze wybiera najczęstszą klasę decyzyjną ignorując dane wejściowe oraz 1-R tworzący jednopoziomowe drzewo decyzyjne. Metody te bardzo dobrze ukazują poziom złożoności problemu decyzyjnego. Niemniej otrzymywana poprawność klasyfikacji zwykle odbiega od poprawności bardziej złożonych klasyfikatorów. Wśród testowanych algorytmów znalazły się również m.in. wspomniany wcześniej Naiwny Klasyfikator Bayesa (NB), który jest algorytmem prostym i szybkim, jednak jak wykazały badania, algorytm ten nie nadaje się do identyfikacji średnicy i klasy prętów zbrojeniowych. Do klasyfikacji stosowano również sieć neuronową MLP, oraz algorytm drzewa decyzyjnego C4.5 wykorzystujący miarę entropii informacji. W przypadku identyfikacji grubości otuliny najlepszy okazał się być algorytm NB (98% poprawności). Do identyfikacji klasy pręta posłużono się algorytmem drzewa decyzyjnego C4.5, poprawność klasyfikacji sięgnęła w tym przypadku 80%. Algorytm ten okazał się również najlepszy przy identyfikacji średnicy, gdzie poprawność klasyfikacji sięgnęła 75%.

Innym sposobem na poprawę otrzymanych rezultatów jest wygładzenie przebiegów napięcia. Metoda wiroprowadowa jest czuła na zakłócenia. Problem ten narasta wraz ze spadkiem amplitudy otrzymywanego przebiegu. Ta zaś w głównej mierze zależy od grubości otuliny  $h$ . Przy umiarkowanym  $h$  bardzo dobrym rozwiązaniem okazał się być prosty filtr medianowy. Metoda ta nie wprowadza prawie żadnych modyfikacji, w gładkich przebiegach, skutecznie usuwa elementy odstające, a w przypadkach, gdy przebiegi są lekko zaszumione może posłużyć do ich wygładzania. Gdy grubość otuliny jest duża, a wpływ szumu znaczący, przydatne okazało się zastosowanie również innych metod wygładzania. Skuteczną, a zarazem bardzo prostą metodą, jest średnia krocząca. Z metod bardziej zaawansowanych należy wspomnieć o filtrze Savitzky-Golay'a (lokalne wygładzanie wielomianem niskiego stopnia) i regresji najbliższych sąsiadów. Bardzo użyteczne mogą okazać się też dolnoprzepustowe filtry częstotliwościowe. W szczególności interesujący jest filtr Butterwortha, który charakteryzuje się maksymalnie płaską charakterystyką amplitudową w paśmie przenoszenia. Należy jednak pamiętać, że filtry częstotliwościowe wprowadzają przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałem wejściowym, a wyjściowym. Badania wykazały, że znacznie istotniejszym od rodzaju wykorzystanej metody wygładzania jest właściwy dobór jej parametrów. Przy niedostatecznym wygładzeniu przebiegów odchylenie standardowe pomiędzy pomiarami wykonanymi na tej samej próbce może być duże, co utrudnia klasyfikację. Przesadne wygładzenie może natomiast prowadzić do utraty informacji zawartych w przebiegu. Na rysunku 5 przedstawiono efekt zastosowania filtra Butterwortha z

odpowiednio dobranymi parametrami. Wykorzystanie filtra umożliwiło zmniejszenie odchylenia standardowego pomiarów. Efekt ten był szczególnie dobrze widoczny przy grubości otuliny powyżej 35 mm. W niektórych przypadkach znacznej zmianie uległa również wartość średnia poszczególnych atrybutów.



Rys. 5. Wpływ dolnoprzepustowego filtra Butterwortha na powtarzalność pomiarów; na przykładzie identyfikacji grubości otuliny

Zmiana wartości atrybutów  $d$  w funkcji grubości otuliny ma charakter liniowy. Wynika z tego, że posługując się analizą regresji można w sposób prosty i znacznie bardziej niż dotychczas dokładnie określać grubość otuliny betonowej. Na podstawie rysunku 5 można również zauważyć, że wartość odchylenia standardowego pomiarów zaczyna znacząco wzrastać przy około 30÷40 mm (w zależności od badanego atrybutu). Badania wykazały, że relatywnie niski poziom poprawności klasyfikacji klasy i średnicy prętów wynikał z niedostatecznej czułości przetwornika. Próbuąc badać wspomniane parametry przy grubościach otuliny z przedziału 10÷35 mm, po zastosowaniu wygładzania w obu przypadkach uzyskano poprawność klasyfikacji na poziomie około 95%.

## 5. Wnioski

Przedstawione w artykule metody analizy wyników badań wiroprowadowych są uniwersalne i mogą posłużyć na każdym etapie wydobywania wiedzy z pomiarów i zwiększania poprawności identyfikacji. Przedstawione wyniki badań umożliwiają zrozumienie zależności pomiędzy otrzymywanym przebiegiem napięcia, a fizycznymi parametrami badanego obiektu, co w konsekwencji może posłużyć do zbudowania sprawnego systemu ekspertowego.

Proponowane metody i algorytmy wydobywania wiedzy nie umożliwiły całkowitego usunięcia problemu niedostatecznej czułości przetwornika. Pozwoliły jednak na poprawę wyników identyfikacji i określenie zakresu efektywności przetwornika.

## Literatura

- [1] Agrawal R, Srikant R.: Fast algorithms for mining association rules in large databases, Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases, 1994, s. 487-499.
- [2] Chady T., Frankowski P.: Electromagnetic Evaluation of Reinforced Concrete Structure, Review Of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.32, 2013, s. 1355-1362.
- [3] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: Diagnostyka konstrukcji żelbetonowych, – Tom 1. PWN, Warszawa 2010.
- [4] Shearer C.: The CRISP-DM model: the new blueprint for data mining, J Data Warehousing, nr 5/2000, s. 13-22.
- [5] Zybura A., Jaśniok A., Jaśniok T.: Diagnostyka konstrukcji żelbetonowych, Tom 2. PWN, Warszawa 2011.

Mgr inż. Paweł Frankowski

e-mail: pawel.frankowski@sk.sep.szczecin.pl

Paweł Karol Frankowski uzyskał stopień magistra inżyniera w 2012 roku na Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie. Obecnie jest doktorantem na Wydziale Elektrycznym oraz studentem na Wydziale Informatyki ZUT. Jego obszar zainteresowań obejmuje tematykę badań nieniszczących oraz zastosowań sztucznej inteligencji. Podczas studiów uczestniczył z sukcesami w licznych konkursach naukowych.



otrzymano/received: 05.07.2013

przyjęto do druku/accepted: 16.02.2014

# ADAPTACYJNY REGULATOR LQR W UKŁADZIE STEROWANIA KĄTEM KURSOWYM I PRĘDKOŚCIĄ STATKU OPISANEGO NIELINIOWYM MODELEM DYNAMICZNYM MIMO

Michał Brasel

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Wydział Elektryczny, Katedra Automatyki Przemysłowej i Robotyki

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano adaptacyjny układ sterowania kątem kursowym i prędkością statku opisanego nieliniowym modelem dynamicznym MIMO (ang. Multi-input, Multi-Output) o czterech stopniach swobody ruchu (ang. Four-Degrees-of-Freedom, 4-DoF). Przedstawiony model statku jest silnie nieliniowy i uwzględnia nie tylko ograniczenia saturacyjne sygnałów sterujących ale także dynamikę maszyny sterowej i napędu głównego. Głównym zadaniem zaprojektowanego adaptacyjnego regulatora LQR jest sterowanie kątem kursowym statku i jego prędkością względem wody. Poszczególne zestawy parametrów regulatora użyte w procesie adaptacji zostały wyznaczone na podstawie linearyzacji modelu statku w wybranych nominalnych punktach pracy. W końcowej części artykułu przedstawiono wyniki badań symulacyjnych zaprojektowanego regulatora w układzie z pełnym nieliniowym modelem statku.

**Słowa kluczowe:** sterowanie optymalne, sterowanie adaptacyjne, obiekty nieliniowe, nieliniowy model statku

## ADAPTIVE LQR COURSE-KEEPING CONTROLLER FOR THE NONLINEAR MIMO MODEL OF A CONTAINER VESSEL

**Abstract.** In the paper an adaptive control system for the nonlinear 4-DoF model of a container vessel is presented. The considered model of the ship includes input signals saturations and dynamics of actuators. Main goal of the presented control system is control of the course angle and speed of the ship relative to water. The system synthesis is carried out by means of LQ-optimal control method. Sets of controller parameters are designed using linearization of the considered model in the nominal steady-state operating points of the ship. The final part of the paper includes simulation results of control system operation with full nonlinear MIMO model of the container vessel.

**Keywords:** optimal control, adaptive control, nonlinear systems, nonlinear model of a ship

### Wstęp

Zagadnienia związane ze sterowaniem nieliniowymi obiektami dynamicznym MIMO są nadal przedmiotem ciągłych badań i źródłem wielu nierozwiązanych problemów [1-4, 6, 7, 9]. Przykładem takich obiektów mogą być wszelkie obiekty fizyczne o wielu stopniach swobody ruchu, takie jak pływające jednostki morskie, manipulatory przemysłowe czy obiekty latające.

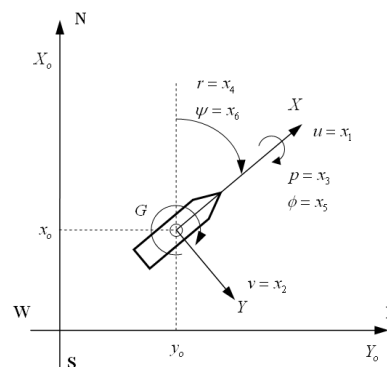
W prezentowanym artykule obiektem sterowania jest nieliniowy model matematyczny kontenerowca opisujący jego przemieszczenie w czterech stopniach swobody ruchu. Wraz ze zmianą parametrów ruchu statku (poszczególnych prędkości składowych statku względem wody) zmieniają się oddziaływania hydrodynamiczne związane z naporem wody na kadłub. Charakter tych zmian jest silnie nieliniowy, co powoduje duże trudności w sterowaniu ruchem statku. Jako rozwiązanie tego problemu w artykule proponuje się zastosowanie adaptacyjnego regulatora LQR o parametrach zmieniających się skokowo [2-4, 6, 7, 9], zależnie od aktualnych właściwości dynamicznych jednostki pływającej. Głównym zadaniem zaprojektowanego regulatora LQR jest sterowanie kątem kursowym statku i jego prędkością postępową względem wody. W artykule przedstawiono model statku uwzględniający dynamikę urządzeń wykonawczych i ograniczenia saturacyjne sygnałów sterujących, następnie opisano proces syntezy regulatora bazujący na linearyzacji modelu obiektu w nominalnych punktach pracy i procedurę adaptacji parametrów tego regulatora. Na koniec przedstawiono wyniki badań symulacyjnych zaprojektowanego układu sterowania wraz z pełnym nieliniowym modelem statku.

### 1. Nieliniowy model matematyczny statku

W pracy wykorzystano nieliniowy model matematyczny opisujący statek - kontenerowiec wyposażony w jednośrubowy napęd główny ze sterem. Nominalne reżimy pracy takiego statku cechują się dużymi prędkościami statku względem wody (szczególnie prędkością wzdłużną), a podstawowym celem sterowania jest regulacja kąta kursowego statku i prędkości wzdłużnej względem wody. Parametry szczegółowe statku:

Długość statku:  $L=175\text{m}$ , szerokość:  $B=25,4\text{m}$ , średnie zanurzenie:  $d=8,5\text{m}$ .

Przyjęto następujące oznaczenia prędkości liniowych i kątowych statku w poszczególnych stopniach swobody ruchu:  $u$  - składowa wzdłużna prędkości liniowej statku względem wody,  $v$  - składowa poprzeczna prędkości liniowej statku względem wody,  $p$  - prędkość kątowa statku wokół osi wzdłużnej,  $r$  - prędkość kątowa statku wokół osi pionowej, oraz oznaczenia odpowiadających im współrzędnych położeniowych określanych w nieruchomym układzie odniesienia związanym z ziemią:  $x_0$  - współrzędna położenia środka ciężkości statku w kierunku N-S,  $y_0$  - współrzędna położenia środka ciężkości statku w kierunku W-E,  $\phi$  - kąt kołysania bocznego statku,  $\psi$  - kąt kursowy statku. Wszystkie zmienne występujące w opisie matematycznym ruchu statku zaznaczono na rys. 1.



Rys. 1. Układy odniesienia statku

Ogólne nieliniowe równania ruchu statku w 4-DoF są następujące [5, 8]:

$$\begin{aligned} (m + m_x) \dot{u} - (m + m_y) vr &= X \\ (m + m_y) \dot{v} + (m + m_x) ur + m_y \alpha \dot{r} - m_y l_y \dot{p} &= Y \\ (I_x + J_x) \dot{p} - m_y l_y \dot{v} - m_x l_x ur + WGM\phi &= K \\ (I_z + J_z) \dot{r} + m_y \alpha \dot{v} &= N - Yx_G \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:  $m$  oznacza masę statku;  $m_x$  i  $m_y$  masy dodane w kierunkach  $X$  i  $Y$ ;  $J_x$  i  $J_z$  dodane momenty bezwładności w osiach  $X$  i  $Z$ ;  $l_x$  i  $l_z$



momenty bezwładności statku w osiach  $X$  i  $Z$ . Ponadto,  $\alpha_y$  oznacza współrzędną w kierunku osi  $X$  środka masy  $m_y$ ;  $l_x$  i  $l_y$  współrzędne w kierunku osi  $Z$  środków mas  $m_x$  i  $m_y$ ;  $x_G$  współrzędną wzdłużną środka ciężkości statku;  $GM$  wysokość metacentryczną statku.

Hydrodynamiczne siły  $X$ ,  $Y$  i momenty  $K$ ,  $N$  w powyższych równaniach określone są następująco:

$$X = X_{uu}|u|u + (1-t)T + X_{vr}vr + X_{vv}v^2 + X_{rr}r^2 + X_{\phi\phi}\phi^2 + c_{RX}F_N \sin(\delta), \quad (2)$$

$$Y = Y_vv + Y_r r + Y_p p + Y_\phi\phi + Y_{vvv}v^3 + Y_{rrr}r^3 + Y_{vvr}v^2r + Y_{vrr}vr^2 + Y_{v\phi\phi}v^2\phi + Y_{v\phi\phi}v\phi^2 + Y_{rr\phi}r^2\phi + Y_{r\phi\phi}r\phi^2 + (1+a_H)F_N \cos(\delta), \quad (3)$$

$$N = N_vv + N_r r + N_p p + N_\phi\phi + N_{vvv}v^3 + N_{rrr}r^3 + N_{vvr}v^2r + N_{vrr}vr^2 + N_{v\phi\phi}v^2\phi + N_{v\phi\phi}v\phi^2 + N_{rr\phi}r^2\phi + N_{r\phi\phi}r\phi^2 + (x_R + a_H x_H)F_N \cos(\delta), \quad (4)$$

$$K = K_vv + K_r r + K_p p + K_\phi\phi + K_{vvv}v^3 + K_{rrr}r^3 + K_{vvr}v^2r + K_{vrr}vr^2 + K_{v\phi\phi}v^2\phi + K_{v\phi\phi}v\phi^2 + K_{rr\phi}r^2\phi + K_{r\phi\phi}r\phi^2 - (1+a_H)z_R F_N \cos(\delta). \quad (5)$$

gdzie: siła  $F_N$  określona jest jako:

$$F_N = \frac{-6.13\Delta}{\Delta + 2.25} \cdot \frac{A_R}{L^2} (u_R^2 + v_R^2) \sin(\alpha_R), \quad (6)$$

gdzie:

$$\alpha_R = \delta + \tan^{-1}(v_R / u_R), \quad (7)$$

$$u_R = u_p \varepsilon \sqrt{1 + 8kK_T / (\pi J^2)}, \quad (8)$$

$$v_R = \gamma v + c_{Rr}r + c_{Rrr}r^3 + c_{Rrv}r^2v, \quad (9)$$

gdzie:

$$J = u_p V / (nD), \quad (10)$$

$$K_T = 0.527 - 0.455J, \quad (11)$$

$$u_p = \cos(v) \left[ (1 - w_p) + \tau \left\{ (v + x_p r)^2 + c_{pv}v + c_{pr}r \right\} \right]. \quad (12)$$

Pozostałe wartości parametrów modelu statku użyte w powyższych równaniach podane są w pracy [5]. Aktualna prędkość postępową statku względem wody wyraża się wzorem:

$V = \sqrt{u^2 + v^2}$ . Sygnałami sterującymi dla tego modelu statku są:  $\delta$  (wychylenie steru) i  $n$  (prędkość śruby głównej).

## 2. Synteza adaptacyjnego regulatora LQR

Powyższy model ruchów statku może być zapisany w postaci nieliniowych równań w przestrzeni stanów:

$$\dot{\mathbf{x}}_2(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}_2(t), \mathbf{u}(t)) \quad (13)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{x}_2(t), \mathbf{u}(t)),$$

gdzie: semi-wektor stanu statku zdefiniowany jest następująco:

$$\mathbf{x}_2(t) = [u \ v \ p \ r \ \phi \ \psi]^T \quad (14)$$

a wektory sygnałów wyjściowych i wejściowych:

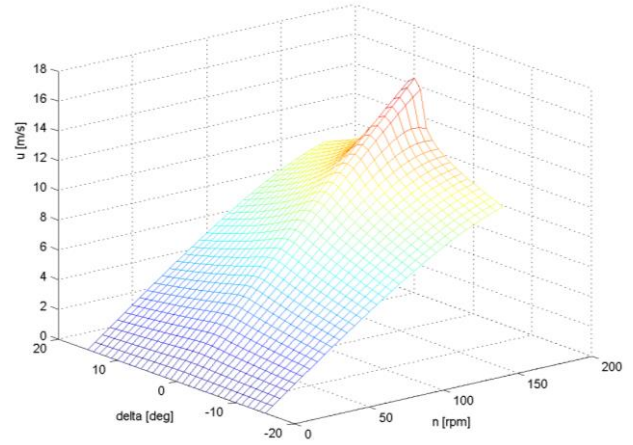
$$\mathbf{y}(t) = [u(t) \ \psi(t)]^T \quad (15)$$

$$\mathbf{u}(t) = [\delta(t) \ n(t)]^T.$$

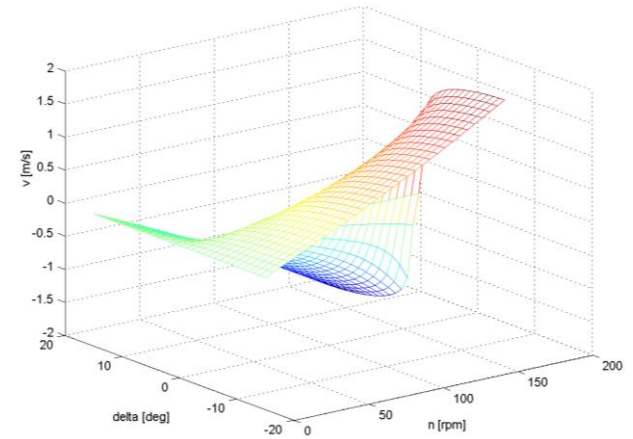
W celu syntezy układu sterowania model ten jest linearyzowany w nominalnych punktach pracy statku. Nominalny reżim pracy statku zdefiniowany jest następująco:

$$\mathbf{x}_{2n} = [u_n \ v_n \ 0 \ r_n \ \phi_n \ \psi_n]^T. \quad (16)$$

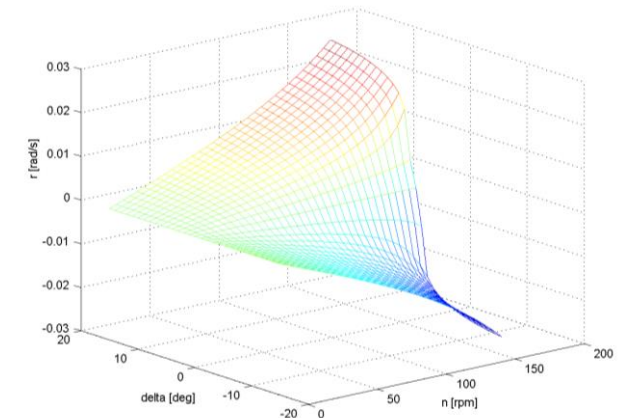
Wartości zmiennych stanu:  $u_n$ ,  $v_n$ ,  $r_n$ ,  $\phi_n$  zostały wyznaczone w symulacyjnych próbach cyrkulacji statku dla sygnałów sterujących:  $\delta_o$  and  $n_o$ . Zakresy zmian tych sygnałów są następujące:  $\delta_o = \langle -15 \div 15 \rangle \text{deg}$  co 1 deg i  $n_o = \langle 5 \div 160 \rangle \text{rpm}$  co 5 rpm. Daje to razem 992 nominalne punkty pracy statku. Każda kombinacja sygnałów sterujących i odpowiadających im parametrów ruchu statku definiuje nam nominalny reżim pracy statku. Zależności prędkości wzdłużnej  $u_n(\delta_o, n_o)$ , bocznej  $v_n(\delta_o, n_o)$  oraz kątowej  $r_n(\delta_o, n_o)$  statku od sygnałów sterujących w nominalnych punktach pracy statku pokazano na poniższych rysunkach.



Rys. 2. Wartości prędkości wzdłużnej statku w nominalnych punktach pracy



Rys. 3. Wartości prędkości bocznej statku w nominalnych punktach pracy



Rys. 4. Wartości prędkości kątowej statku w nominalnych punktach pracy



W wyniku linearyzacji tego modelu w całym zakresie nominalnych sygnałów sterujących otrzymuje się zestaw liniowych modeli statku:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_2(t) &= \mathbf{A}_2[\mathbf{x}_2(t) - \mathbf{x}_{2n}] + \mathbf{B}_2[\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}_n] \\ \mathbf{y}(t) - \mathbf{y}_n &= \mathbf{C}_2[\mathbf{x}_2(t) - \mathbf{x}_{2n}],\end{aligned}\quad (17)$$

gdzie:

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_2 &= \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}^T(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \right]_{\substack{\mathbf{x}_2=\mathbf{x}_{2n} \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_n}}^T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} & a_{15} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{64} & a_{65} & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_2 &= \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{u}} \mathbf{f}^T(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \right]_{\substack{\mathbf{x}_2=\mathbf{x}_{2n} \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_n}}^T = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & 0 & 0 \\ b_{12} & b_{22} & b_{32} & b_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \\ \mathbf{C}_2 &= \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}^T(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \right]_{\substack{\mathbf{x}_2=\mathbf{x}_{2n} \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_n}}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},\end{aligned}\quad (18)$$

gdzie: poszczególne elementy  $a_{ij}$  i  $b_{ij}$  zależą od prędkości:  $u$ ,  $v$ ,  $r$  statku względem wody, kąta przechylenia bocznego  $\phi$  statku i sygnałów sterujących  $\mathbf{u}_n = [\delta_o \ n_o]^T$  w nominalnym punkcie pracy statku.

Dodatkowo dla celów syntezy układu sterowania przyjęto prosty model dynamiki maszyny sterowej w postaci liniowego układu pierwszego rzędu ze stałą czasową  $T_s=1.8$ s. i model napędu głównego o stałej czasowej  $T_m=10.48$ s. Współczynniki te uzyskano przez uśrednienie wartości podanych w pracy [5]. Dzięki temu układ wykonawczy statku może być zapisany jako:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_1(t) &= \mathbf{A}_1 \mathbf{x}_1(t) + \mathbf{B}_1 \mathbf{u}_c(t) \\ \mathbf{y}_1(t) &= \mathbf{x}_1(t),\end{aligned}\quad (19)$$

gdzie:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} -0.556 & 0 \\ 0 & -0.095 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0.556 & 0 \\ 0 & 0.095 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Przy czym  $\mathbf{u}_c(t)$  jest deklaratorem wektorem sygnałów sterujących, a  $\mathbf{u}(t)$  jest wektorem sygnałów sterujących. Pełny wektor stanu statku uwzględniający dynamikę urządzeń wykonawczych można teraz zapisać jako:

$$\mathbf{x}(t) = [\delta \ n \ u \ v \ p \ r \ \phi \ \psi]^T. \quad (21)$$

W końcu, pełny zlinearyzowany model statku opisany jest macierzami:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2 & \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [\mathbf{0} \ \mathbf{C}_2], \quad \mathbf{D} = \mathbf{0}, \quad (22)$$

gdzie: wektory sygnałów sterujących i wyjściowych zdefiniowane są jako:  $\mathbf{u}_c(t) = [\delta_c(t) \ n_c(t)]^T$  i  $\mathbf{y}(t) = [\mathbf{u}(t) \ \psi(t)]^T$ .

Rozwiązanie zagadnienia sterowania LQ-optimalnego dla liniowego modelu dynamicznego (22) sprowadza się do wyznaczenia optymalnej macierzy sprzężeń zwrotnych  $\mathbf{F}$  od stanu gwarantującej pożądane właściwości układu sterowania poprzez minimalizację kwadratowego wskaźnika jakości sterowania w nieskończonym horyzoncie czasu ciągłego:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty ([\mathbf{y}(t) - \mathbf{y}_n]^T \Psi [\mathbf{y}(t) - \mathbf{y}_n] + [\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}_n]^T \Phi [\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}_n]) dt \quad (23)$$

gdzie: symetryczna macierz wagowa  $\Psi \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$  jest nieujemnie określona  $\Psi \geq 0$  natomiast, macierz  $\Phi \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$  dodatnio określona  $\Phi > 0$ . Mając dany opis liniowego obiektu sterowania w przestrzeni stanów  $\{\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}\}$  oraz określone macierze wagowe  $\Psi$  i  $\Phi$  poprzez minimalizację wskaźnika  $J$  można wyznaczyć

optymalną macierz sprzężeń zwrotnych  $\mathbf{F}$  od wektora stanu:

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{N}^T), \quad (24)$$

gdzie: symetryczna i nieujemnie określona macierz  $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{8 \times 8}$  jest rozwiązaniem algebraicznego równania Riccatiego, natomiast macierze:  $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ ,  $\mathbf{N} \in \mathbb{R}^{8 \times 2}$  są zdefiniowane następująco:

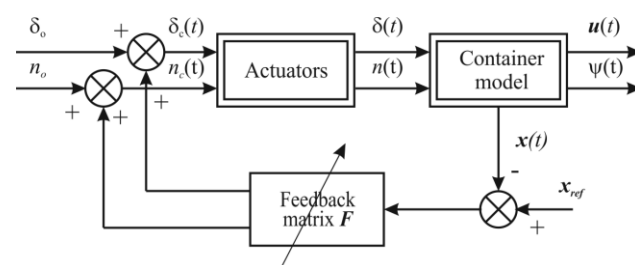
$\mathbf{N} = \mathbf{C}^T \Psi \mathbf{D}$ ,  $\mathbf{R} = \mathbf{D}^T \Psi \mathbf{D} + \Phi$ . W celu dokonania syntezy adaptacyjnego układu sterowania nieliniowym modelem statku, zlinearyzowano go w typowych nominalnych punktach pracy i zaprojektowano macierz  $\mathbf{F}$  dla każdego z nich.

### 3. Struktura układu sterowania i wyniki symulacji

Zaprojektowany zestaw 992 regulatorów został wykorzystany do stworzenia adaptacyjnego regulatora LQR o parametrach strojonych skokowo na podstawie trzech zmierzonych sygnałów pomocniczych:  $u$ ,  $v$  i  $r$ . Do wyznaczenia najbliższego nominalnego punktu pracy statku względem aktualnego stanu statku minimalizuje się wskaźnik  $J_n$ :

$$J_n = \left( \frac{\Delta u}{u_{\max}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta v}{v_{\max}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta r}{r_{\max}} \right)^2 \quad (25)$$

gdzie:  $\Delta u$ ,  $\Delta v$  i  $\Delta r$  są odchyleniami odpowiednich prędkości aktualnych statku od prędkości w nominalnym punkcie pracy, natomiast:  $u_{\max}$ ,  $v_{\max}$  i  $r_{\max}$  są maksymalnymi wartościami odpowiednich prędkości statku spośród wszystkich wartości w nominalnych punktach pracy. Adaptacyjny regulator LQR strojony jest na bieżąco zależnie od znalezionej "najbliższego" względem kryterium (25) punktu pracy statku. Struktura proponowanego układu sterowania kątem kursowym i prędkością postępową statku przedstawiona jest na Rys. 5.



Rys. 5. Struktura adaptacyjnego układu sterowania z regulatorem LQR

Wektor sygnałów  $\mathbf{u}_c(t)$  w proponowanym układzie sterowania wyraża się zależnością:

$$\mathbf{u}_c(t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}_{ref} - \mathbf{x}(t)) + \mathbf{u}_n, \quad (26)$$

gdzie: wektor  $\mathbf{x}_{ref}$  jest referencyjnym wektorem stanu statku (wektor wartości zadanych) określonym jako:

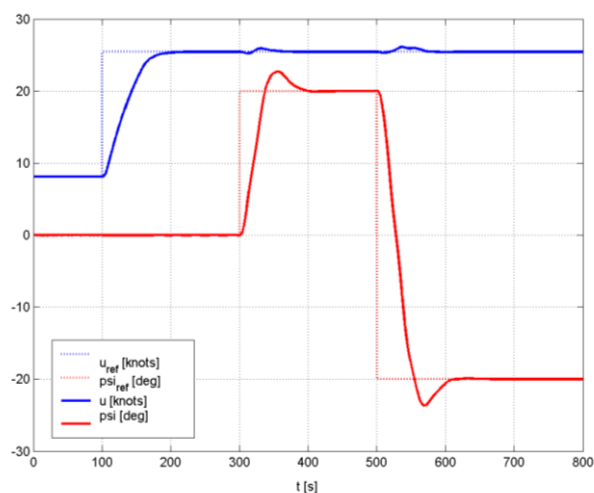
$$\mathbf{x}_{ref} = [0 \ n_{ref} \ u_{ref} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \psi_{ref}]^T. \quad (27)$$

przy czym  $n_{ref}$  jest referencyjną prędkością obrotową śruby głównej, odpowiadającą prędkości  $u_{ref}$  statku, wyznaczoną z wykresu na Rys. 2 dla wychylenia steru równego zero.

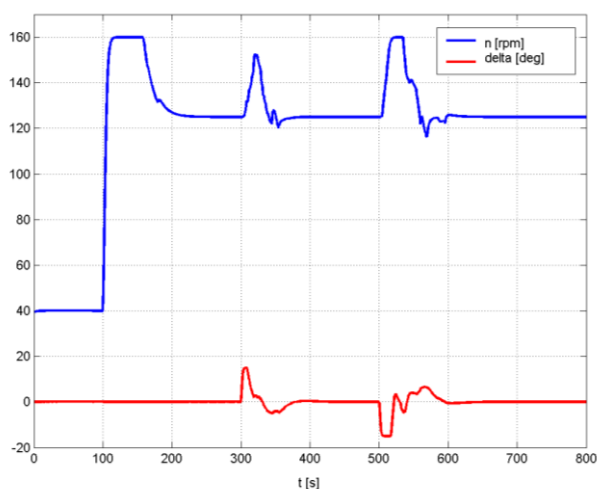
Głównym zadaniem tego układu sterowania jest jednoczesna regulacja dwóch sygnałów wyjściowych statku: kąta kursowego i jego prędkości wzdłużnej. W celu uzyskania możliwie szybkich przebiegów sygnałów wyjściowych układu regulacji przy możliwie najmniejszych nasyceniach sygnałów sterujących, macierze wagowe kryterium (23) zostały wyznaczone metodą kolejnych przybliżeń, jako:

$$\Psi = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 30 \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} 13 & 0 \\ 0 & 0.002 \end{bmatrix}, \quad (28)$$

Prezentowane poniżej wyniki symulacji uzyskano na drodze badań przeprowadzonych w środowisku MATLAB/Simulink. Na rys. 6 pokazano przebiegi sygnałów wyjściowych, natomiast na rys. 7 odpowiadające im przebiegi sygnałów sterujących.

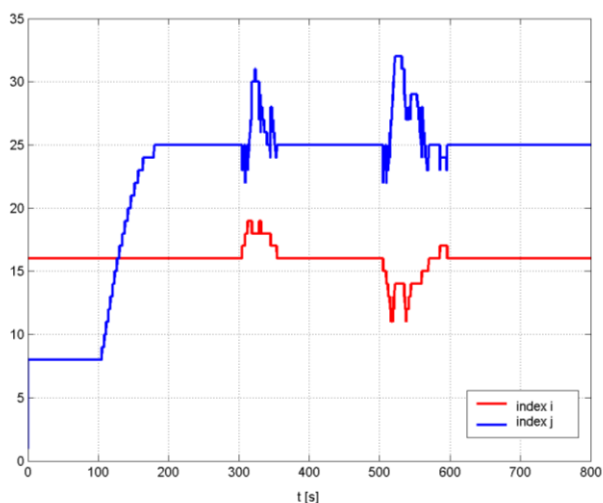


Rys. 6. Przebiegi sygnałów wyjściowych układu sterowania



Rys. 7. Przebiegi sygnałów sterujących

Na rys. 8 pokazano zmianę indeksów nominalnych punktów pracy statku w czasie wykonywania manewru zmiany kąta kursowego i prędkości wzdłużnej statku. Momentom zmian tych indeksów odpowiadają momenty zmian parametrów adaptacyjnego regulatora LQR.



Rys. 8. Momenty zmian parametrów regulatora LQR

Wszystkie badania opracowanej struktury układu sterowania przeprowadzono uwzględniając ograniczenia sygnałów sterujących, zarówno maksymalną prędkość śruby głównej:  $n_{max}=160\text{rpm}$ , jak i maksymalny kąt wychylenia steru:  $\delta_{max}=\pm 15\text{deg}$  oraz maksymalną prędkość wychylenia steru:  $\dot{\delta}_{max}=5\text{deg/s}$ .

#### 4. Podsumowanie

W artykule zaproponowano i przetestowano adaptacyjny układ sterowania LQR dla nieliniowego obiektu dynamicznego MIMO opisującego statek poruszający się w 4-DoF. Synteza układu sterowania opiera się na linearyzacji nieliniowego modelu statku w 992 typowych punktach jego pracy i zaprojektowaniu regulatorów LQR dla każdego z tych punktów. Adaptacyjny regulator LQR strojony jest skokowo zależnie od aktualnego punktu pracy statku na podstawie trzech mierzonych sygnałów pomocniczych, prędkości wzdłużnej, bocznej i kątowej statku względem wody:  $u$ ,  $v$  i  $r$ . Uzyskane wyniki symulacyjne w proponowanym układzie sterowania z pełnym nieliniowym modelem statku wraz z ograniczeniami sygnałów sterujących, potwierdzają możliwość otrzymania wysokiej jakości regulacji zarówno kąta kursowego jak i prędkości statku.

#### Literatura

- [1] Åström K., Wittenmark B.: Adaptive control, Addison Wesley, 1995.
- [2] Brasel M., Bańka S.: Adaptive LQR Control System for Nonlinear MIMO Model of a Drill-Ship with Wind Disturbances, XIV International PhD Workshop OWD 2012, 20-23 October, Wisła, Poland, 2012, s. 81-84.
- [3] Dworak P., Jaroszewski K., Brasel M.: Rozmyty regulator TSK do sterowania obiektem cieplnym MIMO. Przegląd Elektrotechniczny 10a, 2012, s. 83-87.
- [4] Dworak P., Jaroszewski K., Brasel M.: Neuronowy regulator do sterowania nieliniowym obiektem cieplnym MIMO. Przegląd Elektrotechniczny 10a, 2012, s. 79-83.
- [5] Fossen T. I.: Guidance and Control of Ocean Vehicles. John Wiley and Sons, 1994.
- [6] Morse A.S.: Control Using Logic-Based Switching, Trends in Control: A European Perspective, Springer-Verlag, 1998, s. 69-113.
- [7] Shengxiang J., Voulgaris P.G.: Performance Optimization of Switched Systems: A Model Matching Approach, IEEE Transactions on Automatic Control, 54, 2009, nr 9, s. 2058-2071.
- [8] Son, K. H., Nomoto K.: On the Coupled Motion of Steering and Rolling of a High Speed Container, J.S.N.A., Japan, 1981, Vol. 150, s. 232-244.
- [9] Yamé J., Kinnaert M., Delwiche T.: Parametrization of MIMO multi-controller schemes for bumpless switching, European Control Conference, ECC'07, Kos, Greece, 2007.

**Mgr inż. Michał Brasel**

e-mail: [michal.brasel@zut.edu.pl](mailto:michal.brasel@zut.edu.pl)

Student stacjonarnych studiów doktoranckich na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Swoje aktualne zainteresowania naukowe koncentruje na zagadnieniach sterowania nieliniowymi obiektami dynamicznymi MIMO, sterowaniu adaptacyjnym i praktycznym wykorzystaniu algebry liniowej w syntezie układów sterowania.



otrzymano/received: 27.06.2013

przyjęto do druku/accepted: 16.02.2014

# OPTIMALIZACJA GEOMETRII GŁOWICY TNĄCEJ OBRABIARKI WATER-JET Z WYKORZYSTANIEM METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Maciej Szczepanik

Politechnika Śląska, Katedra Budowy Maszyn

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono proces optymalizacji postaci geometrycznej głowicy tnącej obrabiarki water-jet z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS Workbench. Celem badań było sprawdzenie jaki wpływ mają zmiany poszczególnych wymiarów na zmianę parametrów przepływu strugi wodno-ścierniej. Analiza statystyczna wyników pozwoli ograniczyć stopień skomplikowania modelu w późniejszych badaniach zbiorczych poprzez pominięcie nieistotnych parametrów.

**Słowa kluczowe:** Optymalizacja, MES, obróbka wodno-ścierna, parametry geometryczne

## GEOMETRY OPTIMIZATION OF WATER-JET MACHINE CUTTING HEAD USING FINITE ELEMENT METHOD

**Abstract.** The article presents optimization process of water-jet cutting head geometry using ANSYS Workbench software. The aim of study was to examine influence of specific dimensions on output abrasive stream flow parameters. Statistical analysis of the results will help to reduce the complexity of the model in the later studies by omitting irrelevant parameters.

**Keywords:** Optimization, FEM, water-jet machining, geometry parameters

### Wstęp

Obróbka metodą wodno-ścierną wykorzystywana jest w przemyśle przez prawie 20 lat. Jest to niekonwencjonalna metoda obróbki, w której ziarna materiału ściernego w wysokim ciśnieniowym strumieniu wody uderzają w przedmiot obrabiany powodując jego erozję. W procesie tym cząstki ścierniwa, takiego jak granat lub krzemionka są porywane przez strumień wody pod wysokim ciśnieniem i przyspieszane do osiągnięcia pożądanych parametrów obróbki.

### 1. Założenia modelu

Modelem wykorzystanym w trakcie badań jest dysza wodna, w skład której wchodzi korpus, kamień spiętrzający wraz z mocowaniem oraz fragment kanału doprowadzającego i dodatkowa przestrzeń reprezentująca powietrze.

#### 1.1. Analiza przepływu

Większość podobnych badań zakłada uproszczenie polegające na zmianie własności płynu na uśrednione udziały proporcjonalne wody oraz ścierniwa. Generalnie najprostszą metodą jest zmiana masy molowej oraz gęstości wody, aby symulowała ona zawartość cząstek ściernych. W ramach analiz zastosowano odmienne podejście polegające na modelowaniu 3 faz:

- Wody – faza ciągła (główna i najważniejsza faza odpowiedzialna za transport materiału),
- Ścierniwa – faza rozproszona cząstek stałych. Przyjęto, że ścierniwem jest granat (almandyn –  $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ ) o masie molowej 497,6 g/mol oraz gęstości 4 g/cm<sup>3</sup>. Twardość w skali Mohsa wynosi 7 - 7,5 ale w badaniach przepływowych nie jest ona specjalnie istotna. Wartość ta jest jedną z podstawowych parametrów podczas modelowania erozji. Cząstki ścierniwa mają określoną średnicę 0,07 mm oraz współczynniki kształtu równym 0,
- Powietrza – faza rozproszona cząstek płynu. W oprogramowaniu ANSYS CFX niemożliwe jest zasymulowanie ruchu cząstek stałych używając dwóch faz ciągłych. Przyjęto więc, że po wyjściu z dyszy, struga wodno-ścierna znajduje się w przestrzeni wypełnionej cząsteczkami powietrza o średnicy 1 μm.

Jako, że w analizach tych nie uwzględniamy zmian temperatur wszystkie fazy posiadają jednakową temperaturę 25°C, a parametry wody jak i powietrza ustalone zostały właśnie dla tej temperatury odniesienia. Pomiędzy fazami woda – powietrze

zadano także istnienie napięcia powierzchniowego równego  $72 \cdot 10^{-3}$  N/m, czyli wartości napięcia w temperaturze 25 °C.

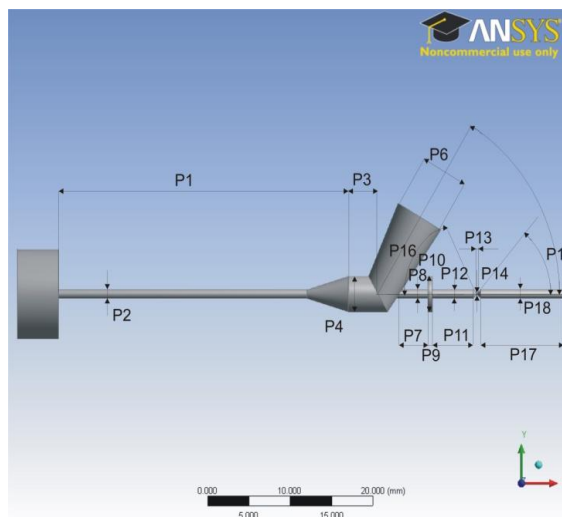
Najważniejsze warunki brzegowe przyjęte podczas analizy oparte są na rzeczywistych parametrach obróbki, tj:

- Woda podawana pod ciśnieniem 500 MPa, z założoną turbulencją na poziomie 5%,
- Ścierniwo podawane z prędkością 158,1 m/s, natężeniem przepływu na poziomie 15 g/s, liczba podanych cząstek ścierniwa – 250 z jednorodnym rozkładem na całej powierzchni warunku brzegowe. Liczba ta w analizie w stanie ustalonym jest ogólną liczbą podanych cząstek, a w stanie nieustalonym liczbą cząstek podawanych na sekundę.
- Na wyjściu panuje ciśnienie odniesienia 1 atmosfery.
- Sama analiza została wykonana dla 50 iteracji.

Warunki brzegowe, ustawienia siatki oraz założenia analizy zostały dobrane w oparciu o wcześniej wykonane prace badawcze [2, 4, 5].

#### 1.2. Parametryzacja geometrii

Geometria głowicy została wykonana w module ANSYS Geometry. Jako, że w przypadku przeprowadzonych badań nie zajmujemy się analiza wytrzymałościową lecz przepływową wystarczające jest zamodelowanie wewnętrznej części kanałów głowicy. Przedstawione zostało to na rysunku 1.



Rys. 1. Geometria głowicy tnącej z zaznaczeniem analizowanych parametrów

Wszystkie wymiary geometryczne zostały sparametryzowane, ich wykaz oraz dopuszczalne zakresy zmienności zostały przedstawione w tabeli 1. W kolumnie uwagi zostały zdefiniowane dodatkowe ograniczenia poszczególnych wymiarów, zapobiegają one powstaniu błędów geometrii, a w szczególnych przypadkach przerwaniu obliczeń. Parametry te można podzielić na 4 podgrupy:

- P1 – P2 – parametry związane z rurką skupiającą,
- P3 – P6 – parametry związane z komorą mieszania,
- P7 – P10 – parametry związane z kanałami doprowadzającymi,
- P11 – P18 – parametry związane z dyszą wodną.

Tabela 1. Tabela zdefiniowanych parametrów oraz ich ograniczeń

Nr	Nazwa parametru	Zakres zmienności	Uwagi
P1	Długość rurki skupiającej	20 – 100 mm	-
P2	Promień rurki skupiającej	0,25 – 1,95 mm	P2 ≠ P4
P3	Długość komory mieszania	1,5 – 10 mm	1,5 ≤ P3
P4	Promień komory mieszania	1,4 – 6 mm	1,3 < P4 ≤ 6
P5	Kąt komory mieszania	45 – 90°	45 ≤ P5 ≤ 90
P6	Promień wlotu ścierniwa	1 – 6 mm	P6 ≤ 6
P7	Długość kanału do komory mieszania	3 – 10 mm	3 ≤ P7
P8	Promień kanału do komory mieszania	0,1 – 1,9 mm	0,1 ≤ P8 < 2 P8 ≠ P10, P8 < P4
P9	Długość szczeliny powietrznej	0,2 – 4 mm	0,2 ≤ P9
P10	Promień szczeliny powietrznej	0,2 – 4,4 mm	P10 < 4,5 P10 ≠ P8
P11	Długość dyszy wodnej	1 – 10 mm	-
P12	Promień dyszy wodnej	0,25 – 1 mm	P12 ≥ P14
P13	Długość kryzy	0,1 – 1 mm	-
P14	Promień kryzy	0,1 – 0,49 mm	P14 < 0,5
P15	Kąt wejścia do kryzy	10 – 90°	-
P16	Kąt wyjścia z kryzy	10 – 90°	-
P17	Długość kanału dolotu wody	5 – 20 mm	-
P18	Promień kanału dolotu wody	0,2 – 1 mm	P18 ≥ P14

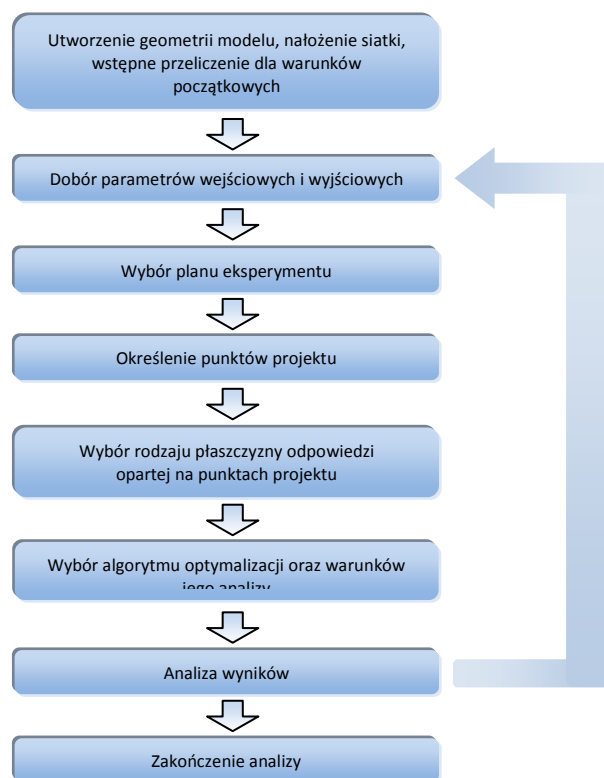
Pomiar wartości wyjściowej dokonywany jest na granicy rurki skupiającej oraz przestrzeni reprezentującej powietrze. Reprezentuje to prędkość strugi wodno-ścierniej po wyjściu z głowicy, a co za tym idzie jej zdolność cięcia materiału.

### 1.3. Algorytm optymalizacji

Niezależnie od użytego planu eksperymentu poszukiwanie ekstremum dokonywane jest w dwóch etapach. Najpierw w oparciu o zakresy zmienności parametrów wejściowych utworzone zostają punkty projektu, w których dokonywane jest przeliczenie matematyczne modelu. W kolejnym kroku na wyliczonych punktach projektu generowana jest płaszczyzna odpowiedzi która zostaje wypełniona punktami pareto będącymi potencjalnymi rozwiązaniami (rysunek 2). Wzorując się na wcześniejszych pracach badawczych [3] stwierdzono, że najlepsze wyniki uzyskiwane są przy wykorzystaniu płaszczyzny odpowiedzi stworzonej za pomocą metody Kriging'a oraz optymalizacji wykorzystującego algorytm genetyczny wielu celów. Algorytm genetyczny MOGA stosowany w optymalizacji jest odmianą algorytmu opartego na kontrolowanej elitarności.

Dokonano rozpoznania wpływu poszczególnych parametrów geometrycznych na otrzymywane wyniki. Podczas wszystkich rozpatrywanych przypadków przyjęto następujące założenia optymalizacji:

- maksymalizacja parametru wyjściowego (prędkości wody po wyjściu z głowicy) z najwyższym priorytetem,
- brak konkretnego celu dla wszystkich parametrów wejściowych z niskim priorytetem.



Rys. 2. Schemat blokowy działania algorytmu optymalizacji w oprogramowaniu ANSYS Workbench

## 2. Otrzymane wyniki

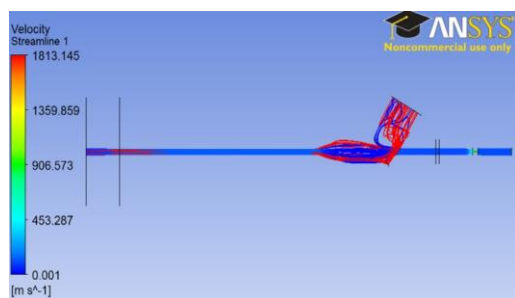
Moduł optymalizacji w oprogramowaniu ANSYS po zakończeniu obliczeń sugeruje trzech kandydatów najlepiej spełniających założone kryteria, w tabeli 2 przedstawiono tylko najlepszego kandydata.

Tabela 2. Wartości parametrów po optymalizacji oraz otrzymana prędkość strugi wodno-ścierniej.

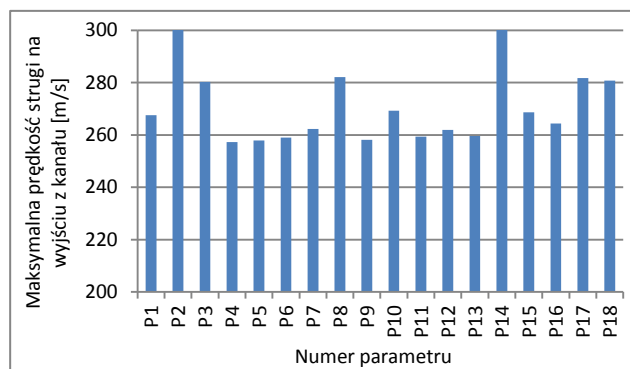
Nr	Wartość parametru	Maksymalna prędkość strugi na wyjściu z głowicy [m/s]
P1	20,265 [mm]	267,490
P2	0,251 [mm]	393,957
P3	9,989 [mm]	280,207
P4	1,218 [mm]	257,233
P5	55,770 [°]	257,904
P6	4,926 [mm]	258,986
P7	9,992 [mm]	262,258
P8	1,997 [mm]	282,095
P9	0,207 [mm]	258,067
P10	0,051 [mm]	269,254
P11	1,004 [mm]	259,388
P12	0,863 [mm]	261,891
P13	0,105 [mm]	259,545
P14	0,499 [mm]	305,547
P15	89,899 [°]	268,601
P16	82,386 [°]	264,325
P17	19,616 [mm]	281,779
P18	0,999 [mm]	280,761

Rysunek 3 przedstawia przepływ strugi wodno-ścierniej dla danych początkowych. Kolorem niebieskim zaznaczono ruch wody, natomiast czerwonym cząstek ścierniwa. Legenda pokazuje maksymalne wartości prędkości strugi wodno-ścierniej wewnątrz kanału. Zgodnie z prawem ciągłości strugi osiągnięta jest w kanale o najmniejszym przekroju czyli wewnątrz kryzy. Rysunek 4 obrazuje dane zawarte w tabeli 2, przedstawia on uzyskaną prędkość maksymalną dla konkretnych parametrów. Jak widać największą prędkość uzyskujemy przez zmianę parametrów będących promieniami. Jest to zgodne z równaniem ciągłości strugi.





Rys. 3. Przepływ strugi wodno-ścierniej wewnątrz kanałów głowicy dla warunków początkowych



Rys. 4. Maksymalna prędkość strugi dla poszczególnych parametrów

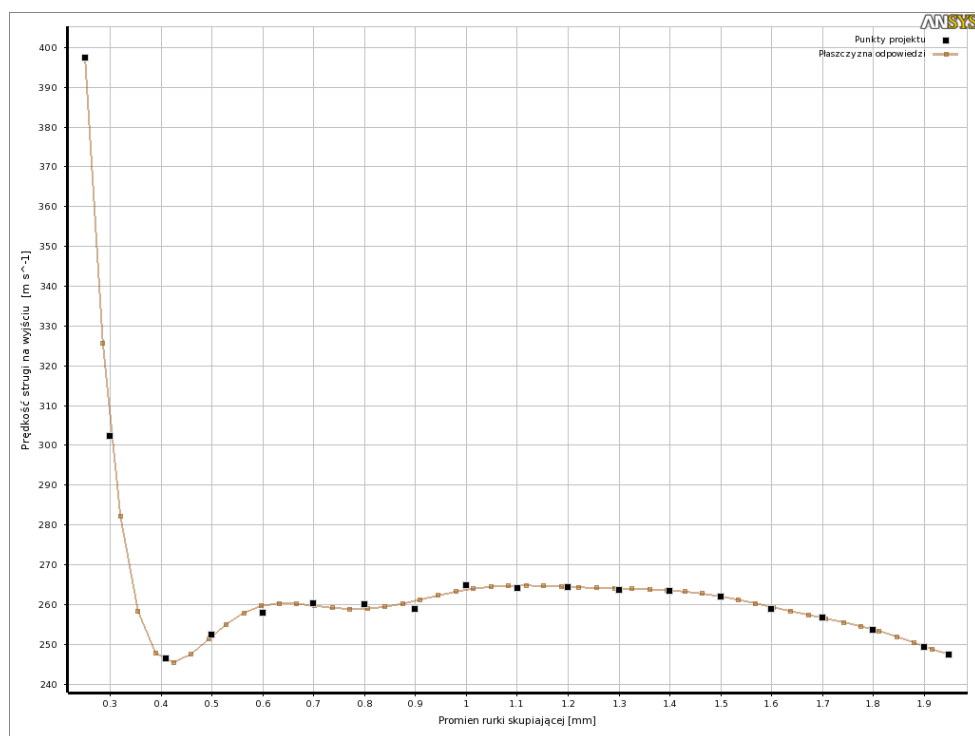
## 2.1. Analiza korelacji otrzymanych wyników

Aby móc porównać ze sobą poszczególne parametry wyznaczono wartości średnie oraz odchylenia standardowe, a także dokonano oceny korelacji parametrów dla poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ . Korelacja odnosi się do stopnia powiązania między jedną zmienną, a drugą, dlatego współczynnik korelacji jest ilościową miarą tego powiązania. Mówi on o istnieniu powiązań pomiędzy zmiennymi, ale nie mówi nic o istocie tego związku. Współczynnik korelacji  $r$  przybiera wartości  $\pm 1,0$  do  $0,0$ . Ujemne wartości współczynnika  $r$  oznaczają ujemny współczynnik nachylenia prostej. Dla pełnej korelacji zmiennych  $r = \pm 1$ , natomiast dla braku korelacji  $r = 0$  [1].

Wyliczone dane przedstawiono w tabeli 3. Od razu wyróżniają się parametry P2 oraz P12. W pierwszym przypadku pomimo stosunkowo niewielkiej wartości współczynnika korelacji hipoteza zerowa (brak związku pomiędzy zmiennymi) zostaje odrzucona dla przedziału istotności  $\alpha = 0,05$ . Wynika to z faktu, że parametr ten (promień rurki skupiającej) definiuje ostatni element modelu. Co za tym idzie, zmniejszenie promienia ostatniego kanału dla bardzo małych wartości powoduje powstanie dodatkowej kryzy przed punktem pomiarowym. Dla bardzo niewielkich wartości prędkość rośnie wykładniczo na skutek zmniejszenia przekroju kanału, a później wartość wyjściowa stabilizuje się. Przedstawia to rysunek 5. W praktyce nie jest stosowane używanie mniejszych promieni niż  $0,5$  mm ze względu na zużycie rurek skupiających – transportuje ona wodę już ze ścierniwem co powoduje ściernie się ścianek kanału. Co za tym idzie zmniejszenie przekroju zmniejsza jednocześnie żywotność elementu. Jednak w celach badawczych dokonano analizy także mniejszych wartości promienia. Ujęcie dwóch pierwszych punktów powoduje zaburzenie wyników, a co za tym idzie sugeruje istnienie korelacji.

Tabela 3. Otrzymane wyniki dla poszczególnych parametrów

Nr	Wartość średnia $\mu$ [m/s]	Odchylenie standardowe $\sigma$ [m/s]	Wsp. korelacji $r$	Sprawdzenie wg. poziomu istotności $\alpha$	Wartość współczynnika nachylenia prostej regresji
P1	223,940	27,687	-0,997	istnieje korelacja	-0,230
P2	267,731	33,538	-0,477	istnieje korelacja	-0,140
P3	262,945	14,734	0,947	istnieje korelacja	0,115
P4	224,459	21,851	-0,977	istnieje korelacja	-0,184
P5	251,683	7,032	-0,432	brak	0,022
P6	253,985	5,247	-0,302	brak	-0,012
P7	257,030	3,518	0,806	istnieje korelacja	0,023
P8	272,152	11,012	0,479	brak	0,037
P9	250,024	7,637	0,041	brak	0,003
P10	254,993	8,590	-0,030	brak	-0,002
P11	254,641	3,795	-0,050	brak	-0,002
P12	244,514	23,102	0,829	brak	0,047
P13	251,346	12,045	0,165	brak	0,017
P14	256,219	44,383	0,477	brak	0,174
P15	260,036	6,853	0,773	istnieje korelacja	0,044
P16	251,002	15,521	0,819	istnieje korelacja	0,106
P17	262,588	9,078	0,576	istnieje korelacja	0,047
P18	253,375	27,729	0,977	istnieje korelacja	0,181



Rys. 5. Analiza parametru P2. Czarne punkty określają konkretne obliczone punkty projektu, natomiast brązowa linia to wygenerowana płaszczyzna odpowiedzi. Dwa pierwsze punkty sugerują istnienie korelacji

W przypadku parametru P12 natomiast pomimo stosunkowo dużego współczynnika korelacji nie możemy odrzucić hipotezy zerowej dla przyjętego poziomu istotności. Spowodowane jest to faktem, że parametr ten posiada niewielki zakres zmienności, a co za tym idzie punktów projektu jest zaledwie 4 (liczba stopni swobody jest niewielka,  $n - 2$ ). W efekcie niewielka zmienność wartości prędkości powoduje powstanie zależności sugerującej istnienie korelacji.

## 2.2. Analiza regresji liniowej otrzymanych wyników

Jako, że korelacja mówi nam jedynie o istnieniu bądź braku zależności pomiędzy poszczególnymi zmiennymi dokonano analizy regresji liniowej korzystając z metody najmniejszych kwadratów. Należy tutaj zwrócić uwagę, że istnieją szczególne przypadki, gdzie model liniowy nie sprawdza się najlepiej, parametry P2 i P14 ze względu na wartości o silnym odchyleniu od średniej. Jednak użyto go aby możliwe było porównanie wyników. Współczynnik nachylenia prostej regresji  $a$  wyliczono ze wzoru 1.

$$a = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum(x - \bar{x})^2} \quad (1)$$

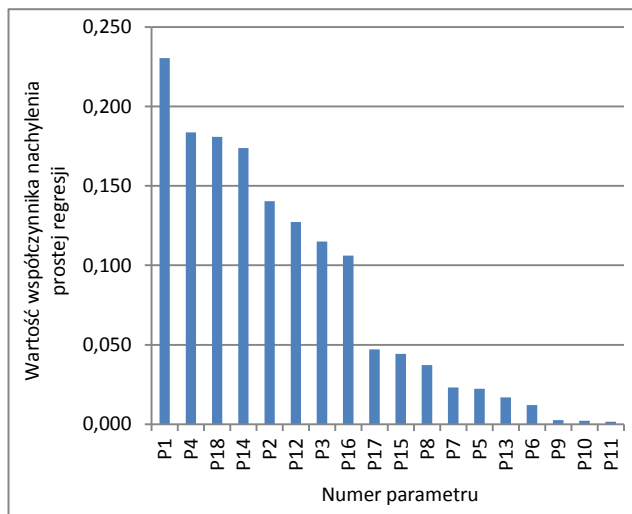
gdzie:  $x, y$  – wartości zmienne,  $\bar{x}, \bar{y}$  – wartości średnie.

Dodatkowo aby móc porównać dane między sobą dokonano normalizacji zmiennych poszczególnych parametrów do przedziału  $<0, 1>$  używając metody normalizacji min-max opisanej wzorem 2.

$$f(x) = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (2)$$

gdzie:  $x$  – zmienna,  $\min(x)$  – wartość minimalna zmiennej  $x$ ,  $\max(x)$  – wartość maksymalna zmiennej  $x$ .

Otrzymane współczynniki nachylenia prostej regresji zostały przedstawione w tabeli 3. Podobnie jak w przypadku korelacji ujemny znak oznacza spadek wartości  $y$  wraz ze wzrostem wartości  $x$ . Natomiast rysunek 6 przedstawia wykres istotności parametrów według wartości współczynnika regresji  $a$ . Dane w tym przypadku zostały poseregowane oraz wyrażone w wartości bezwzględnej w celu łatwiejszej ich analizy.



Rys. 6. Wykres istotności wpływu parametrów na uzyskaną prędkość strugi wodno-ścierniej

## 3. Wnioski

Analizując poszczególne parametry można wyciągnąć szereg wniosków.

- 1) Niektóre wymiary geometryczne mają znikomy wpływ na prędkość strugi wodno-ścierniej na wyjściu. Nie znaczy to jednak, że są one zupełnie nieistotne. Parametry te mogą zmieniać zachowanie się strugi wewnątrz dyszy, co będzie szczególnie istotne w komorze mieszania.
- 2) Największą prędkość strugi na wyjściu z głowicy uzyskano poprzez zmianę parametrów reprezentujących promienie kanałów. Jest to uzasadnione gdyż spełniony zostaje warunek o ciągłości strugi.
- 3) Zwiększenie ilości punktów projektu podczas obliczeń zdecydowanie zwiększy dokładność rozwiązania, a więc płaszczyzna odpowiedzi będzie lepiej odwzorowywać rzeczywistość. Jest to jednak problematycznie ze względu na znacząco rosnący czas obliczeń.
- 4) W przypadku niektórych parametrów pojawiają się wartości znacznie odbiegające od reszty. Wynika to z powstającego specyficznego układu wymiarów, który będzie zmieniał tor ruchu strugi wodnej co będzie powodowało powstawanie dodatkowych turbulencji oraz wirów.
- 5) Analizując współczynniki regresji można zauważyć, że największy wpływ na parametr wyjściowy mają wymiary położone najbliżej punktu pomiarowego. Jest to logiczne, gdyż im dalej od wyjścia z głowicy tym więcej czasu ma struga wodno-ścierna na unormowanie się.

## Literatura

- [1] Kosmol J.: Wybrane zagadnienia metodologii badań, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
- [2] Mombier Andreas W., Kovacevic R.: Principles of Abrasive Water Jet Machining, Springer, London 1998.
- [3] Szczepanik M., Sokołowski A.: Porównanie metod optymalizacji dostępnych w oprogramowaniu ANSYS Workbench, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Politechnika Śląska, Gliwice 2011.
- [4] Szczepanik M.: Modelowanie ruchu ścierniwa w komorze mieszania z wykorzystaniem metody elementów skończonych, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Politechnika Śląska, Gliwice 2012.
- [5] Szuta K.: Praca dyplomowa, Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska, Gliwice 2012.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓŁNOŚCI



Śląskie  
Pozytywna energia



DoktoRIS



UNIWERSYTET ŚLĄSKI  
W KATOWICACH



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI FUNDUSZ SPOŁECZNY

Autor otrzymał stypendium w ramach projektu *DoktoRIS – Program stypendialny na rzecz innowacyjnego Śląska* współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Mgr inż. Maciej Szczepanik

e-mail: maciej.szczepanik@polsl.pl

Absolwent Automatyki i Robotyki na wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Od roku 2009 uczestnik studiów doktoranckich.

Główny zakres badań obejmuje badania modelowe MES przepływu, analizę zjawisk występujących podczas cięcia strumieniem wodno-ściernym, optymalizację.

Stypendysta projektu DoktoRIS - Program stypendialny na rzecz innowacyjnego Śląska



otrzymano/received: 06.06.2013

przyjęto do druku/accepted: 16.02.2014

## THE FUNCTIONALLY-ORIENTED METHOD FOR SPECIALIZED EI-SYSTEMS DESIGN APPLICATION

Anton Mykhailiuk<sup>1</sup>, Andrii Pukach<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Borys Grinchenko Kyiv University, <sup>2</sup>Lviv Polytechnic National University, CAD Department

**Abstract.** The algorithm and the model of the functionally-oriented method for specialized educational and intellectual systems (EI systems) automated design, based on Petri nets, are developed in the article. The example of the developed algorithm application for the real EI-system design is also given. The developed model based on Petri nets helps to identify the major states of the system synthesis process.

**Keywords:** method, model, Petri nets, design, EI system

### FUNKCJONALNIE ZORIENTOWANA METODA PROJEKTOWANIA APLIKACJI SPECJALISTYCZNYCH SYSTEMÓW EDUKACYJNYCH I INTELIGENTNYCH

**Streszczenie.** W artykule rozpatrzono algorytm i model funkcjonalnie zorientowanej metody projektowania automatyzowanych specjalizowanych systemów edukacyjnych i inteligentnych (systemów EI) opartych na sieciach Petri. Przedstawiono również przykład tworzenia algorytmu aplikacji dla rzeczywistego projektowania systemu EI. Opracowano model oparty na sieci Petriego wspomagającej identyfikację głównych stanów systemu syntezy procesów.

**Słowa kluczowe:** sposób, modelu sieci Petriego, projektowanie, EI-systemy

### Introduction

Development of any complex system is associated with some major difficulties. The initial design stage requires determination of the system structure, its main elements and parameters, relations among data structure elements and others. There are number of methods for the design automation at the system level [1, 5, 9, 14, 16], but one of the most effective for specialized EI systems development is the functionally-oriented method [11, 15].

Examples of such complex systems are specialized educational and intelligent systems (EI-systems), which are nowadays very popular and fast-growing. Since EI systems ensure effective support of modern training technologies [6], development of the model and algorithm for functionally-oriented method application is the relevant modern task.

### 1. Development of the specialized EI systems automation design algorithm

This article presents the algorithm for the functionally-oriented method application, which involves the following basic steps:

- Step 1. Input data setting and defining the EI systems class.
- Step 2. Selection of the EI-system functional profile [8].
- Step 3. Formation of the projects that correspond to the selected (developed) functional profiles of the developed EI-system.
- Step 4. Specifying of the linguistic variable "EI-system project general coefficient".
- Step 5. Selection of the partial coefficients for all EI-system projects.
- Step 6. Determination of the estimates for all EI-system projects partial coefficients.
- Step 7. Determination of the estimate for each EI-system projects general coefficient.
- Step 8. Comparing EI system projects by general coefficients and selection of the technical implementation project.
- Step 9. If the project satisfies customer requirements, then the algorithm is completed, otherwise, go to step 2.

According to the developed algorithm, one or several standard functional profiles should be selected (step 2 of the algorithm) from among those, which correspond to the class specific for EI-system, which are designed according to the technical task. It is possible to develop a special functional profile or modify the standard one. During the linguistic variable (LV) "EI-system project general coefficient" introduction (step 4) all terms and the corresponding functions have to be built. When choosing partial coefficients for all EI system projects (step 5) the appropriate LV should be set and the priority coefficients should

be calculated. Evaluation of EI-system projects partial coefficients (step 6) is determined by expert evaluation, calculation and analysis based on the unified software modules values that are part of this project.

The developed algorithm allows automatically implement the computer aided design method and realize the specialized EI-systems synthesis procedure.

### 2. The EI systems designing process model based on Petri nets

For studying of the basic states of functionally-oriented method based on the developed algorithm, the model basing on Petri net [7, 10, 13] was built, it can be described using the following expression, an example of the scheme model is in Fig. 1.

$$N = \{S, T, F, M_0\} \quad (1)$$

where:  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  is the set of positions (states);  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  is the set of transitions;  $F$  is the set of arcs, which includes two subsets of incoming and outgoing arcs in relation to transition;  $M_0$  is the set, which specifies the initial tagging of Petri nets.

Table 1. Table of the developed model based on Petri net positions

Position	Purpose
p1	The start position. The marker in this position testifies the launch of the model.
p2	The subsystem initialization position. The marker in this position testifies successful initialization of the model.
p3	Position responsible for the chosen class of the developed EI-system.
p4	Position that corresponds to the selected functional profile of the developed EI-system.
p5	Position responsible for specifying linguistic variable "EI-system project general coefficient".
p6	Position is responsible for determining estimates for all EI-system projects general coefficients.
p7	Stage of project coordination with the customer.
p8	The marker in this position demonstrates that the project satisfies the customer requirements.
p9	Position responsible for the case, when this project does not meet the customer requirements. The marker in this position testifies choice of some other (different from the previous) EI-system functional profile and subsequent formation of the next project, which would satisfy the requirements of the customer.
p10	Model shutdown position. The marker in this position testifies completion of the developed model work.

The built model based on Petri nets contains number of states  $p1-p10$ , and number of transitions  $t1-t8$ , which have individual logically-functional purpose (see table 1 and table 2, respectively).

The positions set describes the possible model's states and enables tracking behavior of the design process on separate areas, whereas the transitions set reflects the internal processes that occur inside the model and are designed to achieve results.

Below, in fig. 2, the corresponding states reachability graph for the developed model based on Petri net is presented [12], it allows exploring possible states and dynamics of the specialized EI systems design process.

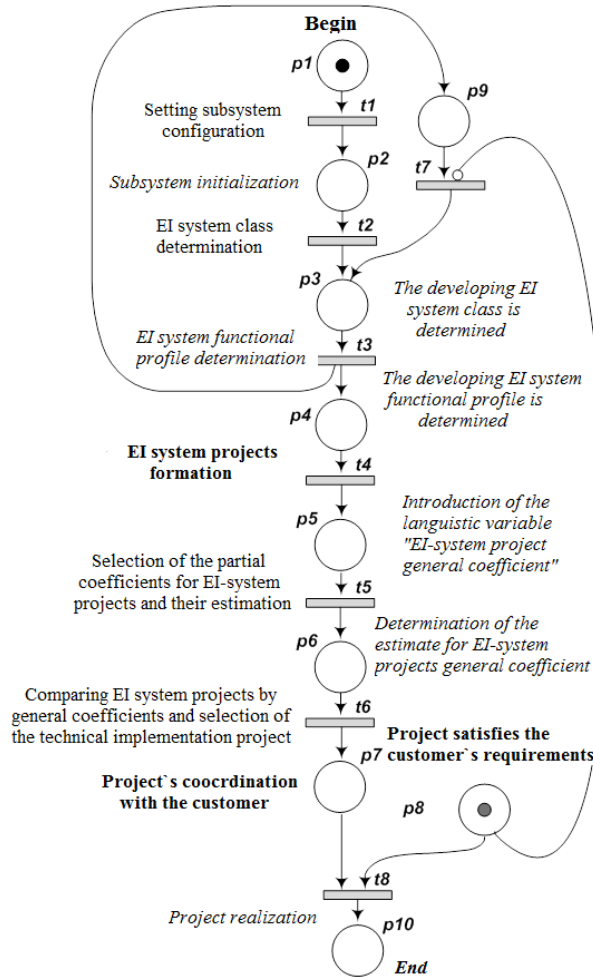


Fig. 1. The developed model based on Petri nets

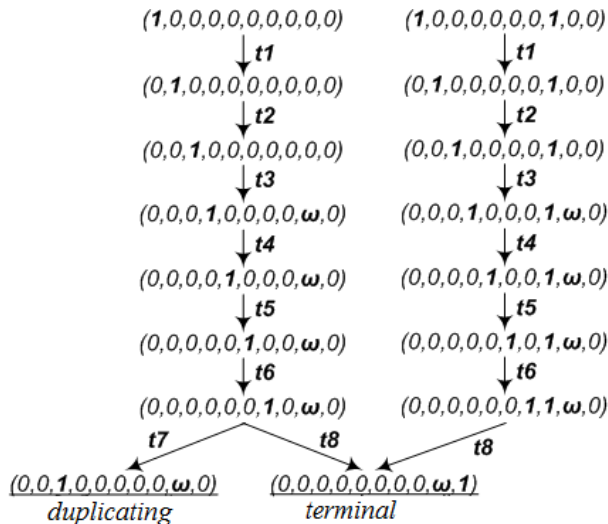


Fig. 2. States reachability graph for the developed model based on Petri nets

Table 2. The developed model based on Petri net transitions table

Transition	Purpose
t1	The subsystem configuration setting.
t2	The developed EI-system class determination.
t3	The developed EI-system functional profile choice.
t4	Formation of projects that correspond to the selected (developed) functional profiles of the developed EI-system.
t5	Choice of the partial coefficients for all EI systems projects. Determination estimates of the partial coefficients for all EI systems projects.
t6	Comparison of EI system projects by general coefficients and selection of the technical implementation project.
t7	Start of the other functional solution selection mechanism for project implementation that ensures the customer requirements.
t8	Implementation of the project. Shutdown of the model.

### 3. Results of the specialized EI system structure synthesis using the functionally-oriented method

To illustrate the developed method for EI system design, the following example is presented. Assume, that the EI system, which according to future plans and other considerations is referred to class "12. Context-search EI system", is being developed. Let assume, that for this class of systems there are two standard functional profiles:

$$\Phi_{12\ 1}^c = \{\psi_7, \psi_{19}, \psi_{27}\}, \Phi_{12\ 2}^c = \{\psi_7, \psi_{19}, \psi_{31}\}, \quad (2)$$

where  $\psi_7$  – "Contextual search" functional service;  $\psi_{19}$  – "Ranking of search feedback by relevance" functional service;  $\psi_{27}$  – "Automated text summarization" functional service;  $\psi_{31}$  – "Automated text annotation" functional service.

Assume that system developers have access to the standardized software modules library, which among others contains the following modules:  $\theta_4$  with  $\Phi_4^m = \{\psi_7\}$  functional profile,  $\theta_9$  with  $\Phi_9^m = \{\psi_7, \psi_{16}\}$  functional profile,  $\theta_{41}$  with  $\Phi_{41}^m = \{\psi_{19}\}$  functional profile,  $\theta_{45}$  with  $\Phi_{45}^m = \{\psi_{27}\}$  functional profile,  $\theta_{68}$  with  $\Phi_{68}^m = \{\psi_{31}\}$  functional profile. Here  $\psi_{16}$  is "Automatic correction of the search query spelling" functional service. Thus, in accordance with the proposed methodology for the developed system implementation the 4 following projects might be formed:

$$\Omega_1 = \{\theta_4, \theta_{41}, \theta_{45}\}, \Omega_2 = \{\theta_9, \theta_{41}, \theta_{45}\}, \Omega_3 = \{\theta_4, \theta_{41}, \theta_{68}\}, \Omega_4 = \{\theta_9, \theta_{41}, \theta_{68}\} \quad (3)$$

(since this example illustrates design procedure for only one EI-system,  $p'$  index in the project conditional signs is excessive, so here and further on we will be limited to only  $V$  index use).

For the optimal project selection the partial modules coefficients listed in table 3 (in table 3 and further on the letter t after shortenings VHV and HV should be read as "trustworthy") should be considered. Some partial coefficients values are presented in conventional units, the rest, primarily integrated indices are characterized by fuzzy expert estimates [2, 3, 4] for LV with five terms and changes range from 0 to 1. Limits of the according belonging functions are defined in analogy with the common criteria.

Among the  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$  projects the optimal one should be chosen, with considering that the most important system



element is the context search module, thus  $\theta_4$  and  $\theta_9$  for the respective projects. The projects comparison will be done with the thought that the general quality indicator for each of them will be determined based on the following partial indicators (presented by decreasing priority): search speed  $w_1$ ; search precision  $w_2$ ; search completeness  $w_3$ ; referencing/annotation quality  $w_4$ ; ranking quality  $w_5$ ; guarantability  $w_6$  (cumulative characteristic determined by the modules reliability and quality of their license maintenance); cost of the project  $w_7$ .

The cost of the project will be considered to be equal to the sum of the included modules cost. For those projects, where only one module identifies some indicator, its value for the entire project coincides with one for indicator's module. For other indicators their scores for the entire project also correspond to the LV in the range from 0 to 1, and for their determination the same methodology as for general project index finding should be applied. In this case, priority coefficients help to verify that various modules contribute differently to this index value.

Thus, the belonging functions of LV terms 1-6 coefficients will be defined as follows ( $i = \overline{1,6}$ ):  $w_{i1} = \langle 0; 0; 0.1; 0.2 \rangle$ , that corresponds to VLV;  $w_{i2} = \langle 0.1; 0.2; 0.3; 0.4 \rangle$ , which corresponds to LV;  $w_{i3} = \langle 0.3; 0.4; 0.5; 0.6 \rangle$ , which corresponds to AV;  $w_{i4} = \langle 0.5; 0.6; 0.7; 0.8 \rangle$ , which corresponds to HV;  $w_{i5} = \langle 0.7; 0.8; 1; 1 \rangle$ , which meets VHV.

The belonging functions of LV terms 7 coefficient equal to:  $w_{71} = \langle 0; 0; 2; 3 \rangle$ , which corresponds to VHV;  $w_{72} = \langle 2; 3; 3.5; 4 \rangle$ , which corresponds to HV;  $w_{73} = \langle 4; 4.2; 4.5; 5 \rangle$ , which corresponds to AV;  $w_{74} = \langle 4.5; 5; 5.3; 5.5 \rangle$ , which corresponds to LV;  $w_{75} = \langle 5.3; 5.5; \infty; \infty \rangle$ , which corresponds to VLV.

Table 3. Parameters of the unified software modules

Module	Parameter	Parameter value
$\theta_4$	Search speed	VHV T 0.8 .
	Search precision	VHV T 0.8 .
	Search completeness	HV T 1 .
	Reliability	HV T 0.7 and VHV T 0.3 .
	Cost	1800 \$
	License terms	AV t 1
$\theta_9$	Search speed	HV T 0.9 .
	Search precision	HV T 0.9 and VHV T 0.1 .
	Search completeness	VHV T 0.6 .
	Reliability	AV T 0.6 and HV T 0.4 .
	Cost	1400 \$.
$\theta_{41}$	License terms	LV T 1.0 .
	Ranking quality	HV T 0.4 and VHV T 0.6 .
	Reliability	HV T 0.6 i VHV T 0.4 .
	Cost	1000 \$.
$\theta_{45}$	License terms	LV T 0.4 and AV T 0.6 .
	Summarizing, annotation quality	HV T 0.7 and VHV T 0.3 .
	Reliability	AV T 0.9 and LV T 0.1 .
	Cost	2200 \$
$\theta_{68}$	License terms	VHV T 0.6 .
	Summarizing, annotation quality	VHV T 0.8 .
	Reliability	AV T 0.9 and LV T 0.1 .
	Cost	1800 \$.
	License terms	LV T 1

Lets find the guarantability index value  $w_6$ . First of all we have to determine the reliability f the each project ( $w_8$ ) and quality of the license maintenance by the modules developers ( $w_9$ ). For each term of the same content (VLV, LV, AV, HV, VHV) we will get the estimates:

$$x_j = \sum_k B_k \mu_{kj}(w_k). \quad (4)$$

For example, Bi coefficients will be got with the use f Fishburn method:

$$B_k = \frac{2(T+1-l_k)}{T*(T+1)}, \quad (5)$$

where  $l_k$  – number of k-th module in the order of its importance in the project's appropriate metric, T is the total number of project modules.

Let the module  $\theta_4$  be more important for the  $w_8$  coefficient, than the module  $\theta_{45}$  but module  $\theta_{45}$  is more important, than  $\theta_{41}$  one. According to formula (5) the corresponding modules priority coefficients will be computed:

$$B_1 = \frac{2(3+1-1)}{3*4} = \frac{1}{2}; \quad B_2 = \frac{1}{6}; \quad B_3 = \frac{1}{3}. \quad (6)$$

Then the following data will be got for the project  $\Omega_1$  table 4).

The estimation of the  $\Omega_1$  project generalized reliability index  $w_8$  will be done by the following formula:

$$w_{18} = \sum_{j=1}^5 x_j E_{\alpha_j} = 0*0.05 + 0.0333*0.25 + 0.3*0.45 + 0.45*0.65 + 0.216*0.9 = 0.633. \quad (7)$$

When  $w_{18} = 0.633$  the project reliability  $\Omega_1$  corresponds to the HV term with the belonging function  $\mu_4$  ( $0.633 = 1$  and for all other terms with the belonging function equals zero.

In the same way the reliability indicators for four other projects will be found. For the project  $\Omega_2$  the situation is the following:

$$w_{28} = \sum_{j=1}^5 x_j E_{\alpha_j} = 0*0.05 + 0.0333*0.25 + 0.6*0.45 + 0.3*0.65 + 0.067*0.9 = 0.533. \quad (8)$$

Table 4. Data for the first project reliability index calculation

Module	$w_8$ index terms				
	VLV	LV	AV	HV	VHV
$\theta_4$	$\mu_{11} = 0$	$\mu_{12} = 0$	$\mu_{13} = 0$	$\mu_{14} = 0,7$	$\mu_{15} = 0,3$
$\theta_{41}$	$\mu_{21} = 0$	$\mu_{22} = 0$	$\mu_{23} = 0$	$\mu_{24} = 0,6$	$\mu_{25} = 0,4$
$\theta_{45}$	$\mu_{31} = 0$	$\mu_{32} = 0,1$	$\mu_{33} = 0,9$	$\mu_{34} = 0$	$\mu_{35} = 0$
$x_j = \sum_{i=1}^3 B_i \mu_{ij}$	0	0,0333	0,3	0,45	0,216

For the project  $\Omega_3$  -  $w_{38} = 0.672$ , and for  $\Omega_4$  -  $w_{48} = 0.586$ .

The value of modules quality license maintenance indexes are found the same way, namely:  $w_{19} = 0.554$ ,  $w_{29} = 0.451$ ,  $w_{39} = 0.39$ ,  $w_{49} = 0.495$ .

In case of the equal importance of the indicators  $w_8$  and  $w_9$  ( $B_1 = B_2 = 0.5$ ) for the guarantability indicator  $w_6$  (project  $\Omega_1$ ) the last will be computed based on the data summarized in table 5.

Table 5. Data for the first project guarantability index calculation

Coefficient	Terms				
	VLV	LV	AV	HV	VHV
$w_8$	$\mu_{11} = 0$	$\mu_{12} = 0$	$\mu_{13} = 0$	$\mu_{14} = 1$	$\mu_{15} = 0$
$w_9$	$\mu_{21} = 0$	$\mu_{22} = 0$	$\mu_{23} = 0.54$	$\mu_{24} = 0.46$	$\mu_{25} = 0$
$x_{j6} = \sum_{i=1}^2 B_i \mu_{ij}$	0	0	0.27	0.73	0

Table 6. Projects partial indicators

Project	EI system partial criteria						
	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_5$	$w_6$	$w_7$
$\Omega_1$	VHV T 0.8_	VHV T 0.8_	HV T 1_	HV T 0.7 and VHV T 0.3	HV T 0.4 and VHV T 0.6_	HV T 1_	LV T 1_
$\Omega_2$	HV T 0.9 and VHV T 0.1_	HV T 0.7 and VHV T 0.3	HVT 0.4 and VHV T 0.6_	HV T 0.7 and VHV T 0.3	HV T 0.4 and VHV T 0.6_	AV T 1	LV T 0.2 and AV T 0.8_
$\Omega_3$	VHV T 0.8_	VHV T 0.8_	HV T 1_	VHV T 0.8	HV T 0.4 and VHV T 0.6_	HV T 0.36 and C3 T 0.64	LV T 0.2 and AV T 0.8
$\Omega_4$	HV T 0.9 and VHV T 0.1	HV T 0.7 and VHV T 0.3_	HV T 0.4 and VHV T 0.6	VHV T 0.8	HV T 0.4 and VHV T 0.6	HV T 0.36 and AV T 0.64	AV T 1

Table 7. The first project partial indicators belonging functions

Indicator	Terms				
	VLV	LV	AV	HV	VHV
$w_{11} = 0.78$	$\mu_{11}(w_{11}) = 0$	$\mu_{12}(w_{11}) = 0$	$\mu_{13}(w_{11}) = 0$	$\mu_{14}(w_{11}) = 0.2$	$\mu_{15}(w_{11}) = 0.8$
$w_{12} = 0.78$	$\mu_{21}(w_{12}) = 0$	$\mu_{22}(w_{12}) = 0$	$\mu_{23}(w_{12}) = 0$	$\mu_{24}(w_{12}) = 0.2$	$\mu_{25}(w_{12}) = 0.8$
$w_{13} = 0.65$	$\mu_{31}(w_{13}) = 0$	$\mu_{32}(w_{13}) = 0$	$\mu_{33}(w_{13}) = 0$	$\mu_{34}(w_{13}) = 1$	$\mu_{35}(w_{13}) = 0$
$w_{14} = 0.73$	$\mu_{41}(w_{14}) = 0$	$\mu_{42}(w_{14}) = 0$	$\mu_{43}(w_{14}) = 0$	$\mu_{44}(w_{14}) = 0.7$	$\mu_{45}(w_{14}) = 0.3$
$w_{15} = 0.76$	$\mu_{51}(w_{15}) = 0$	$\mu_{52}(w_{15}) = 0$	$\mu_{53}(w_{15}) = 0$	$\mu_{54}(w_{15}) = 0.4$	$\mu_{55}(w_{15}) = 0.6$
$w_{16} = 0.6$	$\mu_{61}(w_{16}) = 0$	$\mu_{62}(w_{16}) = 0$	$\mu_{63}(w_{16}) = 0$	$\mu_{64}(w_{16}) = 1$	$\mu_{65}(w_{16}) = 0$
$w_{17} = 5$	$\mu_{71}(w_{17}) = 0$	$\mu_{72}(w_{17}) = 1$	$\mu_{73}(w_{17}) = 0$	$\mu_{74}(w_{17}) = 0$	$\mu_{75}(w_{17}) = 0$
$x_j = \sum_{i=1}^7 B_i \mu_{ij}$	0	0.036	0	0.486	0.478

Thus,

$$w_{16} = \sum_{j=1}^5 x_j E_{\alpha j} = 0 * 0.05 + 0 * 0.25 + 0.27 * 0.45 + 0.73 * 0.65 + 0 * 0.9 = 0.6. \quad (9)$$

When  $w_{16} = 0.6$  the investigated project  $\Omega_1$  guarantability corresponds to term VZ with belonging function  $\mu_4(0.6) = 1$  and to all other terms with the function equals zero.

Guarantability indicators for the remaining three projects can be found in the same way. For the project  $\Omega_2$ , accordingly,  $w_{26} = 0.483$ , for project  $\Omega_3$  -  $w_{36} = 0.536$ , and  $\Omega_4$  -  $w_{46} = 0.537$ . On the basis of all partial projects coefficients summarized in table 6, the overall index estimates will be computed. According to the partial indicators ranking order the priority coefficients Bk obtained by the Fishburn method equal to:

$$B_1 = \frac{2(7+1-1)}{7*8} = \frac{1}{4}; B_2 = \frac{6}{28}; B_3 = \frac{5}{28}; \quad (10)$$

$$B_4 = \frac{1}{7}; B_5 = \frac{3}{28}; B_6 = \frac{1}{14}; B_7 = \frac{1}{28}.$$

Results of the belonging functions for each  $\Omega_1$  project indicator calculations are given in table 7.

The overall coefficient for  $\Omega_1$  project

$$x_1 = \sum_{j=1}^5 x_j E_{\alpha j} = 0 * 0.05 + 0.036 * 0.25 + 0 * 0.45 + 0.486 * 0.65 + 0.478 * 0.9 = 0.755. \quad (11)$$

When  $x_1 = 0.755$  the general coefficient of the investigated project  $\Omega_1$  corresponds to the term HV with the belonging function  $\mu_4 (0.755) = 0.45$  and to term VHV with the function  $0.55$ . The general indicators for the remaining three projects can be found in the same way. For the project  $\Omega_2$  we have  $x_2 = 0.703$  (corresponds to term HV with belonging function  $\mu_4 (0.703) = 0.97$  and term VHV with belonging function  $\mu_5 (0.703) = 0.03$ ). For the project  $\Omega_3$  -  $x_3 = 0.739$  (corresponds to term HV with the belonging function  $\mu_4 (0.739) = 0.61$  and term VHV with the function  $\mu_5 (0.739) = 0.39$ ). For the project  $\Omega_4$  -  $x_4 = 0.757$  (corresponds to term HV with belonging function  $\mu_4 (0.757) = 0.43$  and term VHV with the belonging function  $\mu_5 (0.757) = 0.57$ ). Judging from the general indicator values project  $\Omega_4$  is the best one and  $\Omega_2$  is the worst.

## Conclusions

The algorithm of the functionally-oriented method for specialized educational and intellectual systems (EI systems) automated design, based on the unified software modules library and performance indicator definition model for intellectual EI-system project selection is developed in the article. It enables automation of the specialized EI systems synthesis process.

The relevant model based on Petri net, which allows exploring dynamics of the specialized EI systems developing process, is also constructed in the article

The given results of functionally-oriented method appliance to the specialized EI system structure synthesis allow arguing that the developed algorithm works correctly and ensures the optimal choice of the developing system structure.

## Literature

- [1] Dobrov G.M.: Ekspertnyye otsenki v nauchno-tekhnicheskoy prognozirovani, Naukova dumka, 1974.
- [2] Glinenko L. K.: Tekhnologiya inzhenerenogo proyektuvannya: strukturniy sintez biotekhnicheskikh sistem: navch. posibn, L'viv's'ka Politehnika, L'viv 2004.
- [3] Grigor'ev V.A.: Otsenka kachestva intellektual'nykh sistem, operiruyushchikh neformal'nymi ponyatiyami, Nauka i obrazovaniye 10/2004, URL: <http://technomag.edu.ru/sdocs/about.html>
- [4] Hamza Ali Yousef AlShawabkeh, Teslyuk V., Zelinskyy A., Denysyuk P., Bobak K.: Descreasing Alternative Solutions Multitude Power Using Branch and

Bound Algorithm During Solving MEMS Synthesis Task, Proc. of the X Intern. Conf. on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2009), Lviv – Polyana, Ukraine, 2009.

- [5] Kebkalo O.S., Mikhaylyuk A.YU., Tarasenko V.P.: Funktsional'ni profili spetsializovanih informatsiyno-analiticheskikh sistem, Naukoviy visnik Chernivets'kogo universitetu: Zbirnik nauk. prats'. Fizika. Elektronika, 423/2008, s. 117-123.
- [6] Kotov V.Ye.: Seti Petri, Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1984.
- [7] Lakhutin D.G.: O probleme otsenki poiskovykh sistem, NTI II 1/1970, s. 24-34.
- [8] Mikhaylyuk A.Yu., Ognivchuk L.M., Snizhko M.V.: Tekhnologiya vprovadzhennya novitnikh informatsiyno-analiticheskikh sistem u navchal'niy protses, Materiali Vseukraïns'koï naukovo-praktichnoi konferentsii: Osvita v informatsiynomu suspil'stvi, 2010, s. 56-62.
- [9] Mikhaylyuk A.Yu., Snizhko M.V., Bigun L.M.: Pro deyakі napryamki informatizatsii vishchoi osviti v umovakh s'ogodennya, Vishcha osvita Ukraïni – Dodatok 4, tom I, 13/2009, s. 457-463.
- [10] Piterson D.: Teoriya setey Petri i modelirovaniye sistem, Mir, 1984.
- [11] Teslyuk V., Denysyuk P., Hamza Ali Yousef Al Shawabkeh, Kernyskyy A.: Developing Information Model Of The Reachability Graph, Proc. of the XVth International Seminar: Workshop Of Direct And Inverse Problems Of Electromagnetic And Acoustic Wave Theory (DIPED – 2010), Tbilisi, Georgia, 2010, p. 210-214.
- [12] Vasilevich L.F., Mikhaylyuk A.Yu., Tarasenko V.P., Teslenko O.K.: Funktsional'no-orientovaniy pidkhid do proyektuvannya intelektual'nykh informatsiyno-analiticheskikh sistem, Reestratsiya, zberigannya i obrobka danikh, vol. 12, no 2/2010, p. 128-142.
- [13] Vasil'yev V.V., Kuz'muk V.V.: Seti Petri, parallel'nyye algoritmy i modeli mul'tiprotessornykh sistem, Nauk dumka 1990.
- [14] Vasyliuk I., Teslyuk V., Kernyskyy A., Denysyuk P.: Four-layer Model of MEMS Ontology Design, Proc. of the VI-th International Conference of Young Scientists (MEMSTECH'2011), 2011, p. 219-220.
- [15] Zelinskyy A., Teslyuk V., Denysyuk P., Medkovskyy M., Struk I.: Data and Software Development for CSP Solution Subsystem during MEMS Design, Proc. of the V-th International Conference of Young Scientists (MEMSTECH'2010), 2010, p. 66.
- [16] Zwicky F.: Discovery Invention, Research Through the Morphological Approach. McMillan, 1969.

**Ph.D. Anton Mykhailiuk**

e-mail: may-62@ukr.net

Senior Research Fellow, Associate Professor of the Department of Informatics in Borys Grinchenko Kyiv University Research interests: mining of natural language text information objects, semantization of data-searching in electronic information resources, and computer-formal education.



**M.Sc. Andrii Pukach**

e-mail: andrey\_pukach@mail.ru

Assistant of CAD Department in Lviv Polytechnic National University Research interests: Microelectromechanical systems



otrzymano/received: 13.12.2013

przyjęto do druku/accepted: 14.01.2014

# DEVELOPMENT OF THE ALGORITHMIC SOFTWARE AND INFORMATION SUPPLIES FOR THE LINGUISTIC ONTOLOGY BASED ON STRUCTURED ELECTRONIC ENCYCLOPEDIA RESOURCE FORMATION METHOD

Anton Mykhailiuk<sup>1</sup>, Vasyl Teslyuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Borys Grinchenko Kyiv University, Kyiv, Ukraine, <sup>2</sup>Lviv Polytechnic National University, CAD Department, Lviv, Ukraine

**Abstract.** Intellectualization of the information retrieval process requires appliance of the specialized linguistic resources. The domain specific linguistic ontology might be one of such resources. This article presents software organization method for automated formation of the ontological knowledge base by converting structured encyclopaedic resource to the appropriate ontology objects. The concepts ontology database creation procedures, concepts hierarchies and associative relations networks are presented and also studies of the qualitative and quantitative composition of the current experimental ontology based on Ukrainian Wikipedia segment are performed.

**Keywords:** linguistic ontology, semantic relations, structured encyclopaedia

## ROZWÓJ OPROGRAMOWANIA ALGORYTMICZNEGO I ŚRODKÓW INFORMATYCZNYCH DLA ONTOLOGII JĘZYKOWEJ BAZUJĄCYCH NA METODZIE TWORZENIA STRUKTURALNEGO ELEKTRONICZNEGO ZASOBU ENCYKLOPEDYCZNEGO

**Streszczenie.** Intelktualizacja procesu wyszukiwania informacji wymaga urządzenia z wyspecjalizowanymi zasobami lingwistycznymi. Specyficzna ontologia językowa może być domeną jednego z takich zasobów. W artykule przedstawiono oprogramowanie do automatycznego tworzenia bazy wiedzy ontologicznej przez konwersję zorganizowanych zasobów encyklopedycznych do odpowiednich obiektów ontologicznych. Przedstawiono koncepcje procedury tworzenia bazy danych ontologii, koncepcję hierarchii oraz sieci relacji, a także przeprowadzone badania jakościowego i ilościowego składu bieżącej ontologii eksperymentalnej opartej na ukraińskiej wersji Wikipedii.

**Słowa kluczowe:** ontologia językowa, relacje semantyczne, zorganizowany encyklopedii

### Introduction

The content analysis and information retrieval procedures intellectualization requires development of the specialized linguistic resources that could increase the efficiency of information-analytical software tools. This would give a significant impetus to the development of such linguistic resources as synonyms dictionaries, computer thesaurus [2], semantic networks [12], etc. In particular, the interest to ontologies use for objects including text information has immensely increased in recent times, it is not coincidentally as the ontology by nature should reflect the structure of human knowledge about the world, which could be used for infusing essential components in the process of information objects elaboration, their analysis, as well as information search through these items procedures.

The ontology concept is very widely interpreted in general philosophical terms, as well as in the context of information technologies. This, primarily, is due to the fact that ontology can vary by the representation level, purpose, scope of application and methods for their formation, etc. As one of the most common areas where the ontology application seems to be appropriate and promising is the information retrieval field (primarily search [6, 7] or informational monitoring [8] of text objects in the global or local information network), the ontology should be considered from the linguistics perspective as objects have text nature. A linguistic ontology is a special knowledge base that describes the outer world concepts and the relations among them. On the other hand, this is a special class of ontologies, where concepts are formed on the basis of language units that are related to a specific subject area [2].

### 1. The linguistic ontologies features analysis

Based on the references analysis, the following important features for structurally-logical characteristics of similar ontologies can be highlighted:

- each subject field concept is presented in the ontology by a synset – set of close synonyms that have similar meanings;
- each synset has some meaning that is represented by a unique interpretation;

- different concepts can have the same linguistic representation, in this case, it is talked about disambiguated terms and semantic differentiation of such concepts is possible by using interpretations;
- all synsets are combined into a single hierarchical terms taxonomy from abstract concepts to concrete ones;
- ontology synsets are linked together by semantic relations, the most common relations are association and hyponym-hyperonym [2].

In addition, the ontologies use in automatic mode for synthetic languages, which include Ukrainian language, requires normal word forms for ontology concepts.

An ontology formation by software means involves separate text data analysis, concepts separation and identification of links among them in accordance with the specified semantic relations. Unfortunately, this procedure requires too complicated semantic analysis apparatus, which, however, does not guarantee the ontology quality due to natural texts interpretation ambiguity. The solution to this problem lies in bringing the collection documents of encyclopedic (vocabulary) type, which have a clear structure and are formed by experts. The free electronic encyclopedia Wikipedia [14] is an example of such structured collection. Its articles have concepts descriptions, moreover the narrative part has quite clear structure and, in addition, contains links to other articles. This enables automation of such documents processing and an ontology development.

Therefore, the purpose of the presented study is to develop ways of software organization, which would enable automatic or semi-automatic mode for creation a linguistic ontology knowledge base on bases of the certain language segment Wikipedia articles (e.g., Ukrainian segment) for application in retrieval process, in particular, in quasisearch procedures [9].

### 2. Development of the input data structure

The ontology development software has to use the structural organization of Wikipedia materials features. The articles are formed with the use of a special format MediaWiki [5] (fig. 1). This format allows unique description of the structural elements (headers, sections, links, meta elements, etc.) and their efficient processing in automatic mode. The entire archive collection for a particular language Wikipedia articles segment is stored in the



form of an XML document [3, 4, 5, 10, 11, 13] and is available for downloading. The XML markup allows selecting necessary components for further processing. Fig. 1 shows an example of a node that describes one of the Ukrainian segment articles. This fragment illustrates the XML node structure for the article describing "Tuple" concept. The node contains not only the article source code, but also some additional metainformation. <title> (article title), and <text> (text of the article) fields are of the greatest interest for the content analysis and the problem solving.

```
<page>
<title>Cortege</title>
<id>19488</id>
<revision>
<timestamp>2010-01-21T18:45:56Z</timestamp>
<contributor>
<username>Igor Yalovecky</username>
</contributor>
<text xml:space="preserve">"Cortege" or "n"-ка&nbsp;
— in [[mathematics]] ordered and [[finite set|finite]] set of
elements ...
== See also ==
* [[Descartes product]]
* [[Formal language]]
[[Category: Theory of Sets]]
[[Category: Relational Data Model]]
[[en:Tuple]] [[ru:Кортеж]]
</text>
</revision>
</page>
```

Fig. 1. The Wikipedia article XML document fragment

Table 1. The types of Wikipedia articles

Articles type	Description
Explanatory articles	Articles describing a particular concept, event or phenomenon. Accordingly to the title is the main source of the encyclopedia information content and serve as the main source for the ontologies .
Articles describing the multi-valued concept	This kind of articles is designed to store a list of all currently available in the corresponding Wikipedia segment means of some term. The following articles contain links to the appropriate explanatory article, if it is available, and a short, unique description for each semantic meanings of the term. The main indicator of such articles is the proprietary tags <i>{{disambig}}</i> at the beginning of the text.
Categories articles	Article describing the concept-category from the general Wikipedia categories hierarchy. In the explanatory articles, one or more of such concepts can also be specified as a parent category.
Articles describing the files	File articles describe the Wikipedia file objects (e.g. images) and contain information specific for the respective objects (references, size, type, etc.)
Incomplete articles	Explanatory articles often link to articles, which due to some reasons, are not yet written. They do not have the narrative part, but have the title.
Service articles	Such articles do not have direct informational value for the user, and are used in the Wikipedia developing process. In particular they might be article templates, helps, comments, discussions, etc.

The entire set of Wikipedia articles by various criteria can be attributed to several groups which are depicted in the table. 1.

Analysis of the Wikipedia structure allows concluding that Wikipedia articles along with reciprocal internal links create a prototype of ontological knowledge bases [14]. The main role in this case is played by the explanatory articles and categories article, the multivalued concepts articles group performs a supporting role in development of the explanatory articles for each of the meaning. In addition, the incomplete articles can be used to identify relations among other articles if those contain the according link.

### 3. Development of the output data information model

The detected Wikipedia structure features allow examining the software for linguistic ontology creation as means of Wikipedia elements conversion into the appropriate ontologies objects. Since the last will be actively used in retrieval procedure, their storage with an effective and prompt access to them can be resolved by applying the databases system. According to the logical organization of the ontology, fig. 2 shows the designed structural scheme of a relational database that contains the ontologies main components and relations among them. The result of the ontology information content formation would be filled appropriate values of the database tables. Lets consider in details all the relational links in the database. Synset is a central relational relation which reflects the ontology synset. It contains the following attributes: a unique identifier (id), a symbolic representation of a sinseta in Ukrainian (ua), Russian (ru) and English (en), a unique semantic interpretation of a synset (descr). The ru and en fields are introduced to establish a potential ontologies connection with the similar ontologies, created on the basis of Russian and English Wikipedia segments. Depending on the requirements, a set of languages can be enhanced by adding the appropriate fields in the synset relational relation or completely removed from additional language attributes, leaving only the main language name synset.

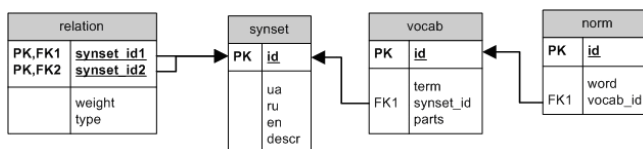


Fig. 2. The ontologies database structure

Vocab is an auxiliary relational link designed to store all synonymic synset inputs. It consists of a unique identifier (id), a term, which is a symbolic representation of synonymic input (term), an identifier of the parent synset (synset\_id) and a field that contains number of words present in term (parts). Norm is an auxiliary relational link for storing word normal forms that make up the term symbolic representation from Vocab. It consists of a unique identifier (id), a character based representation of a word from a term normal form (word) and the identifier of the parent term from Vocab (vocab\_id). Relation is the keyword relational link that reflects existing relations among the ontology concepts. The synset\_id1 and synset\_id2 fields contain synsets identifiers, between which there is a semantic relations. The weight filed characterizes this relationship by a certain weight value, the higher the value, the stronger is the relations between synsets. Finally, the type field stores the semantic relation type, thus, in the quasiharmonic search context there are two types of relations — ssosiation and hyponym-hyperonym.

Such source data structural organization allows forming a hierarchically structured ontology knowledge base for specific domain field, which will describe the concepts (the concept) of outer world and a variety of relations linking these concepts. This knowledge base can be used as a semantic core for quasiharmonic search process. The quasiharmonic approach will allow including semantics in nonsemantic search engines through the use of semantic coherence notion that is embedded in the ontological knowledge base, during the search query formation. To modify the search query within the quasiharmonic search it is proposed to use the knowledge base for domain field via three directions. The first direction - fixing terms from the search query using certain ontological knowledge base notions: the terms are allocated with the use the normal words forms (norm) table, and with the help of vocab table they are bind with a certain synset in case of one valued relation, or the of homonymy resolving procedure for a given term, in the case of its ambiguity is initiated. Fig. 3 shows the database query diagram, which allows determining the corresponding synsets for the normalized words from a user search query (e.g. word1, word2, etc.).

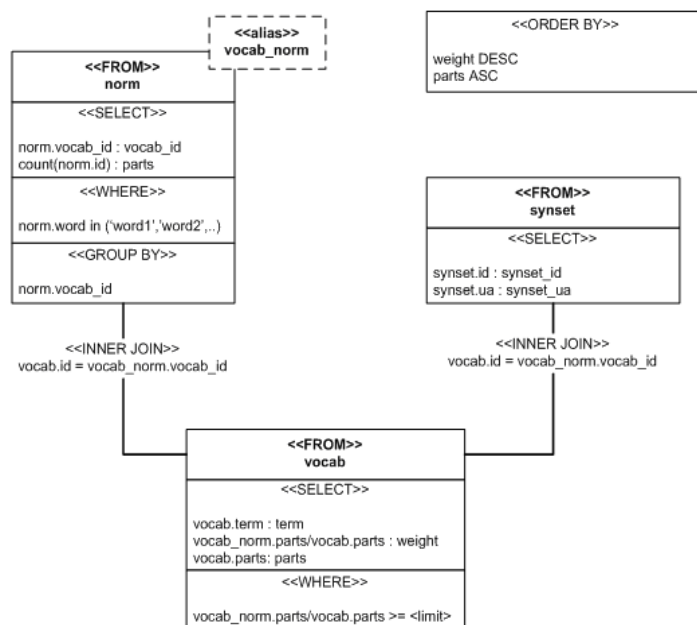


Fig. 3. The database query scheme for searching synsets, which match the words from the search query

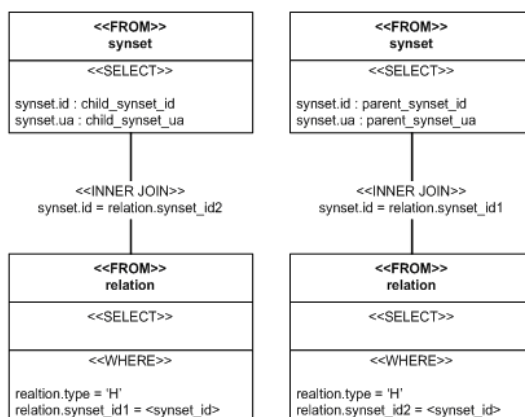


Fig. 4. The database queries scheme for subsidiary and parental elements search

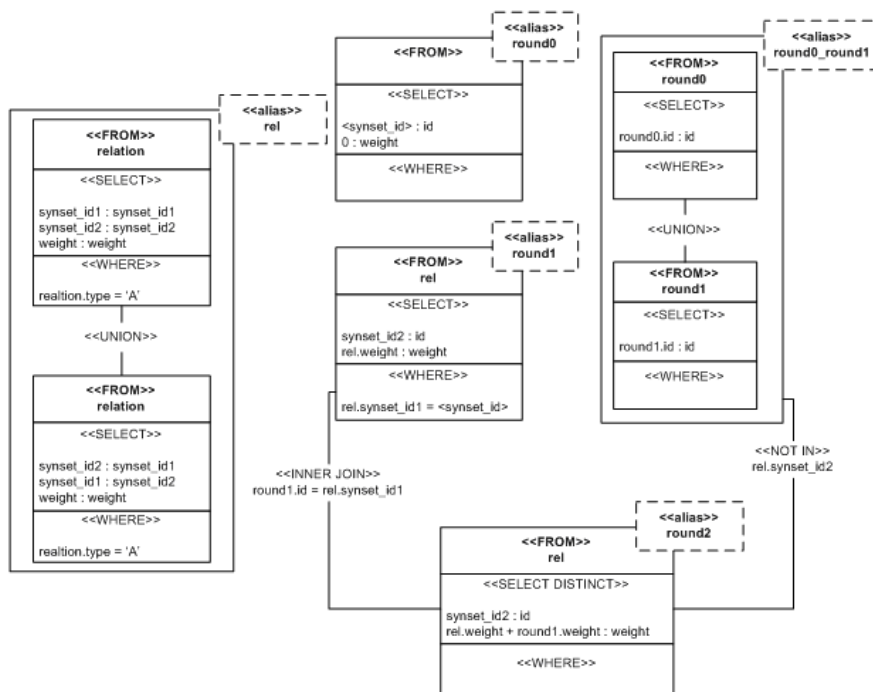


Fig. 5. The database query scheme for searching the ontology semantic cut

In this way the implicit search query modification is done, as it goes from the words set plane into the concepts plane.

The second way is request modification by refinement or enlargement of the query. It is done due to synonymic concepts groups usage, as each concept from the synsets table (synset) can have multiple synonymic representations in the form of terms from a terms table (vocab). Modification may also be done due to concepts relations through common parent elements in the ontology hierarchical structure, and also due to parental and subsidiary concepts. Fig. 4 shows the database query diagram for the according subsidiary and parental synsets search for the selected synset (<synset\_id>).

It is possible to move focus from the general search results to more vague and vice versa by navigating the ontology vertical ties from the relation table, and inclusion into the query concepts logically associated with the the initial query version terms, but more or less specific from them depending on the user's information interest.

Finally, the third direction is the request modification by the search direction management through the semantically linked environment of the current query concepts set. The mechanism for automatic search and visualization of the domain specific ontology sections, that are mostly gravitated to the query concepts group, enables nonlinear (i.e. by hidden associative relations) modifying the request for clarification or change of the search vector. For this aim in the domain field ontology, with the use of the relation semantic table, subnets of the specific radius are determined, each of them has the according query notion in its center. Fig. 5 shows the database query diagram for searching the first (round1) and the second (round2) synsets rounds from some syns subnet <synset\_id>. The zero round (round0) is entered by the synset and the temporary table round0\_round1 is intended to exclude synsets, which already are included in the previous rounds from the second round (round2).

The intersection of these subnets, taking into account the weight (weight) generates the ontology cut by request concepts and can point out the ontological s areas that are semantically most gravitated towards the user's search interests

#### 4. The algorithmic organization of the ontology creation

The ontology formation process can be divided into several stages, laid into the basis of the corresponding algorithm:

- preparatory phase;
- stage of database synsets creation;
- stage of hierarchical relations construction;
- stage of associative relations construction;
- correction phase.

In accordance to the presented general algorithm for ontology creation the process begins with the XML data parsing and the corresponding synset base formation and completes with implementation of the corresponding correction of the formed ontology database in the automatic or manual mode if one is needed.

The developed algorithm has sufficient flexibility of the ontology formation process, in the same time providing simplicity and reliability of its programming implementation and possibility of further functionality enlargement by introducing additional methods.

The presented in the chart (Fig. 6) class mediawiki\_parser provides all the above steps for the ontology creation. Since the source data of the Wikipedia articles are available in XML document format, the initial phase with the main objective of XML-data parsing and their preparation for further processing is required. According to the data segment presented above, it is essential to navigate to each subsequent article (page node) in the ontologies creation process. The title (title node) and the text of the article (text node) from a page node subtree are of further interest for further ontology creation.

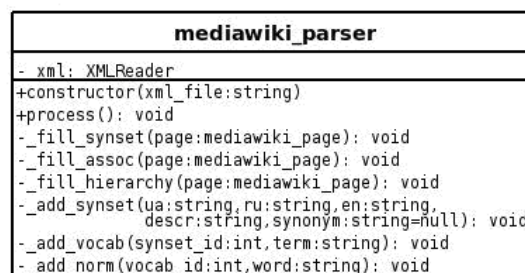
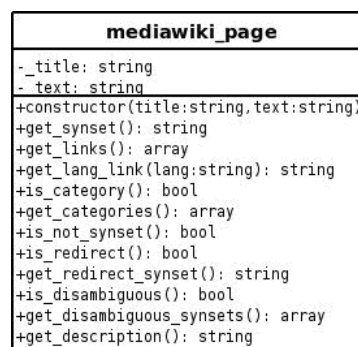


Fig. 6. The Wikipedia class diagram in MediaWiki format

The instance of mediawiki\_page class for work with the Wikipedia page in the MediaWiki format (fig. 6) is created on the basis of the received data. It allows manipulating the article data, doing various checks, selecting logical sections, etc. According to the diagram (fig. 6) the mediawiki\_page class implements the following important methods:

- get\_synset — returns the symbolic synset representation for this article type (if possible);
- get\_links — analyzes the article text, and returns the links set to other Wikipedia articles;
- get\_lang\_link (lang) — returns reference to the corresponding article written in another language according to the parameter lang if such exists;
- is\_category — checks whether the notion described in this article has the category status;
- get\_categories — returns a list of categories, which include this article;
- is\_not\_synset — checks whether a concept described in this article can be interpreted as a synset;
- is\_redirect — checks whether a given article is only a reference to another one;
- get\_redirect\_synset — returns the symbolic representations of synset, to whose article it is referred;
- is\_disambiguous — checks whether this article describes a multivalued concept;
- get\_disambiguous\_synsets — returns a list of synsets with the same spelling but with different interpretations formed according to the multivalued concept article content;
- get\_description — returns the interpretation of the notion described in this article.

All the above described class methods are actively used at the according ontology formation stages. After the preparatory phase comes the turn to fill the ontology database. The process is encapsulated in the process method of the mediawiki\_parser class. Fig. 7 presents pseudocode of this method.

At the database synsets creation stage, in fact, the ontology basis its conceptual part is formed. In each article by analysis of its title and text the type of concept that it describes is determined and the synset, vocab and norm tables are accordingly filled. For this purposes the following mediawiki\_parser class methods are used: \_add\_synset, \_add\_vocab and \_add\_norm. It should be noted that the method \_add\_synset automatically adds the information into the synset dictionary using the \_add\_vocab

method, which, in its turn, automatically triggers the `_add_norm` method. Fig. 8 presents the pseudocode, which abstractly shows the sequence of actions at this stage (`_fill_synset` method of the `mediawiki_parser` class).

```

/*Create XMLReader */
xml = new XMLReader(xml_file);
/*Form synsets database */
/* Read the next page node, while it is possible */
while (xml_page = xml->next('page')) do
    /*Create article object */
    page = new mediawiki_page(xml_page->get('title'), xml_page->get('text'));
    /*Launch synsets filling method based on the current article */
    this->_fill_synset(page);
end while;
/*Return the XMLReader indicator at the beginning of the file */
xml->reset();
/*form ontology relations */
/* Read the next page node, while it is possible */
while (xml_page = xml->next('page')) do
    /* Create article object */
    page = new mediawiki_page(xml_page->get('title'), xml_page->get('text'));
    /*Launch hierarchal relations filling method*/
    this->_fill_hierarchy(page);
    /* Start the filling method of associative connections */
    this->_fill_assoc(page);
end while;

```

Fig. 7. Pseudocode for the ontology database filling

The ontology hierarchical relations creation stage, as it was noted earlier, is based on the use of Wikipedia articles hierarchies that describe the category. At the end of each explanatory article or one describing the category the list of parental categories to which this article belongs is indicated. It is easy to notice that within the Wikipedia one concept may refer to several categories at the same time.

```

/*If article does not describe synset*/
if page->is_not_synset() then
    return; /*stop work*/
/*If article describes reference to another one */
else if page->is_redirect() then
    /*Add new synset with symbolic presentation of the concept from the article,*/
    /* to which it is redirected, the current article concept is given as a synonym */
    this->_add_synset(page->get_redirect_synset(), "", "", page->get_synset());
/*If article describes many-valued concept */
else if page->is_disambiguous() then
    /*Get list of all synsets and their explanations */
    list(synset, description) = page->get_disambiguous_synsets();
    /*Create new synset for each entry from the list */
    for each record in list(synset, description) do
        /*Add new synset (synset) with the definition (description)*/
        /*the current article title gives as a synonym */
        this->_add_synset(synset, "", "", description, page->get_synset());
    end for;
/*If article describes concept or category */
else
    /*Add new synset */
    this->_add_synset(
        page->get_synset(),
        page->get_lang_link('ru'),
        page->get_lang_link('en'),
        page->get_description());
end if;

```

Fig. 8. Pseudocode for the ontology synsets base filling

The hierarchical structure formed in this way will differ from the classic terms hierarchy, where each term has only one more general concept (in other words, only one parent). However, this limitation does not correspond to the real relations among concepts, since for most of them it is impossible to uniquely detect only one parent. Therefore, the direct conversion of all Wikipedia

categorical links into the hierarchical structure of linguistic ontology synsets is regarded as the most optimal, provided that during the design of toolkits, which will use direct hyperonymy relations, the above feature of such relations formation will be taken into account. According to this pseudocode the `_fill_hierarchy` method will have the structure shown in fig. 9.

```

/* If article does not describe concept or category */
if page->is_not_synset() OR page->is_redirect() OR page->is_disambiguous() then
    return; /*stop work*/
/* If article describes concept or category */
else
    /*For each article category */
    for each category in page->get_categories() do
        /*Save the hierarchy relation with relation weigh equal to w0*/
        database->relation->insert(
            'synset_id1' = category,
            'synset_id2' = page->get_synset(),
            'type' = 'H',
            'weight' = w0
        );
    end for;
end if;

```

Fig. 9. Pseudocode for ontology hierarchical relations formation

The associative relations formation stage fundamentally differs from the hierarchical relations formation stage only by the fact that here for relations identification the links to other Wikipedia articles (and, consequently, other concepts in ontologies) in the current article text are used. Moreover, since the link can be repeated, and there also might be reverse links (when the article to which one was referred contains a backlink), this allows increasing this relation weight by some delta value, thereby reflecting the semantic relation strengthening. The higher number of such links, the stronger the relationship among articles, respectively, the greater must be the weight ratio. In order to distribute the relations weight in the ontology uniformly enough, delta should be chosen relatively small in accordance with the initial weight value  $w_0$ . The associative relations are filled in the `_fill_assoc` method, its pseudocode can be seen in fig. 10.

Finally, the last step is an optional correction phase of already created in the previous stages ontological base. It can be done automatically (for example, removing possible service concepts and their relations), and by manual editing of the ontological base by ontology editors (for example, removal of irrelevant or erroneous relations etc.). This correction may be helpful due to partial transparency of the automatic ontology formation and the availability of proprietary information in the primary source, which can be displayed in a specific encyclopedia articles (e.g., category "article starting from the letter "A", etc.), which should not be included in the ontology.

## 5. Results and conclusions

For creation and analysis of an experimental linguistic ontology the research prototype of the Ukrainian Wikipedia segment into the appropriate Ukrainian ontological knowledge base conversion software has been developed. The results of the software module for linguistic ontology based on the Ukrainian Wikipedia segment articles detected during the experiment are included in the table 2. The observed quantitative characteristics allow arguing that this ontology covers quite wide area of human knowledge and can be used in information systems. It should also be mentioned that the developed ontology is only the initial phase, the basis for the further work for experts and, at the same time, scientific-information resource for research and experiments in the search technology field. In further work with the developed ontology, it is possible to provide new concepts and links or remove the false ones.



```

/* If article does not describe concept or category */
if page->is_not_synset() OR page->is_redirect() OR page->is_disambiguous()
    return; /*stop work*/
/* If article describes concept or category */
else
    /* For each reference to another article */
    for each link in page->get_links() do
        /*If current relation was already included into the database */
        if database->relation->select_where(
            'synset_id1' == page->get_synset(),
            'synset_id2' == link) then
            /*Update the weight ratio with some value delta*/
            line = database->relation->select_where(
                'synset_id1' == page->get_synset(),
                'synset_id2' == link);
            line->update(weight = weight + delta);
        else
            /*Save associative relation with weight ratio equal to w0*/
            database->relation->insert(
                'synset_id1' = link,
                'synset_id2' = page->get_synset(),
                'type' = 'A',
                'weight' = w0
            );
        end if;
    end for;
end if;

```

Fig. 10. Pseudocode for ontology associative relations formation

Table 2. Quantitative characteristics of the ontology

Characteristic	Quantitative value
Synsets number	243948
Average number of words in synset	0.15
Number of hierarchical relations	127366
Number of associative relations	2658584

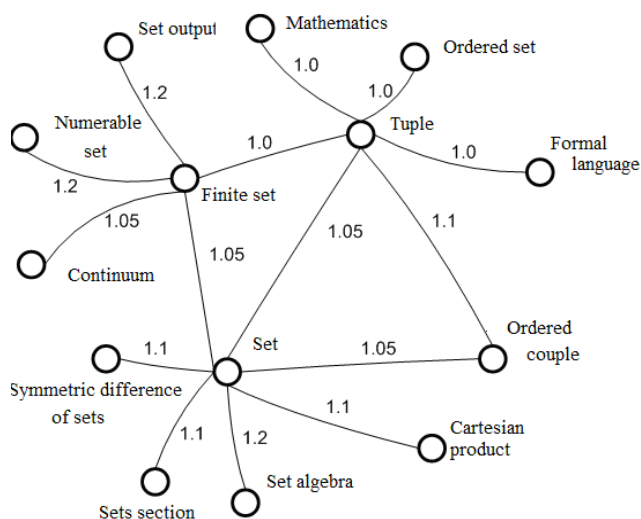


Fig. 11. Fragment of the developed ontology associative relations

The qualitative analysis of the developed ontologies is, in general, actually impossible, taking into account very large number of concepts and relations among them. This process requires long-term practical use of the ontology and considerable human and time resources. Improvement of the ontological knowledge base quality must be performed in parallel with its usage in the development of information retrieval, content analysis

procedures, etc. However, the estimation can be done by means of selective analysis. For this aim several small scatter subnets (such as shown in fig. 11) from different parts of the ontology are build and assess the major links among synsets.

Analysis of these fragments allows concluding that concepts and relations among them, with some minor exceptions, mostly correspond to the conceptual structure of the subject areas. Thus, qualitative composition of the ontology and adequacy of the relations can be considered quite acceptable for use in information retrieval field.

Thus, the presented ontology formation procedures enable relatively easy automatic development of quite large linguistic ontology, which would meet the basic requirements to such resource.

In addition, since Wikipedia as the primary source of information for ontology development is multilingual, in perspective it is possible to create cross-language ontologies, which would greatly expand the scope of their application.

## Literature

- [1] Barrett D.J.: MediaWiki, O'Reilly Media 2008.
- [2] Dobrov B.V., Lukashevich N.V.: The linguistic ontology of nature sciences and technologies for information retrieving applications, Scientists' notes of Kazan. univ. 2/2007, pp. 49-72 (in Russian).
- [3] Garol'd E., Mins S.: XML, Spravochnik, Simvol-Plyus, 2002 (in Russian).
- [4] Khabibullin I.S.H.: Samouchitel' XML, BKHV, Peterburg 2003 (in Russian).
- [5] Kholzner S.: XML. Entsiklopediya, Piter, 2004 (in Russian).
- [6] Lande D.V., Snarskiy A.A., Bezsydnov I.V.: Internetics. Navigation in the complex networks: models and algorithms, Librikom, Moscow 2009 (in Russian).
- [7] Lande D.V.: Knowledge retrieving at the Internet. Professional work, Williams, Moscow 2005 (in Russian).
- [8] Lande D.V.: The base of information flows integration, Ingeniring, Kyiv 2006 (in Russian).
- [9] Mykhailiuk A.Y., Pylypchuk O.V., Snizhko M.V., Tarasenko V.P.: Quasi-semantic search of textual data in an electronic information source, Radioelectronics and Informatics, KhNURE, Kharkov 3/2009, pp. 61-67 (in Ukrainian).
- [10] Rey E.: Izuchayem XML, SimvolPlyus, 2001 (in Russian).
- [11] Sheperd D.: Osvoy samostoyatel'no XML za 21 den', Izdatel'skiy dom «Vil'yams», 2002 (in Russian).
- [12] Skorohodko E.F.: Semantic networks and automatic text processing, Naukova Dumka, Kyiv 1983 (in Russian).
- [13] Spenser P.: XML. Proyektirovaniye i realizatsiya. Programirovaniye s pomoshch'yu XML, ASP i IE5. Seriya: Programmist programmistu M. Lori 2001 (in Russian).
- [14] Syed Z.S., Finin T., Joshi A.: Wikipedia as an Ontology for Describing Documents, In Proceedings of ICWSM, AAAI Press, 2008, pp. 136-144.

**Ph.D. Anton Mykhailiuk**

e-mail: may-62@ukr.net

Senior research fellow, associate professor of the Department of Informatics in Borys Grinchenko Kyiv University.

Research interests: mining of natural language text information objects, semantization of data-searching in electronic information resources, and computer-formal education.



**Prof. Vasyl Teslyuk**

e-mail: vtesliuk(at)polynet.lviv.ua

Professor of CAD Department in Lviv Polytechnic National University.

Research interests: Computer-aided design and modeling of microelectromechanical systems and integrated circuits.



otrzymano/received: 13.12.2013

przyjęto do druku/accepted: 14.01.2014

# DEVELOPMENT OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF PUMPING STATION FOR URBAN WATER SUPPLY

Evgeniy Pistun<sup>1</sup>, Natalia Yakymchuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, <sup>2</sup>Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

**Abstract.** The analysis of the automatic control of water intake area of the pumping station, which is based on a controller with fuzzy logic and systematization using seasonally and hourly water consumption by using wavelet transforms.

**Keywords:** water resources, wavelet transforms, fuzzy control, adaptive systems

## ROZWÓJ AUTOMATYCZNYCH SYSTEMÓW STEROWANIA STACJĄ POMP ZASILAJĄCĄ MIASTO W WODĘ

**Abstract.** Analiza automatycznej kontroli poboru wody pompowni, opartej jest na regulatorze rozmytym i systematyzacji na podstawie sezonowego i godzinowego zużycia wody z wykorzystaniem transformaty falkowej.

**Keywords:** zasoby wodne, transformata falkowa, sterowanie rozmyte, systemy adaptacyjne

### Introduction

The problem of water quality is important for many settlements of Ukraine. The use of outdated equipment pumping stations, lack of effective monitoring and control of pump units leads to overspending of electricity backed excessively high pressure in water supply networks, which increases the risk of accidents. The basic amount of electricity consumed by the pumping station is spent on power pumping units. The water supply is constantly changing, then the pressure that develops pump unit must vary sufficiently flexible to reduce overspending electricity and unproductive water losses.

### 1. The purpose of the article

The aim of this work is to develop a method for improving the energy performance of water by using an adaptive automatic control system of fuzzy logic.

### 2. Research of urban water supply using wavelet transform

For one of the areas of intake pumping station in Rivne (intake area "New Yard") a systematization in Excel measured using a flow sensor "Vzlet MR" values of the hourly cost of water supplied to the water supply network of the city in the summer and autumn- winter period ( during rendering of heat ).

On the basis of this information, we received the control signal, as a set of successive approximations. To this end, wavelet transform is used which is usually applied for signal processing, showing the evolution over time of their main characteristics - the average, variance, periods, amplitudes and phases of harmonic components [1]. Such as these signals is hourly change of the water flow in the water supply network of the city.

On the basis of experimental data on the change in water consumption by their wavelet transform, whereby the received signal ( noise isolation ), which enables further use of this signal as an input task of the regulator, which will regulate the pump units. To do this, the software uses wavelet analysis of data in the form of expansion pack Complex Wavelet Toolbox software Matlab. It includes tools for learning, creating and using wavelets and wavelet transforms as in command mode, and with the help of special tools with graphic user interface(GUI).

On the basis of received experimental data of hourly water consumption in summer and autumn- winter (during the heating season ) periods they were systemized. Later we used the method of Wavelet 1 -D to schedule a one-dimensional signal. We obtained the trends of water consumption hourly change separately for weekends and weekdays. Comparing these trends, it is concluded that the hourly output trends and days are quite

similar, so there is no need to continue their consideration separately. Similarly we received hourly water consumption trends for the summer (Fig. 1) and autumn-winter (Fig. 2) periods (during the heating season).

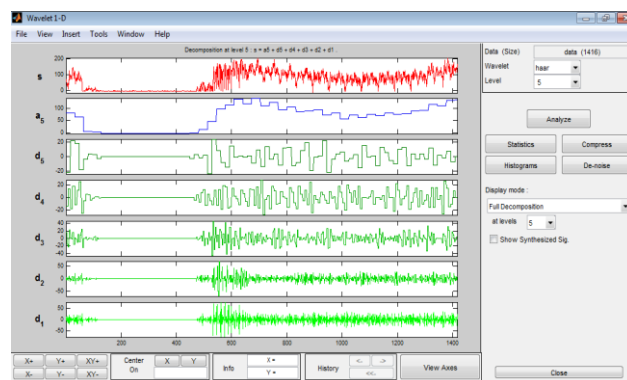


Fig. 1. Hourly trend of water consumption during summer (09.06.2012-06.08.2012)

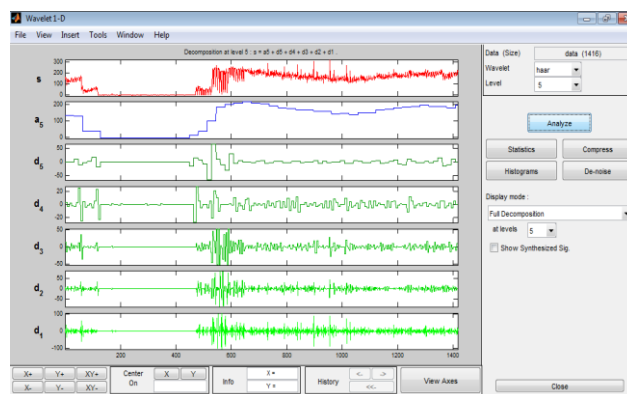


Fig. 2. Hourly trend of water consumption during autumn-winter (30.12.2012-19.01.2013)

Comparing the results for the two periods we concluded that the trend of the autumn- winter period has larger values of water consumption than summer. This difference - it is more in the water that goes into heating.

### 3. Design of fuzzy controller

These approximations (useful signal) can be further used in developing control system of pump unit based on the theory of fuzzy control systems [3]. Application of fuzzy inference approach is justified and sometimes only possible when it is necessary to describe the behavior of a complex system and get a chance to determine the values of some parameters of the system

based on the values of other parameters or environmental parameters. To describe the behavior of the system using two basic concepts of fuzzy logic: a linguistic variable P and the term linguistic variable T. Chance of fuzzy logic corresponds to one of the parameters that characterize the system, such as flow rate, pressure and so on. The measured value of the parameter will appear "clear" value of the variable. The whole set of distinct values forming the domain of the linguistic variable. Term is a variable it "fuzzy" value and is defined phrase that describes one characteristic state system parameters.

When using the method based on fuzzy definition of the management process, there is the possibility of forming an optimal set of commands on the criterion of least energy consumption and delivering the required flow of water to consumers. Fuzzy controller provides higher quality scores transients in comparison with classical regulators [2]. To the great advantages of fuzzy control should include its focus on digital implementation. Systems of this kind have enough great flexibility and good quality of the transition process - the minimum time with minimum overshoot regulation.

Productivity, which should produce a pumping station, is determined by the previous value of the flow of water received by us by wavelet transform with the specification of water now, which is measured by a flow meter at the outlet of the pumping station.

At the input of the fuzzy controller have three variables, including the "difference of water consumption", which takes the value of "very low", "low", "average", "high" and "very high". Naturally, the larger the difference of water consumption at the moment, the greater must be the performance. The second linguistic variable defined "rate of change of consumption" in the network, which was also given to the linguistic meaning of "very low", "low", "average", "high" and "very high". The higher rate of change in consumption requires higher pumping station performance. When the water flow created by the pump unit is approaching to the corresponding rate of change of consumption expenditures in the network will decrease and the productivity of pumping station will reduce. The output variable is a unified signal, which is fed to the frequency converter. He was assigned to the following terms: "very low", "low", "moderately low", "below average", "average", "above average", "moderately high", "high" and "very high" (Table 1).

Table 1. The relationship between the variables of fuzzy control system

Rate of change of consumption	Difference of water consumption				
	Very low	Low	Average	High	Very high
Very low	Very low	Low	Moderately low	Below average	Average
Low	Low	Moderately low	Below average	Average	Above average
Average	Moderately low	Below average	Average	Above average	Moderately high
High	Below average	Average	Above average	Moderately high	High
Very high	Average	Above average	Moderately high	High	Very High

In the event of a sharp pressure decrease in the city water supply network, while ensuring its flow rates calculated according to consumption rates, emerging signal of the likelihood of an emergency, i.e. rupture of pipelines.

Done fuzzy controller design using fuzzy module in Matlab environment using Mamdani type designed framework of rules, variables and terms for the renamed input variables giving them names *zmina-vytraty* (consumption change), *shvydkist-zminy* (the consumption change rate), and *tysk* (pressure), and output variables describing their *sygnal* (signal) and *sygnal-avarii* (alarm signal) (Fig. 3)

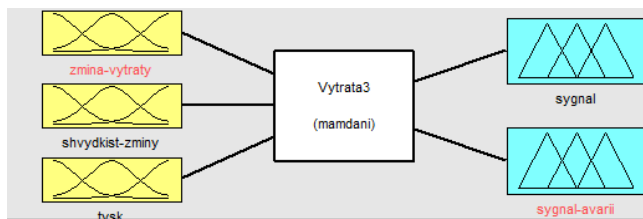


Fig. 3. The designed model of fuzzy controller

Using the editor of membership functions the variation range was set for variables *zmina-vytraty* and *shvydkist-zminy* using five terms with the triangular shape and the variable *tysk* was introduced with three terms, after which they were named. A membership function for the output variables was given. To assess the linguistic variable *signal* using 9 terms of triangular membership functions and to *sygnal-avarii* – d 3 terms. Using the editor of knowledge base RuleEditor the rules were formulated.

Figure 4 shows the visualization window of fuzzy inference. In the "Input" specified values of input variables for the logical conclusion.

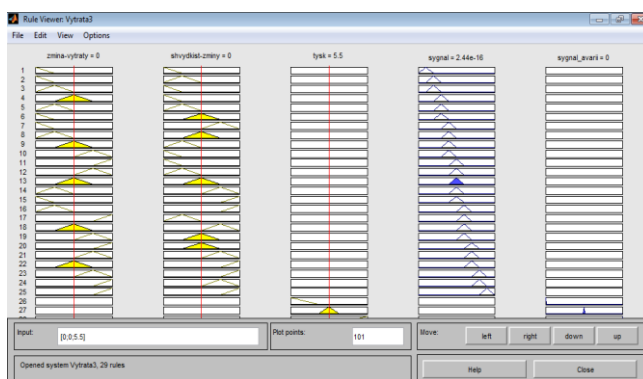


Fig. 4. Visualization of fuzzy logic conclusion in RuleViewer

#### 4. Modeling of control system of pumping station

Based on the designed fuzzy controller had been carried modeling of control system of pumping station. A model of such a system is shown in Fig. 5. The input parameters of the control system are the current flow, the pressure in the network, and the signal of the chosen season of the year (summer or winter). Output parameters: control signal applied to the frequency converter, alarm pressure on potential emergency situations and previous consumption, obtained by wavelet transform, to compare with the current.

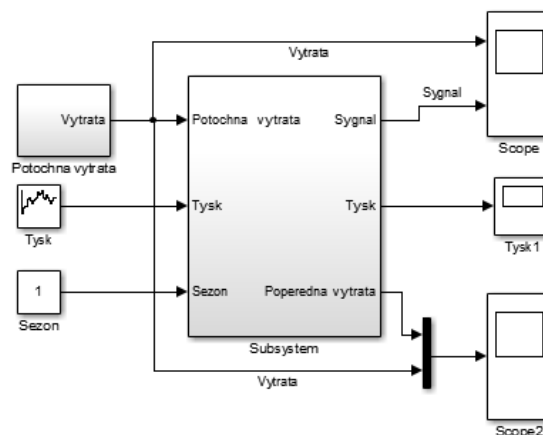


Fig. 5. The model of the control system

A subsystem named «Potochna vytrata» was created. Current consumption is specified by blocks Ramp, simulating time and 1 - D Lookup Table, where each value of time corresponding to a specific value of water consumption (Fig. 6).

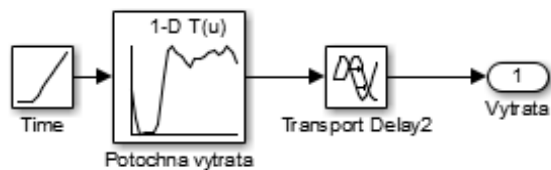


Fig. 6. Subsystem «Potochna vytrata»

Proceed directly to consideration of the control system (Fig. 7).

Subsystem «Vybir sezonu» (Fig. 8) is as follows: Depending on the selected signal Sezon corresponding value of water consumption, which was obtained by wavelet transformation (1 - for winter, 2 - for the summer). Output parameters are preliminary water flow, and control signal derived from this flow (Poperedniy signal).

Subsystem «Fuzzy regulator» (Fig. 9), simulating fuzzy controller. The input parameters of the controller are: changing

consumption supplied from the adder, and is the difference between current flow and the one that was in an earlier time, the rate of change of the flow, which is determined by differentiating the current pressure and flow in the network. Accordingly to the base of the rules described above, receiving the numerical value of signal change in either direction ( $\pm 16\text{mA}$ ). Another parameter is the output signal of the possibility of an emergency, if the pressure is low ( $<4\text{ at}$ ), the output we get (-1), in the normal range ( $4 \dots 7\text{ at}$ ) - 0, high ( $> 7\text{ at}$ ) - (+1). There are checks in the event of a reduction in pressure below that required for normal water farthest point. In the event that less pressure is required, the frequency converter in real time mode increased by 0.5 mA signal that is intended to increase the pressure at the network.

Subsystem «Pochatkovye» publishes preliminary control signal, which is based on current water flow and moves one step (Fig. 10).

Subsystem «Zatrymka peremk» is designed to eliminate the decline of the output signal to 0 at the initial time (Fig. 11).

Consider the subsystem of determine the final output. Based on pre-defined trend of water consumption, obtained by wavelet transforms, for half an hour to how need to provide the necessary flow seems appropriate control signal. At the same time this control signal in the specific moment of time will be clarified based on current flow (Figure 12).

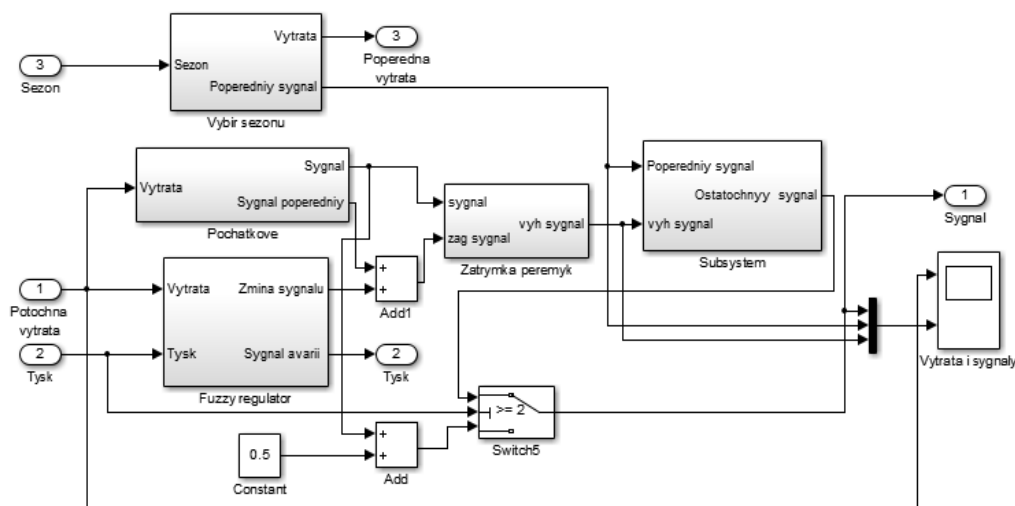


Fig. 7. Main control system

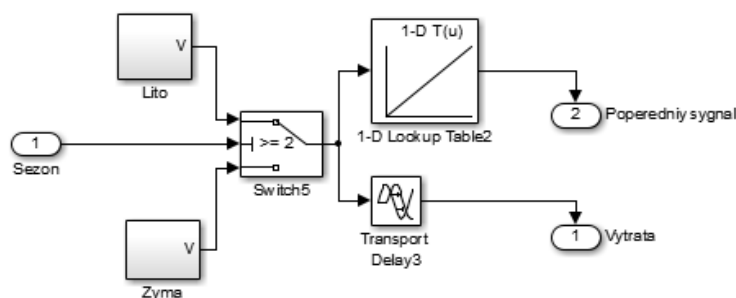


Fig. 8. Subsystem for choice of the season

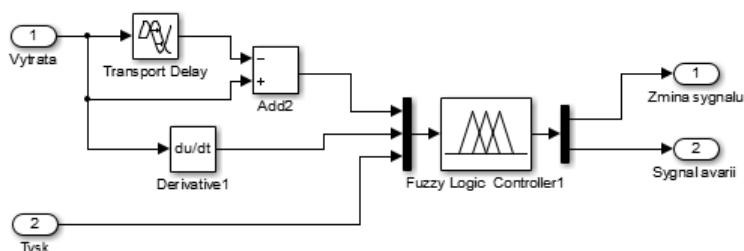


Fig. 9. Subsystem «Fuzzy regulator»



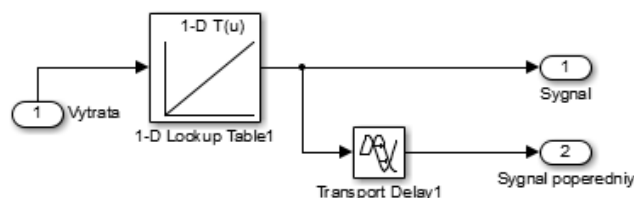


Fig. 10. Subsystem «Pochatkove»

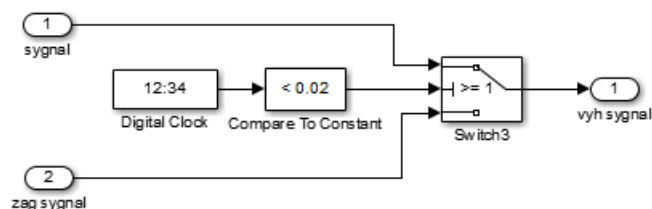


Fig. 11. Subsystem «Zatrymka peremyk»

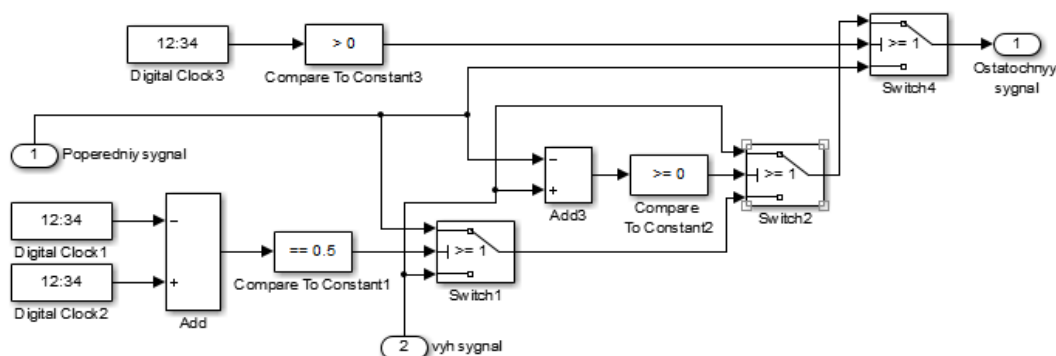


Fig. 12. Subsystem of definition resulting signal

## 5. Results

After simulation we received following graphics (Fig. 13).

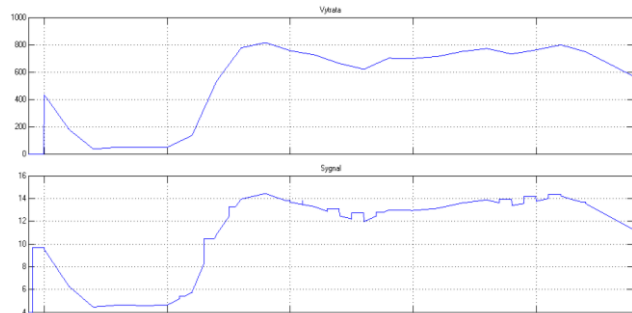


Fig. 13. Graphs of current water flow and the final control signal

Analysis of simulation of automatic control system with fuzzy controller confirms the high quality of the adjustment process of daily water supply to customers according to their requests.

## 6. Conclusions

Based on the data of hourly water consumption we systematized it and made wavelet transforms of this signal. Further we can implement fuzzy control system. It will allow avoid accidents on the pumping station and the excessive consumption electric energy and also it will lead to increase efficiency of processes, the reliability of the water supply and rational use of material and energy resources.

## Bibliography

- [1] Burnaev E.V.: Application of wavelet transformation for analysis of signals: Teaching-methodical aid, Moscow: MFTI, 2007.
- [2] Dementev A.: Optimization of control pump room waterworks, <http://10.3.2.1/articles/pumps/pumps.html>.
- [3] Modern applied control theory. New Classes of regulators of technical systems. Part III, Ed. A.A. Kolesnikov. Taganrog : Taganrog Publishing House, 2000.
- [4] Yakymchuk N. M.: Automatization of water supply for Rivne, VI International Scientific Conference IIRTK, Kyiv, 2013, pp. 208-211.

**Prof. D.Sc. (Technical) Evgeniy Pistun**  
e-mail: acit@polynet.lviv.ua



Head of Automation, thermal and chemical processes Department, Lviv Polytechnic National University. The most significant application development performed under the supervision of Professor Pistun are: technological and test equipment for manufacturing processes of optical fibers, semiconductor devices, integrated circuits and other microelectronic products; set of devices to measure consumption and quantities of gas and liquid by method of differential pressure; composers of gas mixtures; devices for measuring conductivity of the material; the system of automatic control and process optimization of grinding hard materials in the ball drum mill. Author of over 150 scientific papers and patents, including in U.S., UK, Germany, Sweden, Poland and Japan, most of which are implemented in production.

**M.Sc. Natalia Yakymchuk**  
e-mail: selepyna@ukr.net



Research engineer of computer systems and automation, postgraduate student, assistant of the Department of physics and electrical engineering, Lutsk National Technical University. The main scientific direction – automation of water supply processes, construction of data collection, information-processing and industrial automation systems; research, design and modeling of automation systems for the water pumping stations.

otrzymano/received: 03.01.2014

przyjęto do druku/accepted: 07.02.2014

## WYBRANE ASPEKTY TECHNICZNO-EKONOMICZNE LOKALIZACJI FARM WIATROWYCH

Łukasz Gospodarek, Grzegorz Trzmieł

Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono skróconą analizę techniczno-ekonomiczną rozmieszczenia planowanych siłowni wiatrowych. Szczególną uwagę zwrócono na umiejscowienie przestrzenne, uciążliwe dla społeczeństwa efekty pracy wiatraków, wybrane aspekty ekonomiczne oraz potrzebę monitorowania warunków wietrzności przed wyborem lokalizacji, ale również stanu i bieżących uzysków z wykorzystaniem systemu SCADA. Zwrócenie uwagi na wskazane problemy powinno być wystarczającym punktem wyjścia do skutecznej realizacji inwestycji.

**Słowa kluczowe:** siłownie wiatrowe, wietrzność, lokalizacja, kryteria ekonomiczne, systemy SCADA

### SOME TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF THE LOCATION OF WIND FARMS

**Abstract.** The paper presents a summary technical and economic analysis of the placement of planned wind turbines. Particular attention was paid to the spatial location and tedious for the public results of wind turbines work, selected economic aspects and the need for monitoring of wind conditions before choosing a location, but also state and current yields using the SCADA system. Draw attention to problems noted should be a sufficient starting point for effective implementation of the investment.

**Keywords:** wind turbines, windiness, location, economic criteria, SCADA systems

### Wstęp

Ze względu na szybko rozwijające się technologie wytwarzania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych i dyrektywy wydawane przez Unię Europejską, związane z tematem zwiększenia udziału produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych, rośnie liczba inwestycji w energetyce odnawialnej. Najczęściej wybieranym przez inwestorów dotychczas sposobem wytwarzania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych są elektrownie wiatrowe. Powodem takiego wyboru jest większa sprawność wytwarzania energii elektrycznej niż np. z paneli fotowoltaicznych, dłuższa żywotność, mniejsza powierzchnia terenu potrzebnego do budowy elektrowni wiatrowej. Koniecznością jest ujednolicenie prawa związanego z budową farmy wiatrowej, ponieważ często powstają konflikty, które prowadzą do znacznego przedłużenia czasu realizacji inwestycji. Stąd autorzy widzą potrzebę przeanalizowania problemu doboru odpowiedniej lokalizacji siłowni wiatrowych w aspekcie uzyskania możliwie dużych uzysków energetycznych przy jednoczesnej minimalizacji uciążliwego wpływu inwestycji na okolicznych mieszkańców.

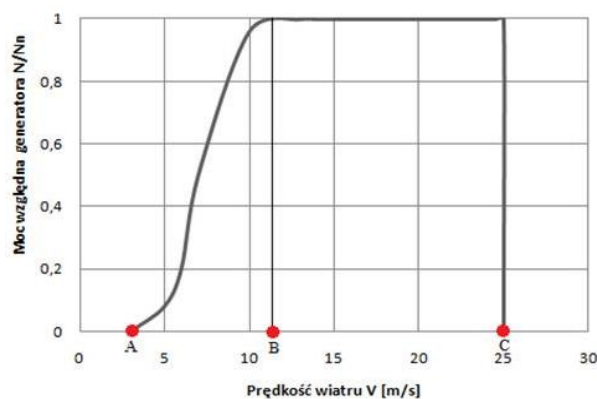
### 1. Elektrownie wiatrowe w Polsce

Obecnie najczęściej spotykane są elektrownie z poziomą osią obrotu, wyposażone w trzy łopaty. Wynika to z lepszej, względem innych rozwiązań, efektywności, sprawności i opłacalności takiego rozwiązania. Większość elektrowni wiatrowych wybudowanych w XX wieku posiada dwustronnie zasilany generator indukcyjny. W celu dostosowania ich prędkości obrotowej (rzędu 750 do 1500 obr/min) do prędkości wirowania łopat wirnika (do 20 obr/min) stosuje się przekładnię, których przełożenie jest niekiedy większe od 60. Przyczyną stosowania generatorów asynchronicznych jest ich prosta konstrukcja, niskie koszty oraz możliwość sterowania.

W układach niewielkiej mocy elektrownie wiatrowe posiadają niekiedy dwa generatory asynchroniczne. Pierwszy z nich pracuje przy mniejszej prędkości wiatru, czyli mniejszych obrotach własnych (np. 750 obr/min), drugi natomiast pracuje przy większych obrotach własnych (1500 obr/min) i większej prędkości wiatru. Na rysunku 1 przedstawiono przykładową charakterystykę zależności mocy generatora od prędkości wiatru [2]. Zakres pracy elektrowni wiatrowej zależy od prędkości wiatru. Załączenie elektrowni wiatrowej następuje przy prędkości wiatru 3÷5 m/s, natomiast jej wyłączenie przy prędkości 25 m/s. Moc nominalną elektrownia wiatrowa osiąga przy 12÷16 m/s.

Najczęściej w praktycznych zastosowaniach stosuje się obecnie układy zmienne-prędkościowe o zmiennej w szerokich

granicach prędkości obrotowej, w których stosuje się generator synchroniczny. Nie jest on bezpośrednio sprzęgnięty z siecią elektroenergetyczną, tylko za pośrednictwem przekształtnika energoelektronicznego, najczęściej o sterowaniu wektorowym typu „full-scale controlled converter” [1]. Wirnik generatora synchronicznego jest bezpośrednio sprzęgnięty z wirnikiem turbiny, co nie wymaga stosowania przekładni, ale wymusza stosowanie większej liczby par biegunów (powyżej 120) niż w tradycyjnych konstrukcjach. Elektrownie wiatrowe wyposażone są w różnego rodzaju systemy sterujące ich pracą, co pozwala dostosować elektrownie do zmieniających się parametrów wiatru. Przykładem może być system do sterowania kątem ustawienia łopat względem siły wiatru, ustawić można je również w tzw. pozycję hamowania w celu zatrzymania elektrowni wiatrowej.



Rys. 1. Zależność mocy względnej generatora wiatrakowego od prędkości wiatru [11]: A – uruchomienie turbiny, B – osiągnięcie mocy znamionowej, C – wyłączenie

### 2. Planowanie lokalizacji

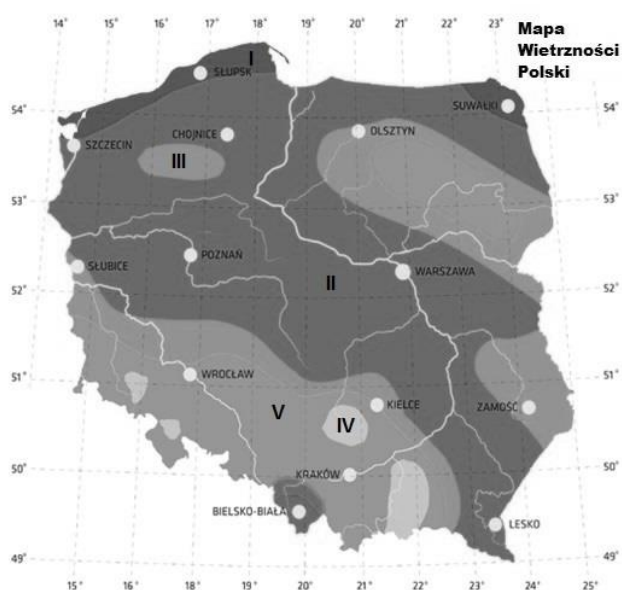
Etap planowania inwestycji opiera się na poszukiwaniu potencjalnego miejsca pod inwestycję budowy farmy wiatrowej względem dostarczanych wstępnych badań wietrzności (rys. 2), możliwości podłączenia do sieci elektro-energetycznej czy też istnienia dróg dojazdowych.

Lokalizacja farmy wiatrowej powinna spełniać między innymi kryteria takie jak [13]:

- duży potencjał wietrzności,
- spełnienie warunków przyłączeniowych do sieci elektroenergetycznej,
- odpowiednia odległość od zabudowań oraz infrastruktura drogowa,
- spełnienie warunków środowiskowych,

- minimalizacja efektu migającego cienia,
- aspekty ekonomiczne,
- możliwość zdalnego monitorowania.

Szczegółowe pomiary siły wiatru dokonywane są najczęściej przez okres dwóch-trzech lat. Pozwala to na uzyskanie szeregu danych zmieniających się w zależności od pory roku oraz na porównanie danych rocznych. Aparaturę pomiarową umieszcza się na masztach kratownicowych bądź rurowych. Maszt wyposażony jest w rejestrator danych (prędkości wiatru, temperatur i ciśnienia na 3 wysokościach) i ogniwo fotowoltaiczne. Stawianie masztów pomiarowych powinno odbywać się zgodnie z prawem budowlanym. Odległość masztu pomiarowego od planowanej lokalizacji turbiny wiatrowej nie powinna przekraczać 2 km. W ciągu całego okresu badań pomiary powinny zachować ciągłość, w związku z czym konieczne jest serwisowanie: cykliczne odbywa się co 3 miesiące, zaś serwisowanie awaryjne odbywa się natychmiast i usterki są jak najszybciej usuwane.



Rys. 2. Strefy wietrzności w Polsce [8]: I - bardzo korzystne, II - korzystne, III - dość korzystne, IV - niekorzystne, V - bardzo niekorzystne

Dzięki szczegółowym pomiarom siły wiatru nie tylko można dobrać parametry turbiny, ale również optymalną wysokość wieży, ponieważ prędkość wiatru rośnie tylko do pewnej wysokości [3]. Uzyskuje się charakterystyki profilu wysokości wieży od siły wiatru, dzięki którym można określić optymalną wysokość, powyżej której wysokość masztu jest nieoptymalna.

Najczęściej przyjmuje się, że minimalna średnioroczna prędkość wiatru na danym terenie powinna przekraczać 4 m/s. Sezonowa zmienność prędkości wiatru w ciągu roku w Polsce w okresie letnim stanowi 70÷80 % wartości średniej a w okresie zimowym od 120 do 130 %. Jest to korzystne ze względu na pokrywający się w okresie zimowym sezon grzewczy. Na mapie z rysunku 2 przedstawiono strefy wietrzności w Polsce, które obrazują potencjalne tereny pod budowę farm wiatrowych. Obszary najbardziej odpowiednie pod inwestycje farm wiatrowych, gdzie prędkość wiatru przekracza 4 m/s, to wybrzeże Morza Bałtyckiego, Suwalszczyzna oraz wysokie partie gór, gdzie średnioroczne prędkości wiatru przekraczają 6 m/s. Niestety w zagospodarowaniu tych terenów przeszkadza uboga, a wręcz niekiedy brak infrastruktury dróg dojazdowych, możliwości przyłączenia elektrowni do sieci oraz ochrona krajobrazu [3]. W związku z tymi problemami należy zwrócić uwagę na odpowiednie zaprojektowanie mapy drogowej oraz określenie odległości farmy wiatrowej od zabudowań, co zagwarantuje dostateczny komfort życia okolicznym mieszkańcom.

## 2.1. Odległość od zabudowań, infrastruktura drogowa

Odpowiednia odległość od zabudowań mieszkalnych powinna spełniać dopuszczalne normy hałasu zawarte w Rozporządzeniu Ministra środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. w sprawie "dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku" [9]. Według tego rozporządzenia poziom hałasu w odpowiedniej odległości od jego źródła nie powinien przekraczać 40 dB, odległość tę powinno się odpowiednio wyliczyć, jest ona zależna od poziomu hałasu, który jest emitowany przez jego źródło. W ten sposób na mapie wybranego terenu wykreśla się izofonę, w obrębie której nie powinny znajdować się zabudowania mieszkalne.

Za pomocą wzorów (1)-(5) przedstawiono metodę wyznaczania granic izofony i tym samym odległości, w jakiej powinien znajdować się wiatrak od zabudowań. Sposób obliczenia izofony przedstawiono poniższymi zależnościami [11]:

$$R_z = r_1 \cdot 10^{\frac{L_{aeq1} - L_{aeq2}}{k}}, \quad (1)$$

$$k = \frac{L_{aeq2} - L_{aeq1}}{\log\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}, \quad (2)$$

gdzie:  $R_z$  - odległość, w jakiej powinien znajdować się wiatrak od zabudowań [m],  $r_1$ ,  $r_2$  - odległość przyjęta przez obserwatora [m],  $L_{aeq1}$  - poziom hałasu w odległości  $r_1$  [dB],  $L_{aeq2}$  - poziom hałasu w odległości  $r_2$  [dB],  $L_{aizo}$  - poziom hałasu określony w normie [dB],  $k$  - całkowita liczba powierzchni.

Obliczenie izofony, oprócz wzoru końcowego (1), wymaga obliczenia poziomu hałasu, jaki emituje turbina wiatrowa  $L_n$ , poziomu hałasu w odległościach  $r_1$ ,  $r_2$  i w punkcie obserwacji  $\Delta L_r$ , co przedstawiono poniższymi wzorami [11]:

$$L_n = 50 \log(V_s) = 10 \log(D) - 4, \quad (3)$$

gdzie:  $L_n$  - poziom źródła hałasu [dB],  $V_s$  - prędkość wiatru [m/s],  $D$  - średnica łopaty wiatraka [m],

$$\Delta L_r = 20 \log\left(\frac{r}{r_0}\right) - 11, \quad (4)$$

gdzie:  $\Delta L_r$  - poziom hałasu w punkcie obserwacji [dB],  $r$  - odległość od wiatraka [m],  $r_0$  - odległość odniesienia równa 1 m.

$$L_{aeq} = L_n - \Delta L_r, \quad (5)$$

gdzie:  $L_n$  - poziom źródła hałasu [dB],  $\Delta L_r$  - poziom hałasu w punkcie obserwacji [dB].

Dokonano przykładowych obliczeń na przykładzie turbiny Vestas V80 2,0 MW [14], przyjęto następujące założenia i wartości do obliczeń:  $V_s = 25$  m/s,  $D = 90$  m,  $r_1 = 10$  m,  $r_2 = 20$  m,  $r_0 = 1$  m,  $L_{aizo} = 45$  dB.

W wyniku przyjętych danych otrzymano następujące wyniki:

- poziom hałasu emitowany przez turbinę:  $L_n = 85$  dB,
- poziom hałasu w punkcie obserwacji:
- $\Delta L_{r1} = 9$  dB,  $\Delta L_{r2} = 15$  dB,
- poziom hałasu w punktach odniesienia  $r_1$ ,  $r_2$ :
- $L_{aeq1} = 76$  dB,  $L_{aeq2} = 70$  dB,
- współczynnik  $k = 19$ .

Odległość wiatraka od zabudowań powinna wynosić  $R_z = 428$  m.

Infrastruktura drogowa powinna umożliwiać dołączenie dróg dojazdowych do istniejących dróg użytku publicznego. Stanowi to dość ważny aspekt podczas planowania budowy farmy wiatrowej. Najlepiej jest usytuować wiatraki jak najbliżej drogi publicznej, ponieważ zmniejsza to koszty utworzenia dróg dojazdowych do wiatraków i dróg łączących wiatraki między sobą. Zmniejsza to również komplikacje wynikające z przygotowania odpowiednio wyprofilowanych łuków zakrętów, utwardzenia dróg dojazdowych i oddania ich do użytku [2]. Bardzo istotnym mankamentem może okazać się duża odległość od sieci elektroenergetycznej ze względu na wysokie koszty budowy linii przesyłowej. Z tego powodu należy zadbać o usytuowanie farmy wiatrowej możliwie blisko infrastruktury elektroenergetycznej.



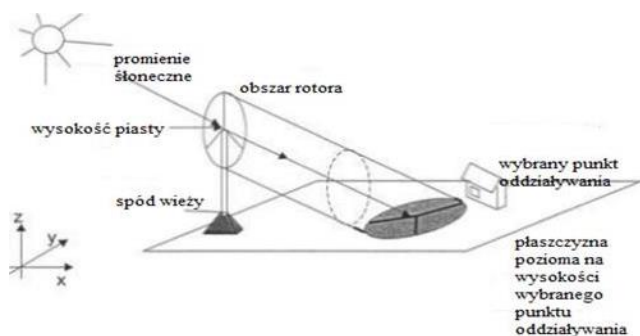
## 2.2. Efekt migotania

Effekt migotającego cienia wywołują obracające się łopaty wirnika. Częstotliwość migotania w granicach  $2,5\div 3$  Hz (efekt nazywany jest wówczas stroboskopowym) u 5 % badanych osób chorych na epilepsję wywołuje negatywne efekty. Nominalna prędkość turbiny Vestas V90 wynosi 14,9 obr/min, co daje częstotliwość migotania równą 0,745 Hz. Jest to znacznie niższa częstotliwość niż ta podawana jako szkodliwa. Mimo to nawet mniejsza częstotliwość migotania cienia powoduje rozdrażnienia nawet u zdrowych osób, stąd kategorycznie należy unikać zjawiska migotania cienia w obrębie budynków mieszkalnych.

Czynnikami mającymi wpływ na intensywność migotania cienia są:

- wysokość wieży i średnica wirnika,
- zachmurzenie,
- odległość zabudowań od farmy wiatrowej,
- obecność „przeszkód” (drzew) znajdujących się pomiędzy farmą wiatrową a zabudowaniami mieszkalnymi,
- rozmieszczenie okien i drzwi w budynkach mieszkalnych.

Możliwość modelowania zjawiska migotania cienia na etapie planowania budowy farmy wiatrowej pozwala na zaplanowanie dogodnego rozmieszczenia wiatraków tak, aby zapobiec nadmiernemu oddziaływaniu migotania na człowieka. Na rysunku 3 przedstawiono schemat powstawania efektu migotania cienia, który stanowi punkt wyjścia w szacowaniu umiejscowienia turbiny wiatrowej.



Rys. 3. Powstawanie migotania cienia [4]

Ponadto na podstawie analizy rysunku 3 można określić szacunkowy czas przesłaniania okien w pomieszczeniach mieszkalnych, a w skrajnych przypadkach nawet okres wyłączenia turbiny.

## 2.3. Kryteria ekonomiczne

Budowa farmy wiatrowej jest bardzo kosztowna. Poza kosztami bezpośrednimi należy brać też pod uwagę cenę gruntów, możliwości podłączenia do sieci elektroenergetycznej, różniące w zależności od liczby wiatraków. Pojedyncze wiatraki można bezpośrednio podłączyć do transformatora średniego napięcia, znajdującego się na pobliskim słupie energetycznym (o ile pozwalają na to warunki przyłączeniowe), natomiast większa liczba turbin wymaga przyłączenia do Głównego Punktu Zasilania (GPZ) [4]. Analiza ekonomiczna wszelkich inwestycji nie określa jednoznacznie i w sposób 100-procentowy nakładu finansowego, z jakim trzeba się liczyć podczas planowania inwestycji. Niepewność analizy ekonomicznej wynika z czynników, które ulegają zmianie w okresie od rozpoczęcia danej inwestycji do jej zakończenia, wliczając również okres eksploatacji. Analiza ekonomiczna opiera się o wyliczenia przypuszczalnych kosztów, jakie poniesie inwestor, w związku z tym trzeba liczyć się z ewentualnymi rozbieżnościami pomiędzy kwotami obliczonymi a rzeczywistymi. Zalecane jest stosowanie różnych metod analizy w celu ich porównania i zobrazowania różnic, jakie z nich wynikają. W istotny sposób wpływ na zmianę parametrów analizy

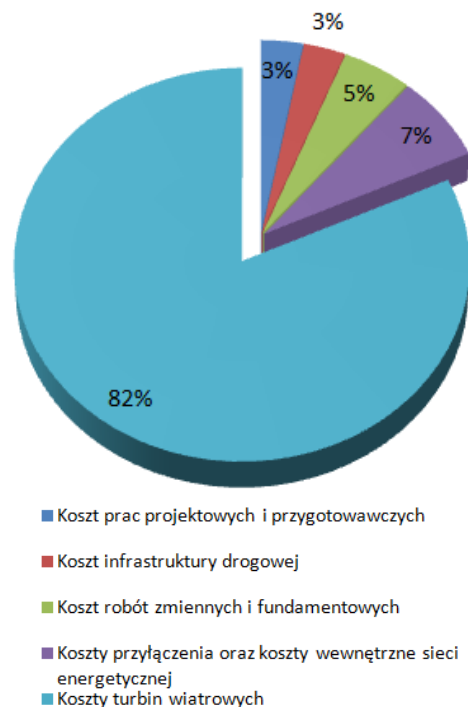
ekonomicznej budowy farmy wiatrowej mają czynniki takie jak [3]: średnia prędkość wiatru w planowanym przez inwestora miejscu budowy elektrowni wiatrowej, nominalna moc elektrowni wiatrowej, ceny energii elektrycznej, sposób finansowania inwestycji, stopa dyskontowa.

W tabeli 1 zestawiono przykładowe koszty inwestycyjne w przypadku budowy farmy wiatrowej o łącznej mocy 40 MW.

W przykładzie oszacowano koszt inwestycji na przykładzie farmy wiatrowej składającej się z dwudziestu siłowni wiatrowych po 2 MW każda, co daje łącznie 40 MW mocy zainstalowanej. Czas realizacji inwestycji przyjęto na 5 lat. Łączna wartość inwestycji przekracza 200 mln zł. Na rysunku 4 przedstawiono procentowy udział poszczególnych kosztów inwestycji. Największy udział w kosztach takiej inwestycji ma zakup turbin wiatrowych (ponad 80% całego wkładu finansowego), inne koszty w zestawieniu procentowym nie różnią się znacznie między sobą. Koszt robót ziemnych i fundamentowych przyjęto dla typowych warunków bez uwzględnienia konieczności wymiany gruntu oraz stabilizacji podłoża, nie przyjęto również posadowienia pośredniego fundamentów. Przyłączenie do sieci przyjęto na podstawie podobnych inwestycji na terenie Polski, są to średnie koszty infrastruktury energetycznej [7, 10, 13].

Tabela 1. Nakład inwestycyjny na farmę wiatrową o mocy 40 MW

Rodzaj nakładu	Wartość [PLN]
Koszt prac projektowych i przygotowawczych	8 000 000
Koszt infrastruktury drogowej	8 000 000
Koszt robót ziemnych i fundamentowych	11 200 000
Koszty przyłączenia oraz koszty wewnętrzne sieci energetycznej	18 000 000
Koszty turbin wiatrowych	196 000 000
Razem	241 200 000



Rys. 4. Procentowe zestawienie nakładu inwestycyjnego

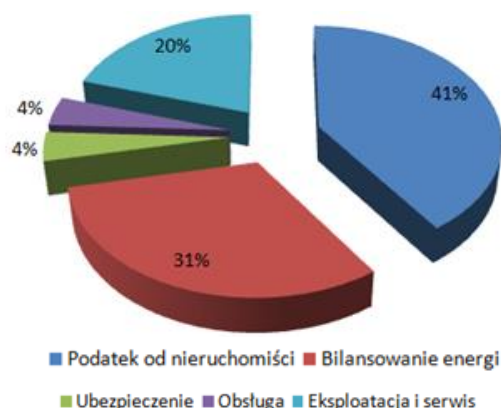
Już w pierwszym roku pracy farmy wiatrowej pojawiają się koszty związane z jej eksploatacją. W opisywanym przypadku farmy wiatrowej zostały obrane koszty eksploatacji na podstawie podobnych związanych z mocą zainstalowaną już istniejących na terenie Polski farm wiatrowych. W tabeli 2 zaprezentowano koszty eksploatacyjne omawianego przykładu farmy wiatrowej.



Tabela 2. Koszty eksploatacyjne farmy wiatrowej o mocy 40 MW

Rodzaje kosztów	Wartość [PLN]
Podatek od nieruchomości	1 800 000
Bilansowanie energii	1 400 000
Ubezpieczenie	200 000
Obsługa	180 000
Eksploatacja i Serwis	960 000
Razem	4 580 000

Głównym elementem kosztów eksploatacyjnych jest podatek związany z nieruchomościami, na których znajduje się farma wiatrowa. Najczęściej wybieraną umową prawa własności do gruntu jest umowa dzierżawy. Drugim najistotniejszym czynnikiem jest bilansowanie energii, koszty wzrastają wraz z jej ceną. Na rysunku 5 pokazano graficznie procentowy udział kosztów eksploatacyjnych.



Rys. 5. Procentowe przedstawienie kosztów eksploatacji

Przychody z farmy wiatrowej uzyskiwane są z tytułu sprzedaży energii elektrycznej oraz ze sprzedaży zielonych certyfikatów (świadczenia pochodzenia energii elektrycznej). W tabeli 3 przedstawiono opłacalność inwestycji w omawianym przypadku.

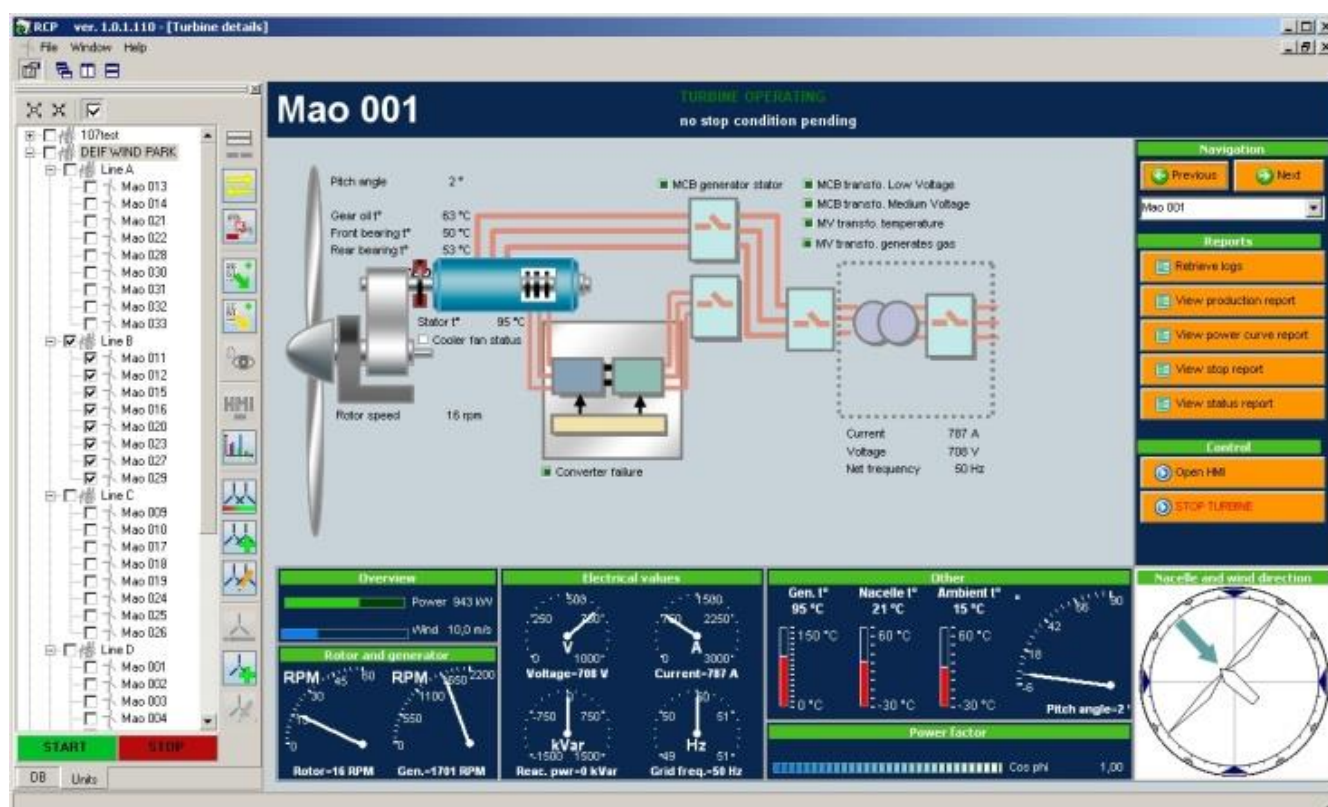
Tabela 3. Opłacalność inwestycji farmy wiatrowej o mocy 40 MW

Suma wpływów zdyskontowanych – wskaźnik opłacalności	48 981 431 zł
Wewnętrzna stopa zwrotu z inwestycji	21,58 %
Stopa dyskontowa	12,09 %
Okres zwrotu od początku inwestycji	13 lat
Okres zwrotu od zakończenia inwestycji	8 lat

W rozdziale tym zostało przybliżone zagadnienie nakładów inwestycyjnych budowy farmy wiatrowej. Wpływ na nakład finansowy ma oczywiście planowana liczba wiatraków w farmie wiatrowej jak również ich łączna moc. W rozpatrywanym przypadku wymieniane kwoty nakładu inwestycyjnego zależą też od przelicznika walutowego przyjętego przy kursie Euro równym 4 PLN.

## 2.4. Zdalny monitoring - SCADA

Wybór lokalizacji farmy wiatrowej zawsze poprzedzony jest analizą warunków wietrzności. Automatyzacja monitorowania oraz archiwizacji tych warunków, połączona z rozbudowanymi możliwościami prezentacji wyników i raportowania, może być skutecznie realizowana przez systemy SCADA. Ponadto systemy te, wyposażone w specjalistyczne biblioteki graficzne, są również wykorzystywane podczas eksploatacji farm wiatrowych.



Rys. 6. System SCADA dla turbin wiatrowych z technologią DEIF Wind Power [12]

Zdalne monitorowanie i nadzór jest nieodłącznym elementem nowoczesnej instalacji współpracującej z farmą wiatrową. Systemy wizualizacji i sterowania SCADA pozwalają szybko i efektywnie zaimplementować aplikację nadzorującą bieżącą pracę wielu urządzeń przemysłowych, domowych układów sterujących, itd. Praktycznie nieograniczone możliwości monitorowania, alarmowania, archiwizacji oraz sterowania stawiają systemy SCADA w czołówce systemów dedykowanych do nadzoru farm wiatrowych. Ponadto bogate biblioteki graficzne pozwalają bez zbędnego nakładu czasu wykonać nawet bardziej rozbudowane wizualizacje. Tworzone na potrzeby danej instalacji obrazy synoptyczne (graficzne) mogą być wykorzystywane w różnorodnej konfiguracji sprzętowej z panelami dotykowymi (operatorskimi) włącznie. Dwustronny przesył danych (parametrów użytkowych i sterujących) może być realizowany z wykorzystaniem tradycyjnych łącz internetowych lub protokołów sieciowych. W zależności od lokalizacji mogą być to media przewodowe lub bezprzewodowe. Na etapie planowania należy zapewnić dostępność pewnego łącza wymiany danych, które zagwarantuje bezawaryjną komunikację pomiędzy farmą (siłownią) wiatrową a punktem monitoringu. Różnorodność dostępnych na rynku automatyki systemów SCADA pozwala dopasować optymalny system do zakładanych potrzeb. Wybór uniwersalnego systemu z bogatymi możliwościami funkcjonalnymi i bibliotekami elementów graficznych jest uzasadnione z ekonomicznego punktu widzenia – zwłaszcza przy planowaniu większej liczby podobnych inwestycji. Na rys. 6 pokazano obraz synoptyczny przykładowego systemu SCADA, zapewniającego kompletny monitoring i kontrolę poszczególnych turbin i całej farmy wiatrowej.

Pokazane na rys. 6 komponenty graficzne informują operatorów o m.in.: bieżących prędkościach wiatru i generatora, parametrach elektrycznych (generowanej mocy, prądzie, napięciu, częstotliwości sieci, wartości współczynnika mocy), temperaturach (wimnika, przekładni, gondoli, otoczenia), kącie pochylecia łopaty, kącie obrotu gondoli, kierunku i prędkości wiatru, itd. Dodatkowo, widoczne po prawej stronie przyciski funkcyjne pozwalają na podgląd trendów (wykresów oraz przebiegów historycznych) krzywych mocy, raportów (wielkości produkcji energii, wyłączeń, statusowych i podsumowujących) i logów (dzienników zdarzeń). Prezentowany system w pełnej automatyce realizuje również funkcje alarmujące z samoistnym zapisem sytuacji awaryjnych w bazach danych.

### 3. Wnioski

Na etapie planowania inwestycji określa się jej opłacalność. Precyzja odgrywa tutaj ważną rolę, chociażby ze względu na badania wietrzności, które pomagają w określeniu liczby siłowni wiatrowych bądź wysokości wieży. Pozwala to przybliżyć czas zwrotu inwestycji. Podczas szukania terenu pod budowę farmy wiatrowej ważne jest też uwzględnienie oddziaływania farmy bądź poszczególnych wiatraków na społeczeństwo zamieszkujące tereny sąsiadujące z farmą wiatrową. Odpowiednia odległość od zabudowań czy też uwzględnienie efektu migającego cienia pozwala ograniczyć bądź też wyeliminować konflikty, mogące wydłużyć czas powstania farmy. W celu uniknięcia niepotrzebnych konfliktów ze społeczeństwem, negującym powstanie farmy wiatrowej w swoim sąsiedztwie, inwestor może rozpocząć działania edukacyjne, przekazujące informacje o danym projekcie i energetyce wiatrowej. Edukację taką można przeprowadzić poprzez przygotowanie materiałów opisujących potencjalne oddziaływanie na środowisko i korzyści, jakie niesie ze sobą energetyka wiatrowa. Nie można zapominać również o konieczności zapewnienia łączności pomiędzy instalacją a stacją nadzorczą w celu realizacji niezbędnego monitoringu. Warto również, w celu zapewnienia ciągłości i wysokiej skuteczności obsługi, wyposażyć planowaną farmę wiatrową w system SCADA, którego uniwersalizm w sterowaniu, monitorowaniu, alarmowaniu, raportowaniu, wizualizacji i archiwizacji dowolnych parametrów i zdarzeń zwiększa pewność bezawaryjnej pracy

planowanej instalacji, a sytuacje krytyczne mogą być szybko zdiagnozowane i wyeliminowane. Ponadto system SCADA ułatwia, w procesie wyboru lokalizacji, automatyczne monitorowanie i archiwizację parametrów opisujących warunki wietrzności na danym terenie. Niniejsza praca stanowi zbiór wskazówek dla potencjalnych inwestorów, których postępowanie powinno być każdorazowo dostosowane do indywidualnych wymagań, oczekiwań i potrzeb miejscowych władz, społeczności i instytucji, w tym grup energetycznych decydujących o możliwościach przyłączeniowych w istniejącej sieci przesyłowej energii elektrycznej. Oszacowane w publikacji wartości wskaźników muszą zostać w każdym przypadku przeliczone do aktualnych warunków terytorialnych oraz ekonomicznych planowanej inwestycji.

### Literatura

- [1] Abolhassani M., Edwards R., Karmaker H., Keister T., Ledezma E., Skorc A.: Power converter for use with wind generator, U.S. Patent 8129853, 2012.
- [2] Analiza uwarunkowań infrastrukturalnych, <http://ioze.pl/energetykawiatrowa/analiza-uwarunkowan-infrastrukturalnych>, Instytut OZE, 10.12.2012.
- [3] Boczar T.: Energetyka Wiatrowa - Aktualne możliwości wykorzystania, Wydawnictwo Pomiaru Automatyka Kontrola, Warszawa, 2007.
- [4] Efekt migotania cienia, <http://nowaenergia.pl/dla-srodowiska/efekt-migotania-cienia/>, 07.01.2013.
- [5] Gumala S., Knap T., Strzelczyk P., Szerbera Z.: Energetyka wiatrowa, AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków, 2006.
- [6] Jarzyna W.: Warunki wyboru turbin i generatorów elektrowni wiatrowych, Rynek Energii, 2010, vol.95, No 1, pp. 102-106.
- [7] Kacejko P., Wydra M.: Energetyka wiatrowa w Polsce, analiza potencjalnych ograniczeń bilansowych i oddziaływań na warunki pracy jednostek konwencjonalnych, Rynek Energii, 2011, vol. 93, No 2, pp. 25-30.
- [8] Mapa wietrzności Polski – najatrakcyjniejsze tereny pod inwestycje, <http://www.inwestycjawkologie.pl/mapa-wietrznosci-polski-najatrakcyjniejsze-tereny-pod-inwestycje-2>, IWE sp. z o.o., 12.12.2013.
- [9] Ministerstwo Środowiska: Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku, Dz. U. z dnia 5 listopada 2007 r.
- [10] Paska J., Klos M.: Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym – przyłączanie, wpływ na system i ekonomia, Rynek Energii, vol. 91, No 1, 2010.
- [11] PN - ISO 9613 - 2: Akustyka. Tłumienie dźwięku podczas propagacji w przestrzeni otwartej. Ogólna metoda obliczania.
- [12] SCADA for remote supervision and control of wind turbines and wind parks, <http://www.deifwindpower.com/SCADA-1.aspx>, DEIF Wind Power Technology, Denmark, 29.04.2013.
- [13] Soliński I., Jesionek J.: Financial risk analysis of proecological investments on example of wind energy production, Górnictwo i Geoinżynieria / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Kraków, vol. 28, No 2, 2004, pp. 27-38.
- [14] V80-2,0 MW, Dane katalogowe turbiny V80, Vestas Wind Systems A/S, Dania, 2013.
- [15] Wyszukanie lokalizacji, kryteria wyboru, <http://ioze.pl/energetyka-wiatrowa/wyszukanie-lokalizacji-kryteria-wyboru>, Instytut OZE, 12.12.2012.

#### Inż. Łukasz Gospodarek

e-mail: lukasz.gospodarek@student.put.poznan.pl

W 2013 roku ukończył studia pierwszego stopnia kierunku Energetyka o specjalizacji Ekologiczne Źródła Energii Elektrycznej na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Od tego czasu kontynuuje na tej samej uczelni ten sam kierunek na drugim stopniu studiów. Głównymi zainteresowaniami jest rozwój technologii niekonwencjonalnych źródeł energii elektrycznej, a w szczególności rozwój farm wiatrowych.



#### Dr inż. Grzegorz Trzmiel

e-mail: grzegorz.trzmiel@put.poznan.pl

Głównym obszarem zainteresowań naukowo-badawczych autora jest tematyka związana z odnawialnymi źródłami energii oraz systemami sterowania i wizualizacji SCADA. W roku 2010 obronił z wyróżnieniem rozprawę doktorską pt. „Stochastyczna analiza charakterystyk modułu fotowoltaicznego”. Jako pracownik Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej opublikował kilkadziesiąt prac naukowo-badawczych, zaprezentowanych na konferencjach krajowych i zagranicznych. Jest członkiem Poznańskiego Oddziału PTETiS.



otrzymano/received: 06.06.2013

przyjęto do druku/accepted: 21.02.2014

## UKŁAD BADAWCZY PRZEZNACZONY DO ANALIZY SYNCHRONIZACJI PRZEKSZTAŁTNIKÓW SIECIOWYCH PODCZAS ZAPADÓW NAPIĘCIA

Dariusz Zieliński

Politechnika Lubelska, Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych

**Streszczenie.** Efektywne wykorzystanie źródeł energii odnawialnej jest zagadnieniem coraz częściej poruszonym, z uwagi na rosnące wymagania stawiane przez użytkowników, głównie pod kątem czasu zwrotu inwestycji oraz niezawodności komponentów wchodzących w skład systemu. W tym celu należy maksymalizować sprawność układów przekształtnikowych oraz dostosować do pracy z dynamicznie zmieniającymi się parametrami sieci elektroenergetycznej (np. poprzez stosowanie złożonych algorytmów sterowania wektorowego). Takie działania prowadzą do efektywnego przekształcania energii elektrycznej oraz bezpiecznej pracy nawet podczas silnych zakłóceń pochodzących od sieci elektroenergetycznej. W artykule autor skupia się na niezwykle istotnym elemencie systemu przekształtnikowego jakim jest algorytm synchronizacji falownika z siecią (PLL). Przedstawione zostaną wyniki badań algorytmu PLL symulowanego w środowisku Matlab/Simulink oraz zostanie dokonane porównanie wyników symulacyjnych z wynikami uzyskanymi podczas badania rzeczywistego przekształtnika współpracującego z modelem sieci. Atrakcyjność przedstawianego artykułu podnosi zastosowanie autorskiego emulatora sieci elektroenergetycznej.

**Słowa kluczowe:** emulator, dSPACE, zaburzenia sieci, PLL

### THE LABORATORY SYSTEM TO ANALYZING POWER INVERTERS DURING VOLTAGE SAG

**Abstract.** The effective usage of the renewable energy is the topic that nowadays is more and more frequently discussed due to the fact that the demands made by the users concerning the payback period and the reliability of the components parts are constantly increasing. To achieve this, it is advisable to maximally increase the effectiveness of the converting systems and adjust them to the operation with the dynamically variable parameters of the power grid (i.e. by the application of the complex algorithms of vector steering). Such solutions lead to the effective conversion of the energy and the safe operation even during strong interference coming from the power grid. In the article, the author focuses on the important element of the converting system which is the synchronizing algorithm of the converter with the network (PLL). The article provides the results of the research conducted on the PLL algorithm simulated in the Matlab/Simulink software. Moreover, it outlines the comparison between the simulation results and the results obtained during the research on the real converter cooperating with the network model. The attractiveness of the presented article is increased by the application of the authorial emulator of the power grid.

**Keywords:** emulation system, dSPACE, disturbance of the grid, PLL

### Wstęp

Podczas projektowania przekształtników trójfazowych wykorzystywane są symulatory obwodów elektrycznych, tj. Simulink, Pspice, Electronic Workbench. Wykorzystanie tych narzędzi pozwala na sprawdzenie w sposób przybliżony, jak będzie zachowywało się projektowane urządzenie. Takie podejście do projektowania jest efektywne, ale posiada znaczącą wadę – modele symulacyjne w większości przypadków znacznie są uproszczone, przyjmując założenia linearyzujące oraz pomijając pewne własności projektowanego układu. Przykładem takich działań może być pominięcie wpływu kwantowania przetworników analogowo-cyfrowych, przesunięć fazowych, opóźnień transmisji danych i fluktuacji napięcia sieci. Wynikiem tych uproszczeń jest stworzenie algorytmu pracującego w systemie wirtualnym np. w środowisku Matlab/Simulink, a po zaimplementowaniu do systemu opartego o układ FPGA model przestaje działać lub nie radzi sobie z nieprzewidzianymi zakłóceniami. W przypadku projektowania drogich systemów przekształtnikowych, szczególnie pracujących na napięciu WN, przeprowadzenie symulacji komputerowej jest niewystarczające. Surowe normy, opisujące dołączenia przekształtnika do sieci, wymuszają przeprowadzenie dużej liczby badań na obiektach rzeczywistych. W takich przypadkach postępowanie polega na zbudowaniu modelu pracującego na niskim napięciu, a następnie przeprowadza badania z uwzględnieniem zaburzeń w sieci [4].

Artykuł proponuje rozwiązanie w postaci układu emulacji sieci trójfazowej. Urządzenie to pozwala zwiększyć niezawodność projektowanych przekształtników oraz umożliwia uniknięcie błędów związanych z upraszczaniem symulowanych obwodów. Głównymi funkcjami emulatora są:

- generowanie sygnału trójfazowego,
- dodawanie do emulowanego sygnału wyższych harmonicznych,
- modelowanie zapadów napięcia sieci,
- modelowanie drgań styków wyłącznika zainstalowanego na wyjściu przekształtnika,

- modelowanie niejednoczesności załączeń poszczególnych noży wyłącznika.

Emulator sieci trójfazowej jest sprzężony ze środowiskiem Matlab/Simulink za pośrednictwem systemu czasu rzeczywistego dSPACE. Taka konfiguracja tworzy możliwość szybkiego przejścia od symulacji komputerowej do badań projektowanego przekształtnika. Dzięki zastosowaniu emulatora jest możliwe zbadanie wpływu opóźnień transmisji oraz kwantyzacji przetwarzanego sygnału na pracę algorytmu w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. To rozwiązanie pozwala na minimalizację kosztów finansowych na działania badawcze, przyspiesza operacje prototypowania układów i umożliwia wczesne wykrycie większości stanów nieustalonych badanego urządzenia lub algorytmu.

### 1. Omówienie platformy sterującej emulatorom

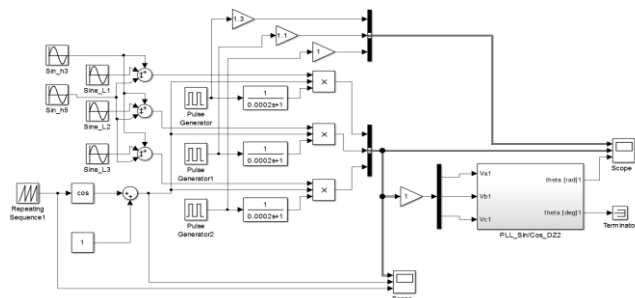
Istnieje wiele platform umożliwiających generowanie oraz analizę złożonych sygnałów analogowych. Zśród przodujących można wymienić: dSPACE, Labview, układy DSP firm Texas Instruments lub STM. Na szczególną uwagę zasługuje system czasu rzeczywistego dSPACE wraz z oprogramowaniem ControlDesk oraz procesory DSP z rodziny C5000 firmy Texas Instruments oprogramowywane oraz debugowane z pomocą środowiska Code Composer Studio. Do celów kontroli parametrów emulatora wraz z badanym falownikiem zastosowano system czasu rzeczywistego dSPACE. Podczas wyboru platformy autor zwrócił uwagę na szybkość odświeżania i akwizycji danych. Istotnym czynnikiem jest również kompatybilność platformy ze środowiskami takimi jak: Matlab/Simulink, kompilatorem języka C oraz przyjazny i niezwykle ergonomiczny interfejs użytkownika. Struktura systemu dSPACE ma budowę modułową. Do pracy systemu zaangażowano trzy karty procesorowe (RTI 1006, DS2101 oraz DS2001). Jądem całego systemu dSPACE jest moduł 1006 wyposażony w cztery rdzenie fizyczne AMD o częstotliwości taktowania 2,8GHz oraz 1Gb pamięci operacyjnej RAM. Rdzenie pracują całkowicie niezależnie względem siebie, co skutkuje możliwością uruchomienia do czterech różnych



aplikacji czasu rzeczywistego. Omawiany projekt wykorzystuje dwa rdzenie procesora AMD:

- aplikacja sterująca, oraz kontrolująca parametry emulatora sieci wraz z generatorem zakłóceń sieci,
- badany algorytm ( obwód synchronizacji falownika z siecią PLL) wraz z strukturą sterowanie wektorowego VOC.

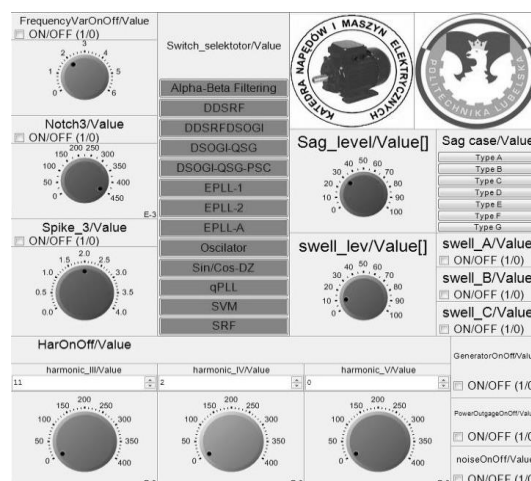
Aplikację sterującą emulatorem zbudowano w Simulinku. Składa się z dużej liczby generatorów przebiegów odkształconych powiązanych ze sobą za pomocą logiki kontrolnej. Przykładowy uproszczony generator trzeciej oraz piątej harmonicznej służący do testowania algorytmu PLL przedstawiono na rys. 1. W celu zwiększenia funkcjonalności nałożono maskę na algorytm sterujący emulatorem (rys. 2) zaprojektowaną w programie ControDesk.



Rys. 1. Uproszczony schemat generacji wyższych harmonicznych wraz z badanym algorytmem PLL

Wyniki pracy algorytmu wyprowadzono na zewnątrz systemu dSPACE za pomocą dwóch specjalizowanych kart procesorowych. Pierwsza karta składa się z 5 niezależnych przetworników DAC o rozdzielczości 14 bitów. Za pomocą tej karty wyprowadzone zostały sygnały sterujące trzech poszczególnych faz emulatora. Kolejna karta zawiera w swojej strukturze przetworniki ADC. W projekcie wykorzystano dwanaście kanałów. Pierwsze sześć dokonuje pomiarów prądów i napięć w poszczególnych fazach emulatora, a kolejne trzy mierzą parametry sieci w miejscu dołączenia badanego falownika do emulowanej sieci. Wyniki pomiarów ADC są gromadzone na dysku komputera, a następnie poddane zostają obróbce DSP za pomocą algorytmu napisanego przy użyciu programu Matlab. Wyniki pomiarów z przetworników ADC są również przekazywane do szybkich komparatorów, które sprzęgnięto z obwodami sterującymi obydwoma urządzeniami. Zastosowanie komparatorów ma na celu wykrycie sytuacji przeciążenia prądowego lub zwarcia, co skutkuje pewną ochroną emulatora jak również badanej energoelektroniki poprzez niezwłoczne odcięcie

sygnałów sterujących w obydwu urządzeniach oraz w szczególnych sytuacjach odłączeniem zasilania.

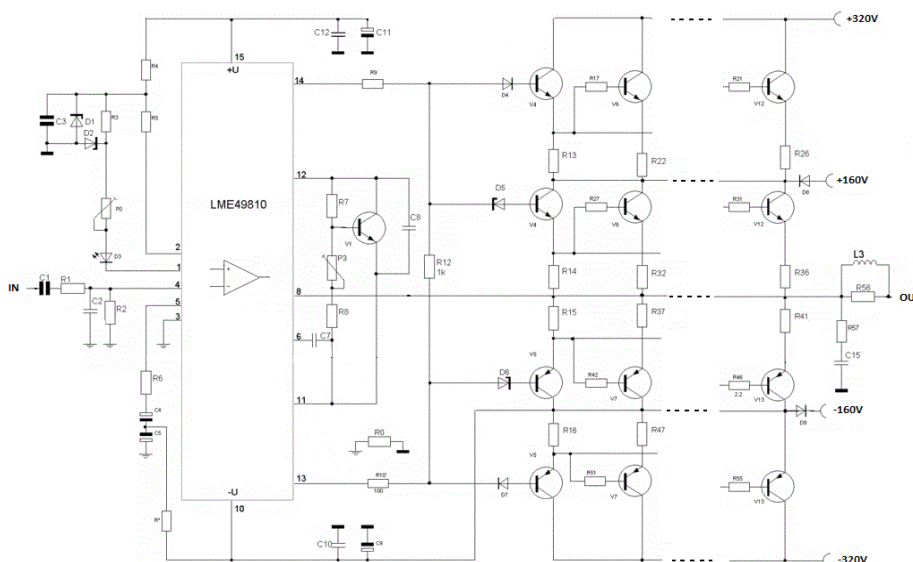


Rys. 2. Maska aplikacji sterującej wykonana w programie ControlDesk

Na uwagę zasługuje sam sposób sterowania poszczególnymi przetwornikami ADC. Mogą być wyzwalone w wielu konfiguracjach. Przykładowo wyzwolenia można dokonywać z pewnym małym interwałem czasowym. Taki pomiar umożliwia uzyskanie powtarzalnego wyniku, gdyż właściwy pomiar odbywa się w stanie ustalonym. Można również wyróżnić pracę z pomiarem synchronicznym 20 MHz, która ma na celu odwzorowanie wartości chwilowej przebiegu mierzonego. Elastyczność pracy przetworników, uśrednianie pomiarów oraz wybór rozdzielczości pozwala na zbliżenie warunków pomiaru do pracy rzeczywistej układu. Modelowanie przesunięcia fazowego pomiędzy pomiarami, a także zastosowanie rzeczywistych układów pomiarowych, takich jak: przekładniki prądowe i napięciowe, drastycznie zwiększa niezawodność projektowanych układów przekształtnikowych, jak również pozwala na oszacowanie stabilności układu.

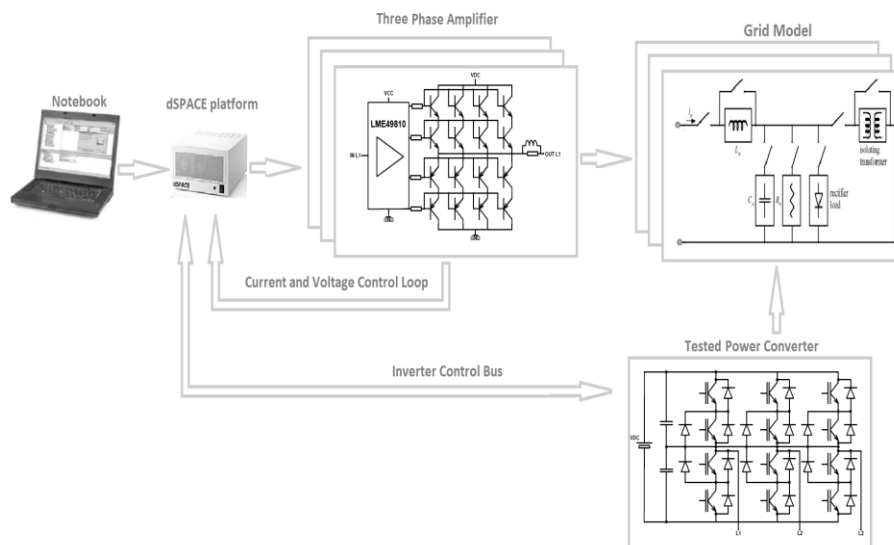
## 2. Budowa emulatora sieci trójfazowej

Głównym zadaniem układu jest emulowanie sieci elektroenergetycznej podczas stanów przejściowych. Elementem wykonawczym emulatora jest trójfazowy analogowy koniec mocy. Konstrukcję oparto o specjalizowany sterownik LME 498010, który steruje grupą tranzystorów bipolarnych. Wzmacniacz zbudowano jako układ dwupoziomowy. Poniższy rysunek przedstawia jeden z trzech końców mocy:



Rys. 3. Schemat jednofazowego modułu mocy zbudowanego na bazie układu LME49810





Rys. 4. Schemat blokowy emulatora sieci trójfazowej

Zdecydowano się na układ analogowy z uwagi na małe zniekształcenie sygnału sterującego oraz bardzo dobre parametry dynamiczne. To pozwala na generowanie złożonych zakłóceń takich jak przepięcia oraz mikro zapady napięcia. Układ modelowy osiągnął moc 2000 W na jeden kanał. Układ wzmacniający zasila modele sieci elektroenergetycznej niskiego napięcia. Model sieci składa się z modułów łatwo rekonfigurowanych do potrzeb aktualnych badań. Moduły zawierają elementy liniowe modelujące impedancję sieci elektroenergetycznej, jak również elementy nieliniowe np. tyrystory które pozwalają przy odpowiednim sterowaniu wytworzyć zakłócenia typu karb rys. 5. Zastosowanie tablicy styczników pozwala na szybką rekonfigurację modelu sieci, zmianę liczby modułów podczas pracy układu takich jak: przejście do pracy z obwodem nieliniowym. By umożliwić poprawną pracę układu trzeba połączyć emulator ze źródłem sygnału trójfazowego. Omawiana aplikacja korzysta z platformy sprzętowej dSPACE, o której była mowa w rozdziale 2. Schemat blokowy przedstawiony na rys. 4 pokazuje koncepcję emulatora

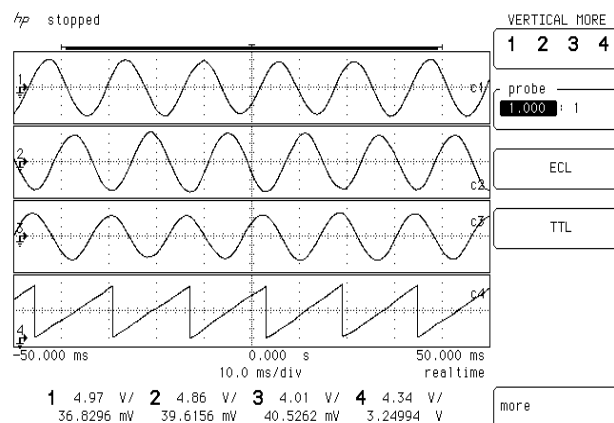
Stosowanie emulatora wymaga zbudowania odpowiedniego bloku generującego w programie Simulink, oraz przesłanie do platformy czasu rzeczywistego dSPACE wygenerowanego po kompilacji kodu wynikowego. Do celów badawczych buduje się kompletne bloki w postaci struktury emulującej zakłóceń. Struktura taka generuje serie zakłóceń charakterystycznych dla sieci przesyłowej. Informacja zwrotna w postaci prądów i napięć jest poddawana obróbce DSP oraz zapisywane są na dysku twardym komputera. Takie postępowanie pozwala również stworzyć bazę danych opisującą zdarzenia. Zdarzenia są archiwizowane w postaci tabelarycznej. Struktura ta zawiera informacje o czasie zaistniałego zdarzenia, oraz warunki w jakich falownik poddany został testom. Dane w postaci tabel pozwalają na szybką analizę jak również wyróżnienie sytuacji, w której dany algorytm nie spełnił oczekiwań lub wykazał istnienie błędu.

### 3. Wyniki badań

Do potwierdzenia otrzymanych w symulacjach wyników wykorzystano stanowisko laboratoryjne oparte o trójfazowy w pełni sterowalny przekształtnik z regulacją wektorową typu VOC oraz autorski emulator sieci trójfazowej. Sprawne przeprowadzenie testów z różnymi algorytmami PLL uzyskano dzięki zastosowaniu systemu dSPACE, który umożliwia niemal bezpośrednią implementację algorytmów. Dla przykładu wybrano algorytm SRF-PLL. Przy prawidłowym działaniu sieci zasilającej

algorytm ten jest w stanie bardzo dokładnie określić kąt synchronizacji  $\theta$ , a tym samym i częstotliwość napięcia zasilania co przedstawiono na rysunku 5.

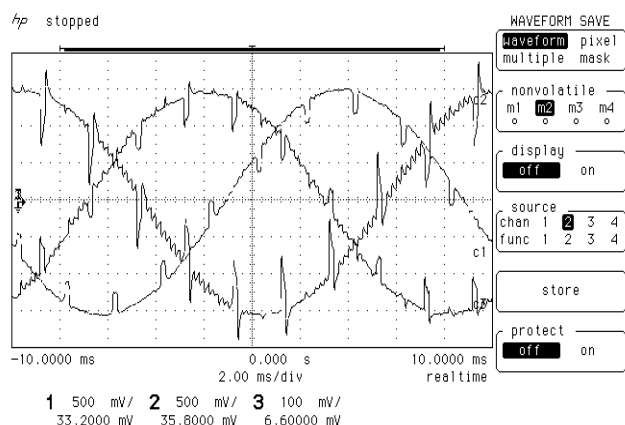
Natomiast wprowadzenie do sieci zakłócenia generowanego przez sterowany prostownik tyrystorowy zasilający obcowzbudny silnik prądu stałego, powoduje zniekształcenie zwane „karbem” rys. 6 i 7. Ten typ zakłóceń powstaje podczas złożonej komutacji tyrystorów i powoduje drastyczne pogorszenie warunków synchronizacji pobliskich przekształtników z siecią rys. 7 [1].



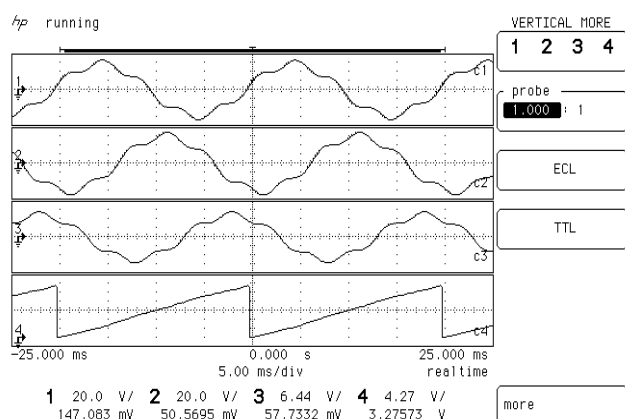
Rys. 5. Oscylogram napięcia poszczególnych faz sieci oraz sygnał generowany przez algorytm SRF-PLL

Algorytm PLL generuje sygnał piłokształtny o amplitudzie maksymalnej  $2\pi$ . Na oscylogramie widać, że nie jest to idealny sygnał piłokształtny, powstają przeregulowania w momencie skokowej zmiany amplitudy, a co najważniejsze sygnał synchronizacji PLL nie jest w fazie z napięciem sieci [2]. Sytuacja się pogarsza w momencie dodania do sygnału piątej harmonicznej rys. 8. W tym przypadku algorytm PLL utracił synchronizację, co w najgorszym przypadku mogłoby doprowadzić do zwarcia pomiędzy falownikiem, a siecią sztywną [3].

Kolejną grupą badań które trzeba wyróżnić jest badanie zachowania algorytmu PLL na asymetrię wyłączników poszczególnych faz. Na poniższym oscylogramie rys. 9 przedstawiono periodyczne załączanie oraz wyłączanie algorytmu SRF-PLL do sieci za pośrednictwem asymetrycznego wyłącznika zbudowanego na bazie trzech przekładników.



Rys. 6. Oscylogram przedstawiający wygenerowane sztucznie zakłócenie typu „karb”



Rys. 8. Na rysunku przedstawiono oscylogram przedstawiający wprowadzenie wyższych harmonicznych do sieci trójfazowej wraz z odpowiedzią układu synchronizacji

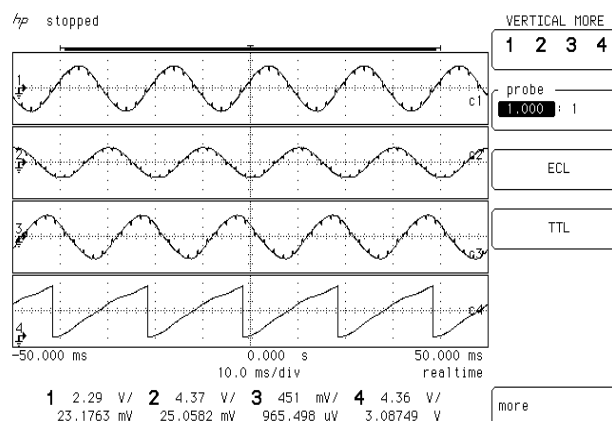
Podczas takiego testu łatwo można zweryfikować nastawy algorytmów PI wchodzących w skład badanego algorytmu. W przypadku zbyt dużych wartości nastaw członu P i I sygnał piłokształtny wpada w oscylacje a także zmienia fazę sygnału. A to zazwyczaj prowadzi do awarii przekształtnika.

#### 4. Wnioski

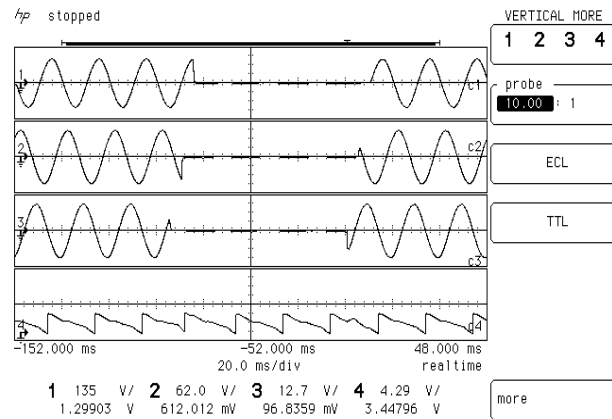
W artykule przedstawiono rozwiązanie układu emulacji sieci elektroenergetycznej wraz z przykładowymi wynikami pracy układu. Układy emulacji znacząco poprawiają niezawodność projektowanych algorytmów, przyspiesza pracę badawczą a także weryfikują pracę algorytmu w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

Dzięki zastosowaniu emulatora jest możliwe zbadanie wpływu opóźnień oraz kwantyzacji przetwarzanego sygnału na pracę algorytmu, a także zbliżenie warunków testowanego algorytmu do warunków rzeczywistej pracy. To rozwiązanie pozwoli na minimalizację kosztów działań badawczych oraz umożliwi wczesne wykrycie wszystkich stanów nieustalonych badanego urządzenia lub algorytmu. Stosowanie programowanej serii zakłóceń zwiela kilkakrotnie niezawodność projektowanego algorytmu synchronizacji.

Podczas badań dokonano weryfikacji wyników. W większości przypadków potwierdziły one własności zauważone podczas symulacji. Różnice wynikały z pewnych uproszczeń programu symulacyjnego model sieci elektroenergetycznej, a zwłaszcza jej własności dynamicznych. Podkreślić należy, że na stanowisku badawczym zastosowano oryginalny emulator sprzętowy sieci elektroenergetycznej, posiadający własności dynamiczne, analogiczne jak w rzeczywistych systemach sieci energetycznych.



Rys. 7. Oscylogram napięcia okształconego typu „karb” oraz odpowiedź układu SRF-PLL



Rys. 9. Oscylogram przedstawiający asymetrię noży wyłącznika mocy

#### Literatura

- [1] Camargo, R. F. de; Pinheiro, H.: Synchronisation method for three-phase PWM converters under unbalanced and distorted grid. w: IEEE Proc., Electr. Power Appl. 153 (5), 2006, s. 763.
- [2] Golestan, Saeed; Monfared, Mohammad; Freijedo, Francisco D.: Design-Oriented Study of Advanced Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loops. w: IEEE Trans. Power Electron. 28 (2), 2013, s. 765–778.
- [3] Renders, B.; Ryckaert, W. R.; Gussemé, K. de; Stockman, K.; Vandeveld, L.: Improving the voltage dip immunity of converter-connected distributed generation units. w: Renewable Energy 33 (5), 2008, s. 1011–1018.
- [4] Sannino, A.; Bollen, M.H.J.; Svensson, J.: Voltage Tolerance Testing of Three-Phase Voltage Source Converters. w: IEEE Trans. Power Delivery 20 (2), 2005, s. 1633–1639.

Mgr inż. Dariusz Zieliński  
e-mail: shadow031@gmail.com

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej (2013). Obecnie uczestnik studiów doktoranckich. Zainteresowania naukowe obejmują energoelektroniczne przekształtniki o wysokich parametrach dynamicznych. Stosowane techniki badawcze to m.in. prototypowania z wykorzystaniem środowiska dSpace, Matlab-Simulink oraz szeregu innych narzędzi informatycznych.



otrzymano/received: 17.05.2014

przyjęto do druku/accepted: 29.05.2014



# IES 2014

ninth international scientific-practical conference



Internet, education and science are playing a great part in the development of the information society. They aimed on economic, social and educational development of Ukraine, the creation and development of the intellectual potential of the nation on the highest level, taking into account world requirements. This is made possible using modern information technology and computer resources in various fields of human activities, which are characterized by interactivity, process intensification, feedback based information exchange that affects the identification of new educational standards in all areas and levels of education.

## CONFERENCE OBJECTIVES

- Discussion of new scientific and practical results of information technologies and Internet usage in science, education and manufacturing;
- Exchange of ideas, search for common directions of research and strengthening the cooperation between educational, scientific and manufacturing organization;
- Demonstration of practical achievements of conference participants in the form of presentations, master-classes and practical workshops;
- Analysis of scientific pedagogical, psychological aspects of information technologies and Internet development;
- Establishment of new contacts and involvement of young scientists in scientific research.

## MAIN DIRECTIONS OF THE CONFERENCE

- Intelligent information technologies;
- Computer network technologies;
- Computer engineering;
- Mathematical modeling;
- Computer technologies and the Internet in informational society;
- Informational Technologies and Internet in Education Process and Scientific Research Activities;
- Geoinformation systems;

## TIME AND DATE OF THE CONFERENCE

October, 14-17, Vinnytsia National Technical University.

## FORMS OF PARTICIPATION IN THE CONFERENCE

Personal as well as by correspondence, distance. Distance form of participation provides for the presentation of the reports via the Internet.

## CONFERENCE LANGUAGES

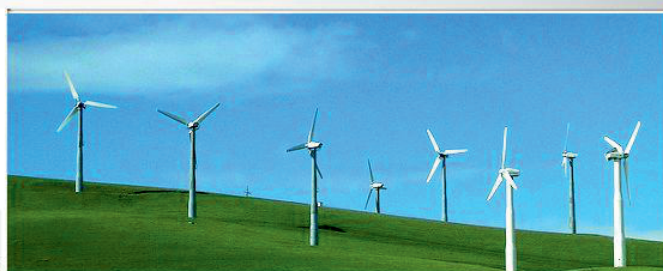
Ukrainian, English, Russian.

<http://ies.vntu.edu.ua>

**Informatyka  
Automatyka  
Pomiary**  
w Gospodarce i Ochronie Środowiska

MNiSW 3.00

ISSN 2083-0157



[Home](#)

[Editorial Board](#)

[Editorial Staff](#)

[Instructions for Authors](#)

✓ [New s](#)

"Informatyka Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska" is technical and scientific business magazin. It's the only polish magazin for scientists and business peoples working in automatic and environmental protection.

✓ [Current issue](#)



Volume 4  
2014  
Number 1

[Net >>](#)

✓ [Archival Issues](#)

✓ [Search](#)

✓ [New sletter](#)

✓ [Authors Pathw ay](#)

✓ [Language](#)

✓ [Review ers](#)

**Nowy adres strony  
naszego czasopisma**

**[www.e-iapgos.pl](http://www.e-iapgos.pl)**



Page created by Index Copernicus Ltd., 2013. All Rights reserved.

Copyright © Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska 2014