Informatics Control Measurement
in Economy and Environment Protection

2/2013

Informatyka Automatyka Pomiary

CITT LPNT

www.iapgos.pl

w gospodarce i ochronie środowiska

ISSN 2083-0157

Kwartalnik Naukowo-Techniczny

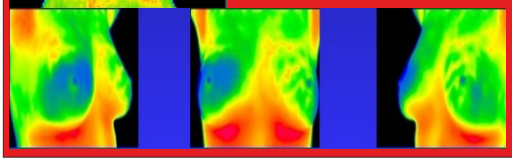
cena 16 zł (w tym 5% VAT)

INFRAMED

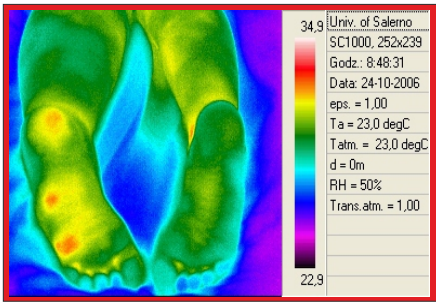
MIKROBOLOMETRYCZNA KAMERA TERMOWIZYJNA DO ZASTOSOWAŃ MEDYCZNYCH

1. zmiany reumatyczne

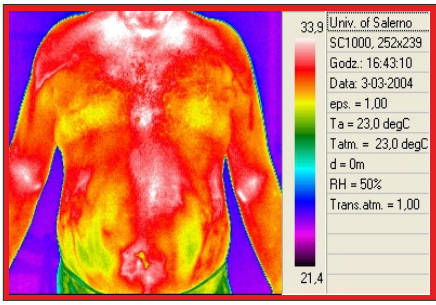
2. dłoń palacza



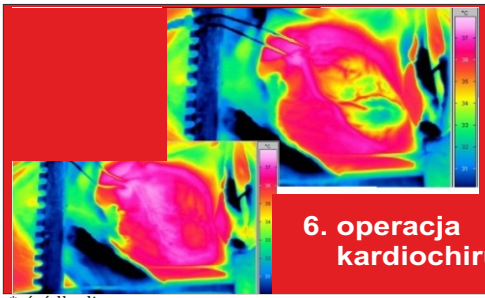
3. zmiany chorobowe uwidocznione obszarami o wyższej temperaturze ciała



4. stany pourazowe



5. łuszczyca



6. operacja kardiochirurgiczna

* źródło: literatura

Parametry kamery	
Rozdzielczość	384x288 or 640x480 pixels
Zakres spektrum	8-14 µm
Wielkość plamki	25 µm
NETD	20 mK
Czułość termiczna	0,1°C
Pole widzenia	18°

Kamera termowizyjna została zaprojektowana i wykonana w Polsce jako wynik współpracy firmy INFRAMED Sp. z o.o. z Instytutem Elektroniki Politechniki Łódzkiej. Urządzenie jest wyposażone w oprogramowanie InfraScope do zaawansowanego przetwarzania obrazu. System termografii może być dodatkowo wzbogacony o kanał wizyjny.
Oprogramowanie InfraScope jest przeznaczone do ogólnego zastosowania medycznego oraz do przeprowadzania badań nieniszczących. Istnieje możliwość dołączenia specjalnego pakietu do klasyfikacji medycznej dla różnych zaawansowanych systemów termicznych.
W oprogramowaniu zastosowano system klasyfikacji obrazu termicznego wykorzystujący sieci neuronowe.

INFRAMED sp. z o.o.
ul. Dobrzańskiego 1
20-262 Lublin
tel. 42 307 04 90
www.inframed.pl email: info@inframed.pl

TECHNOLOGIE MEDYCZNE

2/2013
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

ISSN 2083-0157

SPIS TREŚCI

str.

Piotr Lipnicki
Przegląd metod PLL do synchronizacji z siecią przekształtników energoelektronicznych.....3

Siwek Krzysztof
Redukcja wymiarowości danych a selekcja cech w zastosowaniu do prognozowania maksymalnego dobowego obciążenia elektroenergetycznego.....7

Katarzyna Biernat, Alicja Idziaszek-Gonzalez, Konrad Nita, Stefan Wójtowicz
Terapia magnetyczna: mikroprocesorowy przenośny system do magnetoterapii ze zdalną komunikacją.....11

Piotr Otfinowski, Piotr Kmon, Rafał Kłeczek
Projekt 7-bitowego niskomocowego przetwornika A/C w technologii submikronowej o małej powierzchni do zastosowań wielokanałowych.....15

Mieczysław Borysiewicz, Karol Kowal, Piotr A. Prusiński, Marcin Dąbrowski
Zintegrowany proces decyzyjny uwzględniający ryzyko w przemyśle jądrowym.....19

Anatoli M. Voronin, Bekmurza H. Ajtchanov, Janusz Partyka, Aitkul Aldibekova
Elementy kontroli zautomatyzowanych systemów hydrodynamicznych....32

Maciej Laskowski, Damian Rawski, Przemysław Szadura
Wykorzystanie rzeczywistości rozszerzonej w życiu codziennym.....34

Rafał Piotuch
Wyznaczanie indukcyjności z uwzględnieniem nasycenia obwodu magnetycznego maszyn synchronicznych z magnesami zagnieżdżonymi..... 38

Jarosław Gośliński, Adam Owczarkowski
Rozszerzony filtr Kalmana jako estymator stanu w układzie wahadła odwróconego z napędem inercyjnym.....42

CONTENTS

page

Piotr Lipnicki
Overview of methods for synchronizing with the power gird (PLL) for power converters.....3

Siwek Krzysztof
Data reduction versus feature selection in application of daily maximum power load forecasting.....7

Katarzyna Biernat, Alicja Idziaszek-Gonzalez, Konrad Nita, Stefan Wójtowicz
Magnetic therapy: remote controlling microprocessor system for magnetotherapy.....11

Piotr Otfinowski, Piotr Kmon, Rafał Kłeczek
Design of 7-bit low-power, low area A/D converter in submicron process for multichannel systems.....15

Mieczysław Borysiewicz, Karol Kowal, Piotr A. Prusiński, Marcin Dąbrowski
An integrated risk informed decision making in the nuclear industry.....19

Anatoli M. Voronin, Bekmurza H. Ajtchanov, Janusz Partyka, Aitkul Aldibekova
Elements of automatic control of hydrodynamic systems.....32

Maciej Laskowski, Damian Rawski, Przemysław Szadura
Augmented Reality the way to using advanced technology in normal life.....34

Rafał Piotuch
Inductance calculation considering magnetic saturation of interior permanent magnet synchronous machines.....38

Jarosław Gośliński, Adam Owczarkowski
Extended Kalman filter as a full state observer in application of the Inertia wheel pendulum.....42

INFORMACJE

Od wydawcy..... 2
Jubileusz 60-lecia Politechniki Lubelskiej.....3

IMPREZY SPECJALISTYCZNE

Computational and Information Technologies in Science, Technics and Education - 2013 (CIT 2013)..... 22

KOLEGIUM REDAKCYJNE

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

Reklamy okładka II + III + IV + str. 40

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@iapgos.pl
Skład i łamanie: Centrum Innowacji i Transferu Technologii LPNT Sp. z o. o., Druk: Drukarnia Rapida
nakład 600 egz.

OD WYDAWCY

Szanowni Czytelnicy,

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

Gorąco polecamy artykuł dr inż. Konrada Nita, dr Stefana Wójtowicza, mgr inż. Alicji Idziaszek-Gonzales i mgr inż. Katarzyny Biernat omawiający mikroprocesorowy, przenośny, zasilany baterią system do magnetoterapii ze zdalną komunikacją stosowany w terapii magnetycznej, którego komercjalizacja z pewnością da szansę wielu pacjentom na stosowanie tej metody w użytku domowym.

W numerze znajdą Państwo również artykuł prezentujący zintegrowany proces decyzyjny uwzględniający ryzyko w przemyśle jądrowym, autorstwa dr inż. Mieczysława Józefa Borysiewicza oraz mgr inż. Karola Kowala, mgr inż. Piotra Prusińskiego i mgr inż. Marcina Dąbrowskiego.

Miłośnikom stosowania rzeczywistości rozszerzonej w życiu codziennym polecamy artykuł o wykorzystaniu tej technologii w tworzeniu wirtualnego przewodnika po uczelni, wspierającego bezproblemowe poruszanie się po terenie kampusu, opracowany przez mgr inż. Macieja Laskowskiego oraz dwóch absolwentów studiów inżynierskich na kierunku Informatyka na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.

Absolwentom, pracownikom oraz wszystkim przyjaciołom Politechniki Lubelskiej polecamy artykuł poświęcony obchodom jubileuszu 60-lecia Politechniki Lubelskiej.

INFORMACJE

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

prof. Kazimierz Adamiak (*University of Western Ontario, Ontario, Kanada),* **prof. Darya Alontseva** (*D.Serikbaev East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazachstan),* **prof. Shin-ichi Aoqui** *(Sojo University, Kumamoto, Japonia)*, **prof. Javier Ballester** *(Universidad de Zaragoza, Saragossa, Hiszpania)*, **prof. Anatolij Bielecki** *(National Aviation University, Kijów, Ukraina)*, **prof. Yurii Bobalo** *(Lviv Polytechnic National University, Lwów, Ukraina)*, **prof. Oleksy Borysenko** *(Department of Elektronics 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, Żylina, Słowacja)*, **prof. Jarmila Dedkova** *(Brno University of Technology, Brno, Czechy)*, **dr Józef Dresner** *(EUROTEK International, Warszawa, Polska)*, **prof. Pavel Fiala** *(Brno University of Technology, Brno, Czechy)*, **prof. Vladimir Firago** *(Belarusian State University, Mińsk, Białoruś)*, **prof. Aleksandr Galuszkin** *(Moscow Institute of Physics and Technology, Moskwa, Rosja)*, **prof. Jan Górski** *(Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Polska)*, **prof. Antoni Grzanka** *(Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska)*, **dr Jeni Heino** *(Helsinki University of Technology, Helsinki, Finlandia)*, **prof. Oleksandra Hotra** *(Politechnika Lubelska, Lublin, Polska)*, **prof. Zenon Hotra** *(Lviv Polytechnic National University, Lwów, Ukraina)*, **prof. Piotr Kacejko** *(Politechnika Lubelska, Lublin, Polska)*, **prof. Yurii Krak** *(V.M.Glushkov Institute of Cybernetic of NAS of Ukraine, Kijów, Ukraina)*, **prof. Yurii Kryvonos** *(V.M.Glushkov Institute of Cybernetic of NAS of Ukraine, Kijów, Ukraina)*, **prof. Piotr Lesiak** *(Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny, Radom, Polska)*, **prof. Georgii Lysychenko** *(National Academy of Sciences, Institute of Environmental Geochemistry, Kijów, Ukraina)*, **prof. Volodymyr Lytvynenko** *(Kherson National Technical University, Chersoń, Ukraina)*, **mgr inż. Andrzej Łobzowski** *(Firma LAB-EL, Warszawa, Polska)*, **prof. Henryk Madura** *(Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Polska)*, **prof. Artur Medvied** *(Riga Technical University, Ryga, Łotwa)*, **dr Paweł Mergo** *(Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin, Polska)*, **prof. Andrzej Nafalski** *(South Australia University, Adelajda, Australia)*, **prof. Vladymir Odżhaev** *(Belarusian State University, Mińsk, Białoruś)*, **prof. Jan Owsik** *(Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Polska)*, **prof. Il Han Park** *(Sungkyunkwan University, Suwon, Korea)*, **prof. Sergey Pavlov** *(Vinnytsia National Technical University, Winnica, Ukraina)*, **prof. Wiaczesław Pietrow** *(członek korespondent NANU, Kijów, Ukraina)*, **prof. Liudvikas Pranevicius** *(Vytautas Magnus University, Kowno, Litwa)*, **prof. Denis Premel** *(CEA Saclay, Gif-sur-Yvette, Francja)*, **dr Jason Riley** *(The Eunice Kennedy Shriver National Institute of Child Health and Human Development, Bethesda, USA)*, **prof. Ryszard Roskosz** *(Politechnika Gdańska, Gdańsk, Polska)*, **mgr inż. 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, Ałmaty, Kazachstan)*, **prof. Valery Szmarow** *(National Aviation University, Kijów, Ukraina)*, **mgr Jerzy Szyndler** *(Centrum Innowacji i Transferu Technologii LPNT, Lublin, Polska)*, **prof. Mirosław Świercz** *(Politechnika Białostocka, Białystok, Polska)*, **prof. Stanisław Tarasiewicz** *(Université Laval, Quebec, Kanada)*, **dr Murielle Torregrossa** *(Université de Strasbourg, Strasburg, Francja)*, **prof. Andrzej Wac-Włodarczyk** *(Politechnika Lubelska, Lublin, Polska)*, **doc. dr inż. Zygmunt Warsza** *(Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP Warszawa)*, **mgr Grzegorz Woźniak** *(Centrum Innowacji i Transferu Technologii LPNT, Lublin, Polska)*, **prof. Sotoshi Yamada** *(Kanazawa University, Kanazawa, Japonia)*, **prof. Xiaoyi Yang** *(Beihang University, Pekin, Chiny)*, **prof. Mykola Yermoshenko** *(International Academy of Information Sciences, Kijów, Ukraina)*, **dr Athanasios Zacharopoulos** *(University College London, Londyn, Wielka Brytania)*, **prof. Ivan Zharski** *(Belarusian National Technical University, Mińsk, Białoruś)*, **prof. Cao Zhihong** *(The Institute of Soil Science, Nanjing, Chiny)*, **prof. Paweł Zhukowski** *(Politechnika Lubelska, Lublin, Polska)*

JUBILEUSZ 60-LECIA POLITECHNIKI LUBELSKIEJ

W niedzielę 12 maja 2013 r. w Archikatedrze Lubelskiej odprawiona została msza święta w intencji społeczności akademickiej PL. Następnie odbył się koncert - Martin Voellinger The Latin Jazz Mass w wykonaniu Akademickiego Chóru Politechniki Lubelskiej pod dyrekcją prof. Elżbiety Krzemińskiej.

Główne uroczystości z okazji jubileuszu 60-lecia Politechniki Lubelskiej odbyły się 13 maja 2013 r. w auli Wydziału Mechanicznego. Spotkanie rozpoczął Rektor prof. Piotr Kacejko witając przybyłych na uroczystość gości oraz zapraszając na wirtualną podróż po minionych 60 latach uczelni. Mówił m.in. o ciężkich początkach działalności uczelni: „Niełatwo nam sobie wyobrazić, w jak trudnym okresie powstawała pierwsza uczelnia techniczna w Lublinie. Władze z rektorem Stanisławem Ziemeckim, kilkudziesięciu studentów Wydziału Mechanicznego, kilku wykładowców – tak rozpoczynała pierwszy rok akademicki Wieczorowa Szkoła Inżynierska. Dzisiaj na uczelni pracuje ponad 500 pracowników naukowo-dydaktycznych, corocznie mury uczelni opuszcza 1500 absolwentów, studenci kształcą się w nowoczesnych pomieszczeniach" – podsumowuje dzisiejszą uczelnię Rektor. Kolejnym punktem obchodów było nadania tytułu Doktora Honoris Causa PL prof. Eugeniuszowi Świtońskiemu z Politechniki Śląskiej. Laudację wygłosił promotor prof. Marek Opielak. Natomiast prof. Świtoński w swoim wystąpieniu mówił o mechatronice w systemach bezpieczeństwa i obronności. W dalszej części uroczystości nastąpiło nadanie tytułów Profesora Honorowego Politechniki Lubelskiej. Do grona wyróżnionych dołączyli: prof. Tadeusz Janowski oraz prof. Włodzimierz Sitko. Ważnym momentem uroczystości było wręczenie medali absolwentom pierwszych roczników Wieczorowej Szkoły Inżynierskiej w Lublinie. Spotkanie było również okazją do wręczenia odznaczeń państwowych.

Następnego dnia w auli Wydziału Inżynierii Środowiska odbyła się uroczysta promocja doktorów habilitowanych i doktorów w ramach obchodów 60-lecia Uczelni. Do aktu ślubowanie przystąpiło piętnastu doktorów. Wśród promowanych był dr inż. Yucheng Cao z Chin, który obronił pracę doktorską na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Lubelskiej. „Jestem dumny z tego, że w tym gronie pojawiają się również obcokrajowcy. To dowód na to, iż nasza współpraca międzynarodowa przynosi wymierne efekty" – mówił Rektor prof. Piotr Kacejko. Siedmiu doktorów habilitowanych odebrało dyplomy. Następnie wręczone zostały listy gratulacyjne tym osobom, które otrzymały tytuły profesora, stopnie naukowe doktora habilitowanego i stopnie doktora poza uczelnią, a także pracownikom, którzy zostali mianowani na stanowisko profesora zwyczajnego i nadzwyczajnego w Politechnice Lubelskiej. Spotkanie zakończył wykład dr hab. inż. Wojciecha Franusa pt. „Zeolity – świat małych minerałów o wielkich możliwościach".

15 maja 2013 r. był dniem szczególnym dla Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, który świętował jubileusz 60-lecia funkcjonowania. Uroczystości rocznicowe rozpoczął bieg o puchar dziekana wydziału. W imprezie wzięli udział pracownicy i studenci Uczelni. Długość trasy liczyła ok. 1200 m. Następnie osoby zainteresowane mogły wybić sobie monetę okolicznościową upamiętniającą 60-lecie powstania wydziału. Punktem kulminacyjnym obchodów było uroczyste posiedzenie Rady Wydziału. O tym, co wyróżnia Wydział Mechaniczny od pozostałych wydziałów uczelni mówi dziekan prof. Zbigniew Pater: „Cechą charakterystyczną wydziału jest silne powiązanie z jednostkami gospodarczymi. To dla nich, w znacznej mierze, opracowujemy innowacyjne rozwiązania technologiczne. W zakresie wynalazczości (liczba wynalazków zgłaszanych do ochrony patentowej) jesteśmy liderem i to w skali kraju".

Iwona Czajkowska-Deneka

Fot. 1. Rektor Politechniki Lubelskiej prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko (archiwum PL - SAF)

Fot. 2. Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Świtoński – Doktor Honoris Causa PL (archiwum PL - SAF)

Fot. 3. Prof. dr hab. inż. Tadeusz Janowski – Profesor Honorowy Politechniki Lubelskiej (archiwum PL - SAF)

Fot. 4. Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Sitko – Profesor Honorowy Politechniki Lubelskiej (archiwum PL - SAF)

Fot. 5. Uroczystości z okazji jubileuszu 60-lecia Politechniki Lubelskiej (archiwum PL - SAF)

PRZEGLĄD METOD PLL DO SYNCHRONIZACJI Z SIECIĄ PRZEKSZTAŁTNIKÓW ENERGOELEKTRONICZNYCH

Piotr Lipnicki
Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych

Streszczenie. *W artykule przedstawiono metody synchronizacji przekształtników energoelektronicznych z siecią elektroenergetyczna oparte na pętli sprzężenia fazowego PLL. Przedstawione modele matematyczne oparte są na transformacjach do wirującego układu odniesienia. Modele symulacyjne wykonano w kilku wersjach: w zamkniętej pętli fazowej z synchronicznie wirującym układem odniesienia PLL- SRF, w zmodyfikowanym układzie PLL-SRF z uogólnionym integratorem drugiego rzędu SOGI oraz w podwójnie odprzężonym systemem z dwoma wirującymi przeciwnie układami odniesienia DDSRF. Na podstawie wykonanych symulacji stwierdzono, że zamknięta pętla fazowa PPL z algorytmem SOGI pozwala uzyskać lepszą zbieżność, a algorytmy DDSRF poprawnie pracują nawet dla sieci niesymetrycznej z dużą zawartością harmonicznych czasowych.*

Słowa kluczowe: pętla synchronizacji fazowej (PLL), algorytm SOGI, podwójne odprzężenie układu (DDSRF), synchronizacja sieci z napięciem odkształconym

OVERVIEW OF METHODS FOR SYNCHRONIZING WITH THE POWER GIRD (PLL) FOR POWER CONVERTERS

Abstract. *This paper deals with crucial aspect of synchronizing power converters connected to the utility grid. Today, many components of Distributed Power Generation Systems (DPGS), such as Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS), traction applications and power line conditioners containing power converters, have an important demand for optimized synchronization algorithms. It should be noted that also Transmission System Operator have specific requirements for synchronization with the grid. One of the possible ways to achieve a good performance in terms of synchronization is to use a Phase Locked Loop algorithm (PLL). This paper shows the results of investigation on different PLL methods, explaining how they work along with a summary describing their features, possibilities and drawbacks. In the end the impact of voltage unbalances and harmonics on synchronization algorithms is analyzed. The PLL methods were evaluate by the means of simulations.*

Keywords: Phase-Locked Loop (PLL), harmonics, voltage unbalance, distribution systems, power converters, grid codes

Wstęp

Nowoczesna koncepcja sieci przesyłowych zakłada, że w przyszłości coraz większą rolę będą odgrywać Rozproszone Źródła Energii (RZE). Realizacja tej koncepcji wymaga współpracy wielu źródeł energii oraz możliwości dwukierunkowego przesyłu energii. Taką współpracę umożliwiają sprzęgi energoelektroniczne, które pozwalają m.in. na: zarządzanie energią w sposób efektywny, zapewniają wysoką jakość energii i ciągłość zasilania.

Wymagają one jednak podstawowych informacji o parametrach, w tym wartości częstotliwości i kąta fazowego sieci. Kąt ten, określany pomiędzy wektorem prądu i napięcia składowej podstawowej w punkcie przyłączenia układu przekształtnikowego do sieci, powinien być wykrywany „*online*" w czasie rzeczywistym. Taka informacja jest nieodzowna do przeprowadzenia aktywnego sterowania przepływem energii czynnej jak i biernej między przekształtnikiem, a siecią.

Aby realizacja tych zadań była możliwa konieczna jest odpowiednia synchronizacja przyłączanego źródła z siecią. Dlatego też w każdym kraju operatorzy sieci posiadają odpowiednie regulacje prawne dotyczące synchronizacji. Polski operator PSE określa wyraźnie czas synchronizacji z siecią dla nowych jednostek, a także czasy re-synchronizacji urządzeń np. po zapadach napięcia, bądź chwilowych odłączeniach [8]. Od kilku lat w Europie stowarzyszenie operatorów sieci pracuje nad dokumentem określającym wspólne zasady i wymagania dotyczące przyłączonych źródeł energii. Ważnym aspektem jest możliwość szybkiej re-synchronizacji podczas krótkotrwałych zapadów napięcia [9], która pozwala utrzymać niewielkie źródła energii w stanie pracy bez konieczności uruchamiania długotrwałej procedury ich załączania. Odpowiednie algorytmy utrzymania synchronizacji są w stanie wykryć odpowiedni kąt, nawet w przypadku asymetrii napięcia, bądź też występowania harmonicznych.

Jedną z metod synchronizacji i identyfikacji kąta fazowego sieci jest zastosowanie algorytmów fazowej pętli zwrotnej – Phase Locked Loop (PLL). Dokładność synchronizacji ma bezpośredni wpływ na wydajność obwodów sterowania przekształtników [6]. Jednakże niepożądane zaburzenia takie jak asymetria napięcia, spadki napięcia, zapady napięcia, harmoniczne są szkodliwymi zjawiskami mającymi negatywny wpływ na działanie algorytmów PLL [6]. Aby zapewnić niezawodne działanie synchronizacji stosuje się różne metody uodparniające proces identyfikacji od zakłóceń sieci. Jedne skupiają się na dodaniu do urządzenia odpowiedniego filtra, układu kompensującego, inne natomiast proponują uwzględnienie tych zjawisk już w samej metodzie sterowania. W tym artykule zaprezentowany zostanie drugi typ rozwiązań.

1. Teoria mocy chwilowej w wirującym układzie odniesienia d-q [1]

Nowoczesne algorytmy synchronizacji w dużej większości przypadków bazują na teorii mocy chwilowej d-q opracowanej przez Hirufumi Akagiego [1]. Teoria ta zaproponowała użycie tzw. układu odniesienia d-q-r, który wiruje synchronicznie z wektorem napięcia systemu trójfazowej sieci elektroenergetycznej. W układzie tym mierzone sygnały mają charakter stało-napięciowy/prądowy, co pozwala na zastosowanie dobrze znanych regulatorów PI. Ponadto moce chwilowe, (zarówno moc czynna jak i bierna) są zdefiniowane poprzez liniowo niezależne komponenty prądu i_d i i_q. Aby przejść od układu trójfazowego do układu wirującego d-q należy wykonać szereg transformacji [1].

Pierwszym krokiem jest przejście z koordynat *abc* do *αβ*. Jest to realizowane w następujący sposób:

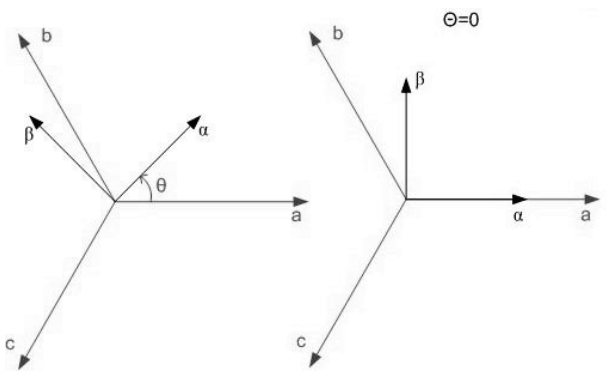
$$\vec{f}_{abc} = \frac{2}{3}\cdot(f_a\cdot e^{j0^o} + f_b\cdot e^{j120^o} + f_c\cdot e^{-j120^o}) \tag{1}$$

$$f_\alpha = \mathrm{Re}[f_{abc}] \tag{2}$$

$$f_\beta = \mathrm{Im}[f_{abc}] \tag{3}$$

$$\vec{f}_{abc} = f_\alpha + jf_\beta; f_0 = \frac{1}{3}(f_a + f_b + f_c) \tag{4}$$

gdzie: f_a, f_b, f_c - to zmienne sygnału w fazie a, b i c, f_α, f_β, f_0 – to zmienne sygnału w układzie stacjonarnym *αβ*. Przejście z układu *abc* do *αβ* w postaci graficznej ilustruje rysunek 1.



Rys. 1. Ilustracja przejścia z układu abc do αβ za pomocą wektorów

Transformacje te można również zapisać z zastosowaniem rzeczywistej macierzy transformacji dla przekształcenia prostego (5) i odwrotnego (6).

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos\frac{2\pi}{3} & \cos\frac{2\pi}{3} \\ \sin 0 & \sin\frac{2\pi}{3} & -\sin\frac{2\pi}{3} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \tag{6}$$

Drugim etapem jest transformacja ze statycznego układu $\alpha\beta$ do wirującego układu dq. Realizowana jest ona w oparciu o informację o wartości chwilowej kąta:

$$f_d = \mathrm{Re}[f_{\alpha\beta} \cdot e^{-j\theta}] = \mathrm{Re}[f_\alpha + jf_\beta] \cdot e^{-j\theta} = \mathrm{Re}\left[\frac{f_\alpha + jf_\beta}{e^{j\theta}}\right] \tag{9}$$

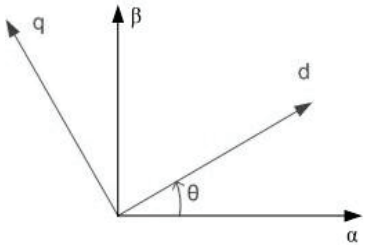
$$f_q = \mathrm{Im}\left[\frac{f_\alpha + jf_\beta}{e^{j\theta}}\right] \tag{10}$$

$$\vec{f}_{\alpha\beta} \cdot e^{-j\theta} = \mathrm{Re}[f_{\alpha\beta}] + j\,\mathrm{Im}[f_{\alpha\beta}] \tag{13}$$

$$\vec{f}_{\alpha\beta} \cdot e^{-j\theta} = f_d + j\,f_q \tag{14}$$

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} \tag{15}$$

gdzie: f_d, f_q - to zmienne sygnału w układzie dq, θ. Przejście z układu $\alpha\beta$ do dq w postaci graficznej ilustruje rysunek 2.



Rys. 2. Ilustracja przejścia z układu αβ do dq za pomocą wektorów

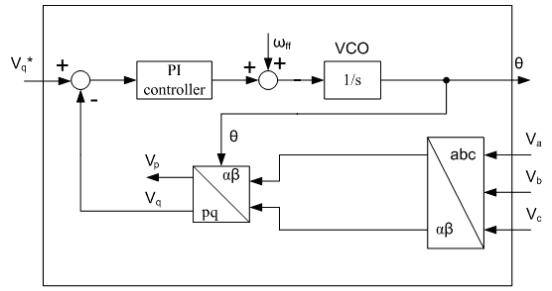
2. Modelowanie pętli PLL w wirującym układzie odniesienia

Powszechnie stosowaną metodą synchronizacji w systemie trójfazowym jest algorytm PLL w wirującym układzie odniesienia (PLL-SRF; Phase Locked Loop – Synchronous Reference Frame). W metodzie tej wartość chwilowa kąta fazowego jest wykrywana poprzez synchronizację wirującego układu odniesienia z wektorem napięcia sieci. Sygnał odniesienia jest synchronizowany z wektorem napięcia za pomocą regulatora proporcjonalno-całkującego.

Regulator ten dostraja oś d wirującego układu odniesienia do wektora napięcia sieci. Można również dostroić oś q wirującego układu odniesienia do wektora napięcia by otrzymać poprawnie działający mechanizm synchronizacji. Wybór pomiędzy tymi dwoma możliwościami zależy od aplikacji. W przypadku sterowania przekształtnikiem sieciowym preferowane jest dostrojenie osi d. W przypadku sterowania maszyną elektryczną powinno wybrać się oś q [3].

Ogólną strukturę działania algorytmu PLL-SRF przedstawia rysunek 3. Jak to zostało opisane wcześniej, metoda ta używa dwóch transformacji sygnałów (abc do $\alpha\beta$ i $\alpha\beta$ do dq).

Układ z rys. 3 zawiera regulator PI i element całkujący. W celu synchronizacji z osią d używana jest tylko składowa q. Za pomocą składowych napięcia Vq i Vq* (sygnał odniesienia) zostaje określony sygnał błędu, który jest podawany na wejście regulatora PI. Sygnał wyjściowy regulatora PI jest sumowany z wielkością ωff, która reprezentuje pulsację składowej podstawowej (ωff = 2π50). Po scałkowaniu sygnału pulsacji otrzymuje się wartość kąta θ. Kąt ten jest wykorzystywany do dalszego przetwarzania sygnałów w różnych układach odniesienia.



Rys. 3. Struktura blokowa algorytmu PLL-SRF, synchronizacja względem osi q

Aby uzyskać wymagane wysterowanie algorytmu PLL-SRF należy dobrać odpowiednie wzmocnienia dla regulatora PI w taki sposób, aby zminimalizować błąd uchybu synchronizowanej składowej. Metoda dostrajania nastaw regulatora, która jest opisana w [5], daje możliwość dokładnego określenia czasu regulacji i tłumienia dla algorytmu PLL-SRF. W ten sposób łatwo można zaprojektować wolny, bądź szybki algorytm PLL dostrajając tylko dwa parametry. Metoda dostrojenia wymaga określenia transmitancji układu PLL przedstawionego na rys.3. Transmitancja projektowanego układu PLL ma postać [5]:

$$H(s) = \frac{\mathrm{K_p} \cdot s + \frac{\mathrm{K_p}}{T_i}}{s^2 + \mathrm{K_p} \cdot s + \frac{\mathrm{K_p}}{T_i}} \tag{17}$$

gdzie: K_p – wzmocnienie członu proporcjonalnego, T_i – stała czasowa całkowania.

To wyrażenie można porównać z transmitancją drugiego rzędu, która ma postać:

$$G(s) = \frac{2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \tag{18}$$

gdzie: ω_n – pulsacja naturalna, ζ – współczynnik tłumienia.

Porównując równania (17) i (18) jesteśmy w stanie dobrać odpowiednie wzmocnienia dla regulatora PI w poniższy sposób. Z teorii sterowania [7] wiemy, że:

$$T_s = \mathrm{k} \cdot \tau = \frac{k}{\zeta \cdot \omega_n} \Rightarrow \omega_n = \frac{k}{\zeta \cdot T_s} \tag{19}$$

gdzie: T_s – czas ustalania, k – współczynnik tolerancji liczony jako logarytm naturalny, przy czym k = -ln(% tolerancji).

Wybierając k=4,6 (co oznacza 10% dokładności) i współczynnik tłumienia ζ=0,7 z równań (17) i (18) otrzymamy wartość wzmocnienia członu proporcjonalnego regulatora PI:

$$K_p = 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n = 2 \cdot 0.7 \cdot \frac{4.6}{0.7 \cdot T_s} = \frac{9.2}{T_s} \tag{20}$$

Posługując się dalej teorią sterowania mamy [7]:

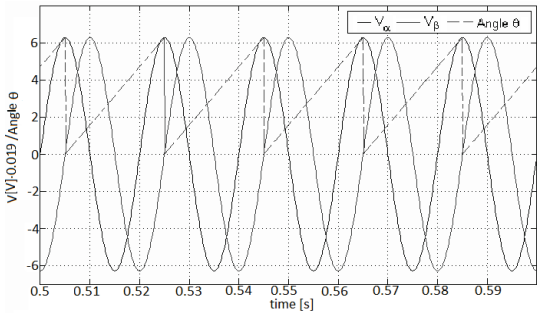
$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \omega_n^2 \tag{21}$$

gdzie: K_p – wzmocnienie członu proporcjonalnego, K_i – wzmocnienie członu PI, T_i – stała czasowa całkowania.

Z powyższego wyrażenia i z poprzednich równań możemy wyliczyć stałą czasową sygnału wyjściowego członu całkującego w następujący sposób:

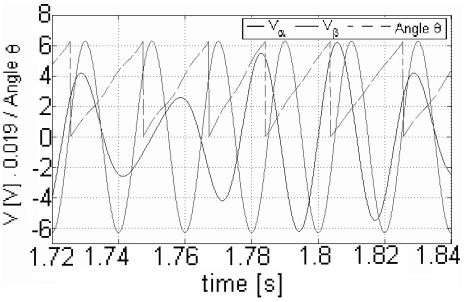
$$T_i = \frac{K_p}{\omega_n^2} = \frac{2 \cdot \zeta \cdot \omega_n}{\omega_n^2} = \frac{2 \cdot \zeta}{\frac{4.6}{\zeta \cdot T_s}} = \frac{\zeta^2 \cdot T_s}{2.3} \tag{20}$$

Mając już dostrojony regulator PI można w pełni wykorzystać algorytm PLL. Wyniki symulacyjne działającego algorytmu przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Estymowany kąt napięcia sieci θ w przypadku symetrycznej sieci

Algorytm ten świetnie się sprawuje w przypadku, gdy nie występują zakłócenia i w sieci występuje symetria napięć. W przypadku jakichkolwiek zakłóceń, bądź niesymetrii napięć nie działa on poprawnie. Ilustruje to rys. 5.



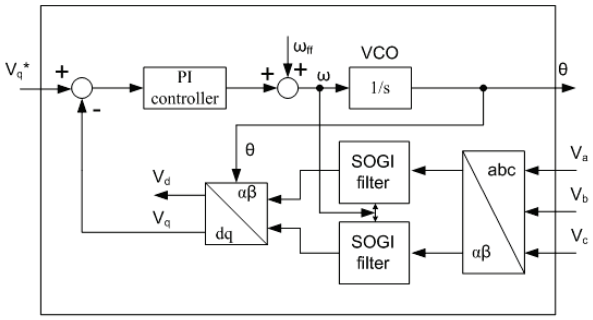
Rys. 5. Estymowany kąt napięcia sieci θ w przypadku niesymetrycznej sieci wraz z napięciem sieci w układzie stacjonarnym

3. PLL w wirującym układzie odniesienia z mechanizmem *SOGI*

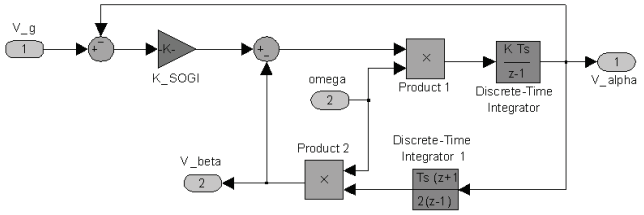
Jednym z mechanizmów służących do synchronizacji może być zastosowanie dodatkowych układów całkujących SOGI (Second Order Generalized Integrator – Uogólniony układ całkujący drugiego rzędu) [6]. Strukturę działania algorytmu PLL-SRF zawierającą elementy SOGI prezentuje rys. 6.

Jak przedstawiono na schemacie sygnał pulsacji naturalnej wykrytej przez algorytm PLL jest wysyłany w pętli sprzężenia zwrotnego do dwóch elementów całkujących SOGI. Elementy te zapewniają dobrą filtrację sygnału. Skalę filtracji można dostroić za pomocą wzmocnienia elementów całkujących K_{SOGI}. Należy zauważyć, że dynamika algorytmu synchronizującego jest silnie powiązana z przepustowością układu SOGI.

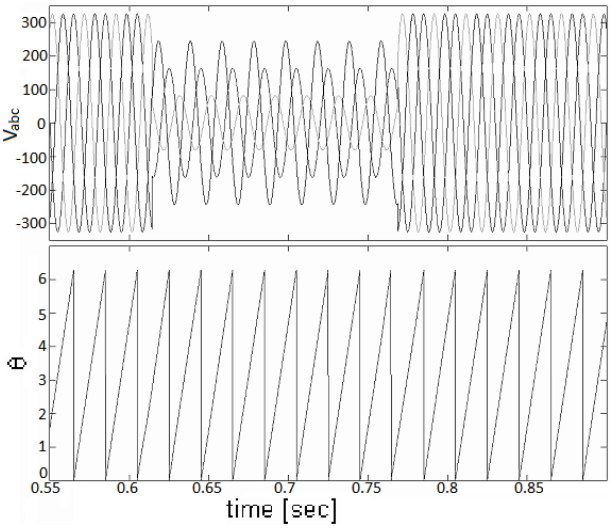
Dostrajając filtr SOGI trzeba brać pod uwagę warunki, w których algorytm PLL będzie stosowany, czy powinien być to algorytm szybki, czy wolniejszy, ale za to w większym stopniu odporny na zakłócenia i asymetrie napięć. Strukturę elementu SOGI przedstawia rys. 7.



Rys. 6. Struktura blokowa algorytmu PLL-SRF z elementami SOGI



Rys. 7. Struktura SOGI



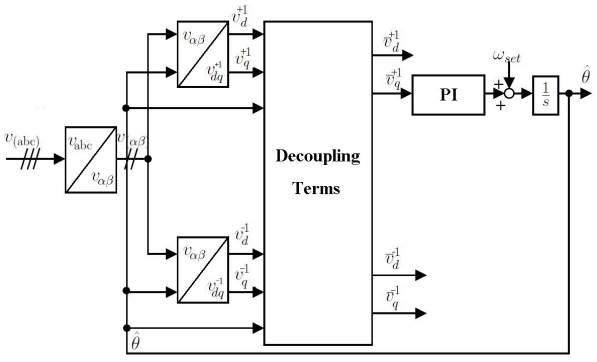
Rys. 8. Działanie PLL-SRF z SOGI

Działanie tego algorytmu w warunkach niesymetrii napięć ilustruje rys. 8.

Jak widać na rysunku 8, algorytm SOGI radzi sobie doskonale – nawet w przypadku asymetrii napięć. Można śmiało stwierdzić, że w rzeczywistych układach stosowanie algorytmu odpornego na zakłócenia i wyższe harmoniczne może być zalecane.

4. PLL w podwójnie odsprzężonym synchronicznym układzie odniesienia DDSRF

Algorytm synchronizacji z siecią w podwójnie odsprzężonym synchronicznym układzie odniesienia (DDSRF – Double Decoupled Synchronous Reference Frame) został zaproponowany w [7]. Korzysta on z transformacji sygnałów napięcia z układu V_{abc} do $V_{\alpha\beta}$ i z $V_{\alpha\beta}$ do V_{dq}. Metoda ta dąży do wykorzystania składowej zgodnej sygnału. Dzięki temu możliwe jest określenie fazowego kąta sieci θ nawet przy niesprzyjających warunkach tj. np. harmonicznych, czy też asymetrii napięcia. Ogólny schemat działania PLL-DDSRF przedstawia rys. 9.



Rys. 10. Algorytm PLL-DDSRF- osobne wirujące układy odniesienia dla składowych wirujących zgodnie i składowych wirujących przeciwnie

Ważnym elementem tej metody jest otrzymanie amplitudy napięcia i kąta fazowego w sposób szybki i dokładny. Realizowane jest to w następujący sposób. Wielkościami wejściowymi algorytmu są wyniki pomiaru napięć, które po transformacjach do układów $\alpha\beta$ kolejności zgodnej i przeciwnej określają składowe zgodne i przeciwne w stacjonarnych układach odniesienia. Wektory te zostają określone w dwóch wirującym układach. Układ dq^+ z kątem θ wiruje w kierunku zgodnym, a układ dq - z kątem $-\theta$ wiruje w kierunku przeciwnym. Wektor napięcia w układzie DDSRF może zostać przedstawiony jako [2]:

$$\mathrm{v}_{\mathrm{dq}}^{+1} = V_S^{+1}\begin{bmatrix}\cos(\omega t-\theta)\\ \sin(\omega t-\theta)\end{bmatrix} + V_S^{-1}\begin{bmatrix}\cos(-\omega t+\phi^{-1}-\theta)\\ \sin(-\omega t+\phi^{-1}-\theta)\end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathrm{v}_{\mathrm{dq}}^{-1} = V_S^{+1}\begin{bmatrix}\cos(\omega t+\theta)\\ \sin(\omega t+\theta)\end{bmatrix} + V_S^{-1}\begin{bmatrix}\cos(-\omega t+\phi^{-1}+\theta)\\ \sin(-\omega t+\phi^{-1}+\theta)\end{bmatrix} \quad (22)$$

gdzie $\mathrm{v}_{\mathrm{dq}}^{+1}$, V_S^{+1} - to składowe zgodne, $\mathrm{v}_{\mathrm{dq}}^{-1}$, V_S^{-1} - to składowe negatywne. Przyjmując następujące założenia [2]:

$$\sin(\omega t - \theta) \approx \omega t - \theta, \cos(\omega t - \theta) \approx 1 - \frac{(\omega t-\theta)^2}{2}, \quad (23)$$

$$-\omega t - \theta \approx -2\omega t$$

możemy równania (21) i (22) zapisać w następującej postaci:

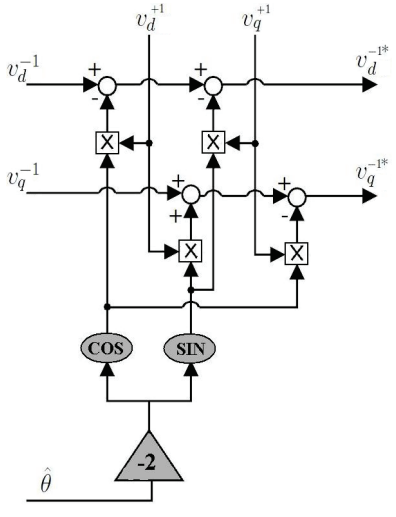
$$\mathrm{v}_{\mathrm{dq}}^{+1} = V_S^{+1}\begin{bmatrix}1-\dfrac{(\omega t-\theta)^2}{2}\\ \omega t-\theta\end{bmatrix} + V_S^{-1}\begin{bmatrix}\cos(-2\omega t+\phi^{-1})\\ \sin(-2\omega t+\phi^{-1})\end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\mathrm{v}_{\mathrm{dq}}^{-1} = V_S^{+1}\begin{bmatrix}\cos(2\omega t)\\ \sin(2\omega t)\end{bmatrix} + V_S^{-1}\begin{bmatrix}\cos(\phi^{-1})\\ \sin(\phi^{-1})\end{bmatrix} \quad (25)$$

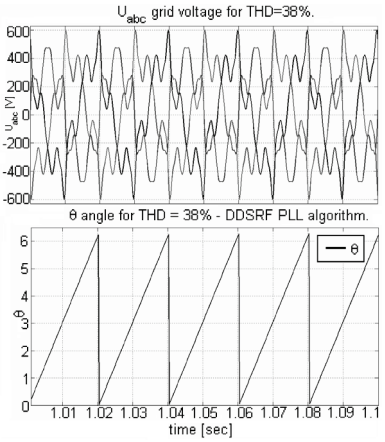
Wartości stałe w (24) i (25) są tożsame z amplitudą V_S^{+1} i V_S^{-1} natomiast oscylacje z członem 2ω pojawiają się w skutek sprzężenia pomiędzy układami odniesienia wirującymi w przeciwnych kierunkach. Człony te można traktować jako perturbacje przy wykrywaniu amplitud sygnałów. Oddzielenie tych sygnałów odbywa się za pomocą specjalnych przekształceń, które zostały przedstawione na rys. 11.

Jak widać na rysunku 11, zastosowanie prostych matematycznych przekształceń sygnałów pozwala na dokładne określenie amplitud i kąta fazowego sygnałów napięcia sieci. Ma to duże znaczenie dla sprawnego działania algorytmu przy niesymetrycznym i odkształconym napięciu sieci.

Jakość działania algorytmu PLL-DDSRF przedstawia rys. 12. W tym przypadku zasymulowana sieć pełna jest odkształceń harmonicznych. $\mathrm{THD_U}$ = 38%, do tego jedna z faz jest asymetryczna względem dwóch pozostałych. Jak widać na załączonym rysunku algorytm synchronizacji radzi sobie mimo tych niesprzyjających warunków. Dzięki temu można stwierdzić, że ta metoda powinna być dedykowana dla rozwiązań wymagających szybkiego i dokładnego wykrywania kąta θ.



Rys. 11. Metoda oddzielenia oscylacji dla składowej pozytywnej



Rys. 12. Działanie PLL-DDSRF przy THD_U=38%

5. Podsumowanie

Metody synchronizacji z siecią powinny być odpowiednio dobierane w zależności od wymagań dla danych rozwiązań. Algorytmy odporne na asymetrię napięć, harmoniczne są trudniejsze w implementacji, ale są w stanie sprostać stawianym im wymaganiom. W niniejszym artykule przedstawiono trzy metody synchronizacji z siecią, za pomocą pętli PLL. Wszystkie algorytmy zostały przetestowane za pomocą modeli symulacyjnych w środowisku MATLAB/Simulink.

Rozwój energoelektroniki, wraz z coraz częstszym stosowanie układów wymagających synchronizacji z siecią powoduje, że algorytmy służące do synchronizacji są stale rozwijane i ulepszane.

Literatura

[1] Akagi H., Kim H., The Instantaneous Power Theory on rotating p-q-r Reference Frames, IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS'99, July 1999, Hong Kong.

[2] Bergas J., Boroyevich D., Burgos R.P., Candela J.I., Pou J., Rodriguez P., Decoupled double synchronous reference frame PLL for power converters control, IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 2, pp. 584–592, Mar. 2007

[3] Blaabjerg, F. Ciobotaru M., Teodorescu R., A New Single-Phase PLL Structure Based on Second Order Generalized Integrator, Power Electronics Specialized Conference 2006, PESC'06, 37th IEEE 18-22 June 2006.

[4] Blaabjerg, F., Ciobotaru M. Teodorescu, R.; ed. (1996). A New Single-Phase PLL Structure Based on Second Order Generalized Integrator Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC'06. 37th IEEE 18-22 June 2006 Page(s):1 – 6.

[5] Blaabjerg, F., Liserre, M., Timbus A., Teodorescu R.; Synchronization Methods for Three Phase Distributed Power Generation Systems. An Overview and Evaluation, Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC '05. IEEE 36th 16-16 June 2005.

[6] Guocheng S., Weiyang W., Xiaofeng S., Xiaoqiang G., Phase Locked Loop for electrically-interfaced converters in distributed utility networks, in Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2008), Oct.17-20 2008, pp. 2346–2350.

[7] Levine W. S., ed. (1996). The Control Handbook. New York: CRC Press. ISBN 978-0-8493-8570-4.

[8] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej – IRiESP, PSE Operator, 1-10-2011.

[9] ENTSO-E Draft Network Code for Requirements for Grid Connection applicable to all Generators, European Network of Transmission System Operators for Electricity, 24 January 2012 http://www.entsoe.eu.

Mgr inż. Piotr Lipnicki
e-mail: Piotr.Lipnicki86@gmail.com

Jest absolwentem Politechniki Lubelskiej i Uniwersytetu technicznego w Aalborgu. Zajmował się zagadnieniem kompensacji mocy biernej dla farm wiatrowych. Opracował metodę sterowania dla kompensatora mocy biernej STATCOM. Pracę magisterską pisał we współpracy z duńską firmą Vestas. Pracował nad zagadnieniem sterowania przekształtników napięciowych połączonych równolegle. Interesuje się zagadnieniem sieci inteligentnych „smart grids", w pracy doktorskiej zajmuje się algorytmami synchronizacji z przekształtników energoelektronicznych z siecią

Artykuł recenzowany

REDUKCJA WYMIAROWOŚCI DANYCH A SELEKCJA CECH W ZASTOSOWANIU DO PROGNOZOWANIA MAKSYMALNEGO DOBOWEGO OBCIĄŻENIA ELEKTROENERGETYCZNEGO

Siwek Krzysztof
Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych

Streszczenie. *Prognozowanie obciążeń w systemie elektroenergetycznym jest ważnym problemem praktycznym zarówno z technicznego jak i ekonomicznego punktu widzenia. W małych systemach problem ten jest stosunkowo trudny do rozwiązania ze względu na dużą zmienność przebiegu obciążenia. Do jego rozwiązania niezbędne jest zastosowanie dobrego predykatora i wyselekcjonowanie cech procesu wpływających na prognozę. Artykuł przedstawia dwie metody selekcji cech – algorytm genetyczny oraz algorytmy redukcji wymiarowości. Jako predykator użyta była maszyna wektorów podtrzymujących działająca w trybie regresji (SVR). Zaprezentowano i omówiono uzyskane wyniki na rzeczywistych danych pomiarowych.*

Słowa kluczowe: prognozowanie obciążeń elektroenergetycznych, redukcja wymiarowości, algorytm genetyczny, maszyna wektorów podtrzymujących

DATA REDUCTION VERSUS FEATURE SELECTION IN APPLICATION OF DAILY MAXIMUM POWER LOAD FORECASTING

Abstract. *Load forecasting task of small energetic region is a difficult problem due to high variability of power consumption. The accurate forecast of the power in the next hours is very important from the economic point of view. The most important problems in prediction are the choice of predictor and selection of features. Two methods of features selection was presented – simple selection using of genetic algorithm and dimensionality reduction methods for creating new features from many available measured data. As a predictor the Support Vector Machine working in regression mode (SVR) was chosen. The load forecasting results with SVR are presented and discussed.*

Keywords: load power forecasting, dimensionality reduction, genetic algorithm, support vector machine

Wstęp

Krótkoterminowe prognozowanie obciążeń w małym rejonie energetycznym jest bardzo trudnym problemem praktycznym ze względu na dużą zmienność konsumpcji energii elektrycznej w stosunku do wartości średniej. Dokładność prognozy przekłada się bezpośrednio na zyski lub ich brak, uzyskane przez dostawców energii z jednej strony oraz koszty ponoszone przez odbiorców z drugiej strony. W interesie obu stron leży więc wykonanie jak najdokładniejszych prognoz zużycia energii elektrycznej w różnych horyzontach czasowych, w tym prognoz krótkoterminowych na następne 24 godziny. Z punktu widzenia bezpieczeństwa systemu, jak również mającym uzasadnienie ekonomiczne, jest predykcja obciążenia maksymalnego w następnym dniu. Artykuł przedstawia badania dotyczące tego zagadnienia.

1. Opis problemu

Najważniejszym problemem jaki należy rozwiązać przy wykonywaniu prognozy jest wybór narzędzia do prognozowania i określenie cech procesu wpływających w największym stopniu na prognozę.

W przypadku dużej bazy danych pomiarowych rejestrujących w dłuższym czasie otrzymuje się ogromny zestaw potencjalnych cech opisujących prognozę. Powstaje problem wyboru stosunkowo małej liczby cech najlepiej reprezentujących badany proces. Artykuł prezentuje dwa podejścia do rozwiązania tego problemu: zastosowanie algorytmów genetycznych do selekcji historycznych wartości pomiarowych oraz redukcja wymiarowości i przetworzenie długiego wektora danych pomiarowych na krótki wektor cech.

Na bazie poprzednich prac jako narzędzie do predykcji wybrano maszynę wektorów podtrzymujących pracującą w trybie regresji (Support Vector Machine in regression mode, SVR) [6, 7, 9].

2. Algorytmy genetyczne

Algorytmy genetyczne (AG) są to algorytmy optymalizacji globalnej wzorowane na mechanizmach doboru naturalnego. W procesie ewolucji wybrane osobniki przekazują swojemu potomstwu własne cechy i jednocześnie, w procesie krzyżowania cechy najlepiej przystosowanych osobników mieszają się, dając kombinacje dotąd nie występujące w populacji. Dodatkowy czynnik losowy wynikający z mutacji jeszcze bardziej różnicuje osobniki potomne.

W kolejnych pokoleniach tworzone są nowe osobniki posiadające taki zestaw cech, który zapewnia coraz lepsze przystosowanie do warunków panujących w środowisku czyli do rozwiązywania zadanego problemu.

Algorytmy genetyczne uznawane są za dobrą metodę optymalizacyjną pozwalającą znaleźć minimum globalne w przypadku bardzo dużej przestrzeni danych. Algorytmy genetyczne są z powodzeniem stosowane w rozwiązywaniu zagadnień naukowych, inżynierskich jak i finansowych [1, 4].

2.1. Kodowanie informacji w chromosomach

Algorytmy genetyczne bazują na przetwarzaniu zakodowanego w postaci chromosomów i genów zadania optymalizacyjnego. Chromosomy i geny definiują osobniki, dla których oblicza się tzw. funkcję przystosowania, która w procesie ewolucji powinna przybierać coraz wyższe wartości.

Dla klasycznych genów binarnych poszczególne pola chromosomów przyjmują wartości zero lub jeden. Kodowanie takie można zastosować w selekcji cech. Wektor chromosomów reprezentować może kolejne cechy, wartość jeden oznaczać będzie wybór danej cechy, wartość zero – usunięcie tej cechy.

2.2. Operatory genetyczne

Do podstawowych operatorów genetycznych wykorzystanych w pracy zalicza się selekcję, krzyżowanie i mutację.

Selekcja jest operatorem wybierania osobników najlepiej przystosowanych do środowiska, osobniki te przekazują swój materiał genetyczny potomstwu. Najczęściej stosowaną metodą selekcji jest metoda tzw. koła ruletki.

Operator krzyżowania polega na wymianie fragmentów chromosomów pomiędzy osobnikami z rodzicielskimi. W efekcie powstają nowe osobniki potomne z innymi wektorami cech.

Operacja mutacji pełni ważną rolę w algorytmach genetycznych. Polega na stosunkowo rzadkiej i przypadkowej zmianie wartości genów na przeciwne. Działanie takie pozwala na powstawanie niespotykanych we wcześniejszych populacjach zestawów cech.

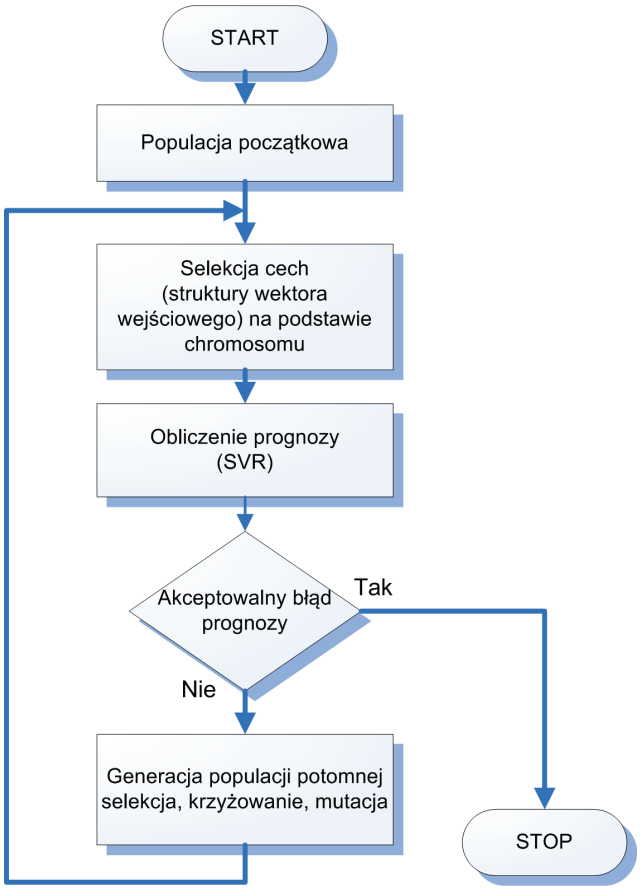
2.3. Algorytm genetyczny do selekcji cech

Po wyborze populacji początkowej (najczęściej w sposób losowy) następuje iteracyjny proces wymiany kolejnych pokoleń. W każdym pokoleniu dokonuje się selekcji osobników, ich krzyżowania i ewentualnej mutacji. Kolejne pokolenia stają się coraz lepiej przystosowane do rozwiązania problemu

optymalizacyjnego, a po osiągnięciu zadanego stopnia przystosowania populacji (lub spełnienia innych warunków stopu jak maksymalna liczba iteracji) algorytm zostaje zatrzymany a najlepiej przystosowany osobnik z ostatniej populacji uznawany jest za końcowe rozwiązanie [4].

W każdej iteracji dla każdego osobnika uczona i testowana jest sieć neuronowa wykonująca predykcję. Binarne chromosomy poszczególnych osobników definiują postać wektora wejściowego dla sieci neuronowej.

Rysunek 1 przedstawia schemat procedury wyboru cech i predykcji przy użyciu algorytmu genetycznego oraz maszyny SVR.



Rys.1. Schemat algorytmu genetycznego do selekcji cech

3. Metody redukcji wymiarowości

Redukcja wymiarowości wektora jest to zadanie liniowego bądź nieliniowego rzutowania zbioru wektorów $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \ldots x_p]^T$ na zbiór wektorów $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \ldots s_k]^T$ o mniejszej wymiarowości, gdzie $k<p$. Rzutowanie takie powinno zachowywać wybrane cechy zbioru wektorów wejściowych, w tym odległości w sensie wybranej metryki pomiędzy wektorami po transformacji [2, 13].

3.1. Liniowa transformacja PCA

Transformacja PCA polega na przekształceniu układu współrzędnych maksymalizującego wariancje kolejnych czynników głównych. Redukcja wymiarowości możliwa jest przy pominięciu czynników najmniej znaczących [5].

Najczęściej spotykana metoda obliczenia macierzy rzutującej polega na obliczeniu macierzy korelacji danych macierzy **X** powstałej z wektorów **x** - wzór (1)

$$\mathbf{R}_{xx} = \frac{1}{n}\mathbf{X}\mathbf{X}^T \tag{1}$$

a następnie dokonaniu rozkładu na wektory własne $\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{U}^T$. Końcowa macierz rzutująca $\mathbf{W}^{k\times p}$ powstaje po pozostawieniu początkowych k wektorów macierzy $\mathbf{U}^T$, odpowiadających największym wartościom własnych i usunięciu pozostałych.

Transformacja PCA realizowana jest jako operacja liniowa – wzór (2)

$$\mathbf{s} = \mathbf{W}\cdot\mathbf{x} \tag{2}$$

3.2. Rzutowanie Sammona

Rzutowanie Sammona należy do grupy metod nieliniowych. Metoda ta zaproponowana w [8] to nieliniowa metoda polegająca na minimalizacji funkcji błędu E odległości pomiędzy elementami wektora **x** w przestrzeni oryginalnej i ze zredukowaną wymiarowością (3).

$$E = \frac{1}{\sum_{i<j} d_{ij}^*}\sum_{i<j}\frac{\left(d_{ij}^* - d_{ij}\right)^2}{d_{ij}^*} \tag{3}$$

Symbol d_{ij}^* opisuje odległość w oryginalnej przestrzeni, a d_{ij} w przestrzeni zredukowanej.

Metoda Sammona jest iteracyjna, oparta na uproszczonej metodzie optymalizacji Newtona, zwykle największego spadku, z punktem startowym losowym lub obliczonym na podstawie wektorów własnych [2].

3.3. Przekształcenie t-SNE

Przekształcenie Stochastic Neighbor Embedding (SNE) należy również do grupy przekształceń nieliniowych. Polega na konwersji odległości euklidesowej pomiędzy punktami w przestrzeni oryginalnej na prawdopodobieństwo warunkowe, odzwierciedlające podobieństwo między tymi punktami w przestrzeni zredukowanej [12, 13].

Podobieństwo punktu $\mathbf{x}_j$ do $\mathbf{x}_i$ w przestrzeni oryginalnej jest prawdopodobieństwem warunkowym $p_{j|i}$ takim, że punkt $\mathbf{x}_j$ będzie najbliższym sąsiadem $\mathbf{x}_i$ przy założeniu, że sąsiedztwo jest wybierane proporcjonalnie do wartości gęstości prawdopodobieństwa Gaussa przy centrum leżącym w $\mathbf{x}_j$.

$$p_{j|i} = \frac{\exp\left(-\left\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\right\|^2 / 2\sigma_i^2\right)}{\sum_{k\neq i}\exp\left(-\left\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_k\right\|^2 / 2\sigma_i^2\right)} \tag{4}$$

Dla wektorów leżących blisko siebie prawdopodobieństwo to jest wysokie, natomiast dla punktów odległych od siebie niskie i dążące do zera dla zbioru wektorów odseparowanych od siebie.

W przypadku dobrego mapowania wektory $\mathbf{s}_i$, $\mathbf{s}_j$ w przestrzeni o zredukowanym wymiarze, z prawdopodobieństwem warunkowym $q_{j|i}$, powinny dobrze odzwierciedlać podobieństwo odpowiednich wektorów $\mathbf{x}_i$, $\mathbf{x}_j$ z przestrzeni oryginalnej. Dla takiej sytuacji prawdopodobieństwa warunkowe $p_{j|i}$ oraz $q_{j|i}$ powinny być sobie równe.

Zadaniem rzutowania SNE jest znalezienie takiego przekształcenia, które minimalizuje rozbieżność między prawdopodobieństwem warunkowym w przestrzeni zrzutowanej $p_{j|i}$ oraz w przestrzeni oryginalnej $q_{j|i}$. Przekształcenie SNE minimalizuje sumę dywergencji Kullbacka-Leiblera zdefiniowanych po wszystkich kombinacjach punktów podlegających rzutowaniu. Do minimalizacji również używana jest metoda największego spadku.

Odmiana tego przekształcenia nazywana t-SNE jest modyfikacją klasycznego SNE, wprowadzająca poprawki umożliwiające poprawne rzutowanie przy obecności dużej liczby danych odstających [12].

3.4. Metoda losowa

W metodzie losowej (random projection) elementy macierzy rzutującej **W** wybiera się w sposób losowy według zależności (5) z prawdopodobieństwem p

$$w_{ij} = \begin{cases} -1/\sqrt{3}, & p = 1/6 \\ 1/\sqrt{3}, & p = 1/6 \\ 0, & p = 2/3 \end{cases} \tag{5}$$

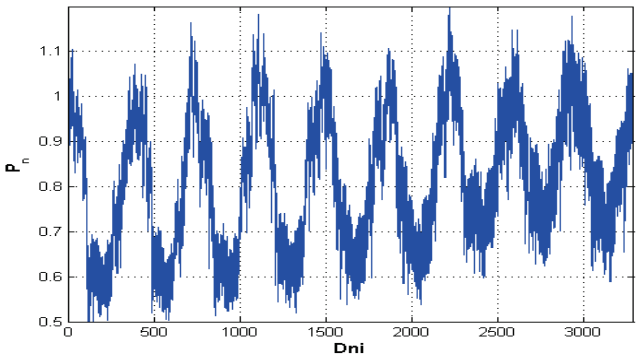
Dowiedziono [2], że taki wybór macierzy pozwala na prawidłowe zachowanie najważniejszych cech zbioru danych po rzutowaniu na mniejszą liczbę wymiarów.

Metoda ta jest szczególnie polecana dla dużych zbiorów danych, gdzie koszt obliczeniowy w innych metodach np. PCA nie pozwala na obliczenie macierzy rzutującej w akceptowalnym czasie.

4. Prognoza zapotrzebowania na energię

Badaniom podlegało zadanie prognozowania obciążenia maksymalnego w następnym dniu dla małego rejonu energetycznego z dominującym obciążeniem o charakterze komunalnym (mieszkania, małe zakłady pracy, biura).

Dostępna baza obejmowała dane obciążenia systemu oraz parametry meteorologiczne za lata 2002-2010. Rejon ten charakteryzował się zużyciem energii elektrycznej z wartością średnią wynoszącą ok. 350MW w dostępnym okresie pomiarów. Rysunek 2 przedstawia znormalizowane obciążenie maksymalne w dniach w latach 2002-2010.



Rys. 2. Znormalizowanie maksymalne obciążenie wybranego rejonu energetycznego w latach 2002-2010

4.1. Cechy wpływające na prognozę

Dokładność prognozowania zużycia energii elektrycznej zależy od charakteru obciążenia i wielkości w danym rejonie energetycznym, jak również od parametrów meteorologicznych takich jak temperatura, prędkość wiatru, wilgotność, nasłonecznienie.

Na prognozę wpływają ponadto wskaźniki kalendarzowe, na przykład typ dnia (roboczy, świąteczny), pora roku, szczyty obciążeń.

W systemie elektroenergetycznym z zasady nie występują gwałtowne zmiany obciążenia z godziny na godzinę i jednocześnie istnieje duża powtarzalność obciążenia w kolejnych dniach tego samego typu. Wynika z tego, że do wektora cech należy zaliczyć wybrane wartości obciążenia z przeszłości, ich kombinacje oraz trendy ich zmian.

Na konsumpcję energii elektrycznej duży wpływ mają również czynniki pogodowe. Bez względu na charakter obciążenia najczęściej korelacja ta jest bardzo wysoka. Przy niskiej temperaturze zewnętrznej zużycie energii rośnie głównie na potrzeby ogrzewania, czy to w budynkach mieszkalnych czy przemysłowych. W dużym stopniu na ogrzewanie ma również wpływ siła wiatru i częściowo jego kierunek. W ostatnich latach obserwuje się ponadto wzrost obciążenia systemu w gorących miesiącach na potrzeby klimatyzacji, tak więc czynniki pogodowe mają znaczenie zarówno w okresach letnich i zimowych.

Wpływ nasłonecznienia na zużycie energii elektrycznej przekłada się bezpośrednio poprzez konieczność włączania oświetlenia i ewentualnie dodatkowego ogrzewania w pochmurne dni.

W prognozowaniu obciążeń należy brać pod uwagę wszystkie wymienione cechy, jak również ich zmiany (trendy). Ogólny wzór na obliczenie prognozy maksymalnej na następny dzień można przedstawić następująco

$$\begin{aligned} P_{\max}(d+1) = f(&td, s, P(d-1), P(d-2), \ldots, \\ &P(d-D), t(d+1), \\ &t(d), t(d-1), \ldots, \\ &t(d-D), ws(d+1), ws(d), ws(d-1), \ldots, \\ &ws(d-D), h(d+1), h(d), h(d-1), \ldots, \\ &h(d-D), is(d+1), \\ &is(d), is(d-1), \ldots, \\ &is(d-D), tr(P), tr(t), tr(ws), tr(h), tr(is)) \end{aligned} \tag{6}$$

w którym f jest szukaną funkcją nieliniową opisującą prognozę, d jest numerem kolejnego dnia w okresie prognozy, $P_{max}(d+1)$ oznacza prognozę wartości maksymalnej na dzień następny, td – typ dnia i s – porę roku dla dnia następnego, t – temperaturę, ws – prędkość wiatru, h – wilgotność oraz is – nasłonecznienie. Symbole $tr(P)$, $tr(t)$, $tr(ws)$, $tr(h)$, $tr(is)$ oznaczają trendy (współczynniki kierunkowe funkcji liniowych) zmian wymienionych wielkości w wybranych przedziałach czasowych. Wielkości oznaczone jako $(d+1)$ są prognozą (również pogody), a pozostałe są wartościami historycznymi z D dni wstecz.

W przypadku rejestrowania danych w odstępach godzinnych powyższy wzór należy rozbudować o wielkości dla kolejnych 24 godzin dnia. Powoduje to znaczne zwiększenie wymiaru wektora wejściowego dla predykatora (np. sieci neuronowej), co może skutkować słabą generalizacją. Pożądane jest więc skrócenie tego wektora w taki sposób, aby zawierał jedynie informacje najbardziej istotne dla opisu procesu prognozowania.

5. Wyniki badań eksperymentalnych

Dane pomiarowe z lat 2002-2010 zostały podzielone losowo na zbiór uczący i testujący w stosunku 65% – 35%. Zgodnie ze wzorem (6) utworzono wektor 117 cech wpływających na prognozę. Do obliczenia funkcji nieliniowej f użyto maszyny wektorów podtrzymujących (SVR) z radialną funkcją jądra [10, 11].

W przypadku uwzględnienia całego wektora 117 cech uzyskano błąd prognozy MAPE na wybranych danych testujących wynoszący 15,9%. Tak wysoki błąd MAPE świadczy o słabej generalizacji, sieć nie zdołała wychwycić charakteru procesu z prezentowanych jej danych uczących i prawidłowo obliczyć prognozę na dzień następny.

W kolejnych krokach przeprowadzono selekcję najlepszych cech wejściowych przy użyciu algorytmu genetycznego oraz zmniejszenie wymiarowości wektora wejściowego metodami redukcji wymiarowości PCA, Sammona, t-SNE oraz metodą losową.

W przypadku użycia algorytmu genetycznego na wejściu sieci pozostają wyselekcjonowane rzeczywiste wartości pomiarowe wielkości fizycznych – obciążenie, temperatura, siła wiatru, nasłonecznienie i wybrane trendy tych wielkości z poprzednich dni i godzin. Uznano, że ze względu na znaczne różnice pomiędzy charakterystykami obciążenia dla różnych pór roku i różnych typów dni (roboczy, świąteczny) cechy takie jak typ dnia i pora roku zawsze będą należały do wektora wejściowego. Tabela 1 przedstawia uzyskane wyniki predykcji obciążenia maksymalnego w następnym dniu.

Tabela 1. Wyniki predykcji (błąd MAPE) na danych testujących po zastosowaniu selekcji cech algorytmem genetycznym

Wymiar wektora	Błąd MAPE [%]
12	9.1201

Algorytm genetyczny wyselekcjonował 10 cech wpływających w największym stopniu na predykcję. Do wektora wejściowego dla sieci SVR dołączono 2 omówione wcześniej cechy opisujące typ dnia i porę roku.

Z metod redukcji wymiarowości (tabela 2) najlepsza okazała się metoda t-SNE, błąd predykcji nie zależał w dużym stopniu od długości wektora w zakresie od 6 do 26. Porównywalne wyniki uzyskano dla metody redukcji Sammona, jednakże jedynie dla długiego wektora wejściowego o wymiarze 26. Metoda PCA pozwalała na uzyskanie małego błędu dla najkrótszego wektora wejściowego. Oznacza to, że metoda PCA pozwala na zawarcie największej liczby informacji w najmniejszym wektorze. Przy długim wektorze wejściowym jej efektywność znacznie spadała.

Koszt obliczeniowy największy jest dla metod Sammona oraz t-SNE, ponieważ wiąże się to z koniecznością przeprowadzenia optymalizacji metodami gradientowymi podczas redukcji.

Metoda losowa (RP) daje nieco większy błąd predykcji przy niewielkiej wymiarowości danych. Wielką zaletą tej metody jest prostota i szybkość działania oraz małe wymagania co do pamięci.

Tabela 2 przedstawia wyniki predykcji wartości maksymalnej w następnym dniu po zredukowaniu wymiarowości wektora wejściowego z początkowych 117 różnymi metodami.

Tabela 2. Wyniki predykcji (błąd MAPE) na danych testujących po redukcji wymiarowości wybranymi metodami

Wymiar wektora	PCA	Sammon	t-SNE	RP
6	**9.4127**	10.1198	**9.3976**	**11.2443**
14	11.2221	10.9132	9.5541	12.0091
26	12.8104	**9.4971**	9.7605	12.3077

6. Wnioski końcowe

We wszystkich przypadkach uzyskano znaczącą poprawę jakości predykcji z początkowego błędu MAPE wynoszącego 15.9% dla pełnego wektora wejściowego składającego się ze 117 cech.

Obie zaprezentowane metody wyboru cech działają na innej zasadzie. Algorytm genetyczny dokonuje selekcji poszczególnych składowych wektora wejściowego, natomiast algorytmy redukcji tworzą zupełnie nowe cechy na podstawie podanego zestawu danych.

Metody redukcji mogą mieszać ze sobą informacje ważne dla predykcji z informacjami nieważnymi, a wręcz szkodliwymi i wprowadzającymi błędy. Stąd obserwuje się lepszą predykcję w przypadku selekcji cech niż przy zastosowaniu metod redukcji wymiarowości.

W przypadku metody PCA najwięcej informacji skojarzonych jest z sześcioma najważniejszymi wartościami własnymi. Z przeprowadzonych badań wynika, że użycie tylko tych informacji pozwala na efektywne obliczenie predykcji. Ponadto zaletą jest zwarta struktura sieci neuronowej, która zapewnia dobrą generalizację.

W przypadku selekcji cech algorytmem genetycznym następuje proces wyboru nie tylko tych elementów wektora, które odpowiadają za dobrą prognozę, ale również zestawu takich cech.

Oba opisane w pracy podejścia do skrócenia wymiarowości wektora wejściowego dały dobre wyniki. Rezultaty prognozy wykonanej przy użyciu sieci SVR dla zredukowanych wektorów wejściowych są znacznie lepsze niż dla pełnego wektora 117 cech.

Literatura

[1] Ashlock D.: Evolutionary Computation for Modeling and Optimization. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2006.
[2] Fodor I.: A Survey of Dimension Reduction Techniques. Raport techniczny, 2002.
[3] Gill P., Murray W., Wright M.: Practical optimization. Academic Press, London 1981.
[4] Goldberg D.: Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
[5] Jackson J.E.: User guide to principal components. Wiley, NY, 1991.
[6] Osowski S., Siwek K., Świderski B., Mycka Ł.: Prediction of power consumption for small power region using indexing approach and neural network. Lecture Notes on Computer Science, LNCS-6352, 2010, str. 54-59.
[7] Osowski S., Siwek K.: Regularization of neural networks for load forecasting in power system. IEE Proc. GTD, 149, 2002, 340-345.
[8] Sammon J.W.: A nonlinear mapping for data structure analysis. IEEE Transactions on Computers, No. 18, 1969, str. 401–409.
[9] Siwek K., Osowski S., Świderski B.: Trend elimination of time series of 24-hour load demand in the power system and its application in power forecasting. Przegląd Elektrotechniczny, vol. 87, No 3, 2011, str. 249-253.
[10] Schölkopf B., Smola A.: Learning with kernels. MIT Press, Cambridge MA, 2002.
[11] Vapnik V.: Statistical learning theory. Wiley, NY, 1998.
[12] Van der Maaten L., Hinton G.: Visualizing Data using t-SNE, Journal of Machine Learning Research, Vol. 9, 2008, str. 2579-2605.
[13] Van der Maaten L., Postma, E.: Dimensionality reduction: a comparative review. 2009, int. report TiCC TR 2009-005.

Dr hab. inż. Krzysztof Siwek
e-mail: ksiwek@iem.pw.edu.pl

Adiunkt w Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej.
W obszarze jego zainteresowań leżą metody sztucznej inteligencji w zastosowaniach praktycznych – szczególnie w rozwiązywaniu problemów predykcji i klasyfikacji.

Artykuł recenzowany

INFORMATYKA AUTOMATYKA POMIARY W GOSPODARCE i OCHRONIE ŚRODOWISKA

Zapraszamy na naszą stronę internetową:

WWW . IAPGOS . PL

WWW.IAPGOS.PL

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

MAGNETIC THERAPY: REMOTE CONTROLLING MICROPROCESSOR SYSTEM FOR MAGNETOTHERAPY

Katarzyna Biernat, Alicja Idziaszek-Gonzalez, Konrad Nita, Stefan Wójtowicz
Electrotechnical Institute

Abstract. *Low-frequency magnetic therapy is already well established treatment of the vast range of diseases. The impact of low frequency magnetic field on human's and animals' bodies is the subject to research in many universities and medical centers. A portable microprocessor device "KTM" used in Pulsed Magnetic Field therapy has been developed at the Department of Measurement and Diagnostic Systems at the Electrotechnical Institute. Due to the device potential to use it for home therapy treatment there are new capabilities brought out e.g., increased accessibility, prolonged sessions, limited therapy costs, remote patient-doctor communication system. Magnetotherapy treatment can be an online monitored and controlled process. The device can be specified by low manufacturing and exploitation costs. Along with the "KTM" the specialized software for controlling several KTM devices from doctor's office has been created.*

Keywords: portable magnetotherapy device, low-frequency magnetic field

TERAPIA MAGNETYCZNA: MIKROPROCESOROWY PRZENOŚNY SYSTEM DO MAGNETOTERAPII ZE ZDALNĄ KOMUNIKACJĄ

Streszczenie. *Terapia wolnozmiennym polem magnetycznym jest uznaną metodą stosowaną przy leczeniu wielu schorzeń. Oddziaływanie pól na organizmy żywe oraz stosowanie wyspecjalizowanych urządzeń do wytwarzania tych pól jest przedmiotem badań w kilku ośrodkach medycznych i technicznych. W Zakładzie Systemów Pomiarowo-Diagnostycznych Instytutu Elektrotechniki opracowano mikroprocesorowe przenośne urządzenie „KTM", do stosowania terapii impulsowym polem magnetycznym. Dzięki możliwości stosowania programowalnego urządzenia w domu pacjenta przez całą dobę uzyskuje się nowe możliwości terapeutyczne związane z szerszą dostępnością, wydłużeniem sesji, zmniejszeniem kosztu terapii, zdalną komunikacją lekarza z pacjentem. Proces magnetoterapii może być zdalnie monitorowany i modyfikowany przez Internet. Urządzenie charakteryzuje się stosunkowo niskim kosztem wytwarzania i eksploatacji. Wraz z urządzeniem opracowano instalowany w gabinecie lekarza system informatyczny, który może obsługiwać kilkadziesiąt przenośnych urządzeń*

Słowa kluczowe: przenośne urządzenia do magnetoterapii, wolno-zmienne pole magnetyczne

Introduction

Since many centuries the impact of magnetic field on biological function of humans and animals have inspired researchers. The ancient Egyptians used permanent magnets as a cure for many diseases or means of boosting the immunity, that way trying to prolong human's life. Nowadays, since we understand the physical basis underlying phenomenon of electromagnetism, the systematic research on impact on human's health has been performed, including the works on therapeutic and preventive effects of low-frequency magnetic field along with the negative influence of magnetic field on human's body.

In recent years there has been an increasing interest in magnetic therapy, caused mainly by the research progress made at many technical research centers. Therapeutic devices are applied in the fields where the positive effects of low-frequency magnetism have been experimentally proved. The measurable health claims have been evidenced for osteoarthritis, nervous system malfunction, e.g. migraine and other vascular headaches and bone fractures. Magnetotherapy applications are the part of scientific field called physical therapy and rehabilitation medicine. The alternating magnetic field is also used in sports medicine and prevention of some diseases.

Recently, there have been several reports on applications in aesthetic medicine. Therapy supporting by magnetic methods make it more effective, but the attention is needed since for many body malfunctions there are no medical claims established.

The advancement in nanotechnolgy contributes to the development of new cancer therapies. New nanomaterials, including magnetic nanoparticles, have been searched for to be applied in cancer therapy and diagnostics. Concluding, the steady growth of interest in magnetic field and human's body interactions has been reported.

Low-frequency magnetic field of low intensity administered in relevant doses positively influences therapies of numerous diseases. The applied magnetic fields are characterized by the frequencies of 3000 Hz and magnetic flux density up to 20 mT. In that frequency range there have been no negative ionization and induction effects in human's body observed. The fields used in magnetotherapy are of frequency less than 100 Hz and magnetic flux density of 0.1 to 20 mT. Those fields are much higher than the geomagnetic field which density oscillates between 30 and 70 μT. The generated fields applied in magnetostimulation are of much higher frequency, lower value of magnetic flux density (1 pT - 100 μT) and complex shape and temporal structure of the impulses that generate magnetic signal.

The stationary devices generating low-frequency magnetic field have been on the market for several years as instruments used to support conventional medicine. However, the number of those devices is insufficient.

1. Portable magnetotherapy device

The Department of Measurement and Diagnostic Systems at the Electrotechnical Institute in cooperation with the AGH University of Science and Technology and Medical and Rehabilitation Center in Kraków have developed a prototype for low-frequency magnetic therapy. The prototype was employed as a light, portable microprocessor device being the integral part of the KTM® (Magnetic Therapy Clinic) system that supports therapeutic treatment. In the schema below the structure of that system has been shown.

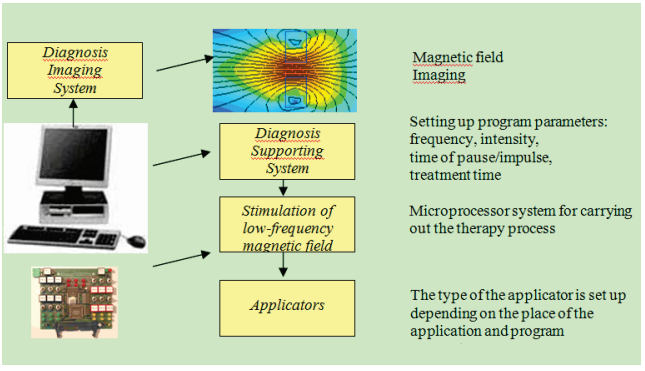


Fig. 1. Structure of the KTM system

Due to its small dimensions the prototype developed at the Electrotechnical Institute allows the patient for unassisted therapy sessions during the whole time of the treatment. The miniaturized controller is connected through the power supply to the suitable applicator that does not limit the patient movement and therapy can be carried out even 24 hours a day. The set of microprocessor programmable, portable apparatuses powered by batteries, being the part of the system supporting

the therapist, was created too. Thanks to programmable functions the device can be used at patient's home whole day and therapeutic outcomes can be reinforced by greater accessibility, longer sessions, lowered therapy costs and remote patient-doctor communication. Figure 2 shows the KTM system for diagnosis and patient filing. The device possesses many advantageous features, e.g.: low utilization cost, programmability, energy efficiency. Due to the novel technology of applicator programming it is a possible to generate the fields characterized by specified values at the fixed intervals that is crucial for treatment of some disorders.

Fig. 2. Computer system for supporting the diagnosis and patient filling KTM

The magnetotherapy process is managed by the controller. It is a microprocessor system that generates electric impulses for the applicators. Its shapes, frequency and temporal dependencies are defined in specified programs. The shapes of the low-frequency magnetic field impulses are set to fulfill relevant biophysical effects: magneto mechanical, electrodynamic and ion cyclotron resonance. The controller is equipped with a port to plug in the applicators. The choice of the active applicator can be made by using the pushbuttons. Each of the applicator differs not only in shape but also generates characteristic, nonuniform magnetic field (Fig. 3, 4 – the example of applicator assortment, Fig 5, 6 – the applicators with controllers).

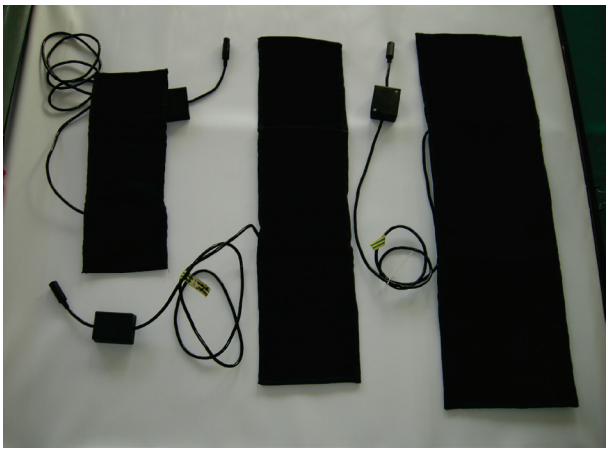


Fig. 3. KTM-A Applicator set. Wrist, arm and thigh applicators

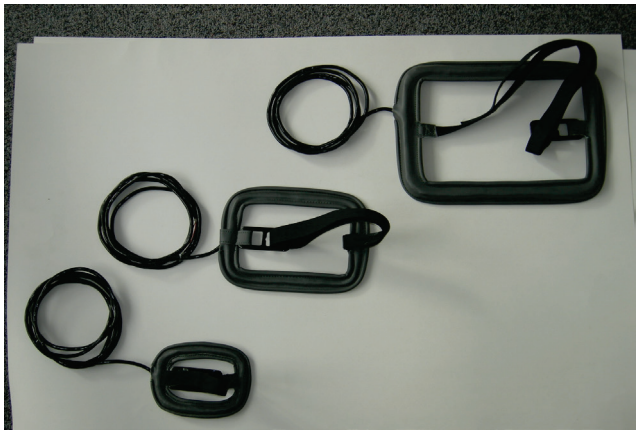


Fig. 4. KTM-A Applicator set. Wrist, arm and thigh applicators

Fig. 5. The controller and arm applicator

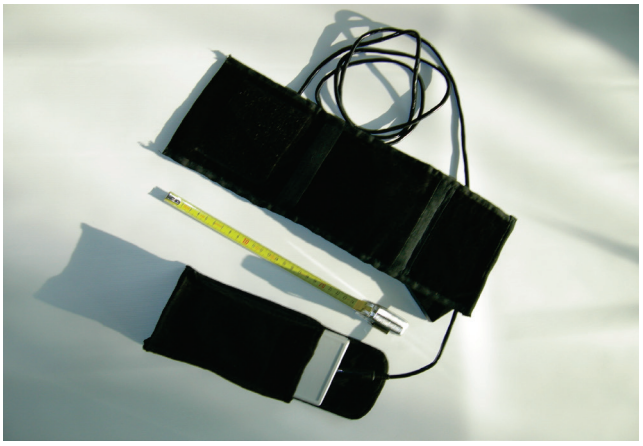


Fig. 6. The controller and wrist applicator

In every applicator there is a solenoid with different number of coils. Additionally, the device is featured by the visualization system developed by the AGH University of Science and Technology. The system is compatible with notebook, that way patent and operator are able to observe instantly the application process.

Magnetic therapy is scheduled by using the PC connected to the applicator. The person responsible for operating the device enters the parameters of the planned therapy through the user friendly software (Fig 7-10).

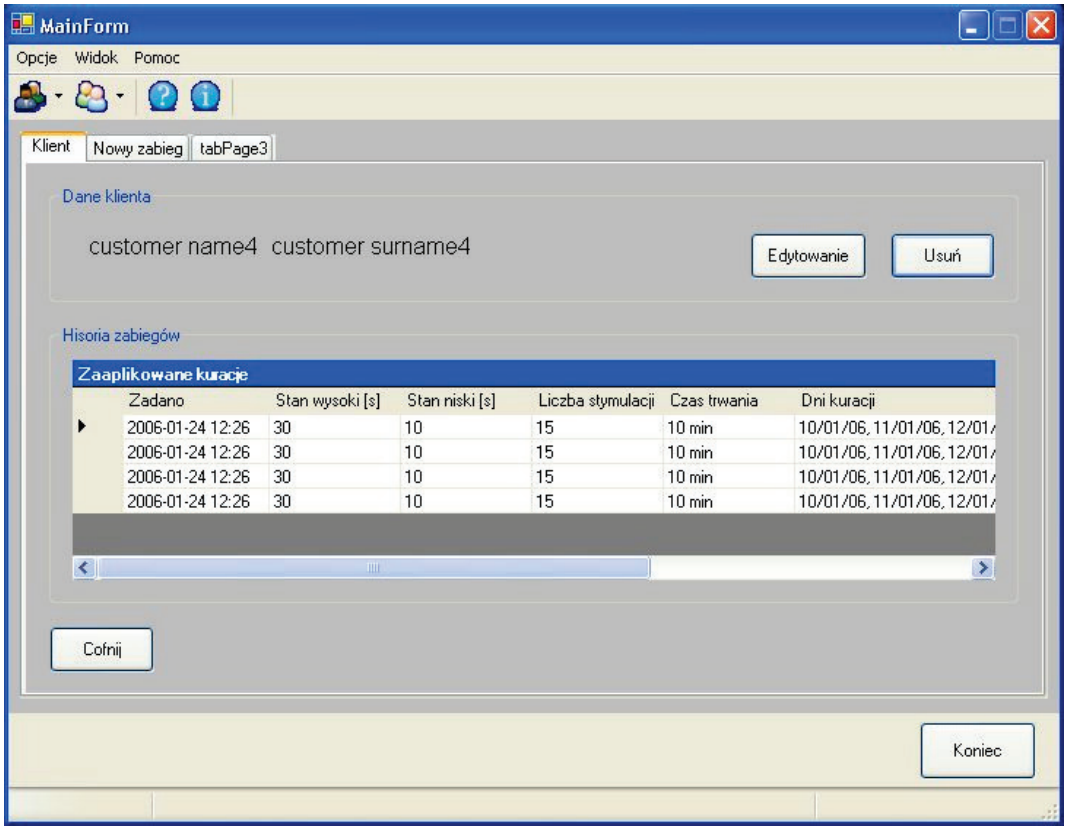


Fig. 7. The patients database

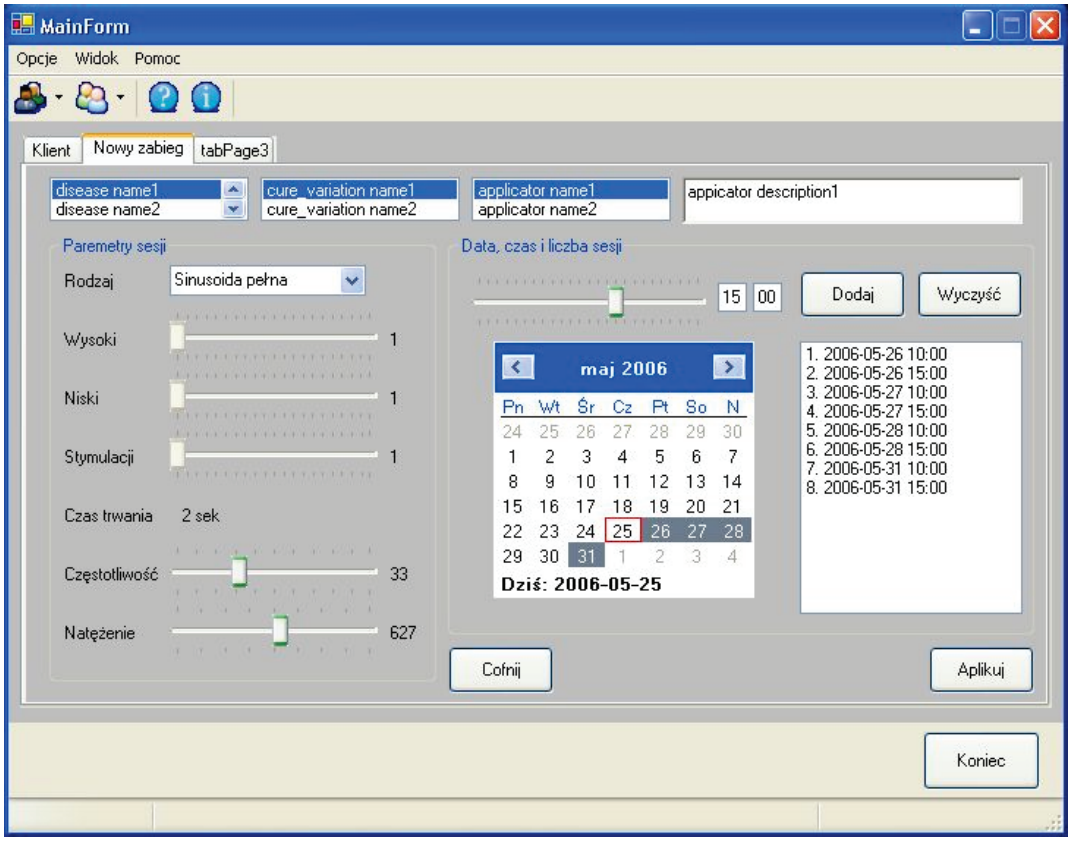


Fig. 8. Setting up therapy parameters, and treatment time

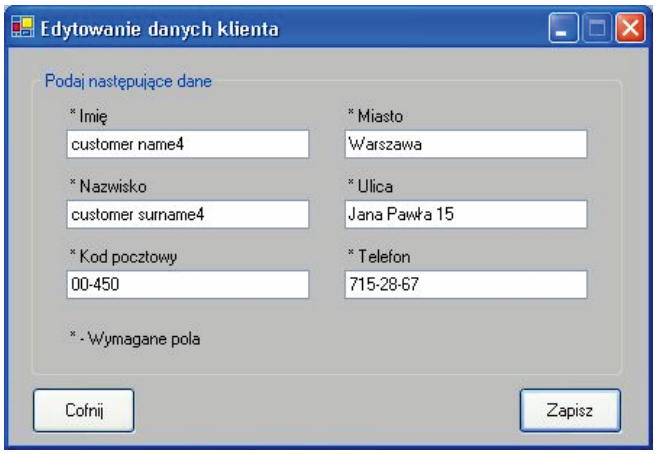


Fig. 9. Patient's data window

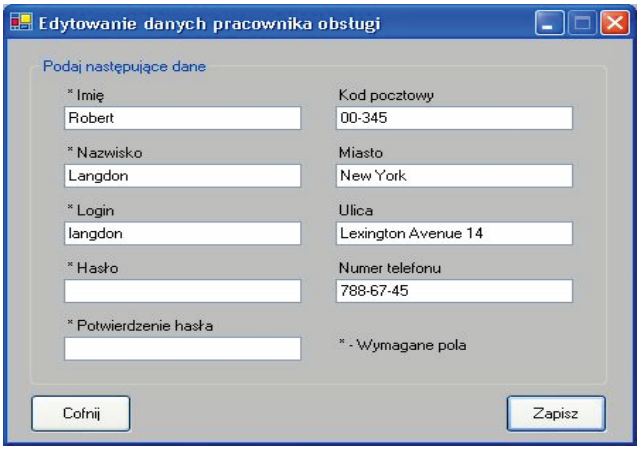


Fig. 10. Doctor's data window

Fig. 11. The programmable KTM-S microprocessor controller

Fig. 12. KTM-S controller after the connection with PC

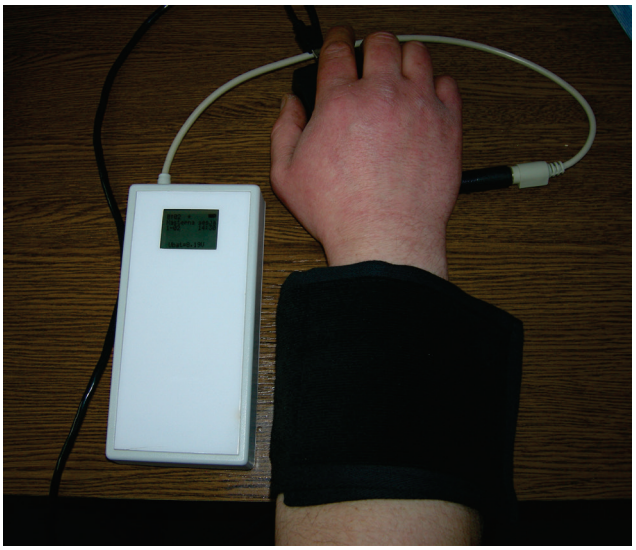


Fig. 13. The KTM-S controller connected with the applicator and PC during programming

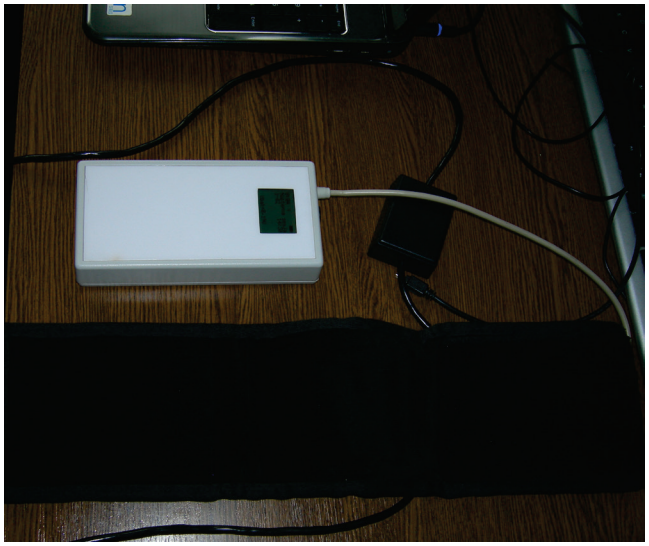


Fig. 14. The KTM-S controller connected with unrolled applicator

The device is equipped with the screen, that shows some treatment parameters as the total exposition and countdown times. The optional messages on therapy data are displayed, too (Fig. 11-14).

Magnetic field can be set in the frequency range from 0.1 to 3000 Hz and magnetic flux density from 1 pT to 20 mT. Treatment time is actually unlimited providing that the batteries are systematically charged. The triggering impulse shape can be freely set down to the applicator's memory in time of the programming. Thanks to the large scale of the possible input values the device can serve as a measurement tool.

Owing to the Electrotechnical Institute and AGH University of Science and Technology it was possible to upgrade the device to the novel methods of magnetic field simulation and imaging.

2. Conclusions

The portable, battery-powered device that has been introduced to market will increase the chance for patients to undergo magnetic therapy. The featured device enables user-friendly therapy, e.g.: therapy scheduling with any available PC, arbitrary magnetic field course and therapy characteristics, lower cost of the therapeutic unit and operation, the possibility of providing rentals by clinics, remote control and patient-doctor communication.

The reported set of applicators was created due to employed normalization process. Depending on part of body undergoing the magnetic treatment different applicators can be chosen. The doctor's duties required for the procedure are supported by IT system, that allows for creating patients database with details of used applicators and administered doses.

The further research activities at the Department of Measurement and Diagnostic Systems is directed toward developing a new generation of programmable devices for magnetic therapy. Along with the methodological concepts next step would be creating a lab station and new version of device. The lab will be equpped in magnetic field scanner, object imaging system, set of standard applicators, programmable microproccesor controller, PC and corresponding software. The key issue is to optimize theplicator's form, that would be performed by simulations with realistic human phantoms.

The next step of the research would be broadening of scope of the electromagnetic field modeling related to the newest solutions in the area of nanotechnology. The works have been started and refer to magnetic field profiling in biological tissues in the process of interaction of external magnetic field and objects injected to the human's body.

References

[1] Biernat K.: *Domowa klinika terapii magnetycznej,* Nowa Elektrotechnika, 05 (2007).

[2] Cieśla A., Kraszewski W., Syrek P.: Nowa koncepcja uzwojenia wzbudzającego pole magnetyczne w zastosowaniu do magnetoterapii. Agrolaser, Warszawa 5-7 września 2006, 21-25.

[3] Dokumentacja techniczna nr NMB/5/2005 Urządzenie do terapii wolnozmiennym polem magnetycznym, 2005.

[4] Dokumentacja techniczna nr NMB/2/2006 Opracowanie oprogramowania i zestawu aplikatorów do terapii magnetycznej, 2006.

[5] Dokumentacja techniczna nr NMB/1/2007 Opracowanie modeli aplikatorów do terapii magnetycznej kręgosłupa i biodra, 2007.

[6] Markov M.S.: Pulsed electromagnetic field therapy history, state of the art and future. Springer Science+Business Media, LLC, 2007.

[7] Sieroń A.: Zastosowanie pól magnetycznych w medycynie. α-medica Press, 2002.

[8] Tadeusiewicz R..: Telemedycyna - nowe wyzwanie współczesnej nauki. Nauka, 3/2004, pp. 57-80.

[9] Tadeusiewicz R.: Informatyka medyczna. Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin 2011.

[10] Zborowski M., Midura R.J., I in.: Magnetic field visualization in applications to pulsed electromagnetic field stimulation of tissues. IEEE Trans. Magn., 50 (2002), No. 5, pp. 133-137.

M. Sc. Katarzyna Biernat
e-mail: k.biernat@iel.waw.pl

M. Sc. Katarzyna Biernat has earned her degree from Technical University in Radom at Department of Informatics and Math. After graduating she started her career at Electrotechnical Institute and has been promoted for position of Assistant Manager at Measurement and Diagnostic System Department. She is the author of many publications in the area of metrology and diagnostics and has been involved in several international amd national R&D projects. At Electrotechnical Institute she is the key person who coordinated several workshops and conferences.

M. Sc. Alicja Idziaszek-Gonzalez
e-mail: a.gonzalez@iel.waw.pl

M. Sc. Alicja Idziaszek-Gonzalez has earned her degree from College of Sciences in Warsaw, Poland and Texas Tech University in Lubbock, USA . She worked as academic teacher for Texas Southern University. Presently she has got a position in Department of Measurement and Diagnostic Systems at Electrotechnical Institute in Warsaw. She specializes in magnetic separation process and industrial application of tomography.

Ph.D. Eng. Konrad Nita
e-mail: k.nita@iel.waw.pl

Ph.D. Eng. Konrad Nita completed his undergraduate education at Warsaw University of Technology in the Electrical Department, where he pursued PhD studies. After graduation he joined the team of Metrology and Non-Destructive Testing at Electrotechnical Institute and then was promoted to the current position as Head of Tomographic Laboratory in the Department of Measurement and Diagnostic Systems. He specializes in electrical impedance tomography method to brickwork damp identification.

Ph.D. Stefan S. Wójtowicz
e-mail: s.wojtowicz@iel.waw.pl.

Ph.D. Stefan S. Wójtowicz graduated from Szczecin University of Technology. After graduating he got a position as Reserch Asisstant, next Assistant Professor at Department of Control Engineering. For several years he has worked for Electrotechnical Institute in Warsaw. His scientific interests are measurement and diagnostics. He is the author of over 150 publications including many monographs and books. In Electrotechnical Institute he was responsible for several Institute functions in management, as well as served on scientific boards at Electrotechnical Institute and Polish Academy of Sciences. He is the Head of Measurement and Diagnostic Systems.

Artykuł recenzowany

PROJEKT 7-BITOWEGO NISKOMOCOWEGO PRZETWORNIKA A/C W TECHNOLOGII SUBMIKRONOWEJ O MAŁEJ POWIERZCHNI DO ZASTOSOWAŃ WIELOKANAŁOWYCH

Piotr Otfinowski, Piotr Kmon, Rafał Kleczek
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, Katedra Metrologii

Streszczenie. *W artykule został przedstawiony projekt przetwornika analogowo-cyfrowego w technologii CMOS 180nm. Wybraną architekturą jest przetwornik kompensacyjny z równoważeniem ładunku. Duży nacisk został położony na zmniejszenie zajmowanej powierzchni jak i minimalizację poboru mocy, co czyni prezentowany układ odpowiednim do zastosowań wielokanałowych. Autorzy prezentują wyniki symulacji Monte-Carlo nieliniowości charakterystyki przejściowej. Zaprezentowany przetwornik osiąga szybkość konwersji 3 MS/s przy rozdzielczości 7 bitów i poborze mocy 77 µW oraz zajmuje tylko 90 x 95 µm^2.*

Słowa kluczowe: przetwornik analogowo-cyfrowy, równoważenie ładunku, przetwornik kompensacyjny

DESIGN OF 7-BIT LOW-POWER, LOW AREA A/D CONVERTER IN SUBMICRON PROCESS FOR MULTICHANNEL SYSTEMS

Abstract. *The design of analog-to-digital converter implemented in CMOS 180 nm technology has been presented in this paper. The successive approximation architecture with charge redistribution has been chosen. Much emphasis was placed on limiting the area occupancy of the whole chip so as its power consumption, which makes the described circuit suitable for multichannel applications. The presented converter achieves 3 MS/s sampling rate with 7-bit resolution at 77 µW and occupies only 90 x 95 µm^2.*

Keywords: SAR ADC, charge redistribution, successive approximation converter

Wstęp

Dynamiczny rozwój w dziedzinach wykorzystujących promienie X, takich jak spektometria masowa lub obrazowanie medyczne, stawia coraz większe wymagania układom odczytu z detektorów krzemowych [6]. Dodanie przetwornika analogowo-cyfrowego mierzącego amplitudę impulsu znacząco poprawiłoby jakość pomiaru, umożliwiając bezpośredni pomiar energii padającego promieniowania. Pozwoliłoby to również ograniczyć negatywny wpływ efektu podziału ładunku w detektorze na rozdzielczość przestrzenną systemu.

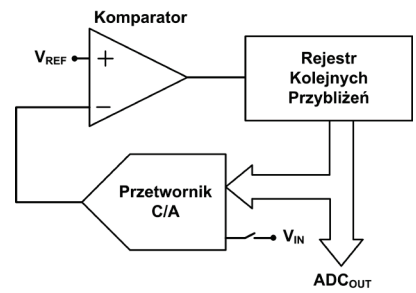
Innym odpowiednim zastosowaniem dla małych, energooszczędnych przetworników A/C są systemy do rejestrowania aktywności neuronowej [3]. Zbudowane są one na bazie matrycy wielu elektrod, z których dane muszą być odczytywane i przesyłane równocześnie. Jako że systemy takie powinny charakteryzować się bardzo duża ilością kanałów rejestracyjnych (w celu lepszego zrozumienia badanych zależności) istnieje konieczność przesyłana bardzo dużej ilości danych. Jednym ze sposobów ograniczenia ilości danych jest wstępna ich kompresja, która powinna być realizowana w sposób cyfrowy. Wymaga to dodania do każdego kanału odczytowego przetwornika A/C. Jako że dostępna moc oraz powierzchnia przypadająca na pojedynczy kanał odczytowy jest ograniczona, budowa przetwornika A/C odpowiedniego zastosowania w wielokanałowych systemach neurobiologicznych – zajmującego bardzo małą powierzchnię i pobierającego niewielką moc – umożliwiłaby zdecydowanie poprawienie ich funkcjonalności.

Celem pracy jest projekt przetwornika A/C odpowiedniego do przedstawionych zastosowań. Przetwornik powinien osiągać rozdzielczość z zakresu 6-8 bitów, szybkość próbkowania co najmniej 2 MS/s oraz charakteryzować się niskim poborem mocy. Jako że planowane zastosowania układu obejmują systemy wielokanałowe, jego pole powierzchni powinno być jak najmniejsze.

1. Architektura przetwornika

Wybraną architekturą przetwornika jest przetwornik kompensacyjny z równoważeniem ładunku. Schemat blokowy przetwornika został przedstawiony na rysunku 1.

Główną zaletą wybranej architektury jest wysoka sprawność energetyczna – definiowana jaka ilość energii potrzebnej do pojedynczej konwersji – FOM (ang. *Figure-of-Merit*). Współczynniki dobroci są mniejsze niż 100 fJ/conv [1], natomiast najniższa zanotowana wartość wynosi 4,4 fJ/conv [2].



Rys. 1. Schemat blokowy przetwornika A/C z równoważeniem ładunku

Kolejną istotną cechą jest brak wzmacniaczy operacyjnych oraz zredukowana część analogowa, ograniczająca się do komparatora oraz przetwornika C/A. Przetwarzanie sygnału opiera się niemal wyłącznie na elementach pasywnych.

Szybkości konwersji osiągane przez tego typu przetworniki wyprodukowane w nowoczesnych procesach produkcyjnych są rzędu 100 MS/s [7], co jest wartością znacznie wyższą niż wymagana do planowanych zastosowań.

Ze względu na to, że najważniejszym kryterium była jak najmniejsza powierzchnia układu, nie zdecydowano się na różnicowe przetwarzanie sygnału, co wymagałoby zastosowania dwóch przetworników C/A.

Konwersja przebiega w dwóch fazach. W pierwszej fazie napięcie wejściowe V_{IN} jest próbkowane oraz zapamiętywana jest jego różnica względem napięcia referencyjnego: V_{REF} - V_{IN}. W następnej fazie następuje właściwa konwersja. Najbardziej znaczący bit słowa wejściowego przetwornika C/A, będącego jednocześnie słowem wyjściowym przetwornika A/C, jest ustawiany. Napięcie wyjściowe przetwornika C/A jest równe wówczas połowie pełnego zakresu i wynosi $\frac{1}{2}V_{REF}$. Jeżeli suma napięcia wyjściowego przetwornika C/A oraz zapamiętanego w pierwszej fazie napięcia V_{REF} - V_{IN} jest mniejsza niż wartość napięcia referencyjnego V_{REF}, bit pozostaje ustawiony. W przeciwnym wypadku jest on zerowany. Procedura przebiega analogicznie dla pozostałych bitów. W ten sposób suma napięcia wyjściowego przetwornika C/A oraz zapamiętanego napięcia dąży do V_{REF}. Po wyznaczeniu najmłodszego bitu, możemy zapisać zależność:

$$V_{DAC} + (V_{REF} - V_{IN}) = V_{REF} \quad (1)$$

która upraszcza się do równości:

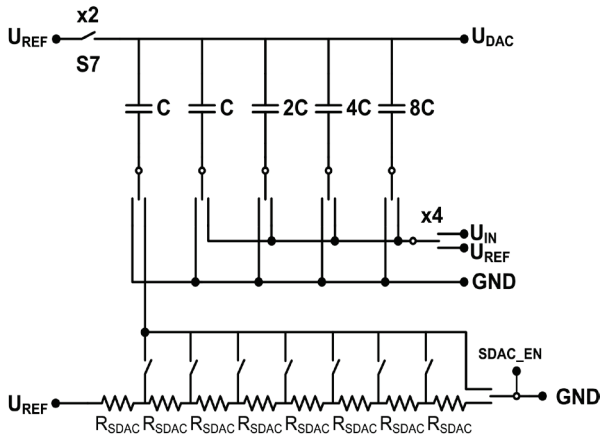
$$V_{DAC} = V_{IN} \quad (2)$$

Oznacza to, że wartość napięcia wyjściowego przetwornika C/A jest równa próbkowanej wartości napięcia wejściowego V_{IN}, a jego słowo wejściowe jest jego cyfrową reprezentacją.

2. Projekt układu

W przetwornikach kompensacyjnych przetwornik C/A jest najważniejszym blokiem, jako że decyduje o rozdzielczości oraz nieliniowości całego przetwornika A/C. Powszechnie stosowanym rozwiązaniem [1, 2, 4, 5, 7] jest przetwornik z podziałem ładunku. Jego zaletami jest zerowy statyczny pobór mocy, dobre dopasowanie scalonych kondensatorów tworzących matrycę (skutkujące dużą liniowością) oraz fakt, że może pełnić on również funkcję układu próbkująco pamiętającego.

Rozdzielczość przetwornika z podziałem ładunku jest proporcjonalna do jego rozmiarów. Aby zwiększyć ją o jeden bit konieczne jest dodanie kolejnego kondensatora o pojemności równej sumie pozostałych. Wymaga to dwukrotnego zwiększenia powierzchni. Do otrzymania wysokich rozdzielczości konieczna jest więc matryca o dużych rozmiarach.



Rys. 2. Schemat przetwornika C/A z równoważeniem ładunku

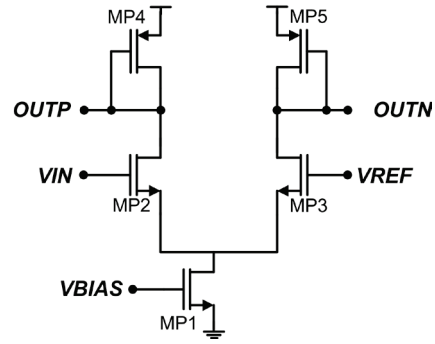
W prezentowanym układzie wybrano rozwiązanie polegające na rozdzieleniu przetwornika C/A na dwie części: przetwornik główny oraz przetwornik pomocniczy [5]. Ma to na celu przede wszystkim zmniejszenie zajmowanej powierzchni oraz pojemności przetwornika C/A, a poprzez to również poboru mocy układu. Jako przetwornik główny użyty został 4-bitowy przetwornik z podziałem ładunku, natomiast jako przetwornik pomocniczy – 3-bitowy dzielnik rezystancyjny.

Aby zminimalizować efekty rozrzutu parametrów w matrycy kondensatorów, przy przygotowywaniu jej planu masek przetwornika wzięto pod uwagę szereg czynników. Podstawową strukturą jest kondensator jednostkowy o wartości najmniejszej pojemności w matrycy. Większe kondensatory są tworzone poprzez równoległe połączenie odpowiedniej liczby kondensatorów jednostkowych. Dodatkowo na granicy zostały dodane dodatkowe kondensatory (ang. *dummy*), w celu zapewnienia jednakowego otoczenia dla pozostałych kondensatorów.

Jako klucze zastosowano bramki transmisyjne. Główną ich zaletą w stosunku do pojedynczego tranzystora jest mniejszy wpływ napięcia na zaciskach klucza na jego rezystancję. Aby zminimalizować błąd wynikający ze wstrzykiwania ładunku kanału wymiary tranzystorów PMOS oraz NMOS są identyczne.

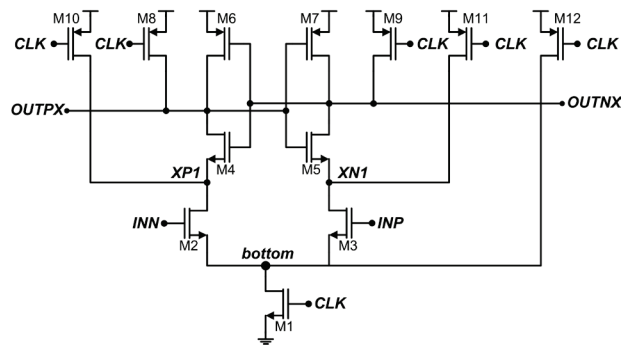
Kolejnym blokiem funkcyjnym składającym się na całość przetwornika A/C jest komparator. Składa się on z dwóch stopni: przedwzmacniacza oraz synchronicznego zatrzasku.

Schemat przedwzmacniacza został zaprezentowany na rysunku 3. Jest on zrealizowany jako para różnicowa tranzystorów NMOS MP2-MP3 z diodowo połączonymi tranzystorami PMOS MP4-MP5 pełniącymi funkcję obciążenia. Czas ustalania się wyjścia przedwzmacniacza jest głównym czynnikiem ograniczającym szybkość układu, stąd stopień przedwzmacniacza wymaga stosunkowo wysokiego prądu polaryzacji, który w prezentowanym układzie został ustalony na poziomie 10 µA. Gwarantuje to, że czas odpowiedzi całego komparatora będzie krótszy od połowy taktu zegarowego.



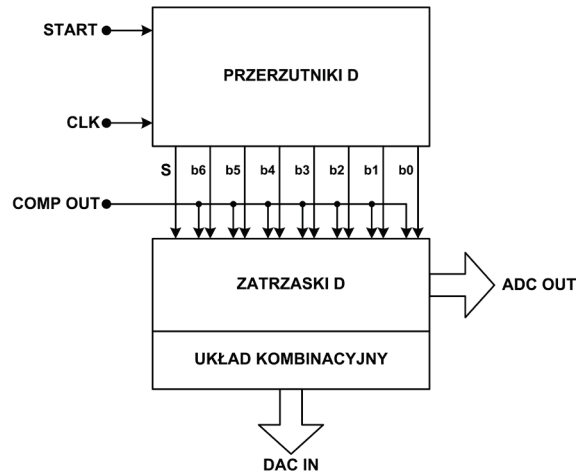
Rys. 3. Schemat przedwzmacniacza

Drugim stopniem komparatora jest synchroniczny zatrzask – rysunek 4. Jego zadaniem jest wzmocnienie sygnału do poziomu napięć zasilania. Działa on w dwóch fazach. Gdy sygnał zegarowy jest niski wszystkie węzły są podłączone do napięcia zasilania, w celu uniknięcia efektu histerezy. Jako że tranzystor M1 jest wyłączony układ nie pobiera w tym stanie żadnego prądu. Przy narastającym zboczu zegara rozpoczyna się faza regeneracji. Tranzystor M1 jest włączany, a tranzystory M2-M3 zaczynają przewodzić prąd przez krzyżowo połączoną parę inwerterów M4 i M6 oraz M5 i M7. Potencjał węzłów XP1 oraz XP2 maleje z różną szybkością zależną od napięcia wejściowego zatrzasku. W momencie, gdy różnica potencjałów jest dostatecznie duża, następuje regeneratywne przełączenie układu i napięcie wyjściowe jest ustalone. W tym stanie układ również nie pobiera prądu.



Rys. 4. Schemat synchronicznego zatrzasku

Ostatnim blokiem składającym się na całość przetwornika A/C jest cyfrowy blok sterowania, zwany również Rejestrem Kolejnych Przybliżeń (ang. *Successive Approximation Register, SAR*). Jego rolą jest generowanie sygnałów sterujących kluczami przetwornika C/A oraz komparatorem. Aby powierzchnia układu była jak najmniejsza, blok ten został w całości zaprojektowany ręcznie (ang. *Full Custom*). Uproszczony schemat blokowy Rejestru Kolejnych Przybliżeń został przedstawiony na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat pojedynczej komórki rejestru kolejnych przybliżeń

Układ może się znajdować w jednym z ośmiu stanów. Pierwszym i domyślnym stanem jest próbkowanie napięcia wejściowego (ang. *Sampling*). W tym stanie, po otrzymaniu sygnału rozpoczęcia konwersji „START", układ automatycznie przechodzi przez siedem pozostałych stanów, w których wyznaczane są bity słowa wyjściowego, kolejno od bitu 6 (MSB) do bitu 0 (LSB). Aktualny stan układu jest przechowywany w przerzutnikach D.

Kolejnym elementem cyfrowego bloku sterowania jest siedem zatrzasków D. Przechowują one słowo wyjściowe przetwornika. Na początku konwersji, po otrzymaniu sygnału „START", ich wartość jest zerowana. Następnie do zatrzasku odpowiadającemu aktualnie testowanemu bitowi jest zapisywana odpowiedź komparatora.

Sygnały sterujące kluczami przetwornika C/A są otrzymywane z układu kombinacyjnego, na podstawie aktualnego stanu układu oraz danych zapisanych w zatrzaskach D.

Pojedyncza konwersja zajmuje co najmniej osiem cykli zegarowych: jeden lub więcej cykli na próbkowanie napięcia wejściowego, siedem na wyznaczenie kolejnych bitów. Przy częstotliwości zegara równej 25 MHz maksymalna szybkość konwersji wynosi 3,125 MS/s.

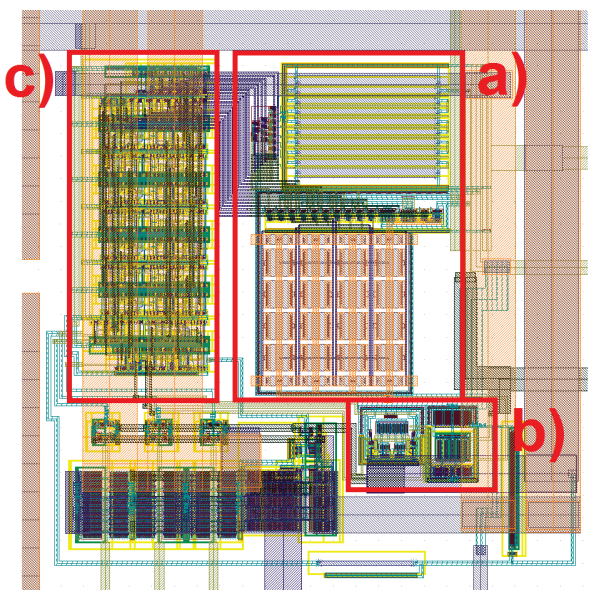
3. Plan masek układu oraz wyniki symulacji

Prezentowany układ został wykonany w technologii CMOS 180nm. Podczas przygotowywania planu masek szczególną uwagę zwrócono na zminimalizowanie wpływu zakłóceń pochodzących z części cyfrowej (rejestr kolejnych przybliżeń) na wrażliwe bloki analogowe (przetwornik C/A). W tym celu zastosowano oddzielne zasilanie bloków analogowych i cyfrowych oraz dodano pierścienie ochronne wokół wspomnianych struktur.

Plan masek gotowego układu został przedstawiony na rysunku 6. Całkowita powierzchnia prezentowanego przetwornika wynosi 90 x 95 μm^2. Zestawienie procentowej powierzchni zajmowanej przez poszczególne bloki funkcyjne przedstawiono w tabeli 1.

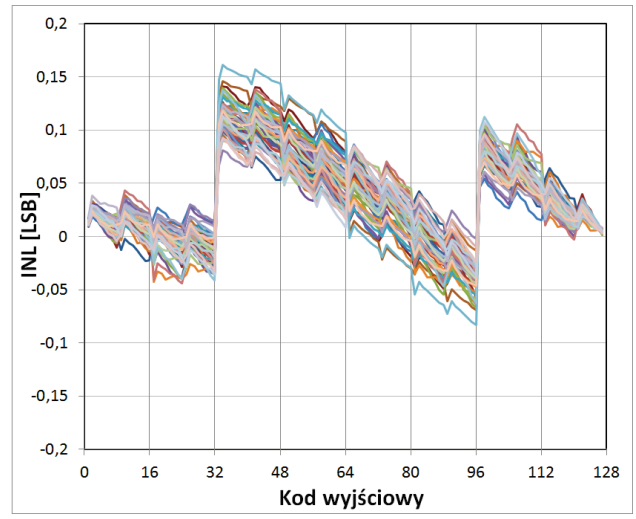
Tabela 1. Zajmowana powierzchnia elementów przetwornika

Blok	Przetwornik C/A	Komparator	SAR	Połączenia między blokami
Powierzchnia	40 %	4,4 %	24 %	31,6 %

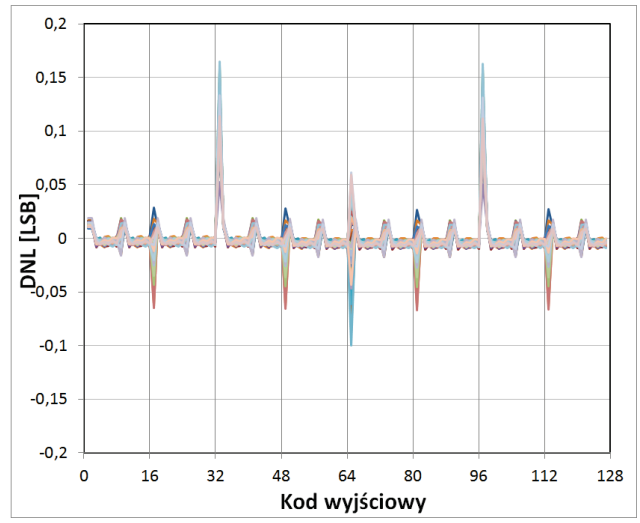


Rys. 6. Plan masek przetwornika A/C: a) przetwornik C/A, b) komparator, c) rejestr kolejnych przybliżeń

W celu weryfikacji projektu przed wysłaniem do produkcji przeprowadzono szereg symulacji pozwalających zminimalizować efekty elementów pasożytniczych oraz symulację charakterystyki przejściowej przetwornika A/C. Jako że w znacznym stopniu zależy ona od rozrzutu wartości elementów – kondensatorów oraz rezystorów w przetworniku C/A – konieczne było przeprowadzenie analiz Monte-Carlo. Rysunek 7 oraz 8 przedstawiają odpowiednio zbiorcze wykresy 50 analiz nieliniowości całkowej oraz różniczkowej omawianego układu.



Rys. 7. Symulacje Monte-Carlo nieliniowości całkowej przetwornika A/C



Rys. 8. Symulacje Monte-Carlo nieliniowości różniczkowej przetwornika A/C

Dla najgorszego przypadku nieliniowość całkowa oraz różniczkowa wynoszą odpowiednio +0.16 / -0.08 LSB oraz +0.17 / -0.1 LSB.

Najważniejsze parametry opisywanego układu zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Podsumowanie parametrów przetwornika A/C

Proces produkcyjny	180nm CMOS
Rozdzielczość	7 bitów
Szybkość konwersji	3 MS/s
Nieliniowość	0.17 / -0.1 LSB
Zakres napięcia we.	0 - 1200 mV
Częstotliwość zegara	25 MHz
Pobór mocy	77 µW
Napięcie zasilania	1.8 V
Zajmowana powierzchnia	90 x 95 μm^2

4. Podsumowanie

W artykule został przedstawiony projekt oraz wyniki symulacji 7-bitowego przetwornika A/C. Jego małe rozmiary oraz niski pobór mocy czynią go szczególnie atrakcyjnym w zastosowaniach wielokanałowych. Analizy Monte-Carlo przeprowadzone na modelu z wyekstrahowanymi pojemnościami pasożytniczymi wykazują również bardzo niską nieliniowość. Układ został wysłany do produkcji w październiku 2012 roku.

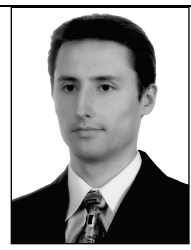
Podziękowania

Niniejsza praca była realizowana w ramach grantu UMO-2011/03/N/ST7/01823 - lata 2012-2013.

Literatura

[1] Chang Y., Wang C., Wang C.: A 8-bit 500-KS/s low power SAR ADC for bio-medical applications. IEEE Asian Solid-State Circuits Conference, 2007, pp. 228–231.
[2] Elzakker, M., et al.: A 10-bit Charge-Redistribution ADC Consuming 1.9 u W at 1 MS/s. IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 45 , no. 5, pp: 1007 – 1015.
[3] Grybos P., Kmon P., Zoladz M., Szczygiel R., Kachel M., Lewandowski M., Blasiak T.: 64 Channel Neural Recording Amplifier with Tunable Bandwidth in 180 nm CMOS Technology. Metrol. Meas. Syst., Vol. XVIII, No. 4, pp. 631-644.
[4] Otfinowski P., Gryboś P., Kłeczek R.: A 10-bit 3MS/s low-power charge redistribution ADC in 180nm CMOS for neural application. MIXDES 2011, Proceedings of the 18th international conference, s. 197–200.
[5] Rivetti A., Anelli G., Anghinolfi F., Mazza G.: A low-power 10-bit ADC in a 0.25-µm CMOS: design considerations and test results. IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 48, no. 4, pp. 1225–1228.
[6] Szczygiel R., Grybos P., Maj P., Tsukiyama A., Matsushita K., Taguchi T.: RG64—High Count Rate Low Noise Multichannel ASIC With Energy Window Selection and Continuous Readout Mode. IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 56, no. 2, pp. 487–495.
[7] Zhu Y., et al.: A 10-bit 100-MS/s Reference-Free SAR ADC in 90 nm CMOS. IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 45, no. 6, pp. 1111-1121.

Mgr inż. Piotr Otfinowski
e-mail: potfin@agh.edu.pl



Ukończył Akademię Górniczo-Hutniczą w 2009, kierunek: Elektronika i Telekomunikacja, specjalność: Sensory i mikrosystemy. Obecnie jest na trzecim roku Studiów Doktoranckich na Wydziale EAIiE, AGH. Pracuje jako asystent w Katedrze Metrologii, AGH. Jego głównym tematem badań naukowych są układy scalonych przetworników analogowo-cyfrowych.

Dr inż. Piotr Kmon
e-mail: kmon@agh.edu.pl

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki w 2007 r. Tytuł doktorski uzyskał w 2012 r. broniąc pracy dotyczącej wielokanałowych scalonych układów elektronicznych dedykowanych do eksperymentów neuro-biologicznych. W swoich pracach zajmuje się wykorzystywaniem nowoczesnych technologii produkcji układów scalonych do zastosowań w eksperymentach biologicznych.

Mgr inż. Rafał Kłeczek
e-mail: rafal.kleczek@agh.edu.pl

Ukończył Akademię Górniczo-Hutniczą w 2009, kierunek: Elektronika i Telekomunikacja, specjalność: Mikroelektronika i aparatura biomedyczna. Obecnie jest na trzecim roku Studiów Doktoranckich na Wydziale EAIiE, AGH. Pracuje jako asystent w Katedrze Metrologii, AGH. Jego głównym zainteresowaniem naukowym jest projektowanie scalonych wielokanałowych układów elektroniki front-end do odczytu półprzewodnikowych detektorów promieniowania X.

Artykuł recenzowany

IMPREZY SPECJALISTYCZNE

Computational and Information Technologies in Science, Technics and Education 2013

Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, September 18-22, 2013

Important Dates:

Until July 1, 2013
Submission of article theses, applications for conference participation, an electronic copy of the payment receipt for registration fee

Until July 5, 2013
Sending of notifications about involvement of reports into the conference program

Until July 10, 2013
Confirmation of participation, information about arrival

18 September 2013
Check-in Day

22 September 2013
Day of departure

Scientific Program

Computational technologies

- Mathematical and computer modeling of complex processes and systems;
- Computer Science, automation and radio electronics;
- Computational technologies to ensure the safety of complex technical systems, mining and metallurgical complex and natural objects;
- Safety ensuring of complex engineering systems and natural objects;
- Modeling of technological processes in mechanical engineering and transport;
- Computers and IT technology for construction industry and agriculture;

Information and telecommunication technologies:

- Intelligent decision support systems and spatial data processing technology;
- The integration of distributed information resources, virtual portals and services;
- Information systems and mathematical methods in economics and innovation management;

Math Technologies

- Information technologies in the methods of teaching Mathematics, Physics and Chemistry;
- Numeric methods in the sphere of Algebra, mathematical logic, differential equations and mathematical Physics

AN INTEGRATED RISK INFORMED DECISION MAKING IN THE NUCLEAR INDUSTRY

Mieczysław Borysiewicz[1], Karol Kowal[1], Piotr A. Prusiński[1], Marcin Dąbrowski[2]
[1]National Centre for Nuclear Research (NCBJ), Nuclear Energy Department, Nuclear Energy Division, Poland
[2]National Atomic Energy Agency (NAEA), Department of Nuclear Safety, Division of Inspection of Nuclear Installations, Poland

Abstract. *The regulatory body, established to ensure safety of nuclear facilities, is expected to make right decisions and provide appropriate regulations for the nuclear industry. The traditional manner of its activity has been based on a deterministic approach to safety analyses. However, increased maturity of Probabilistic Safety Assessment (PSA) makes it complementary to deterministic studies. The new IAEA concept, described in this article, is to apply an integrated approach by combining both deterministic and probabilistic insights with other requirements affecting the decision making process.*

Keywords: Nuclear Safety, Integrated Risk Informed Decision Making (IRIDM), Probabilistic Safety Assessment (PSA), Deterministic Safety Assessment (DSA)

ZINTEGROWANY PROCES DECYZYJNY UWZGLĘDNIAJĄCY RYZYKO W PRZEMYŚLE JĄDROWYM

Streszczenie. *Organ regulacyjny, powołany w celu zapewnienia bezpieczeństwa jądrowego, jest odpowiedzialny za podejmowanie decyzji i wprowadzanie rozporządzeń dla przemysłu jądrowego. Tradycyjny sposób jego funkcjonowania opiera się na deterministycznym podejściu do analiz bezpieczeństwa. Rozwój analiz probabilistycznych (PSA) sprawia jednak, iż są one traktowane jako podejście komplementarne. Nowa koncepcja IAEA, opisana w tym artykule, polega na zintegrowanym podejściu, uwzględniającym analizy deterministyczne, probabilistyczne i inne aspekty procesu decyzyjnego.*

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo jądrowe, proces decyzyjny, ryzyko, probabilistyczne analizy bezpieczeństwa (PSA), deterministyczne analizy bezpieczeństwa (DSA)

Introduction

All over the world a nuclear industry structure is organized in a similar manner, meaning its stakeholders are usually: regulatory body, utility (investor) and technology vendor. The utility, owning or operating a nuclear power plant (NPP), is responsible for its safety throughout its lifetime, which means effective control of nuclear radiation, radioactive waste and its transport within the country. For this purpose a nuclear law has to be enacted first and a regulatory body has to be established to enforce the law and to control if the law is obeyed by nuclear facility operators [12].

The major regulatory body responsibilities and functions can be briefly described as authorization, review and assessment, inspection and enforcement, and development of regulations and guides [24]. Authorisation means granting a written permission by the regulator for an operator to perform specific nuclear activities, based on the national legislation, which includes, for example, necessary licensing, certification and registration. After the authorisation process, the operator of the nuclear facility is continuously supervised by the regulatory body, which determines whether the operator's activity ensures that the facility complies, throughout its life cycle, with the safety objectives, safety principles, and safety criteria approved by the national regulations. The regulatory body conducts inspections to check independently and satisfy itself that the operator is in compliance with the requirements set out in the authorization and regulations. If non-compliance with conditions of the authorization is demonstrated the regulatory body applies appropriate sanctions against the operator, including cancelation of the licence for nuclear activity. Consequently, development of appropriate regulations and guides plays a crucial role in the context of the relationship between nuclear facility operator and regulatory body. These documents are created by the national regulatory authority regarding to the indications and standards provided by the International Atomic Energy Agency (IAEA) headquartered in Vienna, Austria.

However, the role of the IAEA is limited to support, not to supervise, the regulation development process in the Member States. Thus the regulatory body is responsible for the nuclear law within the country, while the IAEA provides only the general safety standards and indications that can be adopted by the national authority. These standards are issued as the Safety Standards Series and categorised into Safety Fundamentals, Safety Requirements and Safety Guides. Moreover, the reports on safety in nuclear facilities and activities are issued in other publication series, in particular the Safety Reports Series, the Technical Reports Series, the Training Course Series etc. While sets of the IAEA reports aim to prevent accidents, there are also publications on security issues developed as the Nuclear Security Series, which goal is to reduce the threat of terrorist acts causing intentional damage to the nuclear facility. Since interfaces between safety and security issues exist, appropriate measures have to be taken to achieve both objectives in an optimal manner [35].

Besides of a good legislation, the regulatory body is expected to consider results of specialised safety analyses, performed in order to support decision making process on both new reactor licencing and nuclear safety of existing facilities. Making right decisions in this field is in fact the mission of the regulatory body, which is established to ensure that the safety of the public and of the operating staff of nuclear facilities is protected [22]. Although, the regulatory body usually has an internal group qualified to prepare some of required safety studies, it is a common practice to delegate the whole safety evaluation to the independent organization which, from now on, gains status of the Technical Support Organization (TSO). However, in any case when the TSO performs safety analysis on the request of the regulator, the final decision and ultimate responsibility always lies in the competences of the President of the regulatory organization. Thus the regulatory body never delegates its competences in the decision making on nuclear safety to any external organization including TSO. The role of TSO can be played either by one or several institutions i.e. university laboratories, nuclear research centres and all other units qualified to perform regularly the comprehensive assessments of nuclear safety or even independent specialists in the relevant fields if necessary. Thus the TSO model can be slightly different, depending on the country, while its main tasks in supporting the regulatory body usually stay the same all over the world. Besides of safety assessment, TSO can also assist in developing nuclear regulations, conducting technical inspections and, in case of an accident, it is expected to advise on the possible countermeasures [5, 6, 9].

Although, in some countries it is allowed to provide technical support for both the regulatory body and the utility at the same time and by the same organization, in general it is not recommended due to additional requirements that have to be fulfilled, i.e. political and economic independence of TSO has to be ensured. Therefore TSO should be required to demonstrate that there are no conflicts of interest in its activity. Moreover, it usually means that no one of TSO staff should work for both parties in the same subject area so as to avoid reviewing one's own results and guarantee independence of the analysis. Therefore, it is a good practice to delegate different persons and choose the alternative methods to be used for the two sides [15].

However, it is the most transparent way to establish two separate TSO structures, one for the regulator and another one for the utility.

Another issue is the role of TSO in public information and social debate transparency, especially during licensing of new reactors and nuclear power plant construction. These activities have always been of special interest to the media and the public opinion because of risks associated with their implementation. Public debate is recognized as an important, thus the TSO could participate in an open discussion next to the Government, local decision making bodies and other groups of interest. Nevertheless, it is crucial for TSO to maintain its neutrality and independence. Therefore, its role in the public debate is somewhat limited e.g. it cannot argue in favour of or against any specific solution or concept [15]. On the other hand, the TSO is able to supply the background information for both the decision makers and the public. In particular, the decision makers should be well informed about risks associated with various options to choose from, when it comes to the nuclear safety assurance.

1. Perception and evaluation of the nuclear risks

How people view risks and apply value judgments seems to be the most challenging factor of the decision making based on risk. The way we all treat risks depends on our perception of how they relate to us and the things we value. It has been found that there is a wide range of factors influencing this perception. Particularly important for man-made hazards are: how well the process (giving rise to the hazard) is understood, how equitably the danger is distributed and how well individuals can control their exposure and whether risk is assumed voluntarily [19].

Many researchers argue that the concept of risk is strongly shaped by human minds and culture. It may include the prospect of physical harm and other factors, such as ethical and social considerations, and even the degree of trust in the ability of those creating the risk (or in the regulator) in ensuring that adequate preventive and protective measures are in place for controlling the risks. For many new hazards, high quality risk assessments by leaders in the field often fail to reassure people even using all available data and best science and technology. The other thing is that many of risk assessments cannot be undertaken without making a number of assumptions such as the relative values of risks and benefits or even the scope of the study.

The studies have established that hazards give rise to concerns which can be put into two broad categories: the individual and societal. The individual concerns relate to how individuals see the risk from a particular hazard affecting them and things they value personally. Individuals may be willing to live with a risk that they do not regard as negligible, if it secures them or society certain benefits, they would want such risks to be kept low and clearly controlled. Societal concerns cover the risks from hazards which impact on society and which, if realized, could have adverse repercussions for the institutions responsible for putting in place the provisions and arrangements for protecting people, e.g. Parliament or the Government. This type of concern is often associated with hazards that give rise to risks which, were they to materialize, could provoke a socio-political response, e.g. risk of events causing widespread or large scale detriment or the occurrence of multiple fatalities in a single event. Typical examples relate to nuclear power generation, railway travel, or the genetic modification of organism.

In order to specify the safety goals in a quantitative manner, concrete numerical values describing the level of different risk indicators have to be evaluated first. For that purpose the common concept of risk must be expressed in more mathematical terms. Thus the generally accepted definition of risk is described by the equation below:

$$R_i = P_i \cdot C_i , \tag{1}$$

where R_i is the risk associated with an accident sequence i, while P_i describes the probability of the sequence i and C_i specifies the magnitude of the consequences corresponding to its occurrence.

When the consequences from an accident sequence i can be specified by a continuum of outcomes between x and $x + \Delta x$, the risk density $R_i(x)$ of magnitude $C_i(x)$ can be defined [10].

In such a case usually more important becomes the risk of damages exceeding the acceptable magnitude $C_i(X)$. This risk is the complementary cumulative distribution function for accident sequence i, described by the equation below:

$$R_i(\geq X) = P_i \sum_j \int_X^\infty C_{ij}(x)dx , \tag{2}$$

where $C_{ij}(x)$ includes a variety of predicted consequences of type j caused by the event sequence i. This factor is especially important in the case of severe release of radioactivity, when more than one type of potential damage could occur and they all have to be taken into account during the nuclear risks management [10].

Risks, generated by nuclear facilities, can be analyzed in details by making use of PSA (Probabilistic Safety Assessment) methodology. It includes identification of possible initiating events leading to the potential accident, specification of expected accident scenarios as well as an estimation of their probability and consequences. The PSA methodology has been elaborated in the 70's and it is being used and developed until now [38]. By using these methods the individual and societal risk profile of installation can be obtained and compared with current standards and required criteria [2, 21, 39].

It should be emphasised that the individual risk estimation is to calculate the risk to any individual who lives within a particular distance from a plant; or who follows a particular pattern of life that might subject him or her to the consequences of an accident. In making such an estimate the first question concerns how likely is an accident in the first place, and for this it is necessary to consider the likelihood of each important kind of plant failure. Data on the reliability (i.e. failure rates) of plant and particular components are collected and computerized to assist in such studies. Account has to be taken for the reliability of human beings in the design, construction, testing, operation, maintenance, and modification of such plant and components. Then the results of particular failures, e.g. how much toxic gas, or flammable substance, or radioactivity would be released, have to be considered. It is then necessary to calculate how such releases would be likely to affect a hypothetical person who was at some particular spot, taking account of the possibility that he or she might be in or out of doors; what dose would be received, and what harm would this do. Such calculations have also to take account of the behaviour of substances under different weather conditions. Population and sometimes transport patterns have to be considered. Finally, the chances of harm from all significant failure causes have to be summed up to give the overall level of risk from the installation. Only when such complex studies and calculations have been made it is possible to predict the chance that any individual living within a particular radius, or behaving in a certain way, will be injured by an accident. Such calculations are referred to as individual risk calculations, and enable us to say things like a person who lives within half a mile radius of such and such a plant has a chance of x per annum of being injured from an accident at the plant.

According to the different forms of hazard for which calculations are made, there are various possible ways in which people might be injured. They might die more or less instantaneously from the effects of explosions, fire or toxic gas release. Radiation is a different case, since unless the dose is extremely large death within a few weeks or even years would be extremely unlikely. What could happen is that, depending on size of the doses, a proportion of the people receiving them would develop a cancer some years after the exposure took place or possibly pass on a genetic abnormality to some of their descendants (a number of non-radioactive chemicals can cause the same sort of effects). So, by and large, the risk that an individual experiences from radiation exposure is to increase somewhat that person's chance later in life of developing a cancer,

which might or might not be treatable. This needs to be borne in mind when comparing the effects of exposure to ionising radiation with the effects of conventional accidents, which are immediate.

To estimate large events, we use the term societal risk, and in doing so, we have to consider not only the many different forms an accident could take, but the multiple consequences involved and their cost or severity. In principle at least, the different forms of harm that could follow from a very large accident could be added up and given a money value, provided of course that one is prepared to attach a value to the loss of human life [18].

Then effectiveness of engineered safety systems, their reliability as well as adequacy of safety procedures and countermeasures availability can be assessed. Moreover, the main weaknesses of nuclear systems and the most probable sequences of undesired events can be also identified early at design and pre-commissioning stage, which gives a chance to successfully preventing their occurrence during plant operation. It should be noted that some engineering aspects important to safety may not be explicitly addressed in the safety analysis. For some of these aspects, no well-defined acceptance criteria are available and therefore the assessment of the compliance with the safety requirements is based on a good engineering judgement.

2. Safety assessment for facilities and activities

In general ensuring safety of nuclear installations and activities is reducing to acceptable level the radiation risk for people and environment, they generate during their whole life cycle. Comprehensive safety assessment is an indispensable mean facilitating to achieve this goal. IAEA set up 24 principles for recommended safety assessment including its goal, scope. procedures and uses [32]. In particular the principles state the following:

- The responsibility for carrying out the safety assessment shall rest with the responsible legal person, i.e. the person or the organization responsible for the facility or activity.
- The primary purposes of the safety assessment shall be to determine whether an adequate level of safety has been achieved for a facility or activity and whether the basic safety objectives and safety criteria established by the designer, the operating organization and the regulatory body, in compliance with the requirements for radiation protection and safety as established in the International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, have been fulfilled.
- The results of the safety assessment shall be used to specify the programme for maintenance, surveillance and inspection; to specify the procedures to be put in place for all operational activities significant to safety and for responding to anticipated operational occurrences and accidents; to specify the necessary competences for the staff involved in the facility or activity and to make decisions in an integrated, risk informed approach.

Figure 1 shows the main elements of the safety assessment process. Before proceeding safety assessment, proper setup has to be prepared, which includes ensuring the necessary resources (e.g. sufficient number of specialists and adequate funding), information (e.g. details of design and construction of the facility) and analytical tools (e.g. computer codes for carrying out the safety analysis). Moreover the safety limits must be defined in the national regulations in order to assess if the safety of the facility or activity is adequate or not.

After the preparation process there are several features to be assessed including the possible radiation risks associated with the facility or activity, all relevant safety functions performed to prevent or mitigate the consequences of undesired events, site characteristics relating to the safety, available measures in place to protect people and the environment from harmful effects of the ionizing radiation as well as some engineering aspects (e.g. quality of safety related equipment) and possible human errors.

The safety assessment covers also checking whether the basic safety principles, like defence in depth (DID) philosophy, safety margins and multiple barriers rule, are efficiently implemented. All these aspects will be described in details and discussed in this article in the context of the decision making process.

Another part of the safety assessment are the safety analyses. The full range of undesired initiating events, that could occur over a broad range of operational states (including different levels of availability of the safety systems), is addressed in such studies (Tab. 1). In general there are two complementary methods to perform them: the deterministic (DSA – Deterministic Safety Assessment) and probabilistic one (PSA). The major objectives and methodology as well as differences and limitations of this two approaches will be analyzed in this paper. However, regardless of approach these analyses aim to verify whether facility or activity is in compliance with safety criteria, defined by the national regulations and the regulatory body requirements.

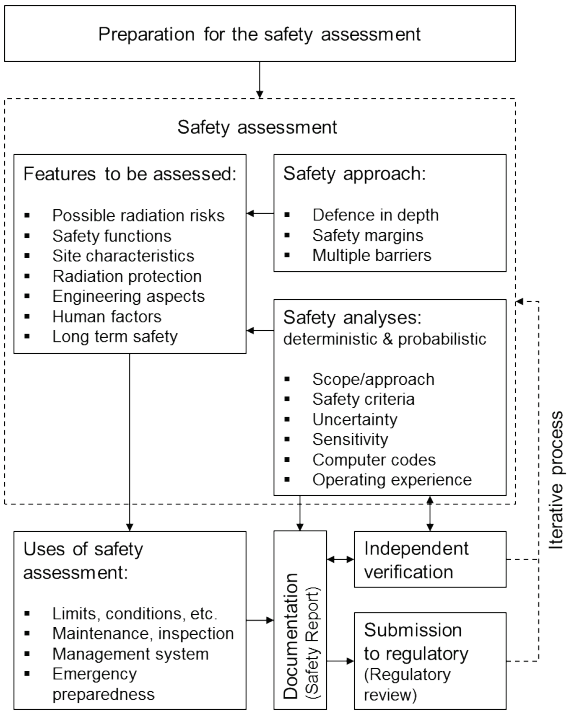


Fig. 1. Overview of the safety assessment process [cf. 32]

Table 1. Possible subdivision of postulated initiating events [31]

Occurrence (1/reactor year)	Characteristics	Plant state	Terminology
$10^{-2} – 1$ Expected over the lifetime of the plant	Expected	Anticipated operational occurrences	Anticipated transients, transients, frequent faults, incidents of moderate frequency, upset conditions, abnormal conditions
$10^{-4} – 10^{-2}$ Chance greater than 1% over the lifetime of the plant	Possible	Design basis accidents	Infrequent incidents, infrequent faults, limiting faults, emergency conditions
$10^{-6} – 10^{-4}$ Chance less than 1% over the lifetime of the plant	Unlikely	Beyond design basis accidents	Faulted conditions
$< 10^{-6}$ Very unlikely to occur	Remote	Severe accidents	Faulted conditions

The deterministic analyses (DSA) require determination of the minimum margins to the acceptance criteria for each group of postulated initiating events and sequences. Then an adequate set of conservative or best estimate assumptions for the initial and boundary conditions should be used.

This type of safety analysis covers only those combinations of transients whose frequency remains the design basis accidents. Thus the time span of any considered scenario should extend up to the moment when the plant reaches a safe and stable end state.

The PSA studies provide estimations of both probability and consequences of an accident scenarios possibly leading to the core melt and radiological releases to the environment i.e. for beyond design basis accidents and severe accidents.

Results of these studies should be additionally verified by the independent organization in order to ensure that there are neither oversights nor mistakes. In general, after verification process the results of deterministic studies complemented by some PSA results on beyond design basis accidents and severe accidents are included into the overall Safety Assessment Report (SAR). This report contains also another important conclusions from the safety assessment on limits and conditions of the facility operating or the carried out activity, maintenance schedule, management and emergency preparedness.

The SAR, when completed, is then submitted to the regulatory body, authorized to its acceptance, rejection or to request additional revisions. Without acceptance of the SAR any nuclear facility cannot operate and nuclear activity can no longer be carried out. This is also a condition for successful completion of the licensing process of new installations and activities to be launched in the future.

3. An integrated risk informed decision making

The fundamental objective of nuclear safety assessment is to protect people and the environment from the ionizing radiation. For that purpose the risks associated with nuclear power plants, throughout their life cycle, must be maintained as low as reasonably practicable. It means minimizing the radiological exposures from normal NPP operation, preventing potential nuclear accidents and mitigating the consequences when they occur. Moreover, the design weaknesses, can be identified before the nuclear power plant construction. It gives a chance to abandon technology, which does not meet the specified requirements and thereby does not provide appropriate safety level.

Since there are various factors affecting the safety of nuclear power plants, different techniques are used to assess the risks associated with them. The traditional approach to safety analysis is based on the deterministic principles, that underlies the design and operation of the nuclear power plants. Its philosophy is to ensure that the design is fault tolerant, to adequately meet a defence in depth rules, to emphasize safety acceptance criteria and to maintain adequate safety margins even during a postulated system failures. Finally, the objective of deterministic safety studies is to demonstrate that the designed barriers will prevent an uncontrolled release of radioactive materials to the environment for all plant states assuming the conservative approach [31].

Nevertheless, there are also safety issues requiring both the deterministic and probabilistic assessment. As an example, equipment qualification of nuclear power plant components can be discussed. It must be demonstrated, basing on deterministic approach, that the performance of equipment required to survive design basis accidents, is adequate [31]. In order to be sure that the systems and components crucial for nuclear safety will perform their function properly, according to the design both under normal operational conditions as well as during an accident, it is necessary to check their resistance to the accident conditions [14]. This activity is one of the defence in depth methods for protection against the release of radioactive materials and preventing failures of equipment due to hazardous service conditions, e.g. high temperature, humidity and radiation fields or high vibration due to earthquake. Moreover, the time of exposure and the ageing process of equipment should be also taken into account in that kind of analysis [20].

However, while the deterministic analysis answers question if the safety margins are retained during a postulated accident, the probabilistic approach is able to predict the occurrence frequency of such an accident. Therefore, the probabilistic assessment of equipment failure frequency has been recognised as an important factor of the qualification process next to the deterministic study. Furthermore, the priorities for equipment qualification may be dictated by the predicted consequences of specific component failures and their impact on overall nuclear safety. These factors could be assessed by probabilistic methods to identify the increase of public risk as a result of the postulated failures [20].

Nowadays, there is a general consensus that the Probabilistic Safety Assessment has reached the status of methodology mature enough to strongly influence the design and operation of nuclear power plants. It is being used to complement the deterministic approach and to provide additional insights that would not otherwise be available. Therefore, it is believed that its usage by regulatory bodies in the risk informed regulation concept can result in reduced threat for the public health [29]. Thus the international standards indicate that the results of the safety assessment have to be used in order to make decisions in an integrated, risk informed approach, by means of which the results from the deterministic studies, probabilistic insights and any other requirements are combined in making decisions on safety matters in relation to the nuclear facility or activity [32]. An integrated risk informed decision making process (IRIDM), if performed in balanced and comprehensive manner, should bring transparency and auditability to complex decisions. However, its applicability depends strongly on appropriate integration of a number of differently weighted elements [36].

The IRIDM process has been originally defined as a modern, systematic approach to identification and balanced integration of the major contributors influencing nuclear power plant safety [36]. However, the universality of its methodology makes it applicable to all types of nuclear facilities and activities that give rise to radiation risks, including research reactors, nuclear installations as well as the use of radiation and radioactive sources, the transport of radioactive material and the management of radioactive waste. Additionally, the IRIDM process has been recognised as a flexible tool, which after appropriate adjustments, can be successfully applied to the non-nuclear technological installations [3].

The main concept of the IRIDM process has been developed in order to support utilities and regulatory bodies in both making right decisions on safety issues for nuclear facilities as well as prioritising their own tasks, according to the significance of risk associated with different fields of their activity.

In case of plant operators there is an additional reason of their interest to the IRIDM methodology implementation in the management process, economical optimisation of their activity. However, the transparency of this approach to decision making and the explicit consideration of risk, makes the IRIDM process useful for the international nuclear community as a whole, including designers, suppliers, licensees, operators and technical support organizations.

Usually, when an unique, non-routine decision on safety matters in relation to the nuclear facility or activity has to be made, qualitatively different insights must be taken into account together, including deterministic and probabilistic outcomes, regulatory requirements, economic, social and other safety important factors. Additionally, application of these approach to physical security is now being considered by the international community.

Finally, one can define the IRIDM process as a comprehensive way of making decisions about modifications of the design or procedures, which are related to safety of nuclear facilities and activities, as well as changes in the security systems in order to reduce the impact of a terrorist threat. Safety and security issues, when considered together in an integrated manner, should

lead to coherent solutions, which means that enhancements made in these areas cannot adversely affect, but assist each other.

Moreover, the integrated approach to the decision making process seems to be especially useful in such cases, when there is a number of different options leading to acceptable results. Then the risk informed analysis of multi attribute safety, security and regulatory issues is powerful enough to identify the expected optimum solution.

4. Basic framework and key elements of IRIDM

Since the general idea as well as the main objectives of the risk informed approach to decision making seem to be clear and reasonable, the formal framework of this process is needed to identify and describe in details the interrelations between its key elements. The implementation of a commonly known scheme of the decision making allows to review the fact-based grounds of once made decision and, if required, its reconsideration.

4.1. Characterization of the issue

According to the basic framework, describing the IRIDM process (Fig. 2), the clear and unambiguous definition of issue to be resolved is crucial to identify which elements or information are relevant to making a decision. The issue characterization should provide additionally its necessity evidence as well as an impact on the facility operation and safety, which covers required design changes, security arrangements, organizational model, internal procedures, man-machine interactions and other factors, that potentially might be dependent on the decision related to the considered matter.

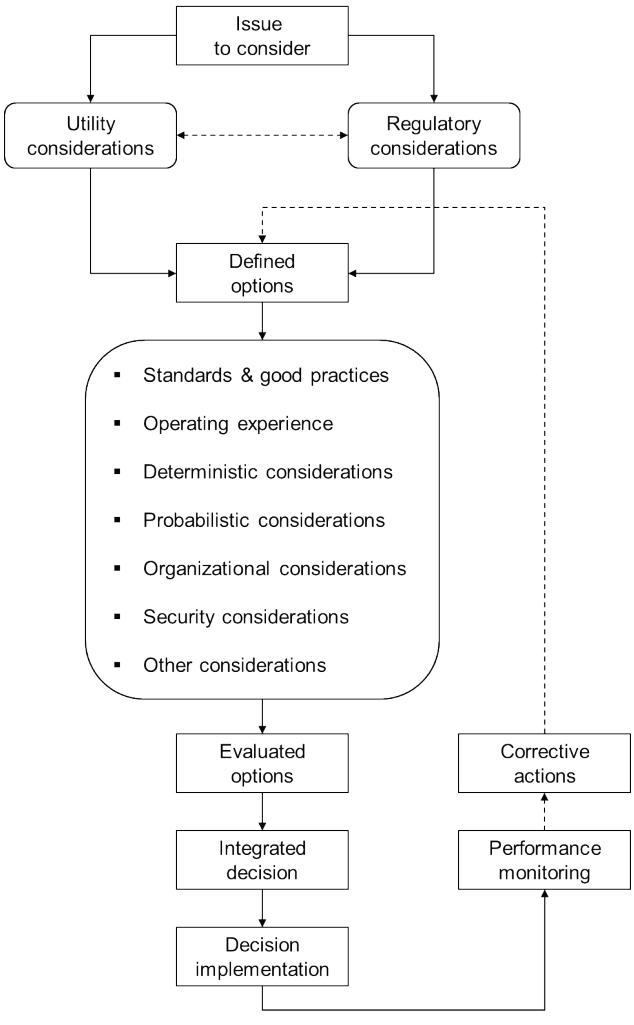


Fig. 2. Organizational framework and key elements of the IRIDM process [cf. 36]

4.2. List of options to choose from

After defining the problem, consideration must be given to the requirements of both regulatory body and licensee in order to draft a preliminary set of options, that potentially could solve the issue. However, to make the final decision and choose one from the preliminary set of options, specified inputs must be established, namely the standards and good practices, operating experience, deterministic and probabilistic considerations, organizational and security systems and other factors such as research or economic insights. Relative importance of each element depends upon the decision to be made and should be weighted either qualitatively or quantitatively. This process leads to evaluation and to reduction of the preliminary set of options. Finally one of them should be chosen, implemented and monitored. If the performance of just implemented decision is not satisfactory corrective actions should be undertaken and the list of options needs to be redefined.

4.3. Standards and good practices

The basic principle of decision making is the compliance with legal requirements in any case under consideration. Thus the national legislation, including the regulatory requirements, must be strictly respected. Besides of mandatory regulations there are also generally accepted international standards and procedures, developed by professional bodies like government agencies or engineering organizations. These standards are usually based on the long operating experience and practical implementations of IRIDM. In such a way best practices are described and published in the form of official guidance and their considerations has been recognized as a major factor in many IRIDM activities.

4.4. Operating experience

The operating experience is also important in the context of the consequences prediction. Lessons learned from the undesired events that have occurred at the nuclear power plant itself or at the similar facilities provide the information what can happen and how to prevent it. This knowledge is applicable in all other IRIDM inputs assessment, including both deterministic and probabilistic insights as well as the organizational, security, research and economic considerations [23, 26].

4.5. Deterministic considerations

The deterministic principles, that underlie the safety design and operation of nuclear facilities, require firstly the definition of safety criteria to be meet, secondly the appropriate level of defence in depth to be guaranteed and finally large safety margins to be ensured. The safety criteria mean a set of values, describing crucial parameters and performance of the nuclear installations, in compliance with which its safety is justified e.g. maximum acceptable peak cladding temperature of the fuel rods. These requirements cover also the limits of the radiological doses for the operating staff and for the public as a whole, which cannot be exceeded. In order to determine whether the predefined IRIDM options meet all deterministic acceptance criteria, established by the regulatory documentation, the design basis accident (DBA) analysis must be performed [21, 36, 37].

The DBA analysis starts from postulating a set of initiating events, which – if occur – could potentially lead to a nuclear accident. Then the different accident scenarios are verified in the context of the design capability for protecting against such events within the limits specified by acceptance criteria. The scenarios depend on the performance of safety systems designed to mitigate the consequences of undesired events and to prevent the accident in any case. Therefore additionally, single or multiple failures of these systems are postulated during the DBA analysis. Moreover, the conservative assumptions

are made in such a study in order to demonstrate that the relevant safety functions can be provided despite the postulated failures even in the worst case [37]. To meet such strict requirements it is necessary to maintain appropriate safety margins and to implement the fundamental rules of the defence in depth (DID) methodology.

The DID approach to the design and operation of nuclear power plants aims to ensure that there are multiple safety systems and barriers, designed to prevent core damage, containment failure and consequently release of radioactive material outside the plant. Therefore, the redundancy of safety systems must be guaranteed, which means their physical separation and diversity. In other words, almost each safety system is able to play more than one role, depending on time and type of an accident, which means it can be used to perform different functions while different accident scenarios. It implies that one safety function, crucial to prevent the consequences of undesired event, can also be performed by a few separated technical installations using different equipment, which ensures the alternative way to the accident counteraction. It is also a good practice to use different physical processes in the alternative systems intended to perform concrete safety function, e.g. reactor shutdown can be achieved by both dropping control rods into the core and injecting boron into the primary coolant system. In such a case the function of a mechanical system can be taken over by the chemical one.

Another issue is the independence of safety systems, which is crucial to avoid the common cause failure of a few installations at the same time. In particular, it is important to provide redundant electrical power supply for each safety system, meaning that at least two separated external sources are needed. However, the active systems are to support the five physical barriers between the radioactive material and the environment, namely: fuel material, fuel cladding, boundary of primary loop (including reactor pressure vessel), containment and reactor building [27, 28]. Any change of the NPP configuration that could bring some benefits, but also may lead to loss any of DID barriers is not acceptable according to IRIDM.

Safety margins describe the difference between the limiting values of assigned parameters and their actual values. Since the limiting values must not be exceeded, because it would lead to failure of important structures, systems or components (SSCs), existence of appropriate margins assures safety of nuclear power plants in all modes of operation. The highest priority is given to those safety margins, that are related to physical barriers protecting against the release of radioactive material. This safety margins are commonly expressed as a maximum fuel temperature, peak clad temperature, its oxidation level, reactor coolant pressure, stress and material condition, reactor containment pressure and temperature, radiological doses to the staff and the public. However, the precise determination of safety margins for these parameters is often very hard to obtain or even impossible. It is because, in many cases, both the limiting values of the relevant parameters and their actual values are provided by the calculations with usage of complex computer codes.

Since the computer simulations provide the results with uncertainties and not the exact real values, there are two options to assess the appropriate level of safety margins. First one is based on conservatism in calculations, which means pessimistic approach during the whole process (Fig. 3). This approach is assumed to determine the safety margins much lower than they actually are, which is not optimal from the economic point of view, because it needs some additional resources to balance the very pessimistic assumptions [25]. Therefore the second solution, leading to the best estimation of safety margins, is more and more commonly applied. This approach, based on realistic assumptions instead of the pessimistic ones, is additionally supplemented by the uncertainty analysis. As a result the actual value of a particular parameter is estimated by the calculated one including the upper bound of its uncertainty.

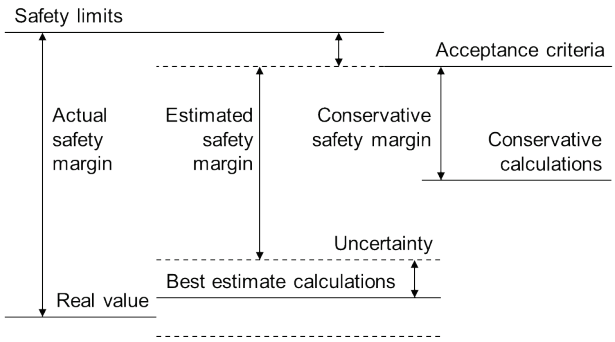


Fig. 3. Different approaches to the assessment of safety margins [cf. 25]

In both the pessimistic and best estimate approach to safety margins, the criteria established by the regulatory body are usually more restrictive than the actual limiting values, which makes the overall assessment more conservative. Regardless of the approach to assessing the safety margins, every time when IRIDM decision leads to its reduction it must be subjected to a detailed examination.

4.6. Probabilistic considerations

Probabilistic analysis is intended to complement deterministic approach by identification of all contributions to the risk in an integrated model that otherwise may be overlooked. The outcomes from these considerations include both quantitative and qualitative insights to the IRIDM process.

Probabilistic Safety Assessment (PSA) is an essential element of IRIDM because it provides relevant information on all possible initiating events, internal hazards (including fires and floods), external hazards (including seismic events), system failures and human errors, that would potentially lead to a nuclear accident. Afterwards various sequences of the accident progress can be identified depending on the success or failure of safety systems required to mitigate the consequences of undesired, but predicted events. These sequences are then depicted in a form of an event tree (Fig. 4).

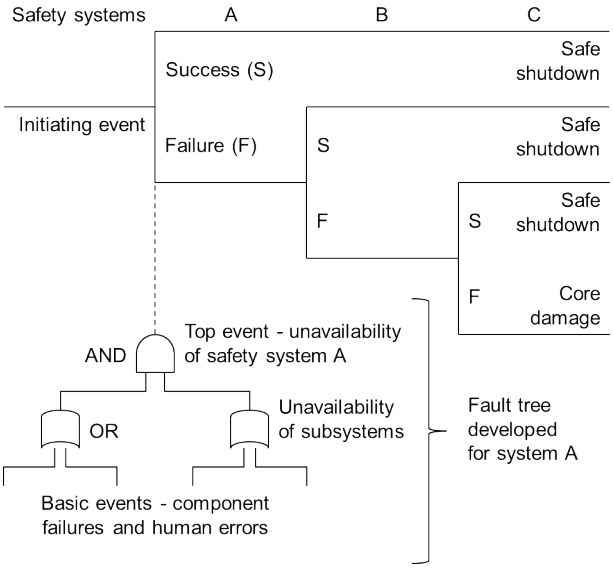


Fig. 4. Simplified diagram of PSA Level-1 – event tree and fault tree construction

Since the reliability of particular safety systems can be obtained based on probabilities of basic equipment failures and human errors, the identified accident sequences can be evaluated quantitatively as well. In order to quantify the event tree, it is necessary to develop a fault tree for each relevant safety system, by identification of basic events, i.e. equipment failures and human errors, and their relations. Moreover, the frequency of each basic event has to be assessed based on operational

experience or external database. It makes this approach capable of calculating the frequency of each accident sequence, and especially those leading to the reactor core damage.

The methodology described above is related to PSA Level-1 and aims to calculate the core damage frequency (CDF) [33]. PSA Level-2 models phenomena that could occur following the core damage, challenges to the containment integrity and transport of radioactive material in the containment. At this stage potential ways for the radioactive releases from the nuclear facility to the environment are investigated. As a result large release frequency (LRF) can be estimated in the same way as those for the core damage frequency [34]. Level-3 PSA models the consequences of such releases in order to estimate the risks to the public health and societal risks like the contamination of land or food.

Thus the adverse consequences of postulated undesired events may be described as a function of various factors like equipment failures, human errors or weather conditions. Since these factors are statistical, the technical design features and internal procedures must minimize the risk. It implies that the IRIDM decision on changing installation design or operational procedures should not significantly increase neither the CDF nor LRF. Often instead of frequencies, which describe the expected number of occurrences per year, dimensionless probabilities or conditional probabilities are used to present the PSA results.

Besides of quantitative PSA outcomes, i.e. CDF and LRF, there are also qualitatively important insights. It was recognized, that the PSA logic model itself, even without of the reliability data, is an important source of relevant information on safety issues. The main advantage of this methodology is the comprehensive approach to all facility systems, which allows to conduct analysis of the interrelations between very basic components and their impact on overall safety.

First of all, the relative impact of IRIDM decision on the facility can be observed by simple modification of the PSA model with accordance to the considered IRIDM option. Comparing PSA models for both cases, before and after modification postulated by IRIDM, it is often possible to state if the changes are qualitatively positive or negative, when it comes to the safety. For example if the proposed changes lead to reduce redundancy level of electric power supply the core damage frequency will certainly increase significantly. Additionally, based on the PSA logic model it is possible to indicate these systems, availability of which would be especially affected by the proposed changes. It is also possible to check how many different events could be potentially caused by each single failure or human error.

On the other hand so-called minimal cut sets (MCSs) can be specified as the minimal combinations of component's failures and human errors leading to undesired state of particular safety systems or the installation as a whole. The MCSs review of the probabilistic model allows to identify if there is a compliance with the single failure criterion, which is one of the fundamental design principles and aims to ensure that there are no single events leading directly to the whole system unavailability.

4.7. Organizational considerations

Organizational issues are increasingly important and need to be considered when making a decision within the IRIDM process next to the safety analyses. Typical inputs from these considerations include information related to the management systems under both normal and emergency operating conditions. In order to enhance safety the management process should cover a wide range of aspects including competence development by appropriate trainings for staff, systematic inspection of equipment maintenance and tests, taking care of good communication and cooperation between staff as well as refinement of internal procedures and many other organizational actions [36].

However, from the IRIDM point of view, it is important to identify how does the proposed option might affect an existing organizational system and how many efforts needs to be made in order to implement and monitor the decision. Finally, even if there is a formal readiness to many organizational changes, like e.g. employment increasing, specialized trainings for new staff, equipment modernization and development of additional procedures, the main question is if there is enough time and financial resources to achieve the goals. If the answer is not, the IRIDM option will be rejected, irrespective of good results from the preliminary safety studies.

4.8. Security considerations

Physical protection of the nuclear facility and the nuclear material on the site is crucial to reduce the potential threat of terrorist acts. However, since some interfaces between safety and security issues exist their proper integration in the IRIDM process is required. Therefore it is especially important to consider all security challenges related to the proposed IRIDM option in the context of their safety impact. Moreover, the security issues may be associated with new investments and structural changes, which should be also taken into account during the IRIDM process [35].

4.9. Other considerations

Although the IRIDM process has been assumed and developed as a set of concrete issues to be considered every time when non-routine decision needs to be made, its framework is not completely fixed nor limited to only those aspects, which were described above. There are also other special considerations, relevant for each particular problem, which need to be identified and included into the IRIDM framework. These additional factors could be related to workers irradiation risks during hardware modifications, economic costs and benefits of the postulated changes or the new results of scientific research.

The radiation doses, that would be received by the workers involved in the facility modification process, would need to be estimated for each of the options evaluated during the IRIDM considerations. Then the estimation results should be compared with the doses from normal operation and the difference would need to be calculated and included into the IRIDM process as an important factor. Consequently, the final IRIDM decision should ensure the minimization of the additional doses.

It is also a generally known statement that the safety measures have their economic effects, costs and benefits, that should be balanced. Although in general the safety issues are the priority and the acceptance criteria must be met in any case, some additional improvements may be blocked by insufficient financial resources. Resignation of heavy investments may be justified especially when there is a short remaining lifetime of the facility.

5. Uncertainty assessment in the IRIDM process

There is a general international agreement, that both the deterministic and probabilistic approaches, when considered together in a complementary manner, form a mature enough and comprehensive methodology of safety assessment. However their limitations should be also indicated.

In general there are two major types of the PSA uncertainties: aleatory (i.e. the inherent variability of the measurable physical quantities) and epistemic ones (coming from lack of complete knowledge about systems, processes and modelled phenomena). While the first type is irreducible, the second one (including parameter uncertainty, model uncertainty and completeness uncertainty) may be reduced over time by additional measures, testing and analyses. In this paper both aleatory and epistemic PSA uncertainties are discussed in the context of the decision making process.

The uncertainty analysis is also associated with deterministic studies and includes model simplifications, input data uncertainties and computational accuracy. Moreover there are some limitations related to availability of adequate hardware resources. All these aspects of the DSA uncertainties are discussed below in more detail.

5.1. Uncertainties of deterministic considerations

The deterministic studies, based on computer simulations, are very complex and need multidisciplinary knowledge and experience. First of all, the virtual 2D or even 3D model corresponding to the real system has to be developed. Then the whole volume occupied by the model is divided into discrete cells forming the volume mesh or nodalization. However, due to high complexity of such a geometry some general assumptions have to be made. The simplification of the system geometry implies the reduction of results accuracy at the very beginning of the analysis.

Another uncertainties come from input data. Usually the one who performs the simulation is not the one who do the measurements during the experiment. Lack of the measurement background information will certainly lead to make some assumptions when simulation setup is prepared. From time to time, some of the parameters necessary to put into the code are simply impossible to measure. This means, certain assumptions, generally conservative, have to be taken into account again. The problem is that every assumption (especially conservative one) introduces undesired uncertainty. Hence, the safety margin become blur and inexact. Also, in most of the cases the experiment is designed to prove existence of appropriate safety margins in real-life reliable conditions and not necessarily to support the DSA simulation which creates another space for speculations.

When the setup is ready to run, another source of uncertainties in deterministic analysis appears. This is a numerical calculation which always give an approximate, but never the accurate solution. Thus the physical phenomena, simulated in order to check if the safety margins are retained during the postulated accident, cannot be accurately described. The quality of results may depend on software, i.e. finite computational accuracy, introduction of empirical models, which not always fits the range of application, inaccurate implementation of methods from handbooks etc. may and surly will affect final results.

Finally, there is also an user effect issue that should be outlined. It is a quite common situation when two or more analysts are performing the same simulation, basing on the same input data, using the same software, but achieving different results. This is due to their experience, routine, perceptivity and so on.

Moreover, the more complex geometry needs to be mapped in details, the lower scale of mesh elements is required, which leads to increase of the computational domain. It is because the appropriate calculations are performed for each element in the volume mesh of a higher density. It provides the higher resolution of the results, but also the high performance computing is needed, which implies additional limitations related to computation time and availability of hardware resources.

5.2. Uncertainties of probabilistic considerations

The uncertainty analysis is even more integrated with the probabilistic approach. It is because its methodology is used in modelling of processes and phenomena, that can be described only statistically. Consequently, the initiating events, system failures and human errors, considered by the PSA studies, have a random nature and appropriate frequencies or probabilities of their occurrence have to be assessed.

Besides of the quantitative assessment, the PSA analysis itself bases on the development of event trees and fault trees linking the events through the logical gates (Fig. 4). Thus the uncertainties corresponding to the particular basic events can propagate in the whole logical structure influencing the top events probabilities. Consequently, both these elements, development of the PSA logic models and assessment of basic events frequencies, introduce some uncertainties, which could have a significant impact on the final PSA results [40].

Since the PSA uncertainties have different sources, there are also different types of them, aleatory and epistemic, which should be analysed separately. The first one is associated with the inherent variability of measurable physical quantities, which implies the random nature of the initiating events and component failures. Thus the aleatory uncertainties cannot be reduced neither by further studies nor even by enlarging of the data set, but they can be assessed based on the traditional data analysis.

Database enlarging can, however, improve the representation of the probability distribution of those stochastic variables, like time to failure or time to repair, for all components of the system. Then the Monte Carlo method can be used in order to assess the aleatory uncertainty as well as the mean value and variance of the top event probability. It can be accomplished by sampling of the probability density functions of stochastic variables corresponding to the particular failures [10].

The epistemic uncertainties arise when making statistical inferences from the data, due to a lack of complete knowledge about systems, processes and modelled phenomena. In contrast to the aleatory uncertainties, the epistemic ones may be reduced over time, by additional measures, testing and analyses, leading to increase the data set and the knowledge. There are three types of epistemic uncertainties in PSA: parameter uncertainty, model uncertainty and completeness uncertainty. The identification, understanding and consideration of these types of uncertainties is crucial for the comprehensiveness of PSA study and consequently for the IRIDM process [16].

Parameter uncertainties relate to the computation of the input parameter values, used to quantify probabilities of the events in the PSA logic model, given that the mathematical form of the model itself has been agreed to be appropriate. It is a common practice to characterize these parameters by using probability distributions instead of their point values. Thus the treatment of both aleatory and parameter uncertainties, requires a two-loops Monte Carlo simulation. The outer loop samples the epistemic variables, when the inner loop is to aleatory ones [8, 13]. In addition, the epistemic correlations, when the same parameter is used to quantify the probabilities of two or more basic events, should be considered. Otherwise, if the correlation between the events is neglected, the uncertainty of system failure probability would be underestimated [40].

Model uncertainties are related to such cases, for which no consensus approach or model exists. Thus, if the chosen model is not suitable to represent a particular aspect of the plant, the uncertainty of PSA results would also exist. It comes from a lack of knowledge of how the SSCs can behave under the conditions arising from an accident. It is because some of the phenomena being modelled are not completely understood yet. Moreover, for some of them, the existed data or other information were collected under different conditions than those expected during the postulated accident. Therefore the model uncertainties assessment usually needs the expert judgment [4].

Another issue is the completeness uncertainty. It represents those aspects that are, either knowingly or unknowingly, not addressed in the model. The omission of some aspects can result from the lack of suitable methodology for the analysis of them. The resources to develop a complete model may be also limited, which implies simplifications.

6. The general concept of the integration process

The main challenge of the IRIDM process is to indicate the best option solving the specified issue in a logical, structured, and comprehensive manner. This approach leads to transparency of the decision making process and allows to understand why and how the decision was reached, which factors were taken into account and what was their relative importance. The decision

made in that way, when documented sufficiently, is reproducible and can be verified by independent group of specialists [36].

In order to achieve an optimal and unbiased solution of the postulated issue, the appropriate integration of different IRIDM elements is needed. First of all, it must be demonstrated that the essential requirements are satisfied for each element separately. For that purpose an implementation of some additional safety measures could be required, but these improvements must not affect adversely the other IRIDM inputs.

However, since all key elements of IRIDM are somehow depended on each other, the integration process should be an iterative one and consideration should be given to all inputs again after one of them has been changed. If the proposed improvements leading to meet one of the safety factors adversely affect at least one another, one needs to consider an implementation of alternative safety measures to ensure the acceptability of all relevant factors.

Figure 5 depicts the combination of the deterministic and probabilistic elements, which is a part of the overall IRIDM integration process. The deterministic considerations answer question if the safety systems are able to meet their design intent properly and if the other requirements like defence in depth or safety margins are ensured. The PSA instead investigates all possible sources of equipment failures, human errors, internal and external hazards, which could lead to unavailability of safety systems or breach of the safety barriers.

There are also some interfaces between these two elements. It is enough to mention that deterministic calculations are used to specified the success criteria for each safety system, that are required as an input to the PSA analysis. These success criteria mean the minimum conditions, under which the designed safety system is recognized to be sufficient to perform its functions properly, even if there are some failures of its single components. Basing on that criteria, the total system unavailability or severely limitation of its functionality can be defined, which is crucial for system reliability assessment under accident conditions.

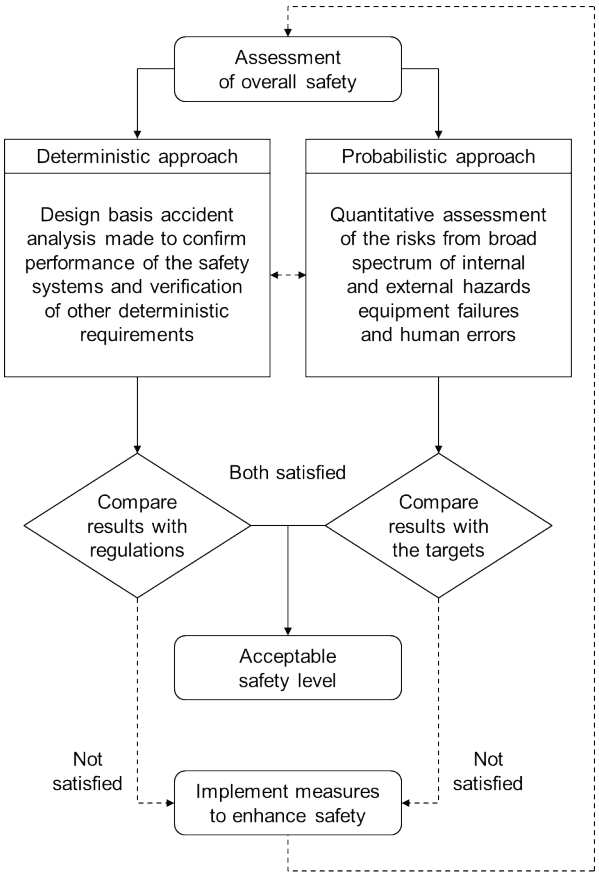


Fig. 5. Integration of deterministic approach and probabilistic insights [cf. 36]

On the other hand, the probabilistic considerations are able to indicate additional initiating events, which should be included into the deterministic studies. Moreover, the PSA methodology is used in prioritising of the events in order to focus more intensively on those cases that are more probable. It is also applicable to define assumptions for the so-called risk informed best estimate deterministic calculations, which are more and more commonly applied instead of conservative ones. The deterministic results are then compared with appropriate acceptance criteria given by the regulatory body, while the PSA insights are assessed in the context of risk minimization. Only when the requirements of both are satisfied the IRIDM option can be implemented.

Nevertheless, the major challenge of the integration process is to assess the relative importance of various qualitative and quantitative inputs in the single IRIDM implementation, as it will be described later in this paper.

7. IRIDM implementation and workflow process

The general framework of the IRIDM process, described in this paper, can be applied to decision making by all stakeholders involved in the nuclear industry, i.e. the regulatory bodies, NPP operators and technology vendors. However, some necessary prerequisites have to be met before implementing the IRIDM approach to consider a certain issue.

7.1. Preparation for performing IRIDM

Prerequisites of the IRIDM implementation may be developed as a consensus between the stakeholders (Fig. 6). Through the cooperation of the regulatory body, NPP operator and TSO, the risk informed safety policy needs to be established at the national level. While the ultimate responsibility for the policy lies as usually in the competence of the regulatory body, the cooperation between stakeholders has been recognized as an important aspect of the preparation process for the IRIDM performance.

The safety policy, prepared in that way, should cover the high level safety goals and acceptance criteria to be applicable in the future implementations of IRIDM [11]. It may also indicate possible ways to exempt from the specified regulatory requirements or even to changing them in very special cases, if these requirements are against the justified proposals or conclusions of IRIDM.

Once the national policy is approved the decision to apply IRIDM approach in the future activity of the stockholders can be taken. However the potential limitations of the IRIDM process in the specific organization has to be analyzed.

The major factors influencing the implementation of the IRIDM methods within the specified organizational structure are the following: relevant infrastructure, competence base and computational codes. Therefore the existing organizational structure, employees competencies, computational resources as well as the management system itself should be adjusted to carrying out the formal IRIDM process regularly before its first implementation.

Since the organizational changes, mentioned above, may cause many complex issues, the detailed IRIDM implementation programme needs to be developed within the organization in order to resolve them all in the structured manner. The programme for the IRIDM implementation should indicate the potential fields of its applicability first. It means that the range of issues should be defined by the regulatory body and shared between stakeholders. Then one needs to provide and develop the whole infrastructure suitable to perform and review the analyses covering the specified IRIDM inputs. This infrastructure then should be capable to understand the conclusions from that process. It requires the identification of the expertise areas to be covered and the assessment tools to be provided.

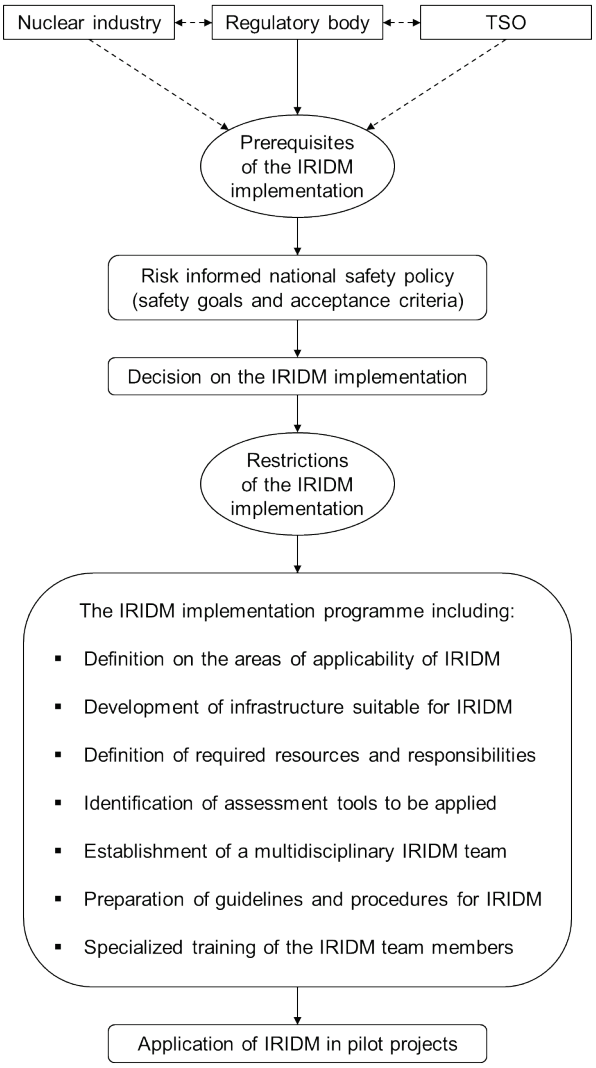


Fig. 6. Initial preparations for the IRIDM process implementation [cf. 11]

Another important issue is the division of responsibilities regarding IRIDM between individuals within the organization. It is a common practice in the industries, where various risks for the public exist, to train a group of leaders responsible for different types of them. Moreover, there are also specialists for financial risk assessment, responsible for minimization of the financial losses or bankruptcy probability. Thus, the risks associated with the industry should be interpreted not only in terms of the potential hazards, which poses some threats to the environment or to the public, but also in the context of decrease in production efficiency or financial losses, leading to the suspension or even cessation of the activity. This is the reason why the risk informed decision making process in the industry as a whole should be an integrated one.

The same approach is applicable in the nuclear industry through the explicit IRIDM implementation. First, the special IRIDM team needs to be established within the organization. Since the IRIDM process covers a wide range of issues, from technical, through economic up to the psychological ones, it is essential for the team to be multidisciplinary, which means its members should be specialists in their fields. Then the leaders, responsible for different IRIDM inputs, corresponding to various risks, should be selected from the team members. The leaders, however, are expected to be interdisciplinary, which means capable to understand and evaluate the significance of conclusions coming from different inputs, in the light of that type of risk, which has been assigned to them.

To fulfil its mission, the team needs to be intensively trained for implementing the IRIDM methodology into the real problems. However, while the understanding of the IRIDM principles is relatively simple, their practical application is usually very difficult. Therefore, besides of the general IRIDM training for the team as a whole, some specialised courses on various fields are necessary to be provided systematically for each group, according to its activity area within the team.

Moreover, the knowledge gained from the trainings and from experience as well should be documented in a form of guidelines describing the best practices for the IRIDM implementation. On that basis some internal procedures and tools can be developed for the teamwork improvement. After that it is recommended to carry out the pilot project in order to test the IRIDM methodology, review the team capability and verify the guidance and procedures in a realistic, but small scale preliminary study.

7.2. Implementation of the IRIDM process

Practical application of the IRIDM process requires a number of systematic steps and activities to be performed in a logical order according to the overall workflow (Fig. 7).

The first stage, covering characterisation of the issue, drafting the initial set of options and formation of the IRIDM team, has been described above. However, it should be mentioned here, that for specific issues the permanent IRIDM team may be expanded by additional, even external, experts in order to provide required technical support or specialized consultations.

The second step of the IRIDM workflow is the analysis of its feasibility for the specified problem to be solved. It aims to identify all potential obstacles associated with the specific issue under consideration. It includes the complexity of the problem, period of the time required for IRIDM performance in the context of deadlines and terms imposed by the regulatory body, as well as the availability of financial resources for the comprehensive studies. Thus the IRIDM implementation may be abandoned because of lack of specialists, lack or incompleteness of information regarding the IRIDM inputs, high uncertainties of the analysis methods applied in specified area or lack of appropriate software tools. In such a case one needs to try another method to solve the issue, the less expensive or less time-consuming one, keeping in mind that it also means less comprehensive than the IRIDM is.

However the answer to the question, if the IRIDM process is feasible for the specific issue, is not always simple yes or not. Usually, only some options selected from the initial set of solutions to be considered are rejected at this stage, while the others can be analyzed in the next stages of IRIDM.

After the decision has been made to implement the formal IRIDM approach into the specific issue, one needs to start initial preparations for the assessment of the identified inputs required by the decision making process. It is important to ensure the following things: completeness of detailed technical information, sufficient quality of the data with specified uncertainties as well as appropriate validation of analytical tools and models used in the IRIDM process. All inputs should be evaluated for all decision options to check whether the proposed solutions meet the existing acceptance criteria. Furthermore, it is a good practice to provide an independent review of once made analysis in order to verify the results credibility.

The next stage of the IRIDM implementation is the integration process. It aims to determine the weights to be attributed to each of the inputs in the IRIDM process. However, the weighting scale for the inputs needs to be established first. The weighting scale describes the range of values for weighting factors assigned for particular types of risk. In practise there are two general ways for the factors assessment. Qualitative or quantitative approach can be applied to achieve it. The first one is to divide the inputs into three categories according to their significance for the considered issue: high, medium and low. The alternative way is to assign them the numerical values from 0 – negligible impact, up to 10 – the highest impact on the decision. During the weighting process one needs to remember that the factors are to specify the relative importance of each input in relation to the others [11]. Moreover the weights assigning is quite

subjective, based on the engineering judgment and dependent on the particular issue being addressed. Therefore various techniques have been developed in order to improve this process so that it can be carried out in a clear, understandable and reasonable manner [1, 7, 17].

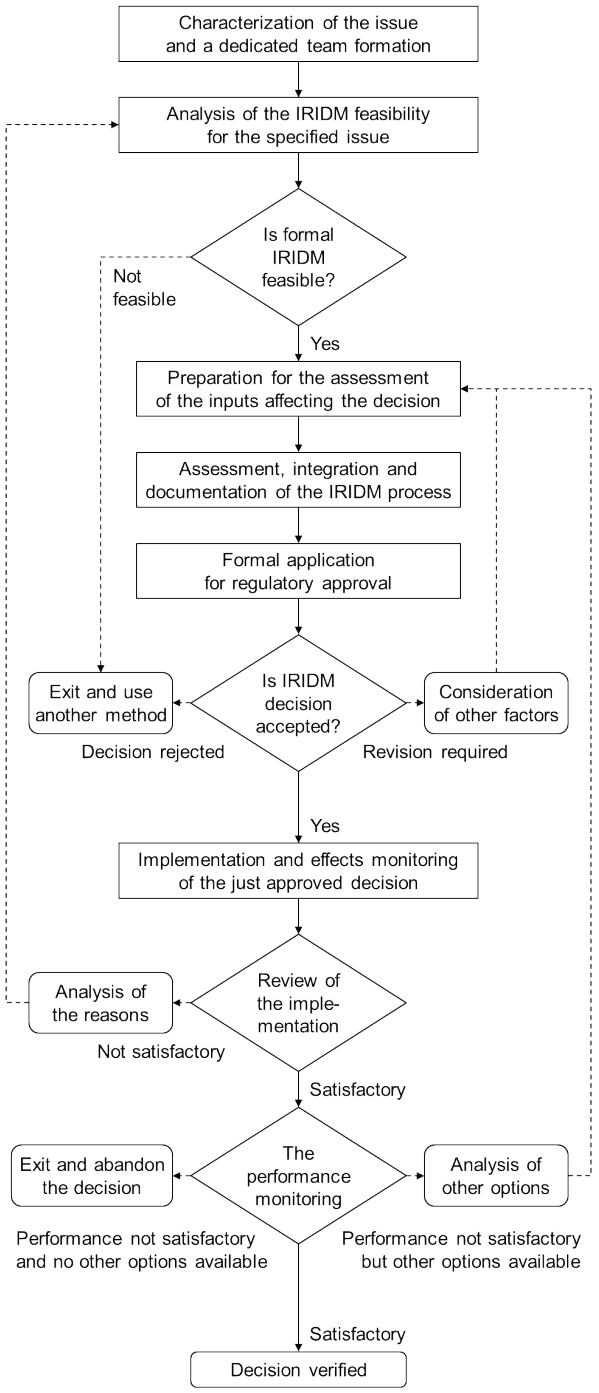


Fig. 7. The overall workflow of activities in the IRIDM process [cf. 37]

As a result of the weighting process the inputs can be ranked by their relative significance for the considered issue. Then one can determine the impact of the various IRIDM options on the particular inputs. Usually at the beginning the qualitative impact assessment is performed. It means each option needs to be analyzed in the context whether it has a positive or negative impact on each particular input. After that the score can be assigned for each option in the range of values from -10 (the highest negative impact) through 0 (no impact) up to 10 (the highest positive impact). It allows to evaluate the option i by the total weighted score (S_i) described by the equation below:

$$S_i = \sum_j w_j \cdot s_{ij}, \tag{3}$$

where w_j is the weighting factor of the input j and sij is the impact of option i on the input j based on the scoring approach. Consequently, all initially proposed options can be ranked by that factor and the best solution can be selected. The recommendation is given for that option which has the highest positive impact or, if all are negative, the lowest one.

Having selected an option, final documentation of the IRIDM process and its results should be prepared. This documentation is essential for the IRIDM implementation while making it traceable and reproducible. On this basis, formal application for approval of the selected solution can be addressed to the regulatory body, which has the necessary authority to its acceptance, rejection or to request additional revisions.

Since IRIDM is an iterative process, the implementation of the decision should be reviewed and its performance needs to be monitored. If the real implementation is found to be different than described in the documentation, the potential reasons should be analyzed. In such a case one needs to go back into the feasibility stage. On the other hand, if the performance of well-implemented option is not satisfactory, the other one should be considered.

7.3. Risk informed regulation

Although the IRIDM approach has been developed to be applied in making decisions on safety issues of nuclear facilities, it may be also useful to specify the way in which a regulatory body should carry out its activities.

As an example the risk informed process of the national regulations improvement can be considered with accordance to the diagram depicted in the figure 8. First, the existing regulations should be reviewed in the terms of possible changes potentially leading to the safety improvement. As a result the list of requirements, that are candidates to be modified, can be developed. From that list those elements, for which the risk informed approach is suitable, should be identified and prioritized according to a number of factors including the risk information. It means the regulatory body can weight these factors and make a judgment on priorities of the proposed changes based on their impact for safety as well as time and resources needed for their full implementation. Different options for modification of particular requirement can be also considered and scored.

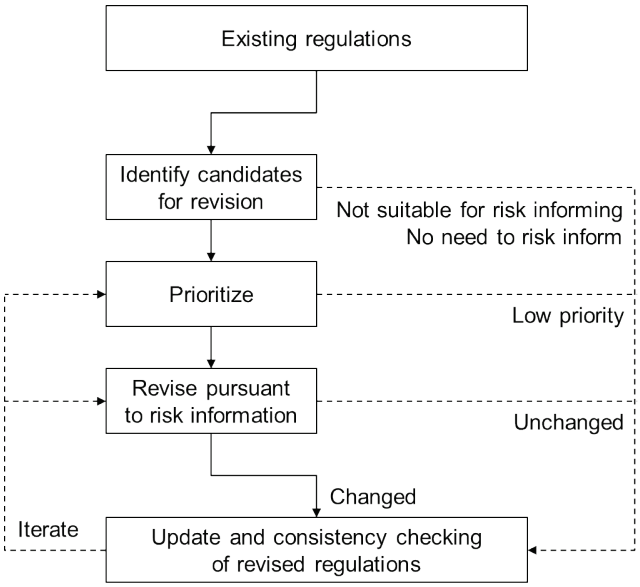


Fig. 8. Risk informed process of improvement the national regulations [cf. 29]

The last step aims to verify whether the approved modification of specific requirement is not in contrary to the other regulations. Since this is the iterative process one can back to the previous steps and select another regulations to be checked for possible improvements.

8. Conclusions

Making a complex decision should always be a structured process, not just an act, especially when it comes to the public safety. In the nuclear industry an integrated approach to the risk informed decision making (IRIDM) is being promoted by such organizations as the International Atomic Energy Agency and the United States Nuclear Regulatory Commission (U.S. NRC).

In this article the fundamentals of the IRIDM process have been thoroughly described based on both the IAEA documentation and the U.S. NRC reports. Major benefits of complementary approach to the deterministic and probabilistic considerations have been specified here as well.

First of all, the PSA analysis is possible to determine whether any group of initiating events makes a contribution to the risk that is much higher than the others. It implicates greater levels of redundancy and diversity of that equipment, which is intended to prevent the most probable events.

Comprehensiveness of PSA is another advantage of such kind of studies. Since all initiating events and SSCs are included in a single model, it is possible to derive the relative importance of each of them explicitly and, what is sometimes even more important, their interrelations. The same applies to the interdependencies between the various levels of defence in depth implementation.

Although the IRIDM is widely regarded as a transparent, balanced, logical and consistent process, the limitations of this approach have been also indicated here.

9. The IAEA Safety Glossary

The IAEA Safety Glossary [30] is used to define and explain technical terms used in the paper:

Acceptance criteria – Specified bounds on the value of an indicator – characteristic of a structure, system or component that can be observed, measured or trended – used to assess the ability of a structure, system or component to perform its design function.

Availability – the fraction of time for which a system is capable of fulfilling its intended purpose.

Common cause failure (CCF) – failure of two or more structures, systems and components due to a single specific event or cause.

Defence in depth (DID) – A hierarchical deployment of different levels of diverse equipment and procedures to prevent the escalation of anticipated operational occurrences and to maintain the effectiveness of physical barriers placed between a radiation source or radioactive material and workers, members of the public or the environment, in operational states and, for some barriers, in accident conditions.

Design basis accident (DBA) – Accident conditions against which a facility is designed according to established design criteria, and for which the damage to the fuel and the release of radioactive material are kept within authorized limits.

Licensing process – the authorization process leading to the grant of a licence, which is a legal document issued by the regulatory body granting authorization to perform specified activities related to a facility or activity.

Multiple barriers – Two or more natural or engineered barriers – physical obstacles that prevent or inhibit the movement of people, radionuclides or some other phenomenon, or provide shielding against radiation – used to isolate radioactive waste in, and prevent migration of radionuclides from, a repository.

Nuclear safety – The achievement of proper operating conditions, prevention of accidents or mitigation of accident consequences, resulting in protection of workers, the public and the environment from undue radiation hazards.

Nuclear security – The prevention and detection of, and response to, theft, sabotage, unauthorized access, illegal transfer or other malicious acts involving nuclear material, other radioactive substances or their associated facilities.

Operator – Any organization or person applying for authorization or authorized and/or responsible for nuclear, radiation, radioactive waste or transport safety when undertaking activities or in relation to any nuclear facilities or sources of ionizing radiation. This includes, inter alia, private individuals, governmental bodies, consignors or carriers, licensees, hospitals, self-employed persons.

Radioactive waste – For legal and regulatory purposes, waste that contains, or is contaminated with, radionuclides at concentrations or activities greater than clearance levels as established by the regulatory body.

Reliability – probability that a system or component will meet its minimum performance requirements when called upon to do so.

Research reactor – A nuclear reactor used mainly for the generation and utilization of neutron flux and ionizing radiation for research and other purposes, including experimental facilities associated with the reactor and storage, handling and treatment facilities for radioactive materials on the same site that are directly related to safe operation of the research reactor. Facilities commonly known as critical assemblies are included.

Safety analysis – Evaluation of the potential hazards associated with the conduct of an activity.

Safety assessment – Assessment of all aspects of a practice that are relevant to protection and safety; for an authorized facility, this includes siting, design and operation of the facility.

Safety function – A specific purpose that must be accomplished for safety.

Safety system – A system important to safety, provided to ensure the safe shutdown of the reactor or the residual heat removal from the core, or to limit the consequences of anticipated operational occurrences and design basis accidents.

Sensitivity analysis – A quantitative examination of how the behaviour of a system varies with change, usually in the values of the governing parameters.

Single failure criterion – A criterion (or requirement) applied to a system such that it must be capable of performing its task in the presence of any single failure.

Structures, systems and components (SSCs) – A general term encompassing all of the elements (items) of a facility or activity which contribute to protection and safety, except human factors.

Acknowledgements

The authors of this paper are pleased to acknowledge the participants of the Regional Workshop on Advances and Issues in Integrated RIDM, organized by the International Atomic Energy Agency (IAEA) in collaboration with the Bulgarian Nuclear Regulatory Agency (BNRA), held in May 2012, in Sofia (Bulgaria). The presented work was supported by the EU and MSHE grant nr POIG.02.03.00-00-013/09.

References

[1] Ahn B.S., Park K.S.: Comparing methods for multi-attribute decision making with ordinal weights. Computers and Operations Research 35/2008, pp. 1660-1670.
[2] Borysiewicz M., Furtek A., Potempski S.: Poradnik metod ocen ryzyka związanego z niebezpiecznymi instalacjami procesowymi. Instytut Energii Atomowej, Otwock-Świerk 2000.
[3] Borysiewicz M., Kowal K., Potempski S.: Decision making for safety of technological installations based on risk. Proceedings of the XIX Scientific-Technical Seminar of Materials Investigation for Power Industry, Zakopane 2012, pp. 209-219.
[4] Cooke R.M.: Experts in Uncertainty. Opinion and Subjective Probability in Science. Oxford University Press, Oxford 1991.
[5] Govaerts P.: Roles, functions and value of TSOs. Proceedings of an International Conference on Challenges Faced by Technical and Scientific Support Organizations in Enhancing Nuclear Safety, Aix-en-Provence 2007, pp. 49-54.
[6] Hahn L.: Independent technical and scientific advice for regulatory decision making. Proceedings of an International Conference on Challenges Faced by Technical and Scientific Support Organizations in Enhancing Nuclear Safety, Aix-en-Provence 2007, pp. 55-65.
[7] Jia J., Fisher G.W., Dyer J.S.: Attribute weighting methods and decision quality in the presence of response error: A simulation study. Journal of Behavioral Decision Making 11/1998, pp. 85-105.
[8] Knudsen J.K., Smith C.L.: Estimation of system failure probability uncertainty including model success criteria. Proceedings of the 6th International Conference on PSA and Management, San Juan 2002, pp. 201-206.
[9] Ko K.S., Han K.I.: Relevance of TSOs in providing technical and scientific services to operators/industry. Proceedings of an International Conference on Challenges Faced by Technical and Scientific Support Organizations in Enhancing Nuclear Safety, Aix-en-Provence 2007, pp. 67-85.
[10] Lee J.C., McCormick N.J.: Risk and Safety Analysis of Nuclear Systems. John Wiley & Sons Inc., Hoboken 2011.
[11] Lyubarskiy A., Kuzmina I., El-Shanawany M.: Advances in Risk Informed Decision Making – IAEA's Approach. Proceedings of the Nordic PSA Conference, Gottröra 2011, pp. 1-14.
[12] Małecki L.: Introduction to the nuclear energy in Poland. Proceedings of the XIX Scientific-Technical Seminar of Materials Investigation for Power Industry, Zakopane 2012, pp. 1-40.
[13] Rao K.D., Kushwaha H.S., Verma A.K., Srividya A.: Quantification of epistemic and aleatory uncertainties in level-1 probabilistic safety assessment studies. Reliability Engineering & System Safety 92/2009, pp. 947-956.
[14] Strupczewski A.: Safety classification of nuclear power plants structures, systems and components and their qualification. Proceedings of the XIX Scientific-Technical Seminar of Materials Investigation for Power Industry, Zakopane 2012, pp. 57-84.
[15] Valtonen K., Vanttola T.: Role of the TSO in public information/debate openness, transparency. Proceedings of an International Conference on Challenges Faced by Technical and Scientific Support Organizations in Enhancing Nuclear Safety, Aix-en-Provence 2007, pp. 97-102.
[16] Volkanovski A., Čepin M.: Implication of PSA uncertainties on risk-informed decision making. Nuclear Engineering and Design 241/2011, pp. 1108-1113.
[17] Xuan S.: A Novel Kind of Decision of Weight of Multi-attribute Decision-Making Model Based on Bayesian Networks. International Seminar on Business and Information Management 2/2008, pp. 30-33.
[18] Health and Safety Executive: The tolerability of risk from nuclear power stations. HSE Books, Sudbury 1992.
[19] Health and Safety Executive: Reducing Risks, Protecting People: HSE's decision-making process. HSE Books, Norwich 2001.
[20] International Atomic Energy Agency: Equipment qualification in operational nuclear power plants: upgrading, preserving and reviewing. IAEA, Vienna 1998.
[21] International Atomic Energy Agency: Basic safety principles for nuclear power plants. IAEA, Vienna 1999.
[22] International Atomic Energy Agency: Quality assurance within regulatory bodies. IAEA, Vienna 1999.
[23] International Atomic Energy Agency: Operational safety performance indicators for Nuclear Power Plants. IAEA, Vienna 2000.
[24] International Atomic Energy Agency: Training the staff of the regulatory body for nuclear facilities: A competency framework. IAEA, Vienna 2001.
[25] International Atomic Energy Agency: Safety Margins of Operating Reactors. IAEA, Vienna 2003.
[26] International Atomic Energy Agency: Precursor analyses – The use of deterministic and PSA based methods in the event investigation process at nuclear power plants. IAEA, Vienna 2004.
[27] International Atomic Energy Agency: Assessment of Defence in Depth for Nuclear Power Plants. IAEA, Vienna 2005.
[28] International Atomic Energy Agency: Defence in Depth in Nuclear Safety. IAEA, Vienna 2005.
[29] International Atomic Energy Agency: Risk informed regulation of nuclear facilities: Overview of the current status. IAEA, Vienna 2005.
[30] International Atomic Energy Agency: IAEA Safety Glossary – Terminology Used In Nuclear Safety And Radiation Protection. IAEA, Vienna 2007.
[31] International Atomic Energy Agency: Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants. IAEA, Vienna 2009.
[32] International Atomic Energy Agency: Safety assessment for facilities and activities. IAEA, Vienna 2009.
[33] International Atomic Energy Agency: Development and Application of Level-1 PSA. IAEA, Vienna 2010.
[34] International Atomic Energy Agency: Development and Application of Level-2 PSA. IAEA, Vienna 2010.
[35] International Atomic Energy Agency: The Interface Between Safety and Security at Nuclear Power Plants. IAEA, Vienna 2010.
[36] International Atomic Energy Agency: A Framework for an Integrated Risk Informed Decision Making Process. IAEA, Vienna 2011.
[37] International Atomic Energy Agency: Safety of Nuclear Power Plants: Design. IAEA, Vienna 2012.
[38] U.S. Nuclear Regulatory Commission: Reactor Safety Study - An assessment of accident risks in U. S. commercial nuclear power plants. U.S. NRC, Washington D. C. 1975.
[39] United States Nuclear Regulatory Commission: Safety goals for nuclear power plants operations. USNRC, Washington 1996.
[40] United States Nuclear Regulatory Commission: Guidance on the Treatment of Uncertainties Associated with PRAs in Risk-Informed Decision Making. US NRC, Washington 2009.

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

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

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

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

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

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

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

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

Artykuł recenzowany

ELEMENTS OF AUTOMATIC CONTROL OF HYDRODYNAMIC SYSTEMS

Anatoli M. Voronin[1], Bekmurza H. Ajtchanov[2], Janusz Partyka[3], Aitkul Aldibekova[2]
[1]Almaty Technological University, [2]Kazakhstan National Technical University named after K.I.Satpayev, [3]Lublin University of Technology

Abstract. *The paper presents the automated system of control of certain elements of the hydrodynamic system related to the production of liquid milk. Similar systems may find application in various fields of engineering, such as: hydro power station construction; oil refineries construction; control systems in various chemical industries containing hydrogen atoms in the final product; in propellant flow rate systems, etc., whenever it is required to control hydrodynamic parameters by means of nuclear magnetic resonance on the relevant atoms of the products used.*

Keywords: the automated control system, hydrodynamics, nuclear magnetic resonance

ELEMENTY KONTROLI ZAUTOMATYZOWANYCH SYSTEMÓW HYDRODYNAMICZNYCH

Streszczenie. *Artykuł prezentuje zautomatyzowany system sterowania wybranymi elementami systemu hydrodynamicznego wykorzystywanego przy produkcji mleka. Podobne systemy mogą znaleźć zastosowanie w innych obszarach zastosowań, np. hydroelektrowniach, rafineriach, zakładach chemicznych, układach paliwowych, itp., gdzie jest wymagane kontrolowanie parametrów hydrodynamicznych za pomocą jądrowego rezonansu magnetycznego.*

Słowa kluczowe: zautomatyzowany system kontroli, mechanika płynów, rezonans jądrowy

Introduction

A number of studies [4, 8] examined various automated control systems of technological processes. Fundamentals of the theory of control systems are incorporated in the works [1, 2]. We proposed to use the nuclear magnetic resonance [9] on the hydrogen atoms as a probe of the magnetic field in the magnetization of milk. This technology can increase overall system accuracy of autoregulation.

1. System of automated control

In the devices intended for the magnetization of milk aimed at improvement of the physico-chemical properties of milk it is necessary to maintain several constant parameters. To obtain stable output parameters it is necessary on the one hand to have a high degree of accuracy in controlling the speed of the milk flowing through the pipelines, and keep it constant for a long time. On the other hand the magnetic field should be monitored with its subsequent stabilization. These parameters may vary in proportions depending on the type of equipment.

There are various devices for maintaining the continuance of liquid flow through the pipeline, such as the use of modified Mariotte vessels. This paper considers a more general approach for getting a stabilized flow of fluid in the experimental installation.

Figure 1 shows a block diagram of the apparatus. The milk from dairy farms is loaded into the reservoir (1), which through the pipeline (2) is fed into a control unit (3) equipped with an auto regulation system (4) controlled by the liquid flow rate sensor through the pipeline (5). Then, the milk flows through a pair of quadrupole lenses (6) which produce a preset level of magnetic field whose value is regulated by an automatic control system (7) connected with the sensor of magnetic field intensity level (8).

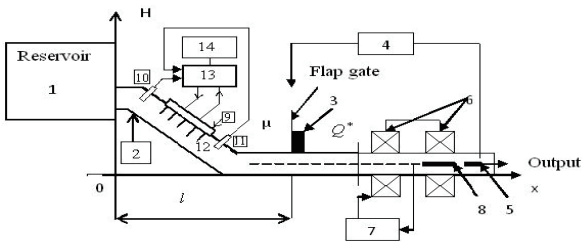


Fig. 1. General block diagram of the apparatus

The temperature of the incoming product for the milk magnetizing system should be 3-4 0C. For this purpose the fluid control system is based on the Peltier effect. The controller is made of flat parallel aluminium plates located inside the pipe (12) cooled with a Peltier element (9) the heat from which is diverted through the radiator installed outside the pipe (14), air-cooled. In order to maintain the temperature of milk in the tube within the limit of 3 ± 0,50C an electronic control device (13) is used for the temperature sensors (10, 11) in the form of thermistors incorporated into the scheme of the temperature controller. External heat is is diverted through the air-blown radiator.

We propose an approach that provides a transition from hydrodynamics to the automatic control system of a liquid flow rate.

Dynamic processes in the pipeline are characterized by the two variables: by the pressure H^* and by the flow rate Q^*,

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\gamma}{\alpha} \cdot \frac{\partial q}{\partial t}; \frac{\partial q}{\partial x} = -\frac{1}{\gamma\alpha} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \tag{1}$$

where $h = \frac{H^*}{H_{*0}}$, $q = \frac{Q^*}{Q_0^*}$ − the relative values of pressure and flow, respectively, H_0^*, Q_0^* − basic values of H^*, Q^*, α – acoustic velocity in the pipeline, $\gamma = \frac{aQ_0^*}{gFH_0^*}$, g − free-fall acceleration, F − cross-sectional area of the pipeline.

After the transformations we receive the following equation for the originals:

$$u(l,t) = 2h(O,t-\tau) - h(l,t-2\tau) + \gamma q(l,t-2\tau) - \gamma q(l,t) \tag{2}$$

The given equation links the two basic quantities $h(l,t)$ and $q(l,t)$ at the end of the pipeline with a pressure at its beginning $h(o,t)$. In order to make the task definite, the equation of the flow rate $q(l,t)$ should be added to the equation (2):

$$q(l,t) = \mu f[h(l,t)] \approx \mu\sqrt{1+h(l,t)} \tag{3}$$

The joint solution of equations (2) and (3) determines the basic values $h(l,t)$ and $q(l,t)$ at the end of the pipeline with the definite values of the pressure $h(o,t)$, at its beginning and in the position of the gate μ.

The analysis of the equation (2) shows that the length of the pipeline can be replaced (by an electric model) (in the course of developing automatic control systems) by reinforcing components with delay, and by the performing a linearization of the equation (3) we can apply the methods of the analysis of linear systems with delay [3, 5].

Therefore a block diagram of the model designed to determine the value $h(t)|_{x=l}$ and $q(t)|_{x=l}$, i.e. to determine the changes in pressure and flow at the point $x = l$ (Fig. 2), is composed on the basis of equations (2) and (3). The signals proportional to $h(o,t)$ and μ are sent to the input; they pass through the model elements and transform to the unknown variables $h(l,t)$ and $q(l,t)$. Similar systems of diagnostics are applied in paper [6].

This conclusion about the possibility of recording components with distributed parameters by the components with delay follows from the physical considerations: an object with distributed parameters can be represented by n as series-connected elementary components of the first order; and such components can be represented by a delayed component.

Because of the transcendence of the transfer function of a delay component, the characteristic equation of the closed-loop system

is also transcendental; so the algebraic criteria for stability cannot be used directly. However, partial criteria of Mikhailov and Nyquist can be generalized for the case of delay systems, i.e. the system under consideration is stable [7].

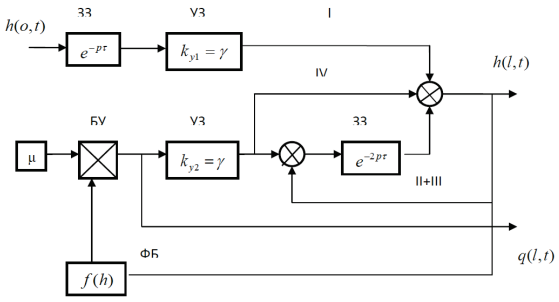


Fig. 2. The block diagram of the model: ЗЗ - delay unit; УЗ - intensifying *unit; БУ - multiplying unit; ФБ - functional unit with the input h(l,t) and output* $f(h)=\sqrt{1+h(l,t)}$ *; I, II, III, IV- composing equations (1)*

For many processes the characteristic feature is a significant time lag response of the object (the change of the output value y) to the change of the control action u. According to the calculations for a particular value of the ratio of the delay time of the object τ_0 to its time constant T_0 (for instance, at $\tau_0/T_0>0.5$) the effectiveness of the control laws is sharply reduced because of the large static (P, PD-laws) or dynamic (I, PI, PID - laws) errors, and in some cases, the system may become unstable. Therefore there were developed special (non-classical) laws of control: proportional-integral-differential (PIR - law) and proportional-integral by the background (PIP - law). In contrast to the classical control laws that use only the information about the deviation of the controlled value from the given value y^* ($\Delta=y^*-y$), here is used a priori information about the controlled object on the basis of which the classical control law

$$u(t)=k_1\Delta(t)+k_2\int_0^t\Delta(t)dt+k_3\frac{d\Delta(t)}{dt},$$

where k_i - coefficient of proportionality (transfer) in order to make certain corrections. In the case of a parallel transfer the correction function of the adjusted control law $W_y^{dk}(P)$ can be written as

$$W_y^{cu}(P)=W_\delta(P)+W_k(P) \qquad (4)$$

where $W_\delta(P)$, $W_k(P)$ - transfer functions of the base-level control and correction unit.

In connection with the above-described process the control block diagram of the control panel-controller can be represented as it is given in Figure 3.

The analysis of this scheme shows that the control action is formed as the algebraic sum of the two components: u_δ - the component on the output of PI − regulator; u_k - the component unit of a parallel correction. The introduction of the component u_k weakens the proportional and integral part of the basic component (k_1 and k_2 are less than one) at $t>\tau_0$ The latter condition is ensured by the introduction of component 4, which is a model of a controlled object. Therefore, the PIP - the regulator provides a high level of control action $u=u_\delta$ at $t>\tau_0$ and gradual decline of this level at $t>\tau_0(u=u_\delta-u_k)$.

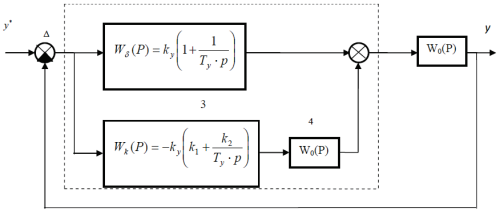


Fig. 3. Block diagram of automated control panel with PIP system: 1- control panel; 2- PI-regulator; 3,4- correction units; 5- PIP- regulator

Like in the case with the PIR - regulator, the implementation of the PIP - control law improves the quality of a transient stability process and increases the absolute stability margin in the amplitude and phase compared to the PI-regulator. Besides, the parameter settings of the correction component k_1 and k_2 because of their linear relation to the proportional and integral components of the output correction signal 3 is quite simple.

Therefore, the introduction of delayed components into the structure of a parallel correction component can significantly enhance the quality of transient processes to the ACS by the objects with a significant delay, as in the system of milk magnetization.

Literature

[1] Aleksandrov A. G.: Optimal'nye i adaptivnye sistemy.M, Vysshaja shkola 1989.

[2] Fradkov A. L.: Adaptivnoe upravlenie v sozhnyh sistemah. M, Nauka 1990.

[3] Makarova I.M., Lohchena V.M.: Intelektual'nye sistemy avtomaticheskogo upravlenija. M,Fizmatgiz 2001.

[4] Miroshnik I. V.: Teorija avtomaticheskogo upravlenija. Linejnye sistemy. SPb, Piter 2005.

[5] Popov E. P.: Teorija linejnyh sistem avtomaticheskogo regulirovanija i upravlenija. M, Nauka 1989.

[6] Sulejmenov B.A., Shuvatov T.T.: Metodika postroenija sistemy diagnostiki GPA. № 4 (30), Inzhenerno tehnicheskij zhurnal «Vestnik avtomatizacii», 12/ 2010, s. 7-9.

[7] Syzdykov D.Zh., Shirjaeva O.I., Omirbekova Zh.Zh.: Razvitie metoda obwego parametra dlja immunnoj modeli. Inzhenerno tehnicheskij zhurnal «Vestnik avtomatizacii», № 3 (25), 9/ 2009, s. 31-33.

[8] Voronin A. M., Aldibekova A. N.: O stabilizacii magnitnyh polej jelektro-fizicheskih ustanovok s ispol'zovaniem JaMR. Vestnik Nacional'noj Inzhenernoj Akademii RK 2/2012, s. 80-84.

[9] Vlasov K. P.: *Teorija avtomaticheskogo upravlenija.* Uchebnoe posobie. H, Izd-vo Gumanitarnyj centr 2007.

Prof. Voronin Anatoli Mikhailovich
e-mail: voronin.ski@rambler.ru

Professor, expert in nuclear physics and accelerators, Full Member of the International Engineering Academy (instrument engineering), Academician of the National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan (accelerators of charged particles). At present he works as a professor of the chair of physics at the Almaty Technological University.
Fields of interest: nuclear physics; high-frequency systems of charged-particle accelerators; radioecology; information and communication technologies; electronic pedagogy in high-education institutions.

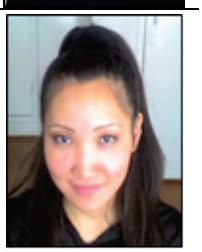
Prof. Aitchanov Bekmurza Husainovich
e-mail: berait@rambler.ru

Dr.Sci.Tech., Professor, Academician of the International Academy of Information and Academician of the Kazakhstan National Academy of Natural Sciences. He published more than 205 research papers. He teaches the following disciplines: «Information technologies», «Theory of the information», «Designing of information systems». His experience of scientific and pedagogical activity is 37 years.

Prof. Janusz Partyka
e-mail: j.partyka@pollub.pl

He is employed at the Lublin University of Technology, Department of Electrical Engineering and Information Science as a university professor. He is the author or co-author of over 150 scientific publications and has been a supervisor of several dozens of graduate theses. His research interests focus on electronic materials and technologies.

Aldibekova Aitkul
e-mail: aitkul_86@mail.ru



A PhD student of Satpayev Kazakh National Technical University in "Automation and Control." A co-author of eight publications.

Artykuł recenzowany

WYKORZYSTANIE RZECZYWISTOŚCI ROZSZERZONEJ W ŻYCIU CODZIENNYM

Maciej Laskowski[1], Damian Rawski[2], Przemysław Szadura[2]
[1] Instytut Informatyki, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska, [2] Koło Naukowe Informatyki PENTAGON, Politechnika Lubelska

Streszczenie: *W ostatnich latach gwałtowny rozwój telefonii komórkowej powoduje powstawanie nowych interesujących technologii, takich jak system Layar wykorzystujący rozszerzoną rzeczywistość. Jest to platforma wzbogacająca otaczający nas świat o cyfrowe informacje. Poniższy artykuł opisuje wykorzystanie tej technologii w tworzeniu wirtualnego przewodnika po uczelni, wspierającego bezproblemowe poruszanie się po terenie kampusu. Zawiera on opis problemu, technologie wykorzystywane w tym projekcie oraz zastosowanie go w prawdziwym życiu.*

Słowa kluczowe: Layar, Rzeczywistość Rozszerzona, smartfon, wirtualny przewodnik

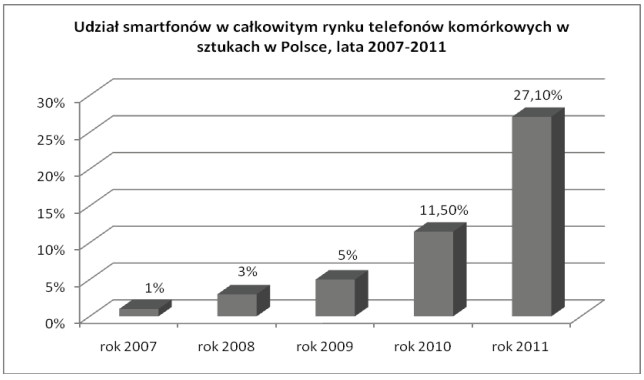
AUGMENTED REALITY – THE WAY TO USING ADVANCED TECHNOLOGY IN NORMAL LIFE

Abstract*: The rapid growth of smartphone market share is a key factor for both developing and implementing many solutions dedicated to mobile devices. One of the most promising technologies is Layar - a mobile platform for discovering digital information about the physical world using Augmented Reality (AR). This paper describes the implementation of Layar in creating a virtual guide of university campus in order to help finding particular buildings and other kinds of campus information needed. The issues of creating an information layer containing all the necessary information about the campus buildings are also discussed.*

Keywords: Layar, Augmented Reality, smartphone, virtual guide

Wstęp

Ostatnimi czasy możemy zaobserwować ogromny rozwój w dziedzinie telefonii komórkowej, a zwłaszcza w segmencie tzw. smartfonów, czyli telefonów posiadających system operacyjny, ekran dotykowy i/lub klawiaturę QWERTY [4] (rys. 1).



Rys. 1. Udział smartfonów w całkowitym rynku telefonów komórkowych w sztukach w Polsce w latach 2007-2011 [4]

Warto nadmienić, iż obecnie systemem operacyjnym, który zyskuje największą popularność jest system Android rozwijany przez Google i oparty na jądrze Linuxa. Dodatkowo właściciele smartfonów korzystają z wielu dodatkowych multimedialnych funkcji, które oferuje sprzęt, a mianowicie: GPS, przeglądarka WWW, poczta elektroniczna czy wideokonferencje. Wszystkie te czynniki sprawiają, iż technologia komórkowa rozwija się w szybkim tempie, przez co pojawia się wiele usług i aplikacji dedykowanych na tego typu urządzenia.

W 1994 roku Paul Milgram i Fumio Kishino określili koncepcję schematu ciągłości rzeczywistość – wirtualność (Virtuality Continuum, VC), formułującą definicję rzeczywistości mieszanej (Mixed Reality, MR) oraz przedstawili relacje pomiędzy światem rzeczywistym a wirtualnym [8].

Jeśli za jeden z końców schematu (rys. 2) ciągłości przyjmiemy środowisko rzeczywiste, a drugi zaś za wirtualne, wtedy rzeczywistość rozszerzona umiejscowiona jest na schemacie tuż przy środowisku rzeczywistym. Im bliżej systemowi do wirtualnej rzeczywistości, tym bardziej zredukowana jest liczba elementów rzeczywistych.

Systemy typu „see-through", gdzie obraz jest najczęściej generowany bezpośrednio na urządzeniu optycznym) znajdują się bliżej świata prawdziwego w porównaniu do systemów używających technik mieszania obrazu wideo (Video-Mixing) [8].

Rzeczywistość może być „rozszerzana" o wirtualne obiekty, analogicznie do tego świat wirtualny może być „rozszerzany" przez rzeczywiste obiekty [8]. Takie Środowisko nazywane jest Rozszerzoną Wirtualnością (Augmented Virtuality, AV) i na schemacie ciągłości rzeczywistość – wirtualność umiejscowiona jest tuż przy środowisku wirtualnej rzeczywistości [8].

Rys. 2. Schemat ciągłości rzeczywistość-wirtualność [7]

Zgodnie z definicją, System Rzeczywistości Rozszerzonej powinien (za: [1]):

- łączyć w sobie świat wirtualny i rzeczywisty;
- umożliwiać interakcję w czasie rzeczywistym;
- umożliwiać swobodę ruchów w płaszczyźnie trójwymiarowej.

Rzeczywistość rozszerzona nie generuje więc oddzielnego, całkowicie cyfrowego świata, lecz opiera się na realnym, wzbogacając informacje o istniejących miejscach bądź obiektach dzięki nakładaniu na nie wirtualnych elementów zawierających dodatkowe dane, często w postaci multimedialnej [5]. Odbywa się to zazwyczaj przy pomocy odpowiedniej aplikacji, która analizuje i wzbogaca obraz widziany przez wbudowaną w smartfon kamerę.

Sama idea Rozszerzone Rzeczywistości nie jest nowa - prace nad nią rozpoczął w latach 60-tych XX wieku Ivan Sutherlan ze studentami Uniwersytetu Harvarda i Uniwersytetu Utah. Wraz z rozwojem technologii systemy AR zaczęły wychodzić poza ściany zamkniętych środowisk, w celu pokazania użytkownikowi grafiki 2D lub modelu 3D bezpośrednio w terenie za pomocą mobilnych, osobistych urządzeń wyświetlających informacje wirtualne nakładane na obraz rzeczywistego świata [8].

Rozszerzoną Rzeczywistość charakteryzuje duży potencjał rozwoju, może ona być zastosowana do m.in. stworzenia kompleksowego przewodnika (np. po mieście), gdyż pozwala na wyświetlanie mapy na ekranie telefonu komórkowego, natychmiastowo lokalizuje użytkownika na tle pobliskich atrakcji turystycznych (za pomocą GPS), czy też pełni funkcję nawigatora – kieruje użytkownika do obranego celu, kolejnego obiektu..

Jak się przewiduje [5], w najbliższym czasie powstanie wiele interesujących rozwiązań, m.in. umożliwiających użytkownikowi wizualizację projektów architektonicznych w odniesieniu do konkretnego terenu lub produktów, które klient będzie mógł

obejrzeć przed zakupem. (np. umożliwienie przymierzenia projektowanych ubrań bez konieczności ich fizycznego tworzenia).

Jak można zauważyć, możliwości zastosowania Rozszerzonej Rzeczywistości są olbrzymie.

Warto więc zastanowić się nad możliwością zastosowania rozwiązań z tej dziedziny w życiu zwykłego użytkownika już w chwili obecnej.

1. Problem lokalizacji miejsc na kampusie

Jednym z najpopularniejszych zastosowań systemów Rozszerzonej Rzeczywistości są lokalizatory. Najpopularniejsze implementacje są tworzone zazwyczaj w celach reklamowo-promocyjnych [6]. Warto jednak zastanowić się nad zastosowaniami o nieco większym znaczeniu społecznym. Przykładem tego rodzaju wykorzystania Rzeczywistości Rozszerzonej może być wspomaganie poruszania się po kampusach uczelni.

Jednym z największych problemów z jakimi muszą borykać się studenci, szczególnie pierwszych lat studiów (zarówno I, jak i II stopnia) jest kwestia poruszania się po terenie uczelni oraz odnalezienie właściwego budynku i sali, gdzie odbywają się zajęcia. Problem ten jest szczególnie widoczny w przypadku kampusów o strukturze rozproszonej.

Dobrą ilustracją omawianego zagadnienia jest przykład Lublina – największego ośrodka akademickiego w Polsce Wschodniej [11].

Na terenie miasta działa w sumie dwanaście uczelni, w tym pięć państwowych, przy czym kampusy większości z nich są rozrzucone po terenie całego miasta. Dobrą ilustracją problemu mogą być tutaj Uniwersytet Przyrodniczy i Katolicki Uniwersytet Lubelski – studenci obydwu tych uczelni mają często zajęcia w obiektach umieszczonych na przeciwległych końcach Lublina. Oznacza to, że odnalezienie właściwego budynku i terminowe dotarcie na zajęcia może być dla studentów swoistym wyzwaniem. Poruszanie się po nawet relatywnie zwartym terenie uczelni (np. Politechniki Lubelskiej) może stanowić problem spowodowany m.in. przez trwające budowy, zmieniające nie tylko wygląd kampusu, ale i sposób poruszania się po nim.

Standardowym rozwiązaniem jest tradycyjna papierowa mapka lub inny dokument prezentujące plan kampusu oraz zawierające podstawowe informacje organizacyjne, jak chociażby rozkład zajęć. Często jednak charakteryzują się ona sporym stopniem niedokładności czy wręcz nieaktualności, gdyż np. nie uwzględniają aktualnych zmian w topografii kampusu (wynikających chociażby z trwających prac budowlanych). Dodatkowo wszystkie takie informacje charakteryzuje brak zwartości, gdyż zazwyczaj są umieszczane na oddzielnych dokumentach. Powoduje to konieczność posługiwania się np. kilkoma różnymi wydrukami jednocześnie, co oczywiście może powodować dyskomfort użytkownika i zwiększać stopień jego dezorientacji.

Pytanie, jakie się nasuwa podczas analizy opisywanego problemu brzmi: w jaki sposób można wykorzystać systemy rozszerzonej rzeczywistości do ułatwienia życia użytkownikowi?

Odpowiedzią może być system Layar.

2. Layar

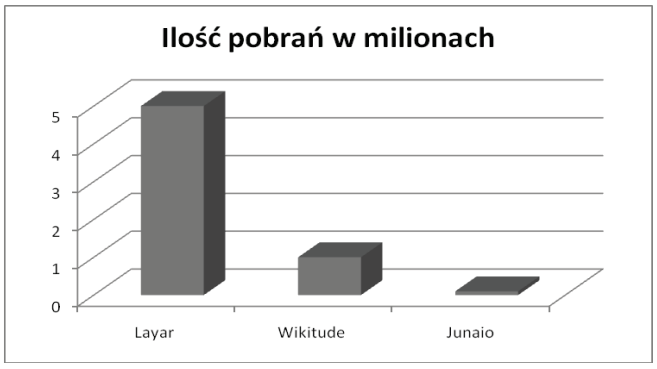
Layar to pierwsza na świecie mobilna platforma współpracująca z otaczającą użytkownika rzeczywistością. System działa na urządzeniach mobilnych wyposażonych w GPS, kamerę, kompas, akcelerometr oraz stałe połączenie internetowe minimum w technologii 2G. Wszystkie aktualnie dostępne na rynku smartfony (bez względu na wykorzystywany system operacyjny - Android, Symbian, BadaOS, IOS, RIM) spełniają te wymagania. Warto również zauważyć, że Layar jest darmowy dla każdej platformy mobilnej.

System, stworzony przez firmę SPRXMobile, był początkowo dostępny tylko w Holandii – dopiero w sierpniu 2009 API systemu doczekało się premiery światowej. Rozgłos i spory sukces zawdzięcza sklepowi z aplikacjami – Android Market, który jest dostępny pod adresem http://market.android.com.

Później program zdobył nowe możliwości, w tym prezentowanie obiektów opartych na technologii OpenGL, tworzenia płatnych warstw czy możliwości rozpoznawania obrazów po stronie klienta. Obecnie wprowadzona została nowa wersja API - 6.2, która umożliwia także prezentowanie warstwy filmowej [2].

Sama aplikacja jest bezpłatna, jednak można uaktualniać ją o płatne warstwy oferujące ogromną ilość informacji, co pozwala na wykorzystanie w pełni oferowanych przez system możliwości.

Warto zauważyć, że pomimo istnienia kilku systemów obsługujących Rozszerzoną Rzeczywistość, to właśnie Layar cieszy się największą popularnością (rys. 3).



Rys. 3. Ilość pobrań (w milionach) przeglądarek wirtualnej rzeczywistości (źródło: opracowanie własne na podstawie danych z Android Market z lipca 2011)

3. Layar – jak to działa?

Cała idea Layara opiera się na tworzeniu tzw. warstw (ang. layer). Jest to cyfrowa nakładka zawierająca wszystkie interesujące nas informacje na dany temat. Całość działa w ten sposób iż, na obraz z kamery smartfonu nakładane są - w oparciu o położenie geograficzne - cyfrowe informacje odnośnie obiektu znajdującego się w obiektywie kamery.

W systemie Layar warstwy tworzone są w oparciu o technologie sieciowe: dozwolone jest użycie m.in. PHP, MySQL oraz Java. Jedynym kryterium walidacji warstwy jest jej zgodność z formatem JSON.

JSON, czyli JavaScript Object Notation to lekki format wymiany danych komputerowych [3]. JSON jest formatem tekstowym, będącym podzbiorem języka JavaScript, jednak pomimo tego faktu jest formatem niezależnym od konkretnego języka, dzięki czemu wiele języków programowania korzysta z tego formatu danych przez dodatkowe pakiety czy biblioteki [3].

Oczywiście przy tworzeniu warstwy do dyspozycji jest również wiele płatnych narzędzi, dzięki którym nawet osoby nie mające pojęcia o programowaniu, mogą tworzyć własne warstwy.

Swoją przygodę z Layarem należy rozpocząć od zarejestrowania się na stronie www.layar.com, następnie należy utworzyć konto developerskie na stronie www.layar.com/development.

Kolejnym krokiem jest stworzenie definicji warstwy (www.layar.com/publishing). Należy w niej podać jedynie tytuł i opis warstwy oraz adres do naszej strony internetowej. Jest to strona obsługująca połączenie naszej warstwy z bazą danych zawierającą wszystkie informacje odnośnie obiektów. Na stronie Layara istnieje samouczek, który przeprowadzi nas przez wszystkie kroki tworzenia warstwy, a także jest zaprezentowany przykładowy kod strony obsługujący wspomniane wyżej połączenie z bazą danych.

W tym momencie przychodzi pora na obsłużenie połączenia naszej bazy danych z warstwą prezentacyjną. Jak zostało wspomniane wyżej, na stronie znajduje się przykładowy kod takiej obsługi. Pierwszą i najważniejszą sprawą, przy tworzeniu Layara jest to by posiadać własny serwer danych, na których

przechowywane będą wszystkie potrzebne informacje. Teraz pozostaje tylko odpowiednie przeformatowanie przykładowego kodu obsługi bazy, tak by działał z naszym serwerem. Tych modyfikacji należy dokonać w pliku config.inc, w którym znajdują się definicje zmiennych do połączenia z bazą danych.

Po ukończeniu opisanych powyżej kroków nowopowstała warstwa z odpowiednimi parametrami jest już niemal gotowa.

Warto teraz przetestować połączenie bazy danych z warstwą. Logujemy się zatem na stronie www.layar.com na nasze konto deweloperskie, przechodzimy do zakładki „my layers" i klikamy na przycisk Test. Przechodzimy teraz na stronę testową, w której widzimy mapę pewnego obszaru a na niej pewien zasięg wyróżniony innym kolorem. Jest to testowy zasięg potencjonalnego użytkownika.

Ustawiamy ten zasięg na okolice nas interesujące i sprawdzamy działanie warstwy. Jeśli zostają wczytane wszystkie punkty to warstwa działa poprawnie, jeśli nie, ewentualne błędy można sprawdzić w konsoli poniżej.

Pozostaje teraz wyruszenie sprzed ekranu komputera, aby dokonać odpowiednich pomiarów współrzędnych geograficznych (lub sprawdzenie ich np. w Google Maps) i wpisać je do bazy danych.

Gdy wszystko już działa sprawnie, w zakładce „my layers" klikamy na przycisk „Request approval", co powoduje oficjalne opublikowanie naszej warstwy w serwisie Layar.

4. Wybrane zastosowania technologii Layar w Polsce

Jak zostało już wspomniane wcześniej, jednym z najpopularniejszych zastosowań technologii Layar jest tworzenie różnego rodzaju wirtualnych przewodników.

Pierwszym miastem w Polsce, które dysponowało oficjalnym przewodnikiem wykonanym w technologii Layar były Katowice. Na początku 2010 roku udostępniono dwujęzykową (po polsku i angielsku) mapę Katowic składającą się z 4 kategorii wyświetlanych w zależności od wyboru użytkownika: kultura i rozrywka, służba publiczna i transport, hotele oraz wydarzenia [9]. Mapa zawiera 50 POI (Points of interest) - głównie budynki użyteczności publicznej – z których każdy posiada opis miejsca oraz formularz kontaktowy, dzięki któremu bezpośrednio z aplikacji można się z tym miejscem skontaktować. Ciekawym rozwiązaniem jest również warstwa Wydarzenia, która dzięki ciągłym aktualizacjom pełni rolę repertuaru.

Kolejnym miastem, które stosuje w swoich działaniach Rzeczywistość Rozszerzoną jest Lublin. Ośrodek „Brama Grodzka – Teatr NN" - instytucja kultury działająca w Lublinie na rzecz ochrony dziedzictwa kulturowego i edukacji po raz pierwszy zastosował technologie AR w 2011 roku podczas wystawy prac niemieckiej artystki Urlike Grossarth w Lublinie. Było to jednak działanie czasowe, które zakończyło się wraz z wystawą [10].

Kolejnym działaniem był projekt „Przewodniki. Lublin 2.0". Warstwa opracowana w ramach tego projektu warstwa zawiera 11 szlaków (za: [10]):

- Zabytki Lublina,
- Żydowski Lublin (w dwujęzycznej: polsko-angielskiej wersji),
- Lublin Od Unii Lubelskiej do Unii Europejskiej,
- Lublin 1918 roku,
- Lublin Hartwigów,
- Lublin Stefana Kiełszni,
- Architektura poprzemysłowa,
- Poemat o mieście Lublinie,
- Wiersze o Lublinie, Modele 3D,
- Historie Mówione o Lublinie.

Szlaki te zawierają w sumie 145 punktów (Zabytki Lublina – 28 punktów, Żydowski Lublin – 18 punktów, Lublin Od Unii Lubelskiej do Unii Europejskiej – 11, Lublin 1918 roku – 7, Lublin Hartwigów – 10, Architektura Poprzemysłowa – 39, Poemat o mieście Lublinie – 14, Wiersze o Lublinie– 10, Modele 3D – 8) [10].

Szlaki można ze sobą łączyć - poszczególne elementy tworzą zintegrowany system, prezentujący w sposób przystępny i atrakcyjny kompleksową wiedzę o historii i dziedzictwie kulturowym miasta [10].

Warto zauważyć, że punkty na szlakach różnią się pod względem zawartości. Szlaki dotyczące dziedzictwa kulturowego – Zabytki Lublina, Żydowski Lublin, Architektura poprzemysłowa oraz historii Lublina: Lublin Od Unii Lubelskiej do Unii Europejskiej czy Lublin 1918 roku opierają się na krótkich tekstach opisujących miejsca lub wydarzenia. Każdy z nich jest uzupełniony ilustracją i linkiem przekierowującym do artykułu szerzej omawiającego zagadnienie [10].

Szlaki: Poemat o mieście Lublinie i Wiersze o Lublinie dostarczają materiał audio: w przypadku Poematu o Lublinie - utwór Józefa Czechowicza czytany przez poetów, m.in. przez Czesława Miłosza i Wisławę Szymborską, natomiast na szlaku Wierszy o Lublinie wybrane wiersze dotyczące miasta interpretuje jedna osoba – aktor Teatru NN – Witold Dąbrowski. Materiał audio zawiera także szlak Historii Mówionych. Podczas spaceru tym szlakiem można odsłuchać krótkie fragmenty wspomnień mieszkańców Lublina zebranych w ramach projektu Historia Mówiona [10].

Jeszcze inny rodzaj materiału zawiera szlak Lublin Stefana Kiełszni. Stefan Kiełsznia był fotografem międzywojennego Lublina [10]. Patrząc na ekran urządzenia następuje nałożenie archiwalnego zdjęcia z 1934 roku na widok współczesny.

Kolejny szlak – Szlak Hartwigów – znanej lubelskiej rodziny zawiera różnorodne materiały, od tekstów, poprzez materiały audio do fotografii [10].

Ostatni ze szlaków przewodnika – Modele 3D, wykorzystuje elementy z projektu „Lublin 2.0. Interaktywna rekonstrukcja dziejów miasta". Na szlaku umieszczono 8 modeli budynków, które już nie istnieją (kościół farny rozebrany w XVIII wieku i Wielka Synagoga zniszczona w 1944 roku) lub w znaczący sposób zmieniły swój wygląd [10].

Warto podkreślić, że w Lublinie technologia AR została w 2012 roku wykorzystana dwukrotnie podczas wydarzeń kulturalnych – Noc Kultury i Carnaval Sztukmistrzów.

W obu przypadkach dzięki tej technologii stworzono multimedialne mapy punktów, w których odbywały się imprezy kulturalne.

5. Zastosowanie systemu Layar na przykładzie wirtualnego kampusu

Celem prac podjętych w ramach Koła Naukowego Informatyki Pentagon jest stworzenie wirtualnego przewodnika po kampusie, którego zadaniem będzie ułatwienie studentom i osobom odwiedzającym uczelnie w bezproblemowym poruszaniu się po terenach uczelni.

Wirtualny kampus będzie oparty o technologię Layar, która wydaje się być dobrym rozwiązaniem opisanych powyżej problemów.

Użytkownik mając do dyspozycji jedynie swój własny telefon może dowiedzieć się w ciągu kilku sekund, gdzie znajduje się konkretny budynek, jak do niego dojść, jego adres, numer telefonu właściwego dziekanatu, strona internetowa wydziału, plany zajęć, rozkłady sal - jednym słowem ma możliwość zdobycia praktycznie wszystkie potrzebne informacji dotyczące uczelni.

6. Zakończenie

Rozszerzona rzeczywistość tworzy zupełnie nową jakość w projektowaniu aplikacji użytkowych. Co więcej, dzięki relatywnie prostemu procesowi projektowemu, umożliwia zaangażowanie w rozwój elementów aplikacji także użytkowników nie dysponujących wiedzą informatyczną. Jest to szczególnie istotne w przypadku systemów takich jak Layar - opierających się w dużej mierze o treści dostarczane właśnie przez użytkowników.

Projekt wirtualizacji uczelnianego kampusu stanowi dopiero przyczynek do rozwinięcia zagadnienia inteligentnego miasta przyszłości. Jednak dzięki dość szerokiej i dynamicznej grupie odbiorców (głównie młodzi ludzie, otwarci na nowe technologie) stanowi znakomity poligon doświadczalny dla testowania zarówno możliwości, jak i ograniczeń systemu, co pozwoli na udoskonalenie przyszłych implementacji tego projektu.

Literatura

[1] Azuma R.: A Survey of Augmented Reality, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 1997, s. 355–385.
[2] Cameron C.: Layar 6.1 Update Now in App Stores, http://layar.com/blog/2012/02/14/layar-61-now-in-app-stores/, 2012.
[3] Crockford, D.: JSON: The Fat-Free Alternative to XML, http://www.json.org/fatfree.html, 2006.
[4] Hatalska N.: Penetracja smartfonów w Polsce – dane za 2011, http://hatalska.com/2012/02/13/penetracja-smartfonow-w-polsce-dane-za-2011/, 2012.
[5] Konecki T.: Rzeczywistość rozszerzona - lepsza wersja świata, http://nt.interia.pl/news/rzeczywistosc-rozszerzona-lepsza-wersja-swiata,1651714, 2011.
[6] Madden L.: Professional Augmented Reality Browsers for Smartphones: Programming for junaio, Layar and Wikitude, Chicester, John Wiley & Sons 2011.
[7] Milgram P., Kishino F,: A taxonomy of mixed reality visual displays. IEICE Transactions on Information Systems, 1994, E77-D(12).
[8] Pardel P.: Przegląd ważnych zagadnień rozszerzonej rzeczywistości, Studia Informatica, t. 30, nr 1 (82), Politechnika Śląska 2009.
[9] Tomaszewski J.: Mapa Katowic w aplikacji Layar. Jako pierwsza z polskich miast, http://www.mmsilesia.pl/250367/2010/9/9, 2010.
[10] Zętar J.: Przewodniki. Lublin 2.0 - przewodniki po Lublinie z wykorzystaniem poszerzonej rzeczywistości. Studium przypadku, praca seminaryjna napisana pod kierunkiem prof. dr hab. Andrzeja Szromnika w ramach studiów podyplomowych Akademii Dziedzictwa, działającej w ramach Międzynarodowego Centrum Kultury, 2012.
[11] Żyła K.: Broniszewski T., Budzyński A., Usługi lokalizacyjne w inteligentnym mieście na przykładzie mobilnego przewodnika po uczelni, Zeszyty naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego. Studia Informatica, No.29 Vol.721, 2012, pp.7-19.

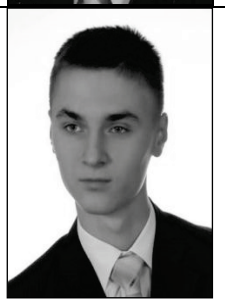
Mgr inż. Maciej Laskowski
e-mail: m.laskowski@pollub.pl

Asystent w Instytucie Informatyki Politechniki Lubelskiej. Absolwent studiów magisterskich na kierunku Informatyka (specjalność *Inżynieria Oprogramowania)* na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej (2007). Absolwent studiów podyplomowych *Public Relations w Badaniach Naukowych* w Wyższej Szkole Ekonomii i Innowacji w Lublinie w 2009 roku. Opiekun Koła Naukowego Informatyki PENTAGON. W swoich badaniach naukowych zajmuje się tematyką osób niepełnosprawnych (szczególnie posiadających różnego rodzaju wady wzroku) w Internecie, a także szeroko pojętą tematykę usability.

Inż. Damian Rawski

Absolwent studiów inżynierskich na kierunku Informatyka na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.
Członek Koła Naukowego Informatyki PENTAGON.
Laureat „konkursu na Projekt" dotyczącego promocji Lubelszczyzny realizowanego przez Biuro Poselskie prof. Leny Kolarskiej – Bobińskiej, Poseł do Parlamentu Europejskiego (temat: wirtualny przewodnik po uczelni).

Inż. Przemysław Szadura



Absolwent studiów inżunierskich na kierunku informatyki na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.
Członek Koła Naukowego Informatyki PENTAGON.
Laureat „konkursu na Projekt" dotyczącego promocji Lubelszczyzny realizowanego przez Biuro Poselskie prof. Leny Kolarskiej – Bobińskiej, Poseł do Parlamentu Europejskiego (temat: wirtualny przewodnik po uczelni).

Artykuł recenzowany

Administrowanie Sieciami Komputerowymi
Politechnika Lubelska
Instytut Elektroniki i Technik Informacyjnych

Dwusemestralne studia podyplomowe obejmują moduły kształcenia:

1 Podstawy administrowania systemem Windows
2 Podstawy administrowania systemem Linux
3 Sieci LAN
4 Sieci IP
5 Routing w sieciach IP
6 Sieci TCP/IP
7 Usługi w sieciach TCP/IP
8 Wykorzystanie Windows w sieciach LAN
9 Wykorzystanie Linux w sieciach LAN
10 Zarządzanie systemami informatycznymi
11 Sieci telekomunikacyjne
12 Serwery usług sieciowych
13 Bezpieczeństwo systemów komputerowych
14 Diagnostyka sieci komputerowych
15 Multimedia strumieniowe
16 Systemy telefonii VoIP
17 Sieci dostępowe
18 Kodowanie informacji multimedialnych
19 Elementy sieci optoelektronicznych
20 Światłowody i kable światłowodowe
21 Podstawy normalizacji
22 Seminarium dyplomowe

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

Faks:
(0-81) 53 84 312

Adres pocztowy:
ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin

Poczta elektroniczna
ask@politechnika.lublin.pl

WYZNACZANIE INDUKCYJNOŚCI Z UWZGLĘDNIENIEM NASYCENIA OBWODU MAGNETYCZNEGO MASZYN SYNCHRONICZNYCH Z MAGNESAMI ZAGNIEŻDŻONYMI

Rafał Piotuch
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny

Streszczenie. *W artykule przedstawiono metodę wyznaczania indukcyjności własnych uzwojeń fazowych oraz indukcyjności w osi d i q maszyny synchronicznej z magnesami zagnieżdżonymi z wykorzystaniem pakietu obliczeniowego Maxwell 2D. Wybrane wyniki badań polowych porównano z wynikami otrzymanymi z modelu obwodowego maszyny. W badaniach tych uwzględniono wpływ wartości prądu stojana na parametry modelu obwodowego, których wyniki stanowią istotne dane wejściowe dla dalszej analizy pracy maszyn z magnesami trwałymi.*

Słowa kluczowe: maszyna synchroniczna, indukcyjność w osi *d* i *q*, analiza polowa

INDUCTANCE CALCULATION CONSIDERING MAGNETIC SATURATION OF INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINES

Abstract. *In the paper a method for FEM calculation of self-inductances and d,q axis inductances determination is presented for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors. FEM simulation results are compared with circuit model simulation results. In the research there is considered influence of magnetic saturation on circuit model parameters. It is a basis for further analysis of PM synchronous machine work.*

Keywords: synchronous machine, *d* and *q* axis inductance, field analysis

Wstęp

Maszyny synchroniczne wzbudzane magnesami trwałymi charakteryzują się coraz lepszymi parametrami. Wysoki stosunek momentu do masy oraz niski moment bezwładności wirnika, a także łatwość sterowania czyni je idealnym rozwiązaniem w aplikacjach wymagających wysokiej dynamiki [1]. Są one powszechnie wykorzystywane w komputerach, drukarkach, w samochodach, na statkach, w elektrycznych wózkach inwalidzkich, napędzie trakcyjnym, w robotach, we frezarkach, w przemyśle medycznym, czy w końcu w aeronautyce [1, 7]. Należy jednocześnie zaznaczyć, że maszyny te mają również swoje wady, którymi są wysoka cena oraz możliwość rozmagnesowania magnesów trwałych.

W związku ze skomplikowanymi geometriami obwodów magnetycznych silników z magnesami trwałymi sposobem wyznaczania parametrów elektromagnetycznych jest analiza oparta o metodę elementów skończonych (MES).
Technika komputerowa, a także dostępność zaawansowanych pakietów symulacyjnych, pozwala w stosunkowo szybki sposób analizować geometrie modelowanych układów.

Klasyczny modelu trójfazowy zapisany w układzie naturalnym ABC, może zostać przekształcony do wirującego układu współrzędnych poprzez zastosowanie przekształcenia Clark i Park'a. W ten sposób uzyskuje się możliwość niezależnego sterowania zarówno momentem, jak i strumieniem. Sterowanie to można porównywać do sterowania obcowzbudnym silnikiem prądu stałego. Poprawne wyznaczenie parametrów modelu obwodowego jest podstawą syntezy regulatorów [5, 12] dla maszyn z magnesami trwałymi. Wielu autorów, projektując regulatory, bazuje na modelu o parametrach stacjonarnych. Istotnym zagadnieniem, coraz częściej podejmowanym w literaturze [3, 4, 9, 10] jest wpływ nasycenia obwodu magnetycznego silnika na wartości parametrów modelu obwodowego. Wpływ ten uwzględnia się np. podczas projektowania trajektorii prądu tak aby zadaną wartość momentu uzyskać przy jak najmniejszej wartości składowych natężenia prądu i_d oraz i_q.

W artykule przedstawiono wybrane wyniki obliczeń, wykonanych przy użyciu programu Maxwell 2D firmy Ansys, indukcyjności własnych uzwojeń fazowych oraz indukcyjności w osi *d* oraz *q* maszyny synchronicznej. Dodatkowo wyznaczono indukcyjność L_{dq}.

Precyzyjne i dokładne wyznaczenie tych parametrów maszyny jest kluczowym zagadnieniem projektowania maszyn elektrycznych. Znajomość ww. parametrów pozwala dokonywać optymalizacji maszyny już na etapie badań symulacyjnych [8].

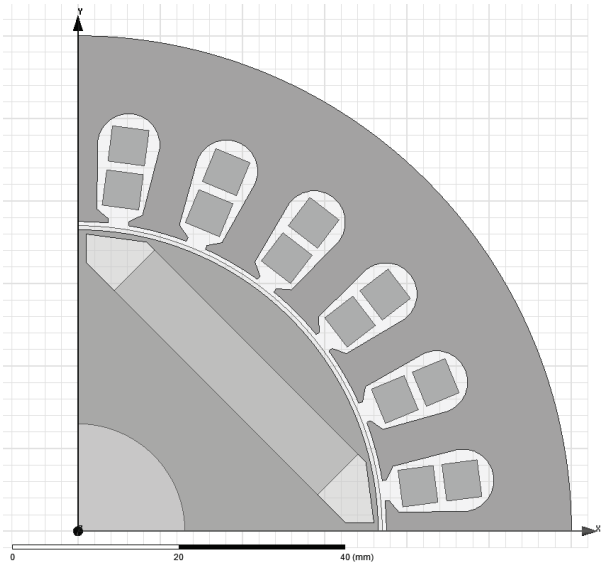
1. Maszyna synchroniczna

Analizowaną maszyną jest cylindryczna maszyna z magnesami XG 196/96 (o indukcji remanencji 0.96T i natężeniu koercji – 763kA/m) zagnieżdżonymi w wirniku. Zamodelowano uzwojenie dwuwarstwowe (ilość boków w żłobku wynosi 60) o poskoku żłobkowym równym 6 i o 2 żłobkach na biegun i fazę. Główne wymiary silnika przedstawiono w tabeli 1.

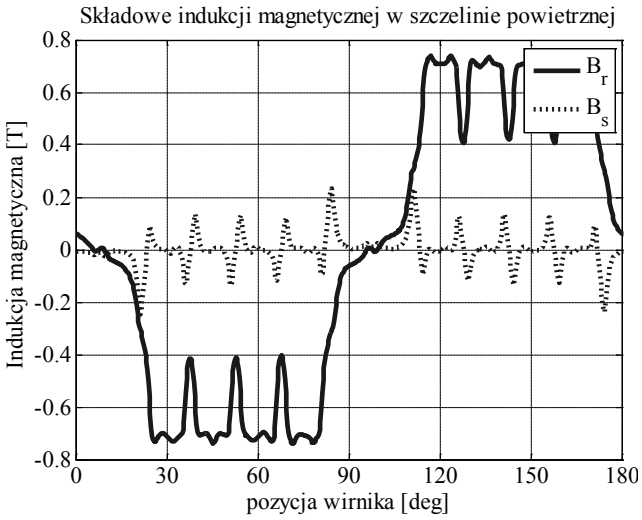
Tabela 1. Wybrane wymiary i parametry silnika

Długość części czynnej	65 mm
Grubość magnesu	4 mm
Szerokość magnesu	35 mm
Ilość żłobków	24
Ilość faz	3
Liczba par biegunów	2
Średnica wewnętrzna wirnika	40 mm
Średnica zewnętrzna stojana	81.5 mm
Wielkość szczeliny powietrznej	1 mm

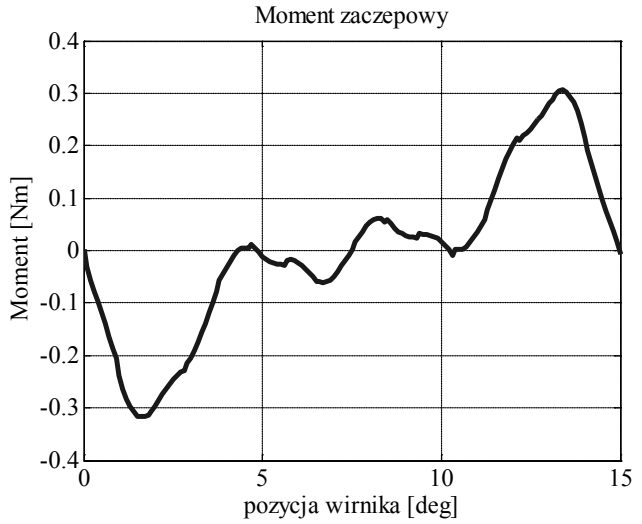
Przekrój poprzeczny modelowanej maszyny pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny maszyny z magnesami



Rys. 2. Składowa promieniowa i styczna indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej pod biegunem



Rys. 3. Moment zaczepowy

Przedstawione przebiegi składowych indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej (rys. 2) i momentu zaczepowego (rys. 3) potwierdzają poprawność modelu.

2. Model matematyczny

W literaturze przedstawione są różne modele obwodowe maszyny synchronicznej, jednakże modelem matematycznym, który jest powszechnie stosowany, jest model zapisany z wykorzystaniem teorii wektorów przestrzennych [1, 4, 12]. Model ten posiada wiele zalet, takich jak zwięzły zapis, prostota, możliwość łatwego przekształcania. W modelu tym pomija się zjawisko nasycenia magnetycznego (a także zjawisko prądów wirowych, zjawisko histerezy) [1], które może zostać uwzględnione w modelu poprzez zmienność indukcyjności L_d oraz L_q.

Równania napięciowe maszyny synchronicznej wzbudzanej magnesami trwałymi można schematycznie zapisać w postaci macierzowej jako:

$$\mathbf{U} = \mathbf{R}\cdot\mathbf{I} + \frac{d}{dt}\left(\boldsymbol{\Psi} + \boldsymbol{\Psi}_{PM}\right) \tag{1}$$

$\mathbf{U}$ – macierz napięć fazowych
$\mathbf{R}$ – macierz rezystancji uzwojeń fazowych
$\boldsymbol{\Psi}$ – macierz strumieni uzwojeń fazowych
$\boldsymbol{\Psi}_{PM}$ – macierz strumieni od magnesów trwałych
$\mathbf{I}$ – macierz prądów fazowych

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix},\ \mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}, \tag{2a}$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix},\ \boldsymbol{\Psi}_{PM} = \Psi_{PM}\begin{bmatrix} \cos(\omega\cdot t) \\ \cos(\omega\cdot t + \frac{2}{3}\cdot\pi) \\ \cos(\omega\cdot t + \frac{4}{3}\cdot\pi) \end{bmatrix} \tag{2b}$$

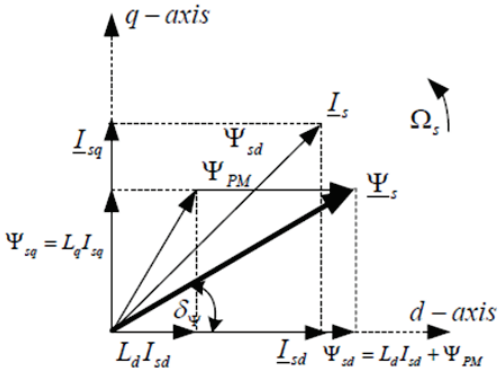
Macierz strumieni sprzężonych z uzwojeniami fazowymi można przedstawić w postaci zawierającej indukcyjności własne i wzajemne:

$$\boldsymbol{\psi} = \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} = \mathbf{L}\cdot\mathbf{I} = \begin{bmatrix} L_A & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_B & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_C \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \tag{3}$$

L_A, L_B, L_C - indukcyjności własne uzwojeń fazowych

L_{AB}, L_{BA}, L_{CA}, L_{AC}, L_{BC}, L_{CB} – indukcyjności wzajemne uzwojeń fazowych.

Stosując przekształcenia Clark i Parka, przedstawiony model można sprowadzić do modelu zapisanego w wirującym układzie współrzędnych zorientowanym względem strumienia od magnesów (strumienia wirnika). Wykres wektorowy modelu *dq* przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wektorowy wykres wielkości fizycznych maszyny w układzie związanym z wirnikiem

Równania napięciowe i strumieniowo-prądowe dla modelu silnika opisanego w wirującym układzie współrzędnych, zorientowanym względem strumienia wirnika, są następujące:

$$U_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - p_b\Omega_m\Psi_{sq} \tag{4}$$

$$U_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\Psi_{sq}}{dt} + p_b\Omega_m\Psi_{sd} \tag{5}$$

$$\Psi_{sd} = L_d I_{sd} + \Psi_{PM} \tag{6}$$

$$\Psi_{sq} = L_q I_{sq} \tag{7}$$

L_d – indukcyjność w osi *d*, L_q – indukcyjność w osi *q*, Ψ_{PM} – strumień od magnesów trwałych, p_b – liczba par biegunów, Ω_m – prędkość kątowa wirnika, R_s – rezystancja uzwojenia fazowego, I_s – wektor prądu stojana, I_d, I_q – składowe prądu, w osi *d* oraz *q*.

Zapis ten jest bardzo przydatny w analizie wektorowych algorytmów sterowania maszynami prądu przemiennego [6]. Zazwyczaj sterowanie takie realizowane jest w układzie wirującym przedstawionym na rysunku 3. Istotną zaletą sterowania wektorowego jest możliwość niemalże dowolnej orientacji wektorów przestrzennych napięcia i prądu, co prowadzi (w każdej chwili czasu) do minimalizacji uchybu pozycji/prędkości. Sterowanie to wymaga znajomości parametrów

maszyny. Znajomość tych parametrów wydaje się być istotna dla predykcyjnych algorytmów regulacji prądu.W literaturze brakuje pozycji opisującej szczegółowo wpływ zmiany wartości parametrów modelu obwodowego na jakość regulacji algorytmów predykcyjnych, których równania wynikają bezpośrednio z równań maszyny.

Poprawne wyznaczanie tych parametrów pozwala uzyskać wysoką jakość regulacji [8], a także pozwala, już na etapie badań symulacyjnych, wyznaczyć parametry użytkowe maszyny (moc, moment, sprawność, stałą napięciową i stałą momentu) [2, 3, 7, 9, 10].

Ze względu na charakterystykę magnesowania stali, z której wykonane są blachy stojana i wirnika, niezbędnym jest uwzględnienie nasycania się stali. Objawia się to zmianą indukcyjności własnych i wzajemnych uzwojeń fazowych w funkcji prądu i położenia wirnika.

Warto jednocześnie podkreślić, że obecnie próbuje się modyfikować tradycyjne obwodowe modele maszyn, w celu uwzględnienia zjawisk niesinusoidalnego rozkładu pola magnetycznego w szczelinie powietrznej, nasycenia magnetowodu, strat w żelazie, czy odziaływań skrośnych w osiach *d* oraz *q* [11].

3. Wyznaczanie indukcyjności własnych uzwojeń fazowych

Zagadnienie wyznaczania indukcyjności własnych uzwojeń fazowych oraz indukcyjności w osi *d* oraz *q*, a także sprzężeń skrośnym w tych osiach, jest zagadnieniem dość szeroko omawianym w literaturze.

Indukcyjności własne uzwojeń fazowych A, B, C mogą zostać wyznaczone dla różnych wartości natężenia prądu stojana oraz różnych położeń wirnika. W miarę nasycania się obwodu magnetycznego maszyny, analiza jej pracy może być dokonywana z uwzględnieniem indukcyjności inkrementalnych, wyznaczonych dla konkretnego punktu pracy lub dla indukcyjności statycznych wyznaczonych jako stosunek strumienia do prądu w danej osi, Jednocześnie warto zaznaczyć, że uwzględnienie wszystkich zjawisk, jakie towarzyszą pracy maszyny – magnesowanie skrośne, prądy wirowe, anizotropia materiałów, jest zadaniem wyjątkowo trudnym.

Badania, których wyniki przedstawiono w artykule, przeprowadzono metodą opartą o formalizm Langrange'a, szerzej opisaną w pozycji [2]. Bazuje ona na całkowitej koenergii magnetycznej zgromadzonej w układzie:

$$W_m^* = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{2} i_i \cdot i_j \cdot L_{ij} \tag{8}$$

Rzeczywista maszyna elektryczna z magnesami trwałymi jest zasilana przez wiele cewek sprzężonych elektromagnetycznie – równanie napięć maszyny zawiera w sobie indukcyjności własne oraz wzajemne uzwojeń fazowych i może być zapisane schematycznie w postaci (1).

Do rozwiązania równania napięciowego konieczna jest znajomość wszystkich rezystancji uzwojeń, a także indukcyjności własnych i wzajemnych poszczególnych uzwojeń fazowych.

Warto podkreślić, że ze względu na istnienie sprzężeń magnetycznych pomiędzy poszczególnymi uzwojeniami fazowymi, wyznaczanie ww. indukcyjności staje się bardzo czasochłonnym i trudnym zadaniem obliczeniowym [2].

Dla każdego położenia wirnika i dla każdego prądu oraz kombinacji prądów linearyzuje się model wokoło punktu pracy i korzysta się z liniowych zależności opisujących koenergię magnetyczną, która zależy od wartości natężenia prądu w poszczególnych częściach czynnych maszyny oraz od wartości indukcyjności uzwojeń fazowych (8).

Procedura wyznaczania indukcyjności rozpoczyna się od wyznaczania indukcyjności własnych pojedynczych grup cewek (po przyjęciu zerowej wartości prądu w pozostałych cewkach). Następnie wyznacza się ponownie indukcyjności wzajemne cewek przy zasilaniu poszczególnych cewek parami. Wyznaczone w drugim kroku indukcyjności wzajemne uzwojeń fazowych uwzględniają wcześniej wyliczone wartości indukcyjności własnych uzwojeń fazowych. Procedura ta wymaga „zamrożenie" przenikalności magnetycznych w każdym punkcie analizowanej geometrii.

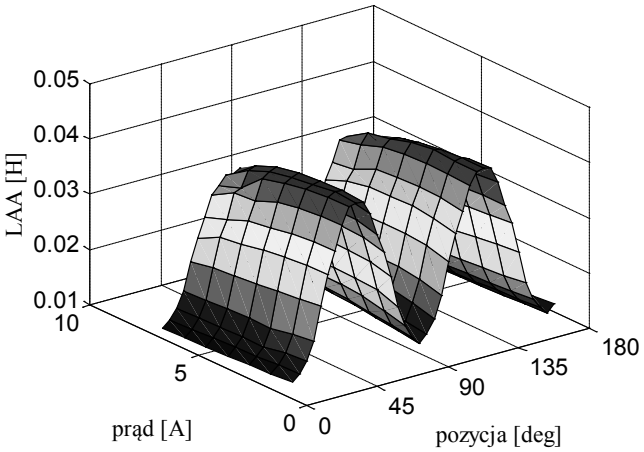
Indukcyjności w osi *d* oraz *q* określono znajdując dla każdej wartości prądu, minimalną oraz maksymalną wartość indukcyjności własnej uzwojenia fazowego [6].

Procedura wyznaczania indukcyjności została zaprogramowana przez autora z wykorzystaniem języka Visual Basic. Pozwoliło to zautomatyzować całą procedurę i umożliwiło swobodę w zapisie danych do pliku. Macierz danych jest przesyłana do programu Matlab i opracowana przez skrypt realizujący niezbędne przekształcenia, obliczenia, a także wyświetlanie danych. Obliczenia wykonano metodą elementów skończonych w programie Maxwell 2D firmy Ansys.

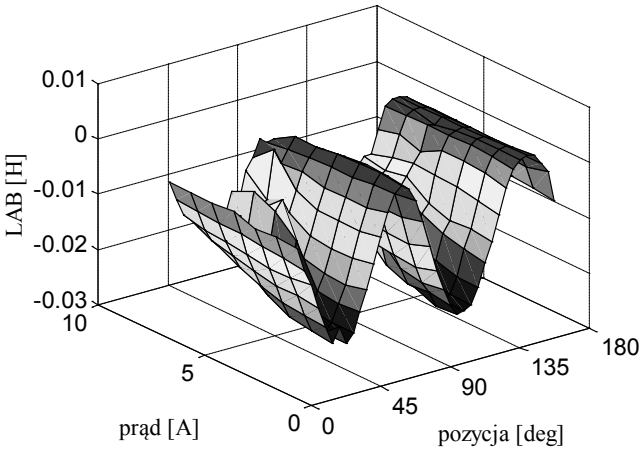
4. Wyniki badań symulacyjnych

Poprawne wyznaczenie indukcyjności własnych i wzajemnych uzwojeń fazowych z wykorzystaniem zaproponowanej metody jest pracochłonnym procesem obliczeniowym, który może być zautomatyzowany z wykorzystaniem odpowiednich narzędzi programistycznych.

Wyniki przedstawione na rysunkach 5 oraz 6 przedstawiają wartości indukcyjności własnych i wzajemnych uzwojeń fazowych wyznaczone zaproponowaną metodą.

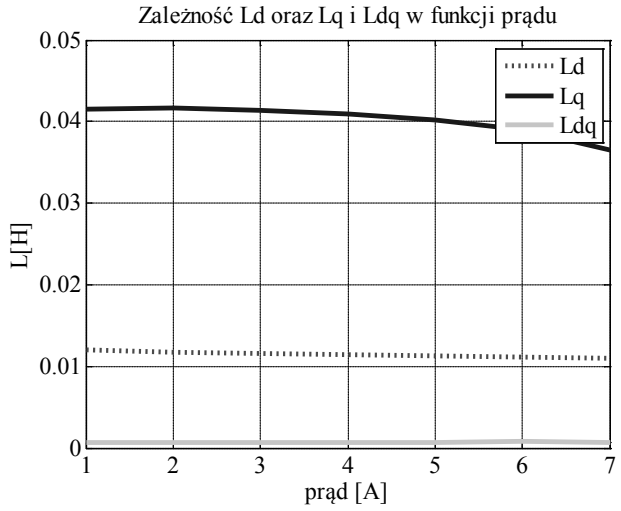


Rys. 5. Indukcyjność własna uzwojenia fazowego w funkcji kąta obrotu wału i natężenia prądu



Rys. 6. Indukcyjność własna uzwojenia fazowego w funkcji kąta obrotu wału i natężenia prądu

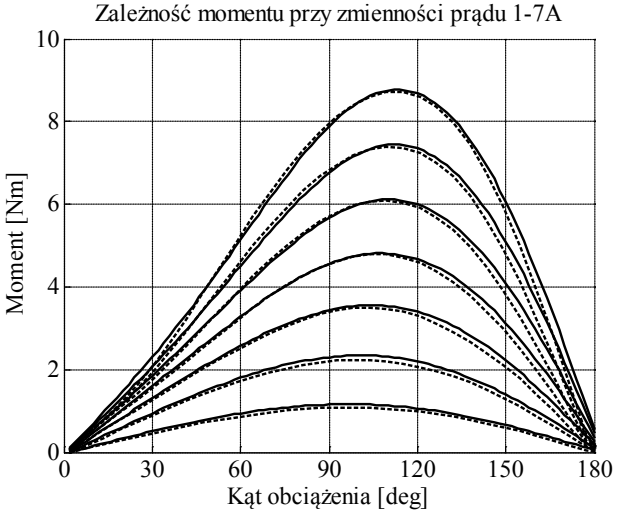
Na rys. 7 pokazano wartości indukcyjności w osi *d* oraz *q*, a także wartości indukcyjności wzajemnej pomiędzy osiami, oznaczoną jako L_{dq}, dla różnych wartości natężenia prądu.



Rys. 7. Indukcyjności L_d, L_q oraz L_{dq}

Wyniki badań pokazują, że wpływ użłobkowania stojana na wartość indukcji wzdłuż magnesu jest spory (rys. 2). Indukcyjności własne uzwojeń fazowych zależą w znacznym stopniu od nasycenia obwodu magnetycznego (dla analizowanego silnika zmienność prądu od 1 do 7 A powodowała zmianę maksymalnej wartości indukcyjności własnej uzwojenia fazowego od 41 do 36 mH). Można ogólnie stwierdzić, że dla struktur z rdzeniem, im większy prąd tym mniejsza indukcyjność własna uzwojenia fazowego – tzn. ten sam wzrost prądu powoduje coraz mniejszy wzrost strumienia skojarzonego z uzwojeniem.

Uzyskane wyniki zostały poddane weryfikacji poprzez porównanie wyznaczonego przebiegu momentu, dla różnych wartości natężenia prądów fazowych i różnych pozycji wirnika, otrzymanego z obliczeń polowych, z wynikami otrzymanymi z równania obwodowego na moment elektromagnetyczny (rys. 7).



Rys. 8. Moment elekromagnetyczny dla różnych pozycji wirnika i różnych natężeń prądu (linia przerywana – FEM, linia ciągła – model obwodowy)

Otrzymane wyniki wykazują bardzo dużą zbieżność, co potwierdza poprawność przedstawionej metody. Wartości średnie oraz podstawowe harmoniczne przebiegu momentu dla różnych prądów mają bardzo podobne wartości.

5. Wnioski

Wykorzystanie zaawansowanych narzędzi programistycznych takich jak program Maxwell 2D i Matlab pozwala na wyznaczenie indukcyjności własnych uzwojeń fazowych w funkcji prądu oraz kąta położenia wirnika na etapie projektowania maszyny. Zaproponowana w artykule metoda bazuje na możliwości „zamrożenia" przenikalności magnetycznej w każdym punkcie analizowanej geometrii, dla każdej wartości natężenia prądu i dla każdego położenia wirnika. Umożliwia to poprawne wyznaczenie tych indukcyjności oraz indukcyjności w osi *d* oraz *q,* co ma wpływ na jakość regulacji tych układów, których algorytmy regulacji opierają się o równania obwodowe modelu matematycznego maszyny synchronicznej.

Wraz ze wzrostem natężenia prądu indukcyjności w osiach *d* i *q* maleją – wynika to z nasycania się obwodu magnetycznego. Dla maszyn z magnesami umieszczonymi na wirniku zjawisko to jest pomijalnie małe (ze względu na stosunkowo dużą szczelinę powietrzną). Indukcyjności własne i wzajemne uzwojeń fazowych są zależne od kąta obrotu wału – jest to związane z użłobkowaniem stojana. Dla zaproponowanej geometrii maszyny, indukcyjność w osi *q* jest bardziej wrażliwa na zmianę wartości prądu w porównaniu z indukcyjnością w osi *d*.

W obliczeniach nie uwzględniono indukcyjności rozproszenia połączeń czołowych, którą należy dodać do wartości indukcyjności w osi *d* oraz *q*. Uzyskane wyniki można wykorzystać w układach regulacji prądu silników synchronicznych z magnesami trwałymi [7, 11].

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki, nr projektu N N510 508040 (2011-2013).

Literatura

[1] Gieras J., Wing M.: Permanent Magnet Motor Technology Design and Applications, University of Cape Town Rondebosch, South Africa, 1997.
[2] Gratkowski S. Pałka R.: Komputerowo wspomagana analiza i projektowanie urządzeń I układów elektromagnetycznych, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, 2001.
[3] Im J.: Inductance calculation method of synchronous reluctance motor including iron loss and cross magnetic saturation, IEEE, Transactions on Magnetics, Vol. 45, No. 6, 2009.
[4] Jagieła M., Grabiec T.: Coupling electromagnetic (FE) models to multidomain simulator to analyse electrical drives and complex control systems, Archives of Electrical Engineering. Vol. 59, No. 3-4, 2010.
[5] Le-Huy H., Slimani K., Viarouge P.: Analysis and implementation of a real-time predictive current controller for permanent-magnet synchronous servo driver, IEEE, Transactions on Industrial Electronics, Vol. 41, No. 1, 1994.
[6] Ohm D.: Dynamic Model of PM Synchronous Motors, Drivetech, Inc. Blacksburg, Virginia, 2000.
[7] Pałka R., Paplicki P., Piotuch R., Wardach M.: Analiza polowa i obwodowa silnika synchronicznego z magnesami trwałymi sterowanego regulatorem histerezowym, Przegląd Elektrotechniczny, Warszawa, 02b/2013.
[8] Putek P., Paplicki P., Slodička M., Pałka R.: Minimization of cogging torque in permanent magnet machines using the topological gradient and adjoint sensitivity in multi-objective design, Proc. of ISEM 2011, Italy, 2011.
[9] Rahman M., Zhou P.: Analysis of Brushless Pemanent Magnet Synchronous Motors, IEEE, Transactions on industrial Electronics, Vol. 43, No. 2, 1996.
[10] Rahman M., Zhou P.: Determination of saturated parameters of pm motors using loading magnetic fields, IEEE, Transactions on Magnetics, Vol. 27, No. 5, 1991.
[11] Shchur I., Rusek A., Makarchuk O.: Modelowanie symulacyjno-komputerowe silnika synchronicznego z magnesami trwałymi na podstawie wyników badań polowych, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 3/2012 (96), Katowice, 2012.
[12] Tunia H., Kaźmierkowski M.: Podstawy automatyki napędu elektrycznego, PWN, Warszawa, 1983.

Mgr inż. Rafał Piotuch
e-mail: rpiotuch@zut.edu.pl

Rafał Piotuch jest doktorantem w Katedrze Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Pod opieką prof. Ryszarda Pałki realizuje badania na temat regulatorów prądu dla silników synchronicznych z magnesami trwałymi.

Artykuł recenzowany

ROZSZERZONY FILTR KALMANA JAKO ESTYMATOR STANU W UKŁADZIE WAHADŁA ODWRÓCONEGO Z NAPĘDEM INERCYJNYM

Jarosław Gośliński, Adam Owczarkowski
Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny, Instytut Automatyki i Inżynierii Informatycznej

Streszczenie. *W pracy przedstawione jest wyprowadzenie pełnego obserwatora wektora stanu dla wahadła odwróconego z napędem inercyjny. Wahadło odwrócone z napędem inercyjnym stanowi mechanizm nieliniowy który posiada więcej stopni swobody niż wymuszeń. W celu poprawnego sterownia postuluje się o znajomość wszystkich zmiennych stanu. W pracy przedstawiony został model wahadła. Następnie autorzy dokonali dyskretyzacji modelu oraz zapisu modelu do postaci macierzowej, ostatecznie przedstawiony został obserwator bazujący na wyprowadzonym modelu oraz wyniki jego działania.*

Słowa kluczowe: Rozszerzony Filtr Kalmana, Wahadło odwrócone z napędem inercyjnym.

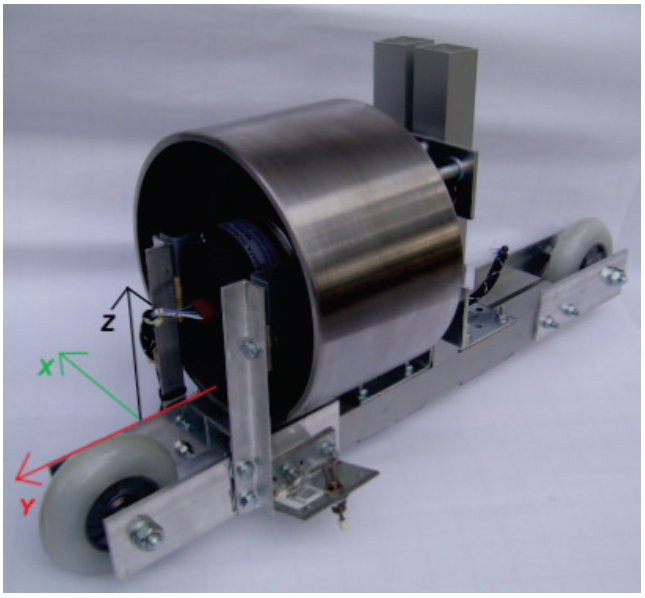
EXTENDED KALMAN FILTER AS A FULL STATE OBSERVER IN APPLICATION OF THE INERTIA WHEEL PENDULUM

Abstract. *This paper presents derivation of the full state observer for an inverted, inertia wheel pendulum (IWP). This is a non-linear, underactuated mechanical system and therefore it has more degrees of freedom than control variables. In order to control this mechanical system properly, knowledge of all state variables is needed. In this paper, authors presented IWP's model, which was later written in matrix form. Finally, based on the model, full state observer was derived. In the end its results were shown.*

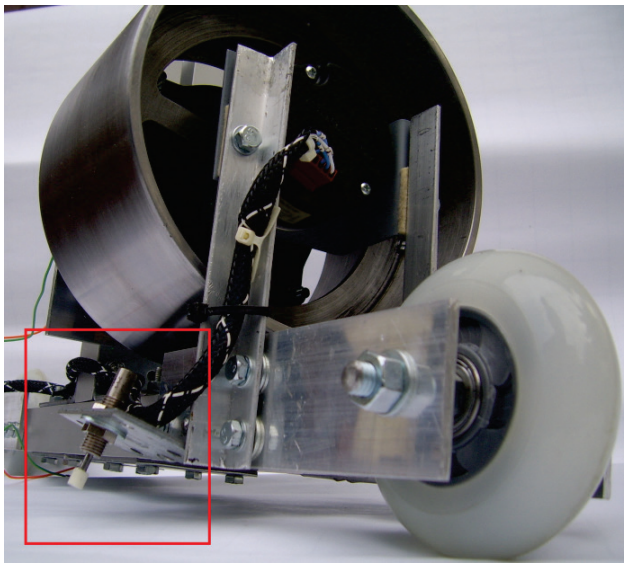
Keywords: Inertia wheel pendulum, Extended Kalman Filter.

Wstęp

Odwrócone wahadło z napędem inercyjny, to urządzenie mechaniczne, które pierwszy raz zostało opisane w [3]. Od tego czasu powstało wiele prac, których celem było określenie prawidłowego sterowania dla takiego układu mechanicznego. Tego typu urządzenie mechaniczne jest szczególne w swoim rodzaju – pozwala ono na utrzymywanie równowagi w pojazdach dwukołowych. Tym samym może służyć jako moduł stabilizacyjny w elektrycznych urządzeniach transportowych. Wahadło z napędem inercyjnym jest jednym z wielu typów wahadeł odwróconych, natomiast jego budowa została opisana w rozdziale pt.: „Wprowadzenie do modelu matematycznego". W kolejnym rozdziale, opisany został model matematyczny rozpatrywanego wahadła. Wahadło to posiada jedno sterowanie (prąd silnika) oraz grupę wyjść – zmiennych stanu, z których część jest estymowana przy użyciu klasycznego filtru Kalmana (fuzja sensorów), a pozostała część jest mierzona przy użyciu sensorów (enkoder, żyroskop oraz akcelerometr). W związku z problemem zakłóceń oraz z potrzebą posiadania wszystkich zmiennych stanu możliwie zbliżonych do wartość rzeczywistych, wprowadzony został estymator stanu, opisany w rozdziale trzecim. Wyniki działania estymatora oraz ich porównanie z pomiarami zostały przedstawione w rozdziale czwartym. W ostatnim punkcie autorzy dokonali podsumowania i wyciągnięcia wniosków z przeprowadzonych prac.



Rys. 1. Konstrukcja wahadła



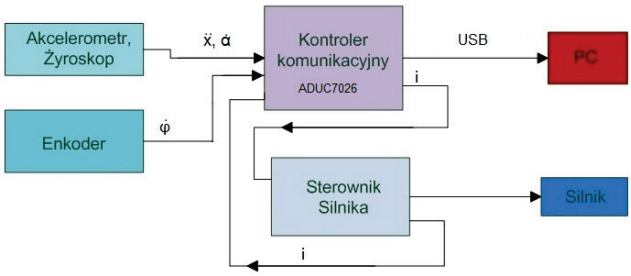
Rys. 2. Konstrukcja wahadła wraz z oznaczonym tłumikiem hydraulicznym

1. Wprowadzenie do modelu matematycznego

Przechodząc do modelu matematycznego wymagana jest wiedza o budowie omawianego wahadła. Wahadło składa się ze sztywnej konstrukcji na której zamontowany jest silnik prądu stałego, wyposażony w koło zamachowe. Cała konstrukcja jest połączona z podłożem za pomocą dwóch kół. Dzięki temu odebrany jest jeden stopień swobody natomiast możliwy jest ruch na boki oraz do przodu i tyłu. Konstrukcja omawianego wahadła została pokazana na rysunku 1, natomiast na rysunku 2 pokazano jeden z tłumików hydraulicznych (czerwona ramka), których zastosowanie pozwoliło wyeliminować niepożądany efekt przewrotu wahadła.

Celem układu sterującego wahadła jest utrzymanie kąta zerowego (licząc od pionu) w osi Y (oś oznaczona na rysunku 1). Jest to możliwe poprzez rozpędzanie oraz hamowanie koła zamachowego. Szczegóły działania wahadła zostały opisane w [1].

Wahadło poza unikatowym rozwiązaniem konstrukcyjnym, posiada układ sterownika opartego o mikroprocesor ADUC7026 firmy Analog Devices którego wykorzystanie umożliwiło realizację komunikacji wskazanej na rysunku 3.



Rys. 3. Kontroler komunikacyjny wraz z systemem sensorycznym oraz układem wykonawczym wahadła.

Obok procesora, bardzo ważny jest układ sensoryczny. Na potrzeby niniejszej pracy wykorzystano precyzyjny czujnik inercyjny składający się z trzech akcelerometrów i trzech żyroskopów oznaczony symbolem ADIS16355 i pokazany na rysunku 4.

Rys. 4. Precyzyjny czujnik inercyjny ADIS16355

2. Model matematyczny

Model matematyczny omawianego wahadła można przedstawić za pomocą równań stanu. Jest to jednak wygodne tylko wtedy, gdy model nie posiada wyrażeń nieliniowych. W omawianym przypadku występuje nieliniowość w postaci funkcji trygonometrycznej. Zatem w pierwszej części model zostanie przedstawiony za pomocą równań:

$$\ddot{\alpha} = \frac{I_k\ddot{\phi}}{I_r+I_k} + \frac{m_c g l_p \sin(\alpha)}{I_r+I_k} - \frac{b_\alpha \dot{\alpha}}{I_r+I_k}, \tag{1}$$

$$\ddot{\phi} = \frac{ki - b_\phi \dot{\phi}}{I_k}, \tag{2}$$

gdzie:
α – to kąt odchylenia wahadła od pionu (w osi Y),
I_k – moment bezwładności koła zamachowego,
I_r – moment bezwładności całkowity wahadła,
ϕ – prędkość kątowa koła zamachowego,
m_c – masa całkowita wahadła,
g – przyspieszenie grawitacyjne,
l_p – wysokość na której zawieszony jest środek masy wahadła,
b_α – współczynnik tarcia w osi wahadła,
k – wzmocnieni prądowe silnika,
i – prąd twornika silnika,
b_ϕ – współczynnik tarcia w silniku.

Model (1), (2) nie może bezpośrednio posłużyć do kolejnych rozważań. Podczas dalszych prac posługiwać będziemy się dyskretnym filtrem oraz estymatorem, tym samym model (1), (2) (nieliniowy oraz ciągły) musi zostać poddany dyskretyzacji. Na tym etapie linearyzacja zostanie pominięta, natomiast kolejnym krokiem jest przeprowadzenie dyskretyzacji powyższego modelu. Zakładając zastosowanie uproszczonej metody dyskretyzacji można uzyskać dyskretne macierze równań stanu modelu (1), (2):

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 & T_p & 0 \\ \frac{m_c g l_p \sin(\alpha)}{I_r+I_k} T_p & 1 - \frac{b_\alpha}{I_r+I_k} T_p & \frac{-b_\phi}{I_r+I_k} T_p \\ 0 & 0 & 1 - \frac{b_\phi}{I_k} T_p \end{bmatrix}, \tag{3}$$

$$B_k = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k}{I_r+I_k} T_p \\ \frac{k}{I_k} T_p \end{bmatrix}, \tag{4}$$

$$C_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{5}$$

$$D_k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{6}$$

gdzie: T_p - to okres próbkowania.

Model oparty o tak zdefiniowane macierze jest słuszny przy założeniu, że równania stanu posiadają następującą konstrukcję:

$$\underline{x}_{k+1} = A_k \underline{x}_k + B_k u_k, \tag{7}$$

$$\underline{y}_k = C_k \underline{x}_k + D_k u_k, \tag{8}$$

(gdzie: u_k - to sygnał wejściowy modelu tj. prąd silnika, a $\underline{y}_k$ to wektor wyjścia, którego skład jest tożsamy z wektorem stanu) oraz, że wektor stanu składa się z następujących zmiennych:

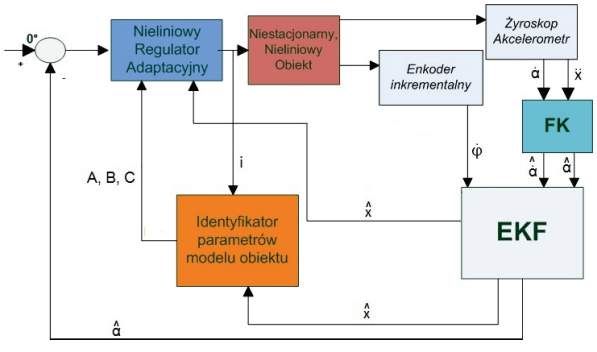
$$\underline{x}_k = \begin{bmatrix} \alpha \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}, \tag{9}$$

gdzie: kąt α odnosi się do odchylenia wahadła od pionu, prędkość kątowa $\dot{\alpha}$ określa częstość zmian kąta α, natomiast $\dot{\phi}$ określa prędkość kątową koła zamachowego.

Pierwsze dwie wielkości wektora stanu mierzone są za pomocą akcelerometru i żyroskopu, a następnie estymowane przy użyciu filtru Kalmana użytego w formie fuzji sensorowej. Trzecia wielkość wektora stanu mierzona jest bezpośrednio przy użyciu enkodera inkrementalnego.

3. Obserwator stanu

Pomimo faktu posiadania dostępu do całkowitego wektora stanu (jego wszystkich składowych), autorzy zdecydowali się zastosować pełny obserwator stanu, bazujący na modelu matematycznym wahadła. Obserwator ten został zastosowany zgodnie z rysunkiem 5, opisującym całkowity schemat sterowania wahadła.



Rys. 5. Schemat sterowania wahadła, oznaczenia: FK – fuzja sensorów, EFK – rozszerzony filtr Kalmana

Potrzeba zastosowania tego typu rozwiązania jest argumentowana silnie zaszumionymi sygnałami zarówno z fuzji sensorowej jak i z enkodera. Model matematyczny pobudzony jednakowym sygnałem jakim pobudzany jest obiekt sterowania, będzie symulować trajektorię generowaną poprzez wahadło. Trajektorie: symulowana jak i rzeczywista będą tożsame tylko w przypadku, gdy model matematyczny będzie wiernie odzwierciedlał dynamikę obiektu sterowania. Wprowadzenie zatem pełnego obserwatora stanu umożliwia dokonanie weryfikacji modelu jak i (w przypadku poprawności modelu) dokonanie lepszej estymacji wektora stanu.

Na mocy posiadanego modelu dyskretnego w ujęciu macierzowym (3), (4), (5), (6), można wprowadzić ogólną postać obserwatora stanu opartego o dwufazowy, rozszerzony filtr Kalmana (opisany w [2]):

a) faza predykcji:

$$\underline{\hat{x}}_k^- = f_k\left(\underline{\hat{x}}_{k-1}^-, u_{k-1}\right) \tag{10}$$

$$F_k = \frac{\partial f_k(\underline{\hat{x}}_{k-1}^-, u_{k-1})}{\partial \underline{\hat{x}}|_{\underline{\hat{x}}=\underline{\hat{x}}_{k-1}}} = \frac{\partial [A_k \underline{\hat{x}}_{k-1}^- + B_k\, u_{k-1}]}{\partial \underline{\hat{x}}|_{\underline{\hat{x}}=\underline{\hat{x}}_{k-1}}} \tag{11}$$

$$P_k^- = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k \tag{12}$$

b) faza korekcji:

$$H_k = \frac{\partial h(\underline{\hat{x}}_{k-1}^-)}{\partial \underline{\hat{x}}|_{\underline{\hat{x}}=\underline{\hat{x}}_{k-1}}} = \frac{\partial [C_k \underline{\hat{x}}_{k-1}]}{\partial \underline{\hat{x}}|_{\underline{\hat{x}}=\underline{\hat{x}}_{k-1}}} \tag{13}$$

$$K_k = P_k^- H_k^T \left(H_k P_k^- H_k^T + R_k\right)^{-1} \tag{14}$$

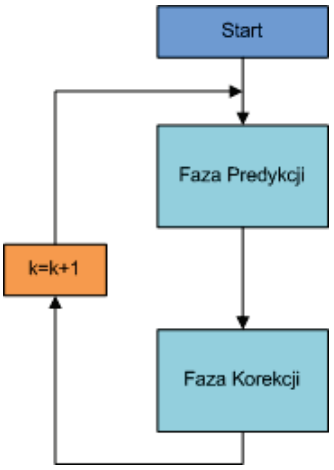
$$\underline{\hat{x}}_k = \underline{\hat{x}}_k^- + K_k\left(\underline{z}_k - C_k \underline{\hat{x}}_k^-\right) \tag{15}$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \tag{16}$$

W pierwszej fazie predykowany jest wektor stanu *a priori* $\underline{\hat{x}}_k^-$. Jest to możliwe dzięki wyliczeniu wektora stanu z modelu o postaci nieliniowej oznaczonego jako f_k. Następnie dokonywana jest linearyzacja modelu w punkcie trajektorii, na której znajduje się obiekt sterowania, uzyskując tym samym macierz F_k. Ostatecznie, na koniec fazy predykcji obliczana jest macierz kowariancji P_k^- (również *a priori*).

W drugiej fazie, wektor stanu jest poddawany korekcie. Korekta ta bazuje na wektorze pomiarowym $\underline{z}_k$ (złożonym ze składników wektora (9)), który koresponduje z wektorem stanu. Jako pierwsza, wyliczana jest macierz wyjścia H_k. Następnie, na podstawie tej macierzy jak i macierzy kowariancji P_k^-, obliczane jest wzmocnienie Kalmana K_k. W przedostatnim punkcie aktualizowany jest wektor stanu, a ostatecznie obliczona zostaje nowa macierz kowariancji.

Po całym cyklu działania obserwatora stanu, wynik zapisywany jest do wektora $\underline{\hat{x}}_k$, dodatkowo zwiększony zostaje licznik iteracji – dokładnie tak jak pokazano to na rysunku 6.



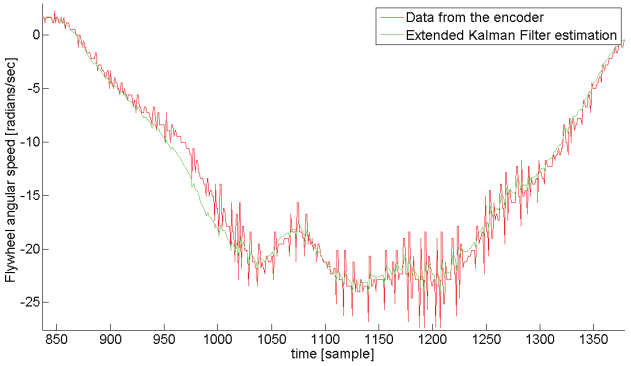
Rys. 6. Algorytm działania obserwatora stanu opartego o rozszerzony filtr Kalmana

Warto podkreślić, że rozszerzony Filtr Kalmana, działa w oparciu o dane zarówno z modelu matematycznego (w fazie predykcji) jak i z czujników pomiarowych i fuzji sensorowej w fazie korekcji. Jest on zatem odporny na błędy modelowania, a tym samym estymata jest w każdym punkcie optymalna dla zdefiniowanych nastaw filtru. Estymator posiada dwa parametry, które można modyfikować, pierwszy to macierz wariancji procesu Q_k, a drugi to macierz wariancji pomiarów R_k. W przypadku zwiększenia pierwszego z dwóch wyżej wymienionych parametrów, zmniejszone zostanie „zaufanie" na dane generowane w fazie predykcji (oparte o model). Jeśli natomiast zwiększona zostanie wariancja R_k wówczas spadnie „zaufanie" na wyniki pomiarów.

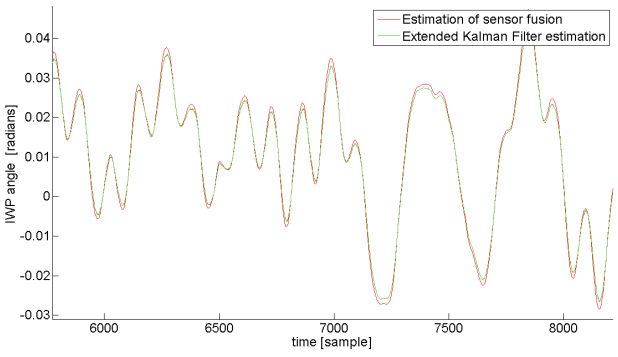
4. Wyniki działania estymatora stanu

Estymator zdefiniowany w poprzednim rozdziale został zaimplementowany w jednostce sterującej wahadła. Kolejnym krokiem było wykonanie testów. Układ pomiarowy i jednostka sterująca zamknięte w jednej obudowie mikroprocesora zostały połączone z komputerem PC, na którym dokonano akwizycji wszystkich danych, zarówno wymuszeń jak i wyników z estymatora. Algorytmy fuzji sensorów, rozszerzonego filtru Kalmana oraz identyfikator parametrów modelu zostały zaimplementowane w aplikacji PC, tym samym do minimum ograniczono liczbę danych przesyłanych pomiędzy komputerem a układem sterującym. Podczas testów skupiono się głównie na porównaniu wyników działania estymatora przy różnych wartościach macierzy wariancji szumu procesu (macierz Q_k) oraz macierzy wariancji szumu pomiarowego (macierz R_k). Jako referencję przyjęto sygnał pomiarowy pochodzący z fuzji sensorowej jak i z enkodera. Dla równych nastaw tj. $Q_k = R_k = 0{,}01$ wynik przedstawiono na rysunku 7.

Jak widać, estymata nie zawiera szumu, który jest stowarzyszony z pomiarami z enkodera. Ciekawym aspektem jest też *offset,* który pojawia się w danych z enkodera (po zliczeniu impulsów), a który został skutecznie wyeliminowany przy wykorzystaniu estymatora.



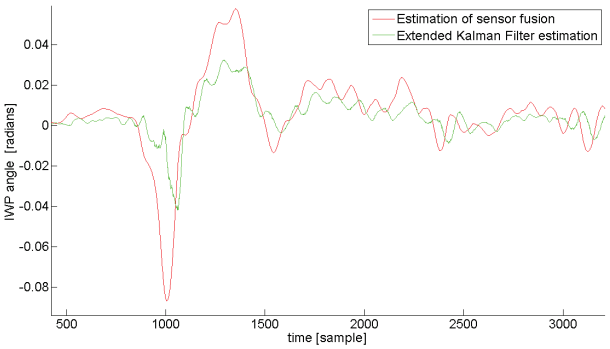
Rys. 7. Porównanie wyników estymaty obserwatora (kolor zielony) oraz pomiarów z enkodera (kolor czerwony)



Rys. 8. Porównanie wyników estymaty obserwatora (kolor zielony) oraz estymaty z fuzji sensorów (kolor czerwony)

W kolejnym kroku sprawdzono działanie estymtora dla kąta α oraz prędkości kątowej $\dot{\alpha}$. Był to kluczowy test, za pomocą którego można było sprawdzić, czy estymata uzyskana z filtru Kalmana działającego w konfiguracji fuzji sensorowej może być poprawiona poprzez rozszerzony Filtr Kalmana. Dla równych nastaw tj. $Q_k = R_k = 0{,}01$ uzyskano wyniki przedstawione na rysunku 8.

Jak widać estymaty nie różnią się od siebie, tym samym nie można wnioskować o poprawie wyniku podczas stosowania rozszerzonego estymatora. Na rysunku 9 pokazano wyniki eksperymentu dla innych nastaw tj. $R_k = 0{,}1$, $Q_k = 0{,}01$.

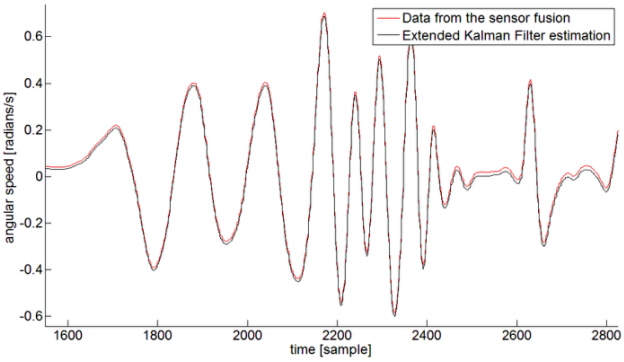


Rys. 9. Porównanie wyników estymaty obserwatora (kolor zielony) oraz estymaty z fuzji sensorów (kolor czerwony)

Dla takich nastaw, gdzie faza korekcji jest obarczona większym błędem (poprzez jawne zdefiniowanie wariancji szumu procesu), wynik rozszerzonego estymatora posiada ograniczoną amplitudę (sygnał jest osłabiony) oraz jest opóźniony. Dla tych nastaw rozszerzony estymator nie działa poprawnie oraz nie można mówić o poprawie wyniku fuzji sensorowej.

Zdecydowanie lepsze wyniki uzyskano dla prędkości kątowych wahadła. Na rysunku 10 przedstawiono wyniki działania estymatora dla prędkości kątowej wahadła. Można stwierdzić, że dzięki wykorzystaniu estymatora, możliwym stało się usunięcie offsetu prędkości kątowej, który nie został wyrugowany na etapie fuzji sensorów.

Po dokonaniu wnikliwej analizy, stwierdzono, że wynik fuzji sensorowej może być poprawiony tylko pod warunkiem pojawienia się skokowych zakłóceń na wejściu rozszerzonego filtru Kalmana lub w momencie pojawienia się offsetu w danych z żyroskopu. Offset ten nie może być wyeliminowany w przypadku stosowanie samej fuzji sensorów, co zostało potwierdzone po zastosowaniu rozszerzonego estymatora.



Rys. 10. Porównanie wyników estymaty obserwatora (kolor czarny) oraz estymaty z fuzji sensorów (kolor czerwony)

5. Podsumowanie

W pracy wprowadzono opis modelu matematycznego wahadła odwróconego, dla którego następnie stworzono obserwator wektora stanu. Obserwator pozwolił na estymację wszystkich zmiennych stanu, tym samym możliwym stało się zaimplementowanie sterowania uzależnionego bezpośrednio od wektora stanu (regulator *LQ*). Wyniki działania rozszerzonego estymatora wektora stanu można podzielić na trzy części. Pierwsza to wyniki dotyczące bezpośrednio kąta odchylenia wahadła od pionu. W tej części nie można mówić o zdecydowanej poprawie estymaty. Druga część dotyczy estymacji prędkości kątowej. Jak się okazało, estymator umożliwił pozbycie się offsetu prędkości, która nie została usunięta na poziomie fuzji sensorowej.

Trzecia część dotyczy prędkości kątowej koła zamachowego. W przypadku tej wielkości wyniki estymatora były zadawalające, natomiast jego zastosowanie pomogło usunąć zakłócenia stowarzyszone z sygnałem z enkodera.

Reasumując stwierdza się poprawę estymacji w stosunku do fuzji sensorów oraz pomiarów z enkodera. Użycie rozszerzonego filtru Kalmana pozwoliło na zastosowanie docelowego sterowania oraz na ustabilizowanie wahadła.

Literatura

[1] Gośliński J., Owczarkowski A.: Control and model parameters identification of inertia wheel pendulum. Proceedings of 9th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Rzym, 2012.

[2] Królikowski A., Horla D.: Identyfikacja Obiektów Sterowania, Wyd. 2, Wydawnictwo Politechniki Poznanskiej, Poznań 2005.

[3] Spong, M. W., P. Corke, R. L.: Nonlinear control of the inertia wheel pendulum. In research under grants CMS-9712170 and ECS-9812591, Urbana, Kenmore, France 1999.

Mgr inż. Adam Owczarkowski
e-mail:
adam.j.owczarkowski@doctorate.put.poznan.pl

W 2011 roku ukończył studia o kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Od tego czasu, jest studentem studiów doktoranckich na tej samej uczelni. Jego praca głównie skupia się na sensoryce opartej o technologię MEMS, algorytmach sterowania robotów i implementacji ich w systemach wbudowanych z układami FPGA.

Mgr inż. Jarosław Gośliński
e-mail:
jaroslaw.a.goslinski@doctorate.put.poznan.pl

Ukończył studia z tytułem magister inżynier na Politechnice Poznańskiej (2011). Od tego czasu jest studentem studiów doktoranckich na tej samej uczelni. Zajmuje się głównie sterowaniem robotów latających (UAV), identyfikacją parametrów modelu oraz obserwatorami stanu. Jego zainteresowania skupiają się również w obszarze algorytmu roju, formowania grup jednostek latających oraz układów cybernetyczno – fizycznych.

Artykuł recenzowany

PROSTAMED spółka z o. o.

PROSTAMED SPÓŁKA Z O.O.
00-511 Warszawa, Nowogrodzka 31
Biuro: 90-612 Łódź, ul. Gdańska 54/402

UC-CARE NaviGo™ Workstation

System UC-CARE NaviGo™

Opracowana technologia przeznaczona jest do stosowania przez lekarzy w klinikach i szpitalach. Oprócz powszechnie oferowanego na rynku rozwiązania polegającego na obrazowaniu 3D prostaty i zapisywaniu danych osobowych pacjenta, system firmy Prostamed jako jedyny na świecie dostarcza dokładnych informacji o położeniu pobranych próbek i ich orientacji w samej prostacie.

Proponowane rozwiązanie również jako jedyne na świecie – zachowuje pobrane próbki w nie zdeformowanej formie. Uzyskane w ten sposób dane są podstawą do określenia obszarów prostaty wymagających kolejnych biopsji i umożliwiają precyzyjne pobranie kolejnych próbek z obszarów podejrzanych o zmiany o charakterze nowotworowym. Takie rozwiązanie, jako jedyne na dziś na świecie – ogranicza do minimum ilość wykonywanych biopsji, które same ze swej natury niosą dla pacjenta ryzyko niechcianych powikłań. Proponowane rozwiązanie nie jest wrażliwe na ruchy pacjenta w czasie zabiegu. Sama technologia tworzenia modelu 3D prostaty umożliwi wkrótce fuzję otrzymanych obrazów prostaty z obrazami tej samej prostaty otrzymanymi za pomocą tomografii komputerowej (CT) i rezonansu magnetycznego (MRI). Rozwiązania obecne na rynku takiej możliwości nie mają. Kolejną przełomową cechą oferowanego rozwiązania jest możliwość zamienienia igły biopsyjnej na igłę do punktowej ablacji zdefiniowanych ognisk nowotworowych prostaty.

Politechnika

BADANIA
NAUKA
ROZWÓJ

ZAPRASZAMY
DO WSPÓŁPRACY:

Biuro Rozwoju, Promocji i Kooperacji
Politechniki Lubelskiej

e-mail: innowacje@pollub.pl
www.brik.pollub.pl