Informatics Control Measurement
in Economy and Environment Protection

INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL

2/2015

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)

Łucki Narodowy Uniwersytet Techniczny (Ukraina)
Lutsk National Technical University (Ukraine)

Okręgowy Urząd Miar w Łodzi

JN 1446

Oferujemy najszerszy zakres usług

legalizacji, wzorcowania i oceny zgodności w odniesieniu do metrologii prawnej i przemysłowej

Misją Okręgowego Urzędu Miar w Łodzi jest skuteczne realizowanie zadań wynikających z ustaw: Prawo o miarach, o towarach paczkowanych i o systemie oceny zgodności.
W tym celu uruchamiamy nowe i modernizujemy istniejące stanowiska pomiarowe oraz rozszerzamy zakres akredytacji i notyfikacji.
Od 2006 roku posiadamy akredytację PCA jako Zespół Laboratoriów Wzorcujących Nr AP 087 w oparciu o normę PN-EN ISO/ IEC 17025:2005.
Obecnie jesteśmy akredytowani w 17 dziedzinach pomiarowych, 42 poddziedzinach i 205 przyrządach pomiarowych.
Jako Jednostka Notyfikowana Nr 1446 posiadamy od 2007 roku zakres notyfikacji obejmujący wszystkie załączniki w ramach dyrektywy MID (przyrządy pomiarowe) i NAWI (wagi nieautomatyczne).

POLSKIE CENTRUM AKREDYTACJI
CERTYFIKAT AKREDYTACJI
LABORATORIUM WZORCUJĄCEGO
Nr AP 087
OKRĘGOWY URZĄD MIAR W ŁODZI

Przykładowe stanowiska pomiarowe

WYDZIAŁ MECHANIKI I AKUSTYKI

PRACOWNIA POMIARÓW DŁUGOŚCI I KĄTA

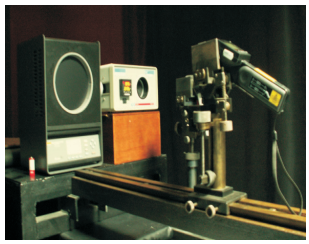
Stanowisko pomiarowe do wzorcowania pierścieni wzorcowych gładkich, sprawdzianów gwintowych walcowych oraz stożkowych

PRACOWNIA AKUSTYKI I DRGAŃ MECHANICZNYCH

Stanowisko pomiarowe do wzorcowania przyrządów z dziedziny drgań mechanicznych i akustycznych

WYDZIAŁ TERMODYNAMIKI

PRACOWNIA POMIARÓW CIŚNIENIA, TEMPERATURY I WILGOTNOŚCI



Stanowisko pomiarowe do wzorcowania pirometrów radiacyjnych

PRACOWNIA POMIARÓW OBJĘTOŚCI

Stanowisko pomiarowe do wzorcowania przyrządów tłokowych do pomiaru objętości: pipet, dozowników i biuret

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY

PRACOWNIA METROLOGII ELEKTRYCZNEJ

Stanowisko pomiarowe do wzorcowania liczników prądu stałego i przemiennego

PRACOWNIA CZASU, CZĘSTOTLIWOŚCI I PRĘDKOŚCI

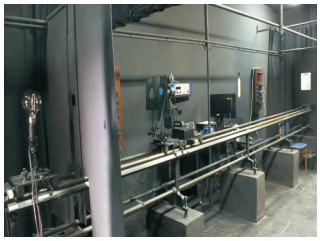
Stanowisko pomiarowe do wzorcowania tachometrów

WYDZIAŁ CHEMII ANALITYCZNEJ I FIZYKOCHEMII

PRACOWNIA WZORCÓW CHEMICZNYCH

Stanowisko pomiarowe do wytwarzania ciekłych refraktometrycznych materiałów odniesienia

PRACOWNIA FIZYKOCHEMII



Stanowisko pomiarowe do wzorcowania luksomierzy

Oferujemy wzorcowanie

- baz drogowych, płytek wzorcowych długości, przyrządów suwmiarkowych, wysokościomierzy do pomiaru wysokości kół pojazdów, przyrządów mikrometrycznych, wałeczków pomiarowych do gwintów, do kół zębatych i do otworów, czujników analogowych, cyfrowych i optycznych, przymiarów wstęgowych, sztywnych oraz półsztywnych, długościomierzy poziomych i pionowych Abbego, mierników do pomiaru poziomu wysokości napełniania zbiorników, grubościomierzy i głębokościomierzy czujnikowych, sprawdzianów tłoczkowych, mikroskopów pomiarowych, pierścieni wzorcowych, sprawdzianów gwintowych trzpieniowych walcowych i pierścieniowych walcowych, płytek kątowych, kątomierzy uniwersalnych, kątowników 90° dwuramiennych i walcowych, poziomic, płaskich oraz płaskorównoległych płytek interferencyjnych, liniałów powierzchniowych, profilometrów stykowych, płyt pomiarowych,
- wzorców masy, odważników i obciążników, wag nieautomatycznych, gęstościomierzy zbożowych,
- maszyn wytrzymałościowych, narzędzi dynamometrycznych, przetworników momentu siły, twardościomierzy, młotów wahadłowych Charpy'ego,
- kalibratorów akustycznych, mierników poziomu dźwięku, audiometrów tonowych, filtrów pasmowych, kalibratorów drgań mechanicznych, mierników drgań mechanicznych,
- pipet, biuret i dozowników tłokowych, kolb szklanych, cylindrów pomiarowych, biuret i pipet szklanych, zbiorników pomiarowych, samochodowych cystern pomiarowych, kolb metalowych II rzędu oraz innych przyrządów do pomiaru objętości,

- wodomierzy, przepływomierzy do wody, instalacji pomiarowych do ciągłego i dynamicznego pomiaru ilości cieczy innych niż woda, liczników objętości gazu,
- ciśnieniomierzy sprężynowych i elektronicznych, przetworników ciśnienia, manometrów do pomiaru ciśnienia tętniczego krwi, barometrów, higrometrów, termometrów do pomiaru temperatury powietrza, termohigrometrów, termometrów elektrycznych, termometrów szklanych, cieczowych, pirometrów radiacyjnych,
- woltomierzy analogowych i cyfrowych DC i AC, multimetrów analogowych i cyfrowych DC i AC, kalibratorów prądu i napięcia DC i AC, amperomierzy analogowych i cyfrowych DC i AC, amperomierzy cęgowych cyfrowych i analogowych DC i AC, mierników zabezpieczeń różnicowo - prądowych, mierników rezystancji izolacji, mierników rezystancji pętli zwarcia, mierników rezystancji uziemienia, mostków technicznych rezystancji, oporników stałych i regulowanych DC i AC, boczników prądowych, mostków i mierników indukcyjności i pojemności, wzorców stałych i regulowanych indukcyjności i pojemności, liczników energii elektrycznej jedno i trójfazowych, watomierzy analogowych i cyfrowych DC i AC, kalibratorów mocy AC, liczników energii elektrycznej prądu stałego,
- częstościomierzy - czasomierzy cyfrowych, chronokomparatorów cyfrowych, sekundomierzy elektronicznych, sekundomierzy mechanicznych, tachometrów, generatorów częstotliwości, przyrządów do sprawdzania tachografów samochodowych, przyrządów do sprawdzania taksometrów elektronicznych, liczników impulsów,
- luksomierzy, kalibratorów fotometrycznych, spektrofotometrów, wzorców achromatycznych, pehametrów, elektrod pehametrycznych, konduktometrów, refraktometrów wizualnych i fotoelektrycznych, polarymetrów wizualnych i fotoelektrycznych, analizatorów wydechu, analizatorów spalin samochodowych, gęstościomierzy oscylacyjnych,

- wytwarzanie certyfikowanych chemicznych materiałów odniesienia: wodnych roztworów wzorcowych jedno i wieloskładnikowych, ciekłych wzorców gęstości, wzorców twardości ogólnej, barwy i mętności wody, roztworów wzorcowych chlorku sodu, chlorku potasu i chlorku wapnia, ciekłych wzorców refraktometrycznych, wzorców do chromatografii gazowej oraz zestawów wzorcowych.

90-132 Łódź, ul. G. Narutowicza 75, centrala tel. + 48 42/ 678 77 66, fax + 48 42/ 678 37 68
e - mail: oum.lodz@gum.gov.pl www.gum.gov.pl/oumlodz

2/2015
kwiecień-czerwiec

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

INFORMATYKA AUTOMATYKA POMIARY

W GOSPODARCE i OCHRONIE ŚRODOWISKA

Informatics Control Measurement in Economy and Environment Protection

KWARTALNIK CZĘŚCIOWO DOTOWANY
PRZEZ MINISTERSTWO NAUKI I SZKOLNICTWA WYŻSZEGO

p-ISSN 2083-0157, e-ISSN 2391-6761

SPIS TREŚCI || CONTENTS str. || page

Agnieszka Banaszak, Justyna Wtorkiewicz
Nadzór nad wyposażeniem pomiarowym na przykładzie mierników natężenia oświetlenia
Supervision of laboratory measuring equipment based on the example of illuminance meters 3

Piotr Kocanda, Andrzej Kos, Adam Gołda
Fraktale w projektowaniu kondensatorów z poprzeczną pojemnością – wyniki pomiarów
Fractal geometries in lateral flux capacitor design – experimental results 6

Krzysztof Krasuski
Rozwój wyładowania łukowego w osiowym polu magnetycznym || Expansion of the discharge arc in the axial magnetical field 10

Łukasz Mucha
Innowacyjny projekt mechanizmu dla narzędzi laparoskopowych || Innovative project of mechanism for tools laparoscopic 13

Rafał Piotuch
Predykcyjny regulator prądu w strategii MTPA – badania symulacyjne || Predictive current controller with MTPA control strategy – simulation results 18

Ranya Al Darwich, Laurent Babout
Optymalizacja obliczeń trójwymiarowych lokalnych map kierunkowych z użyciem środowiska obliczeniowego Matlab
Optimization of 3D local orientation map calculation in the Matlab framework 22

Włodzimierz Kruczek
Koncepcja trakcyjnej podstacji prostownikowo-falownikowej w kolejowym systemie zasilania trakcyjnego 3 kV DC
Traction rectifier-inverter substation concept for 3 kV DC railway traction system 25

Kamil Krasuski
Wykorzystanie formatu IONEX do poprawy pozycjonowania na obszarze powiatu ryckiego
Utilization IONEX file for positioning correction over Ryki district area 30

Adam Cieślak, Jerzy Zgraja
Wykorzystanie metody Ångströma do szacowania dyfuzyjności cieplnej wsadu w układzie nagrzewania indukcyjnego
Utilisation of Ångström method for estimating a thermal diffusivity of charge in induction heating setup 35

Małgorzata Plechawska-Wójcik
Metody eliminacji artefaktów w sygnałach EEG || Methods of EEG artifacts elimination 39

Konrad Kierczyński, Tomasz Norbert Kołtunowicz
Właściwości elektryczne nanokompozytów $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ wytworzonych rozpylaniem wiązką argonu i tlenu jako układy kondensatorowe
Electrical properties of $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ nanocomposites produced by sputtering of argon and oxygen beam as capacitor systems 47

Magdalena Borys
Zastosowania analizy ruchu oczu w diagnostyce chorób neurodegeneracyjnych || Eye-tracking in diagnosis of neurodegenerative disease 55

Agnieszka Żelazna
Systemy fotowoltaiczne w budynkach – model pracy w warunkach klimatycznych Lublina a aspekty środowiskowe
Photovoltaic systems in buildings – model of work in Lublin climate conditions and environmental aspects 64

Pavlo Gumenyuk
Automatyczne sterowanie ruchem wstecznym pojazdu drogowego || Automation of road train motion in reverse 72

Tadeusz Citko (red.), Andrzej Demenko (red.), Mariusz Barański (red. techn.), Zbigniew Szczerba, Romuald Włodek, Ryszard Kacprzyk, Kazimierz Zakrzewski, Adam Szeląg, Stanisław Piróg, Mieczysław Hering, Stanisław Bolkowski
Ekspertyza Komitetu Elektrotechniki PAN: Mapa rozwoju dyscypliny Elektrotechnika (streszczenie)....wkładka || insert

KOLEGIUM REDAKCYJNE || EDITORIAL BOARD

redaktor naczelny	prof. dr hab. inż. Jan Sikora
z-ca redaktora naczelnego	prof. ing. Pavel Fiala, Ph.D.
z-ca redaktora naczelnego	prof. dr hab. inż. Dominik Sankowski
sekretarz redakcji	dr hab. inż. Andrzej Smolarz
redaktor językowy (ang., ros.)	mgr Tatiana Kolesnikova
skład i łamanie	mgr inż. Katarzyna Sobańska

REDAKTORZY DZIAŁOWI || TOPICAL EDITORS

Informatyka	prof. dr hab. inż. Dominik Sankowski
Elektronika	prof. ing. Pavel Fiala, Ph.D.
Automatyka	prof. dr hab. inż. Waldemar Wójcik

Reklama: okładki II, III, IV

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

Redakcja: 20-262 Lublin, ul. Bohdana Dobrzańskiego 3, tel./fax: 81 479 09 17, e-mail: redakcja@iapgos.pl

Skład i łamanie: Centrum Innowacji i Transferu Technologii LPNT Sp. z o. o. Druk: Drukarnia Rapida. Nakład: 300 egz.

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

RADA PROGRAMOWO-NAUKOWA

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

prof. Kazimierz Adamiak - *University of Western Ontario, Ontario, Kanada;* **prof. Darya Alontseva** - *D.Serikbaev East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazachstan;* **prof. Shin-ichi Aoqui** - *Sojo University, Kumamoto, Japonia;* **prof. Javier Ballester** - *Universidad de Zaragoza, Saragossa, Hiszpania;* **prof. Anatolij Bielecki** - *National Aviation University, Kijów, Ukraina;* **prof. Yurii Bobalo** - *Lviv Polytechnic National University, Lwów, Ukraina;* **prof. Oleksy Borysenko** - *Department of 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 Książek** - *Uniwersytet Medyczny w Lublinie, Lublin, Polska;* **prof. Piotr Lesiak** - *Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny, Radom, Polska;* **prof. Georgii Lysychenko** - *National Academy of Sciences, Institute of Environmental Geochemistry, Kijów, Ukraina;* **prof. Volodymyr Lytvynenko** - *Kherson National Technical University, Chersoń, Ukraina;* **mgr inż. Andrzej Łobzowski** - *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. 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, 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*

DOI: 10.5604/20830157.1159317

NADZÓR NAD WYPOSAŻENIEM POMIAROWYM NA PRZYKŁADZIE MIERNIKÓW NATĘŻENIA OŚWIETLENIA

Agnieszka Banaszak, Justyna Wtorkiewicz
Okręgowy Urząd Miar w Łodzi

Streszczenie. *Wyposażenie pomiarowe laboratorium powinno podlegać nadzorowi. Zakres tego nadzoru jest uzależniony od obszaru stosowania przyrządu pomiarowego i powinien obejmować wzorcowanie. Kluczową sprawą jest również prawidłowa eksploatacja urządzenia, we właściwy sposób i we właściwych dla danego przyrządu warunkach. Przyrząd może ponadto podlegać okresowej kontroli, sprawdzeniom i w razie konieczności naprawom.*

Słowa kluczowe: miernik natężenia oświetlenia, wzorcowanie, błąd pomiaru, właściwości metrologiczne

SUPERVISION OF LABORATORY MEASURING EQUIPMENT BASED ON THE EXAMPLE OF ILLUMINANCE METERS

Abstract. *Laboratory measuring equipment should be subject to supervision. The scope of this supervision depends on the field of the application of the instrument and should include calibration. The correct operation of the instrument is also a crucial factor. It should be proceeded in the proper manner and in right conditions. The instrument may also be subject to periodic inspections, checks and, if necessary, repairs.*

Keywords: illuminance meter, calibration, measurement error, metrological characteristics

Wstęp

W każdej metodzie pomiarowej przyrządy mające istotny wpływ na wynik pomiaru wymagają szczególnego nadzoru. Nadzór nad wyposażeniem pomiarowym laboratorium może przyjąć różne formy i zaczyna się do zakupu przyrządu spełniającego określone wcześniej wymagania. Jakość zakupionego urządzenia warto zweryfikować co, można zrealizować w różny sposób np. poprzez wzorcowanie przyrządu. Taka weryfikacja daje dużo informacji, które mogą być pomocne w czasie eksploatacji przyrządu i podczas następnych kontroli metrologicznych.

1. Wybór nowego wyposażenia pomiarowego - luksomierza

Kupując nowe wyposażenie pomiarowe nie mamy pewności, czy jest ono potocznie mówiąc "dobre". Niektórzy użytkownicy uważają, że nowy przyrząd pomiarowy jest "dobry", ponieważ jest nowy. „Nowy" nie zawsze znaczy jednak znaczy „lepszy".

Zakup właściwego urządzenia, co jest pierwszym etapem nadzoru nad danym wyposażeniem, nie jest sprawą prostą. Oferta rynkowa jest szeroka i generalnie jakość przyrządu determinuje jego cenę. Najwyższa cena na rynku nie oznacza jednak automatycznie, że zakupiony przez nas przyrząd będzie najwyższej jakości. Jak zyskać pewność, że zakupiony przyrząd jest „dobry"? Przed zakupem warto zastanowić się nad tym, na jakie parametry powinniśmy zwrócić uwagę i jakie mamy wymagania względem interesującego nas przyrządu pomiarowego. Po dokonaniu zakupu warto te oczekiwania zweryfikować. Chcąc mieć pewność, że uzyskane wyniki z pomiarów są wiarygodne, powinniśmy również zaplanować przyszły sposób nadzorowania wyposażenia pomiarowego.

Chcąc zakupić nowe wyposażenie pomiarowe np. luksomierz służący do pomiaru natężenia oświetlenia powinniśmy zastanowić się nad kilkoma problemami. Ważnym parametrem na jaki powinniśmy zwrócić uwagę jest zakres pomiarowy oraz dokładność przyrządu. Każdy z producentów podaje w specyfikacji przyrządu pewne informacje dotyczące np. zakresu wskazań, zakresu pomiarowego, rozdzielczości, dokładności czy największego dopuszczalnego błędu pomiaru. Każdy z wymienianych wyżej terminów ma swoją definicję w PKN-ISO/IEC Guide 99 [1] z którą użytkownik może się zapoznać przed dokonaniem zakupu, aby właściwie rozumieć dane techniczne podawane w specyfikacji.

Istotną sprawą w przypadku luksomierzy jest także właściwa konstrukcja przyrządu, w szczególności głowicy fotometrycznej, co pozwoli na wykonywanie pomiarów w prawidłowy sposób. Nie bez znaczenia będą miały dla użytkownika dodatkowe elementy współpracujące z przyrządem np. przystawka do pomiaru luminancji. Takie dodatki pozwalają rozszerzyć zakres możliwości pomiarowych laboratorium.

2. Wybór laboratorium wzorującego

Specyfikacja techniczna danego typu luksomierza nie jest gwarancją, że zakupiony egzemplarz spełnia określone przez producenta parametry lub wyspecyfikowane wymagania metrologiczne użytkownika. Najprostszym sposobem weryfikacji luksomierza pod względem metrologicznym jest wzorcowanie.

Wzorcowanie nie jest czynnością obligatoryjną, co oznacza, że użytkownik przyrządu pomiarowego sam decyduje, czy i w jakim zakresie chce mieć przeprowadzone wzorcowanie. Konieczność monitorowania jakości przyrządu oraz potrzeba zachowania spójności pomiarowej pomiarów rodzi potrzebę określenia częstotliwości, z jaką zakupiony luksomierz będzie wzorcowany.

Wzorcowanie (ang. calibration) jest formą potwierdzenia metrologicznego, które daje informację o jakości wyposażenia pomiarowego. Zgodnie z definicją podaną w PKN- ISO/IEC Guide 99 [1] wzorcowanie to "działanie, które w określonych warunkach, w pierwszym kroku ustala zależność pomiędzy odwzorowanymi przez wzorzec pomiarowy wartościami wielkości, wraz z ich niepewnościami pomiaru, a odpowiadającymi im wskazaniami, wraz z ich niepewnościami, a w drugim kroku wykorzystuje tę informację do ustalenia zależności pozwalającej uzyskać wynik pomiaru na podstawie wskazania". Celem wzorcowania jest dokładne poznanie błędów systematycznych przyrządu pomiarowego, czyli wyznaczenie charakterystyki błędów, która jest konieczna do prawidłowego ustalenia wyniku pomiaru. Ponadto wzorcowanie pozwala na utrzymanie spójności pomiarowej.

Spójność pomiarowa [1] jest to właściwość wyniku pomiaru, która pozwala na powiązanie go z odpowiednią jednostką miary poprzez nieprzerwany łańcuch wzorcowań.

Wzorcowaniem luksomierzy zajmują się laboratoria wzorcujące.

Przy wyborze laboratorium wzorcującego należy wziąć pod uwagę:

- zakres, w jakim laboratorium może wykonać pomiary danego luksomierza,
- zdolność pomiarową CMC,
- czy laboratorium ma potwierdzone kompetencje -laboratorium NMI np. GUM lub laboratorium akredytowane,
- koszt, miejsce i czas realizacji usługi wzorcowania.

Aby zyskać pewność, że uzyskane we wzorcowaniu wyniki będą miarodajne czyli wiarygodne, użyteczne oraz rzetelne warto skorzystać z laboratorium o potwierdzonych kompetencjach.

Za laboratoria o potwierdzonych kompetencjach uznaje się krajowe instytucje metrologiczne (w Polsce jest nią Główny Urząd Miar), Instytuty Desygnowane albo laboratoria wzorcujące akredytowane. W Polsce instytucją uprawnioną do akredytacji laboratoriów jest Polskie Centrum Akredytacji - PCA.

Akredytowane laboratoria wzorcujące mają wdrożoną normę PN-EN ISO/IEC 17025:2005 [4]. Norma ta zawiera wymagania, które powinny spełniać laboratoria badawcze i wzorcujące chcąc wykazać, że stosują system zarządzania jakością, są kompetentne technicznie oraz zdolne do uzyskiwania miarodajnych wyników. Na stronie PCA (www.pca.gov.pl) znajduje się m.in. wykaz akredytowanych w Polsce laboratoriów wzorcujących oraz dziedziny i zakresy w jakich dany podmiot jest akredytowany.

Brak akredytacji nie oznacza, że laboratorium nie jest kompetentne do wykonywania konkretnych wzorcowań. Oznacza jednak, że kompetencje te nie zostały potwierdzone w obiektywny sposób przez audytorów o odpowiedniej wiedzy i doświadczeniu w danej dziedzinie pomiarów.

3. Wzorcowanie luksomierzy

Luksomierz jest przyrządem przeznaczonym do pomiaru natężenia oświetlenia. Typowy luksomierz jest zbudowany z głowicy fotometrycznej, przetwornika i urządzenia wskazującego. W głowicy fotometrycznej znajduje się odbiornik promieniowania, którym może być ogniwo fotoelektryczne, fotopowielacz lub fotodioda. Głowica fotoelektryczna wyposażona jest także w filtr korekcyjny oraz rozpraszacz. Wielkością mierzoną podczas wykonywania wzorcowania luksomierza jest natężenie oświetlenia wyrażone w luksach (lx).

Wzorcowanie luksomierzy odbywa się metodą bezpośredniego porównania wskazań luksomierza z wartościami natężenia oświetlenia realizowanymi za pomocą wzorców światłości kierunkowej o temperaturze barwowej T_c=2856 K. Stanowisko do wzorcowania luksomierzy powinno spełniać wymagania normy PN-91/E-04040/02 [3]. Podczas wzorcowania luksomierza pomiary natężenia oświetlenia wykonywane są w ciemni fotometrycznej na ławie fotometrycznej o odpowiedniej długości.

Rys. 1. Stanowisko pomiarowe do wzorcowania luksomierzy

Przed przystąpieniem do wykonywania pomiarów natężenia oświetlenia należy sprawdzić zero luksomierza. Nawet w całkowitej ciemności fotodioda luksomierza generuje prąd elektryczny tzw. „prąd ciemny", który powinien być przez urządzenie odejmowany od sygnału generowanego przez światło. Większość luksomierzy jest wyposażona w przycisk „zero" lub analogiczną funkcję w menu. Pozwala to przezwyciężyć wpływ szumów na poprawność wskazań luksomierza. Sprawdzenie „zera" i somo zerowanie należy wykonać przy całkowicie zasłoniętym elemencie światłoczułym luksomierza. Brak kontroli zera stwarza ryzyko używania przyrządu obarczonego błędem systematycznym, który będzie rzutował na wyniki pomiarów szczególnie w zakresie niskich wartości natężenia oświetlenia.

W trakcie wzorcowania może się okazać, że błąd luksomierza przekracza wartość akceptowaną przez użytkownika urządzenia. W przypadku niektórych typów luksomierzy możliwe jest wtedy wykonanie adiustacji. Adjustacja (ang. adjustment) to zbiór czynności wykonywanych przy układzie pomiarowym zapewniających, że wartością wielkości, które mają być mierzone, odpowiadają odpowiednie wskazania [1]. Adiustacja ma na celu przypisanie wartości odniesienia do wartości mierzonej. Jest narzędziem, które pozwala utrzymać dokładność przyrządu na tym samym poziomie przez długi okres czasu neutralizując wpływ starzenia się elementów elektronicznych i optycznych luksomierza. Wzorcowanie wykonuje się po sprawdzeniu zera oraz przeprowadzeniu ewentualnej adjustacji. Jeżeli adiustację wykonuje laboratorium wzorcujące przyrząd, to wyniki pomiarów wykonanych przed adiustacją powinny zostać podane w świadectwie wzorcowania luksomierza.

Natężenie oświetlenia na powierzchni oświetlonej przez punktowe źródło światła w kierunku prostopadłym do tej powierzchni, oblicza się według wzoru 1.

$$E = \frac{I\Omega_0}{d^2} \tag{1}$$

gdzie: E – natężenie oświetlenia w płaszczyźnie odbioru głowicy fotometrycznej [lx], I – światłość kierunkowa wzorca światłości [cd], d – odległość pomiędzy wzorcem światłości a powierzchnią odbioru głowicy fotometrycznej [m], Ω_0 – jednostkowy kąt bryłowy [sr].

Jednostką natężenia oświetlenia jest luks (lx). Luks określany jest jako oświetlenie wywołane przez równomiernie rozłożony strumień świetlny o wartości jednego lumena, padający na powierzchnię jednego metra kwadratowego.

$$1\ lx = \frac{1\ lm}{1\ m^2} = \frac{1\ cd \cdot 1\ sr}{1\ m^2} \tag{2}$$

W tabeli 1 przestawiono parametry dwóch wzorców światłości, otrzymane w wyniku ich wzorcowania.

Tabela 1. Fragment świadectwa wzorcowania dwóch wzorców światłości

Oznaczenie wzorca	Napięcie elektryczne mierzone V	Prąd elektryczny odtwarzany A	Światłość cd	Temperatura barwowa K	Względna niepewność pomiaru %
1	97,458	0,8171	94,6	2856	1,5
3	94,077	0,8037	90,5	2856	1,5

Tabela 2. Zestawienie czynności metrologicznych: zerowania, adiustacji i wzorcowania

Działanie	Kto?	Kiedy?	W jaki sposób?	W jakim celu?
zerowanie	każdy użytkownik	przed przystąpieniem do pomiarów	przycisk „zero" lub opcja w menu	przygotowanie przyrządu do pomiarów
adiustacja	serwis / laboratorium wzorcujące	przed wzorcowaniem	w ciemni fotometrycznej za pomocą wzorców światłości	prawidłowe działanie przyrządu
wzorcowanie	laboratorium wzorcujące	z określoną częstością	w ciemni fotometrycznej za pomocą wzorców światłości	wyznaczenie bieżącej wartości parametrów metrologicz.

Świadectwo wzorcowania luksomierza może zawierać wyznaczone podczas wzorcowania wartości zmierzone w zestawieniu z wartościami odniesienia, błędy bezwzględne lub względne oraz niepewność pomiaru.

Błąd bezwzględny pomiaru to różnica pomiędzy wartością zmierzoną a wartością odniesienia:

$$\Delta x = x - x_0 \tag{3}$$

gdzie: Δx - błąd pomiaru, x - wartość zmierzona natężenia oświetlenia, x_0 - wartość odniesienia natężenia oświetlenia.

Błąd względny jest natomiast ilorazem błędu bezwzględnego i wartości odniesienia

$$\delta = \Delta x / x_0 = (x - x_0)/ x_0 \tag{4}$$

Błąd względny jest bezwymiarowy i najczęściej wyraża się go w procentach.

Każdemu wynikowi pomiaru towarzyszy niepewność. Z tego powodu uważa się, że wynik pomiaru nie może być wyrażony za pomocą jednej liczby, ale w postaci przedziału niepewności. Niepewność wyniku powinna obejmować wszystkie elementy wpływające na wynik, występujące w czasie pomiaru.

Wzorcowanie luksomierzy będzie zawsze obarczone błędami zastosowanej metody pomiarowej. Znając potencjalne źródła błędów powinniśmy dążyć do ich zminimalizowania.

Poniżej przedstawiono potencjalne źródła błędów i niepewności, które występują podczas wykonywania pomiarów fotometrycznych.

- niepewność wzorca światłości,
- niewłaściwe ustawienia wzorca światłości,
- niewłaściwe ustawienia wzorcowanego luksomierza,
- niewłaściwe ustawienie parametrów elektrycznych wzorca światłości,
- fluktuacja napięcia zasilania,
- starzenie się wzorca światłości,
- niewłaściwa temperatura otoczenia,
- światło rozproszone,
- odchylenie głowicy fotometrycznej wzorcowanego luksomierza od osi optycznej ławy fotometrycznej dla różnych odległości pomiarowych,
- niestabilne mocowanie wzorca światłości oraz głowicy fotometrycznej wzorcowanego luksomierza,
- błędy związane z czynnikiem ludzkim.

Wskazówki do opracowania procedury szacowania niepewności podczas pomiarów fotometrycznych można znaleźć w dokumencie EA-4/02 M:2013 [2].

Po otrzymaniu świadectwa wzorcowania laboratorium powinno przeprowadzić weryfikację otrzymanych wyników. Zgodnie z normą PN-EN ISO 10012:2004 [5] wzorcowanie jest tylko jednym z elementów potwierdzenia metrologicznego. Potwierdzenie metrologiczne obejmuje wzorcowanie wyposażenia pomiarowego, a następnie jego weryfikację metrologiczną. Weryfikacja metrologiczna oznacza ocenę wyników, które znajdują się w świadectwie wzorcowania zgodnie z wyspecyfikowanymi wymaganiami metrologicznymi postawionymi przez laboratorium.

4. Identyfikacja wyposażenia pomiarowego - luksomierza

Każdy przyrząd pomiarowy w tym również luksomierz jest identyfikowany przez nazwę typu oraz niepowtarzalny numer fabryczny. Należy zwrócić uwagę, że głowica fotometryczna, która jest odłączana od przyrządu, posiada swój własny numer fabryczny (w przypadku niektórych luksomierzy głowica fotometryczna posiada również własny typ). Każdy luksomierz, który ma odłączaną głowicę fotometryczną musi być używany z tą głowicą fotometryczną z którą został zakupiony i później wywzorcowany. Jeżeli użyjemy innej głowicy fotometrycznej wówczas nasze wyniki nie będą poprawne.

Zgłaszając luksomierz do podać laboratorium wzorcującemu informacje o nazwie typu i numerze fabrycznym przyrządu oraz zakresie wzorcowania. Jeżeli posiadamy luksomierz z odłączaną głowicą fotometryczną warto również podać informację o numerze fabrycznym oraz nazwie głowicy fotometrycznej. Pamiętajmy, iż wzorcowanie luksomierza wykonuje się z jedną konkretną głowicą fotometryczną, a świadectwo wzorcowania jest wystawiane na konkretny luksomierz w pełni identyfikowany (typ, numer fabryczny, numer fabryczny głowicy fotometrycznej).

Świadectwo wzorcowania nie ma terminu ważności z wyjątkiem sytuacji, kiedy to użytkownik zleca laboratorium wzorcującemu określenie terminu następnego wzorcowania. Ustalenie częstotliwości wykonywania wzorcowania jest zadaniem użytkownika przyrządu.

5. Inne sposoby nadzoru nad wyposażeniem pomiarowym

Nadzów nad wyposażeniem jest ważnym elementem działań laboratorium pozwalającym utrzymać odpowiednią jakość pomiarów. Cykliczne wzorcowanie nie jest jedynym narzędziem kontroli nad przyrządem. Użyteczne może być również sprawdzenie przyrządu przez serwis producenta. Działanie to nie jest sposobem na zachowanie spójności pomiarowej ale może dostarczyć laboratoriom dużo informacji o przyrządzie, co jest szczególnie przydatne na początku eksploatacji oraz po wystąpieniu jakichkolwiek awarii. Regularne działania serwisowe są w przypadku niektórych przyrządów koniecznością, szczególnie w przypadku urządzeń, których elementy z biegiem czasu ulegają zużyciu.

Dodatkowym sposobem kontroli przyrządu mogą być okresowe sprawdzenia. Można do tego celu wykorzystać certyfikowane materiały odniesienia *(ang. Certified Reference Material – CRM.* Certyfikowany materiał odniesienia to materiał odniesienia z certyfikatem, w którym określono jedną lub więcej właściwości danego materiału wraz z określeniem niepewności wraz z prawdopodobieństwem rozszerzenia wynoszącym zwykle 95 %.

W przypadku luksomierzy okresową kontrolę miernika można wykonać przy użyciu kalibratora fotometrycznego. Urządzenie takie jest dostępne na rynku polskim i jest dedykowane do określonych typów luksomierzy. Kalibrator fotometryczny przed użyciem należy wywzorcować w celu określenia natężenia oświetlenia, jakie urządzenie generuje w polu odbioru głowicy fotometrycznej.

6. Wnioski

Wyposażenie pomiarowe ma wpływ na wyniki pomiarów zatem właściwa eksploatacja i troska o okresowe sprawdzenia i wzorcowania jest koniecznym elementem działań laboratorium. Niejednokrotnie niektóre formy nadzoru nad wyposażeniem są obligatoryjne w świetle niektórych norm międzynarodowych lub przepisów prawa krajowego. Warto podjąć wysiłek systematycznego kontrolowania wyposażenia, aby mieć zaufanie do uzyskanych wyników pomiarów.

Literatura

[1] PKN ISO/IEC Guide 99:2010 Międzynarodowy słownik metrologii-Pojęcia podstawowe i ogólne oraz terminy z nimi związane. PKN, Warszawa 2010.
[2] EA-4/02 M: 2013 Wyznaczanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu, wrzesień 2013 wyd.01.
[3] PN-91/E-04040/02:1991 Pomiary promieniowania optycznego. Pomiary fotometryczne. Pomiar światłości.
[4] PN-EN ISO/IEC 17025:2005 Ogólne wymagania dotyczące laboratoriów badawczych i wzorcujących.
[5] PN-EN ISO 10012:2004 Systemy zarządzania pomiarami. Wymagania dotyczące procesów pomiarowych i wyposażenia pomiarowego.

Mgr inż. Agnieszka Banaszak
e-mail: oum.lodz.jn1446@gum.gov.pl

Absolwentka Wydziału Chemii Spożywczej i Biotechnologii Politechniki Łódzkiej. Od roku 2007 Pracownik Okręgowego Urzędu Miar w Łodzi, pełniący 4 lata funkcję Kierownika Technicznego Pracowni Fizykochemii Wydziału Chemii Analitycznej i Fizykochemii. Akredytowana przez PCA w dziedzinach: pehametria, konduktometria, polarymetria, spektrofotometria, fotometria, analiza wydechu, analiza gazów, gęstość (ciecz). Od roku 2014 Pełnomocnik ds. Systemów Zarządzania Jakością w Jednostce Notyfikowanej Nr 1446 oraz Zastępca Pełnomocnika ds. Jakości w Zespole Laboratoriów Wzorcujących AP 087.

Mgr inż. Justyna Wtorkiewicz
e-mail: oum.lodz.w42@gum.gov.pl

Absolwentka Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego i Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Kierownik Pracowni Fizykochemii w Okręgowym Urzędzie Miar w Łodzi, która oferuje m. in. wzorcowanie luksomierzy i kalibratorów fotometrycznych. Absolwentka Uniwersytetu Łódzkiego oraz Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, akredytowana przez PCA w dziedzinach: pehametria, konduktometria, polarymetria, spektrofotometria, fotometria, analiza wydechu, analiza gazów, gęstość (ciecz).

otrzymano/received: 18.10.2014 *przyjęto do druku/accepted: 05.04.2015*

DOI: 10.5604/20830157.1159318

FRACTAL GEOMETRIES IN LATERAL FLUX CAPACITOR DESIGN – EXPERIMENTAL RESULTS

Piotr Kocanda, Andrzej Kos, Adam Gołda
AGH University of Science and Technology

Abstract. *Capacitance density is increased when lateral flux structures are used in CMOS technologies compared to classic parallel-palate capacitors. Lateral-flux capacitors where designed based on three different fractal geometries. Capacitors are designed with and without special MMC metal layer available in some CMOS technologies for capacitor design. For theoretical analysis verification a special ASIC has been designed and fabricated in UMC 0.18um technology. Presented result are obtained by measurement of 5 ICs. Some capacitor structures have much higher capacitance density than classic parallel-plates capacitor without MMC layer. Few presented structures have higher capacitance density than parallel-plate capacitor made with MMC layer. Capacitors have small process parameters spread.*

Keywords: capacitors, CMOS integrated circuit, fractals

FRAKTALE W PROJEKTOWANIU KONDENSATORÓW Z POPRZECZNĄ POJEMNOŚCIĄ – WYNIKI POMIARÓW

Streszczenie. *W porównaniu do klasycznych kondensatorów z równoległymi okładkami użycie struktur z poprzeczną pojemnością pozwala na zwiększenie gęstości pojemności przy projektowaniu kondensatorów w technologiach CMOS. Kondensatory z poprzeczną pojemnością zostały zaprojektowane na bazie trzech rożnych fraktali. Struktury kondensatorów zostały zaprojektowane z i bez użycia specjalnej warstwy metalu MMC, dostępnej w niektórych technologiach CMOS, do projektowania kondensatorów. Do sprawdzenia teoretycznych rozważań specjalny układ ASIC został zaprojektowany i wykonany w technologii UMC 0.18um. Przedstawione wyniki są efektem pomiarów 5 układów scalonych. Niektóre struktury kondensatorów mają dużo większą gęstość pojemności niż klasyczne kondensatory bez warstwy MMC. Niewiele zaprojektowanych struktur ma większą gęstość pojemności niż kondensatory klasyczne z warstwą MMC. Rozrzut parametrów kondensatorów jest niewielki.*

Słowa kluczowe: kondensatory, układy scalone CMOS, fraktale

Introduction

While designing an ASIC in CMOS technology the space management is crucial. Designer often must struggle to fit in all components of a circuit in a restricted area of an IC. Increasing an available surface generates a considerable cost of fabrication. Analog, mixed-signals and radio frequency circuit require use components that are very area-consuming such as capacitors [4]. If high value of capacitance is required the capacitor occupies area even several times larger than all digital components. Typical CMOS capacitors are made as two layers of metal. Because of relatively thick interlevel oxide layer between plates those capacitors have low capacitance density. This drawback is more burdensome with technology scaling. While every other component in IC gets smaller the capacitors stay relatively the same, because vertical separation of metal layers does not change much in order to avoid cross-talk effects.

Capacitance density is increased when lateral-flux structures are used in CMOS technologies compared to classic parallel-palate capacitors [2]. A cross section of basic structure of a lateral-flux capacitor is presented in figure 1. Metal strips with the same plate number are electrically shorted. This arrangement of plates is much more advantageous with technology scaling. When a new CMOS technology is presented it usually means that smaller element can be designed and circuits are more compact. Lateral spacing between elements, in this case strips of metal creating plates, resulting from design rules are getting smaller, but vertical separation between metal layers and their thickness stay relatively the same. Thus influence of lateral flux on capacitance is growing with each new, smaller technology. Smaller bottom plate of lateral-flux capacitor result in decreased parasitic capacitance between plate and substrate. Additionally some of field lines originating from bottom strips of metal are terminated on neighboring plate instead of on substrate further decreasing parasitic capacitance. Use of lateral-flux structures has proven useful in increasing capacitance density [1, 3, 6]. In [3] achieved density is even several times bigger than of classic capacitor.

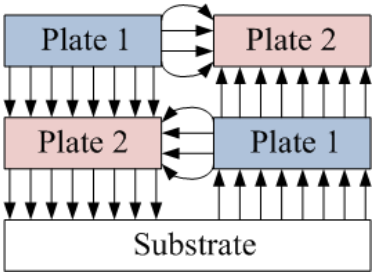


Fig. 1. Structure of lateral flux capacitor with reduction of parasitic capacitance to substrate

Although lateral-flux capacitors have many advantages over classic parallel-plate capacitors they have not replaced them in integrated circuits. In UMC 0.18um CMOS technology, which is the main focus of this paper, a new metal layer was introduced specifically for capacitor design. Layer MMC (Meta to metal Capacitor) is located between last (top) metal layer and second-to-last metal layer. Between MMC layer and lower metal layer there is very thin insulation in form of SiO_2. This layer of insulation is much thinner than between two layers of metal. MMC layer is top plate of MMC capacitor while second-to-last metal layer is bottom plate. Electrical charge is transferred to MMC layer through top metal and VIA. This approach increases significantly the capacitance density of CMOS capacitors. Unfortunately strict design rules regarding this layer are hindering the use of lateral-flux structures. In figure 2 there is presented cross section of lateral-flux structure with use of MMC layer witch marked design rules. Unfortunately publishing exact values of design rules would be a breach of license of the UMC 0.18um technology. Lateral flux is smaller between MMC top plates than metal bottom plated as a result of bigger separation. It is because it is required that MMC layer is enclosed by second to last metal layer by x. The distance between neighboring bottom plates is 0,5x while top plates separation is 5 times bigger. Top-down view of enclosure rule is presented in figure 3.

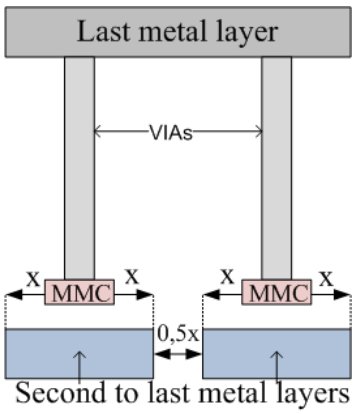


Fig. 2. Localization of MMC metal layer and some of design rules

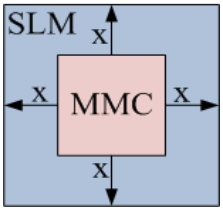


Fig. 3. Top down view of second to last layer and MMC layer with marked enclosure rule

This not only influences lateral-flux but vertical flux as well as area of top plates in lateral-flux capacitors is smaller than area of bottom plates. This paper compares the results of designing fractal lateral flux capacitors with MMC layer and without it.

1. Fractals and quasi-fractal structures

In order to maximize amount of lateral flux a horizontal border between two plates of capacitor need to be as long as possible. One can achieve that by using some fractals as a template for designing a structure. Fractals are self-similar mathematical patterns. Often they are very complicated and not translatable to CMOS topography. As most of fractals are curve based a quasi-fractals structures needs to be designed for implementation. For this three fractals where chosen. Hilbert curve, Peano Curve and Sierpiński fractal which CMOS designs we presented in [4]. They are all space-filling curves and have infinite length in finite area while their fractal number, describing their complexity, is infinite. In [1] capacitor was designed after Koch curve and in [3] Hilbert curve was used, but no direct comparison with other fractal structures was made.

Fractal lines are used as borders between adjacent plates. 11 capacitors where implemented in ASIC:

- Two reference capacitors: one, classic with plates made of two regular metal layers 4 and 5 – called Reference MIM (Metal Insulation Metal), second one is parallel plate MMC capacitor (Referace MMC). All other capacitors will be compared to these two.
- Three capacitors based on three fractals with low complexity number made from two metal layers 4 and 5 – called Hilbert MIM L, Peano MIM L, Siepiński MIM L. Top view of their layouts are presented in, respectively, figure 4, 5, 6.
- Three capacitors based on three fractals with low complexity number made with use of MMC layer – called Hilbert MMC L, Peano MMC L, Sierpiński MMC L. As their design is very similar to MIM L capacitors their layout are not shown.
- Three capacitors based on three fractals with high complexity number made from two metal layers 4 and 5 – called Hilbert MIM H, Peano MIM H, Siepiński MIM H. Their layouts are presented in, respectively, figure 7, 8, 9. In these structures plates are made from thinnest strips of metal possible in this technology in order to achieve longest border between neighboring plates. Plates are the same width as separation between them.

Design of MMC capacitor based on fractals with higher complexity number was not possible because of design rules. All capacitors have the same 50x50μm area. Figures 4 to 9 preserve scale.

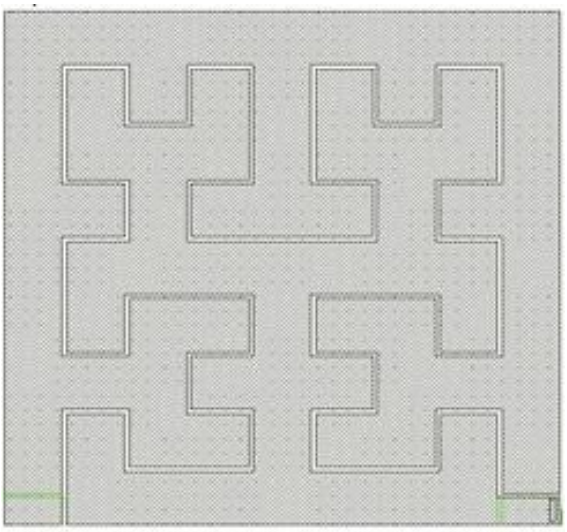


Fig. 4. Layout of Hilbert MIM 2

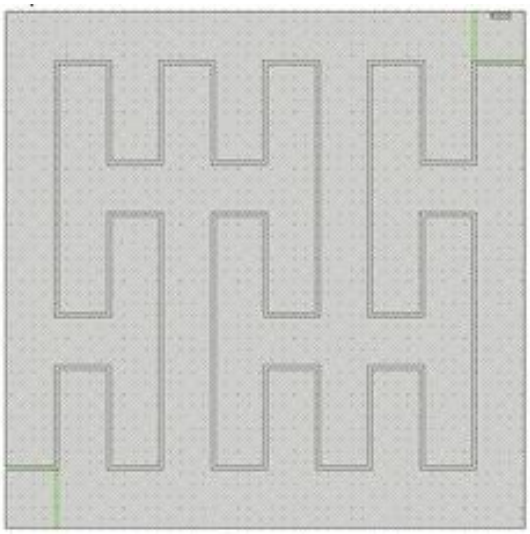


Fig. 5. Layout of Peano MIM 2

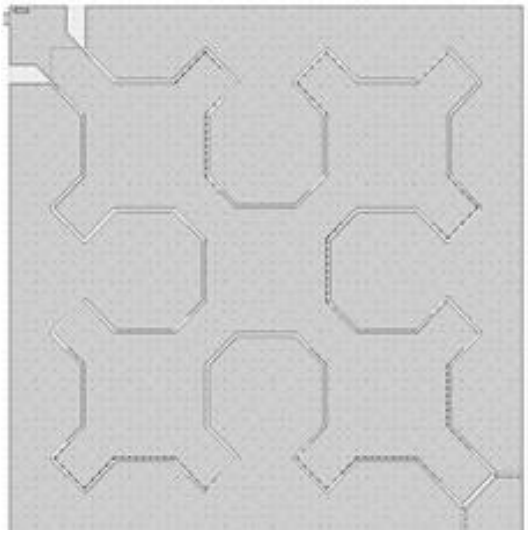


Fig. 6. Layout of Sierpiński MIM 2

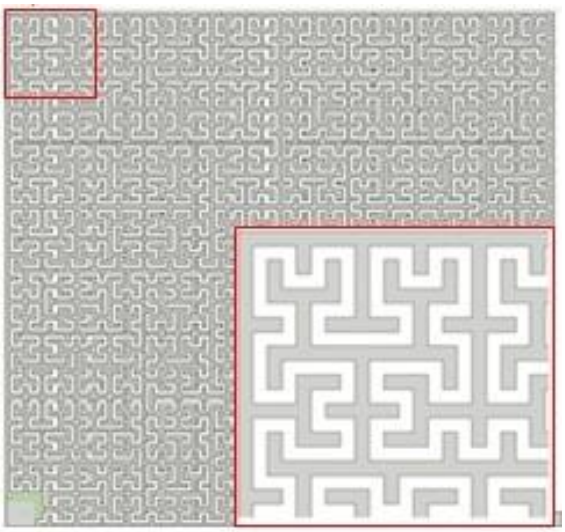


Fig. 7. Hilbert MIM H and zoomed in part of its area

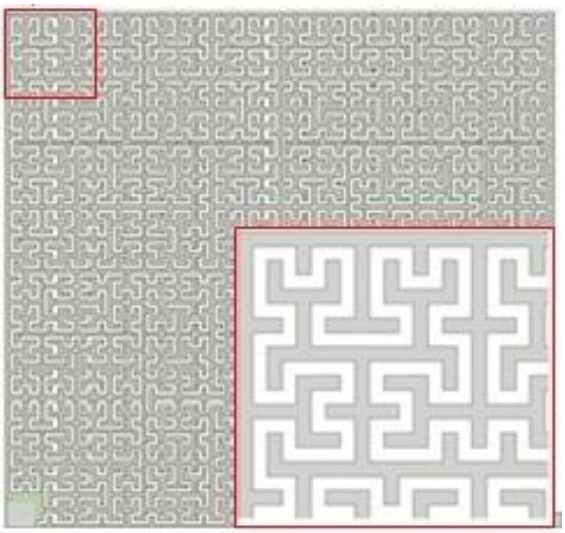


Fig. 8. Peano MIM H and zoomed in part of its area

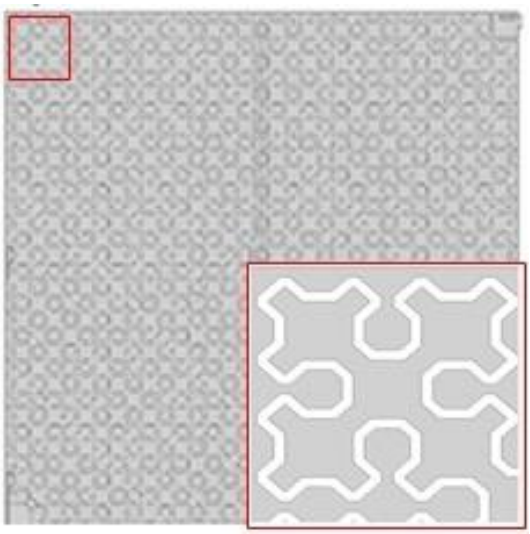


Fig. 9. Sierpinski MIM H and zoomed in part of its area

In order to better visualize difference between structures that use and doesn't use MMC layer a view from different perspective are presented in figures 10 and 11. Scale in figures 10 and 11 are not preserved for clarity.

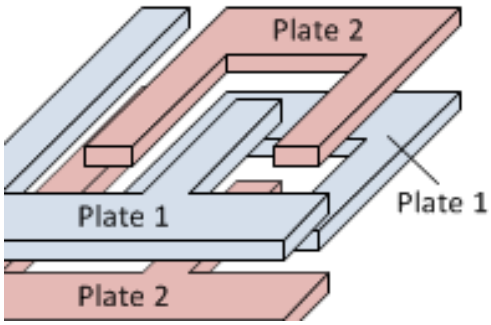


Fig. 10. Different view on MIM structure capacitor

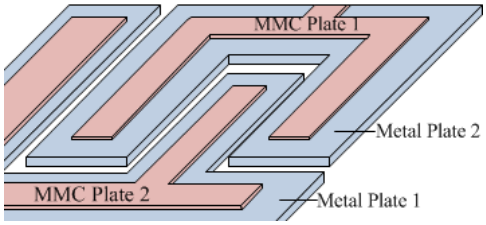


Fig. 11. Different view on MMC structure capacitor

2. Experimental results

After a fabrication of IC, shown in figure 12, capacitance of all structures was measured using probes in 5 chips from one batch. Root mean square and standard deviation of capacitance density were calculated. Results are shown in Table 1.

Tab. 1. Measured capacitance densities of designed structures

Capacitor	Root mean square of capacitance density [fF/μm^2]	Standard deviation [fF/μm^2]
Reference MMC	0,97	0,1
Reference MIM	0,64	0,05
Hilbert MIM L	0,7	0,05
Hilbert MIM H	1,07	0,09
Hilbert MMC L	1,02	0,09
Peano MIM L	0,55	0,05
Peano MIM H	0,77	0,06
Peano MMC L	0,98	0,09
Siepiński MIM L	0,42	0,03
Sierpiński MIM H	0,55	0,05
Sierpiński MMC L	0,78	0,07

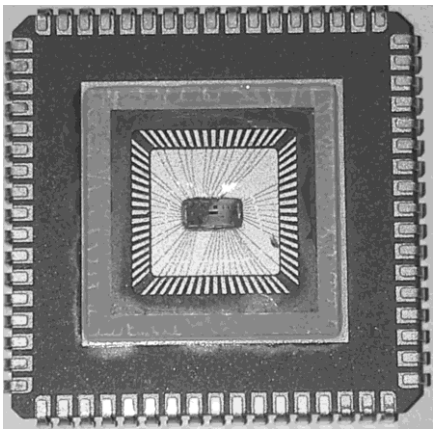


Fig. 12. The IC used for tests

Reference MMC capacitor has a capacitance density of 0.97fF/μm^2 and is 1.5 times bigger than Reference MIM which is as expected. Employing Sierpiński fractal for design of capacitor has opposite effect to indented. Capacitance density for Sierpiński MMC L, Sierpiński MIM L and Sierpiński MIM H is lower than reference capacitors, in fact, in comparison to rest of the structures Sierpiński capacitors have the lowest capacitance density. Use of structure Peano MIM L also gives poor results. In general MIM with low complexity number have capacitance density raised by little or nothing. Capacitors with high complexity: Hilbert MIM H and Peano MIM H, have higher capacitance than reference capacitor. Especially Hilbert MIM H with its 1.07fF/μm^2 capacitance density deserves special interest. Its parameters exceed even MMC capacitors and almost doubles capacitance of Reference MIM. Which is proof that lateral-flux gain is able to do more than compensate of loss of vertical-flux. Unfortunately fractal MMC capacitors have not much better parameters than parallel-plate MMC capacitor. Gain of 0.05fF/μm^2 for Hilbert MMC L does not justify use of much more complicated structure. Use of a lateral-flux structure decreases area of plates in capacitor, which is more severe with very restrictive design rules in UMC 0.18um CMOS technology. Loss of an area of parallel plates and, as a result, vertical flux is too big for lateral-flux to compensate with high gain.

3. Summary

Use of lateral flux capacitors which structure is based on Hilbert curve fractal can almost be half a size of typical parallel-plate capacitor made from two metals. However, if a dedicated layer for creating capacitors is in the disposition to designer, as it was in UMC 0.18um technology, use of fractal capacitors is much less advantageous. If an ASIC is designed in technology that allows for more effective use of lateral-flux capacitors complexity of structures can be increased. Loss of a plate area would not be as severe and thus capacitance density would be higher which in turn means that capacitors can be made on smaller area.

4. Acknowledgements

This project is supported by NCN NN515500340.

References

[1] Akcasu O.E.: High capacitance structures in a semiconductor device, U.S. Patent 5,208,725,1993.
[2] Aparicio R., Hajimiri A.: Capacity Limits and Matching Properties of Lateral Flux Integrated Capacitors, IEEE Conference on Custom Integrated Circuits, San Diego, USA, 2001, 365-368.
[3] Calvo B., Celma S., Gimeno C., Revuelto J.: Hilbert Curve Based Lateral Flux Capacitors, Proceedings of the 2009 Spanish Conference on Electron Devices, Santiago de Compostela (Spain).
[4] Chaw-Sing H., Chit H.N., Shao-Fu C, Shi-Chung S.: MIM Capacitor Integration for Mixed-Signal/RF Applications. IEEE Transactions on electron devices, vol. 52, no.7, 2005, 1399-1409.
[5] Gołda A., Kocanda P., Kos A.: Fractal geometries in lateral flux capacitor design. Proceedings of 2nd International Interdisciplinary PhD Workshop. Brno, Czech Republic, 2013, 90-94
[6] Hajimiri A., Lee T. H., Nasserbakht G. N., Shahani A. R., Samavati H., Fractal capacitors, IEEE Journal of solid-state circuits, vol. 33, no. 12, 1998.

M.Sc. Piotr Kocanda
e-mail: pkocanda@agh.edu.pl

Received the B.E. and M.Sc. degrees in electronics and telecommunications from the Akademia Gorniczo-Hutnicza University of Science and Technology, Krakow, Poland, in 2011 and 2012, respectively. received the B.E. and Ph.D. Currently, he is pursuing the Ph.D. Degree in electronic engineering at the Nano and Microsystems Division, Akademia Górniczo-Hutnicza University of Science and Technology.

Ph.D. Adam Gołda

Received his BSc and M.Sc. degrees in Electronics from AGH University of Science and Technology in 2001, and his PhD degree from AGH University of Science and Technology in 2008. During 2001 to 2013 he has been employed at the Department of Electronics at AGH-UST. His research interests are in the general area of energy losses minimization in integrated circuits, with an emphasis on temperature influence and include modeling and estimation of power loses of VLSI circuits, thermal phenomena in microelectronics, artificial intelligence, and distance learning.

Prof. Andrzej Kos
e-mail: kos@agh.edu.pl

Received Ph.D. in 1983 at AGH University of Science and Technology in Krakow, Poland in electronics, professor title since 2001. Since 1995 head of the Micro- and Nanoelectronics Systems Team in Department of Electronics, AGH University of Science and Technology. Author of over 190 articles, international conference papers and patents, author of 3 books including one printed in United Kingdom. Scientific interests focus on thermal issues in integrated circuits design and testing. Member of the Committee of Electronics and Telecommunication of Polish Academy of Sciences, many scientific committees. European Commission and Polish Ministry of Science and Higher Education expert.

otrzymano/received: 20.02.2014 *przyjęto do druku/accepted: 15.04.2015*

DOI: 10.5604/20830157.1159319

ROZWÓJ WYŁADOWANIA ŁUKOWEGO W OSIOWYM POLU MAGNETYCZNYM

Krzysztof Krasuski
Instytut Elektrotechniki, Zakład Wielkich Mocy

Streszczenie. Artykuł zawiera opis badań wykonanych w Instytucie Elektrotechniki. Badano dwa rodzaje styków generujących osiowe pole magnetyczne stosowane w komorach wyłączników próżniowych. Badania łuku łączeniowego wykonano rejestrując gaszenie łuku ultraszybką kamerą. W pierwszej części artykułu omówiono budowę stanowiska badawczego. W dalszej części przedstawiono wyniki badań zarejestrowane podczas prób zwarciowych w rozbieralnej komorze próżniowej. W konkluzji omówiono uzyskane wyniki badań.

Słowa kluczowe: rozkład pola magnetycznego, łuk elektryczny, wyłącznik próżniowy, styk unipolarny

EXPANSION OF THE DISCHARGE ARC IN THE AXIAL MAGNETICAL FIELD

Abstract. *The test results of the contacts generating the axial magnetic field made in Electrotechnical Institute are presented. Short-circuit test were made in dismountable vacuum chamber on two contacts. The diffusion arc of the interrupted short circuit currents recorded by means of a high speed camera are shown. At the first part of this paper the tests circuit and the equipment used were described. At the second part of this paper oscillograms and diffusion arc of the interrupted short circuit currents recorded by means high speed camera are attached. Conclusions contained the results of these investigations.*

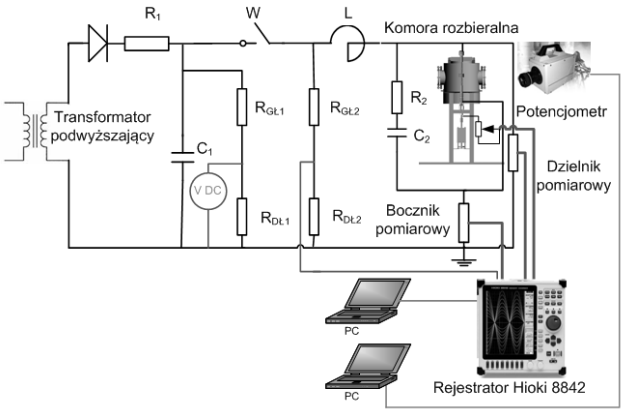
Keywords: distribution of electric and magnetic field, electric arc, vacuum circuit breaker, unipolar contact

Wstęp

W oparciu o dotychczasowe badania [1-4, 7-11] opracowano nowe konstrukcje styków unipolarnych generujących osiowe pole magnetyczne (AMF, Axial Magnetic Field). Wykonano modele fizyczne i przeprowadzono badania łączeniowe w rozbieralnej komorze próżniowej. Podczas badań rejestrowano wylądowania łukowe ultraszybką kamerą z prędkością 10000 klatek/s. Wyniki badań zamieszczono w powyższym artykule.

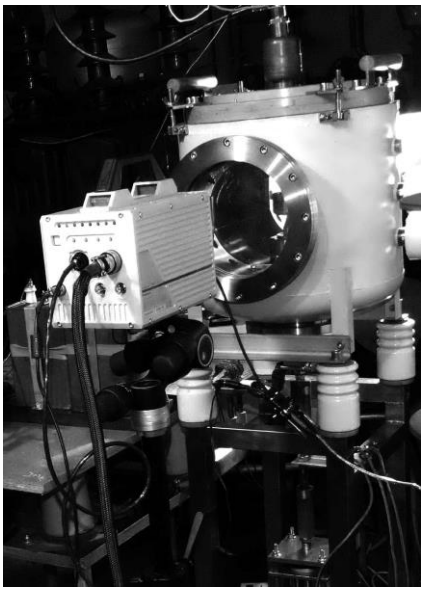
1. Układ probierczy

Do badań wykorzystano układ probierczy zasilany z baterii kondensatorów (rys. 1). Bateria złożona jest 70 kondensatorów o pojemności 27,5 μF. W układzie zastosowano dławiki o regulowanej indukcyjności w granicach około 40 mH. Niepewność pomiaru prądu w układzie zamieszczonym poniżej oszacowano na ±1 % wartości mierzonej. Niepewność pomiaru napięcia nie przekraczała ±1 % wartości mierzonej. Aparatura pomiarowa była wzorcowana zgodnie z wymogami Polskiego Centrum Akredytacji oraz Głównego Urzędu Miar.



Rys. 1. Obwód probierczy (C_1 – bateria kondensatorów 19,25 mF, C_2 – kondensator 0,23 μF – układ do regulacji stromości napięcia powrotnego, $R_{DŁ1}$, $R_{DŁ2}$ – pomiar napięcia ładowania, R_1 – rezystor ograniczający prąd ładowania baterii C_1, R_2 – rezystor do regulacji stromości napięcia powrotnego, dzielnik pomiarowy – przekładnia 460, bocznik pomiarowy 40 kA/2 V

Baterię ładowano maksymalnie do napięcia około 10 kV, uzyskując prąd przemienny o częstotliwości 50 Hz i wartości maksymalnej 16 kA. Podczas badań łączeniowych rejestrowano przebiegi ruchu styków, napięcia obwodu zasilania bezpośrednio na zaciskach komory oraz prąd wyłączany. Obiekty badane – styki zainstalowano w rozbieralnej komorze próżniowej wyposażonej w dwa wizjery umożliwiające obserwację procesów zachodzących podczas prowadzonych testów. Ze względu na znaczne rozmiary rozbieralna komora umożliwia badanie styków o średnicy od 30 mm do 100 mm stosowanych w stycznikach oraz w wyłącznikach średniego i wysokiego napięcia (125 kV). Przy użyciu ultraszybkiej kamery cyfrowej (rys. 2) rejestrowany jest przebieg wyładowania łukowego pomiędzy nakładkami styków podczas operacji otwierania. Filmy nagrano z prędkością 10 000 klatek na sekundę z rozdzielczością 768 × 768, ustawiono prędkość migawki na 1/270 0000 s. Badano zdolność wyłączania prądów zwarciowych w warunkach próżni wynoszącej około 3×10^{-6} mbar.



Rys. 2. Rejestracja zdjęć przy użyciu ultra-szybkiej kamery

Opisany wyżej układ pomiarowy wykorzystywany był wielokrotnie do badań styków komór próżniowych wyłączników średniego napięcia o zdolności łączeniowej nieprzekraczającej 16 kA.

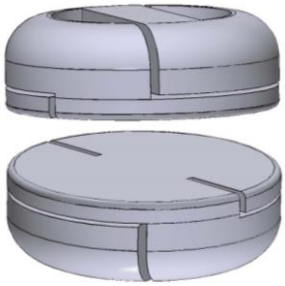
2. Badania łączeniowe

Modele styków AMF (rys. 3, 4) zainstalowano w rozbieralnej komorze próżniowej, która umożliwia obserwację rozwoju wyładowania łukowego podczas operacji otwierania.

Rys. 3. Styk unipolarny (2P) z nacięciami promieniowymi

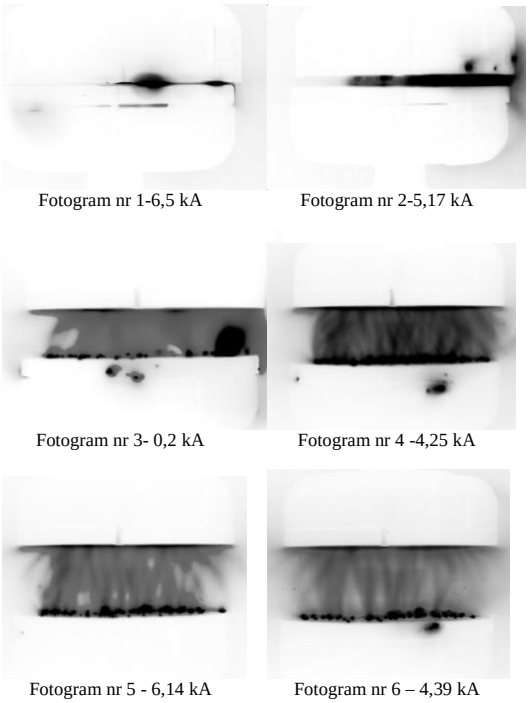
Rys. 4. Styk unipolarny (UNIS2) z nacięciami skośnymi

Przed rozpoczęciem prób łączeniowych szczeliny części cewkowej styku dolnego i górnego ustawiono naprzeciwko siebie, a belki są obrócone względem siebie o kąt 18° (rys. 5). Zestawiono wyniki prób łączeniowych, wybrano przykładowe oscylogramy i fotogramy dla poszczególnych typów układów stykowych.

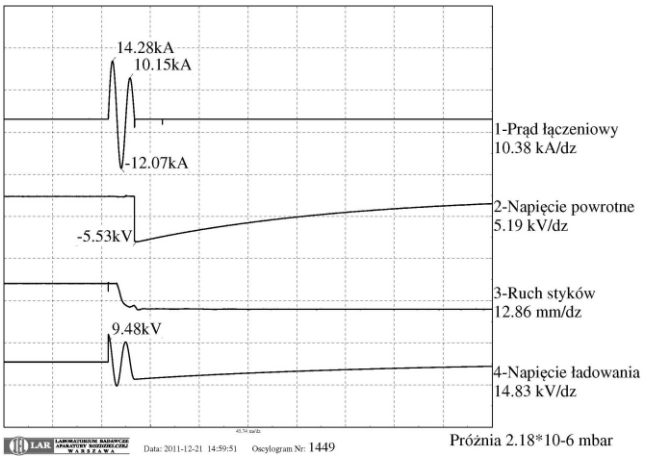


Rys. 5. Ustawienie styków podczas prób zwarciowych

Wybrano 6 fotogramów (rys. 6) dla około 50 % i 100 % wartości prądu wyłączanego (odpowiada to odstępom czasowym na przebiegu co 1/8 okresu, okres trwa 15 ms, a częstotliwość około 62 Hz). Zamieszczonym zdjęciom przyporządkowano opowiadające im wartości prądu. Niepewność pomiaru prądu łączeniowego wynosi ±2 % wartości mierzonej (dla prądu 15 kA, budżet niepewności zawiera się w przedziale 14,7-15,3 kA).

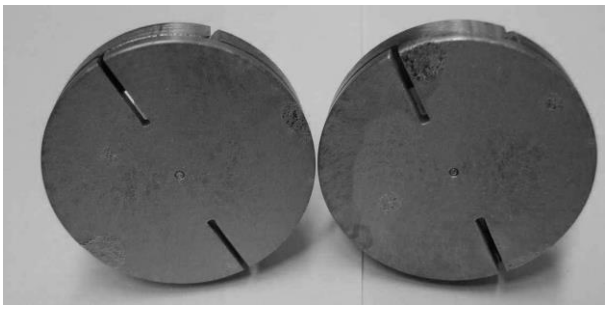


Rys. 6. Fotogramy zarejestrowane podczas prób łączeniowych prądu 6,14 kA dla styków wyposażonych nakładki z nacięciami promieniowymi



Rys. 7. Oscylogram z badań łączeniowych styków z nacięciami promieniowymi

Fotogramy przedstawiające rozkład łuku zaprezentowano po wstępnej obróbce graficznej fotogramów, aby uzyskać czytelności zarejestrowanych obrazów. Z obserwacji zdjęć wynika, że w I fazie wyłączania od 1 ms do 1,5 ms łuk ma postać skupioną i w tej formie może powodować uszkodzenia nakładek stykowych. W II etapie wyłączania formuje się łuk dyfuzyjny niemal na całej powierzchni nakładki stykowej. Następuje tworzenie wielu stóp łuku na powierzchni styków. W końcowej fazie maleje energia łuku i następuje wyłączenie prądu podczas przejścia przez 0 (rys. 7).



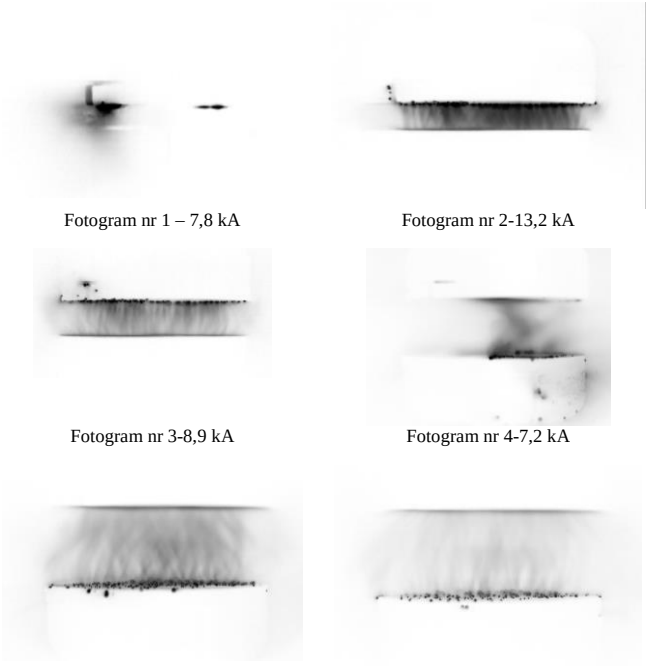
Rys. 8. Styki unipolarne po badaniach zwarciowych

Na zdjęciach styków po badaniach widoczne są ślady wypalenia w pobliżu nacięć (ostrych krawędzi, rys. 8). Na powierzchni nakładki nie wykryto znacznych uszkodzeń powstałych na skutek działania łuku elektrycznego. Podczas operacji zamykania na styki działa duża siła (500 N), która powoduje ich odkształcanie [5, 6]. Następuje wygięcie części dolnej generującej pole magnetyczne w kierunku nakładki stykowej. Deformacja styków powoduje nieprawidłowy rozkład pola magnetycznego, a co za tym idzie skupianie plamek katodowych w środku styków. Aby uniknąć deformacji stosowane są elementy usztywniające styki, które mają na celu ochronę przed odkształceniami mechanicznymi podczas operacji łączeniowych [8].

Aby porównać wpływ kształtu nakładek na rozkład łuku przeprowadzono próby łączeniowe styków z nacięciami skośnymi (rys. 4). Zarejestrowano przebieg otwierania dla prądu około 13 kA.

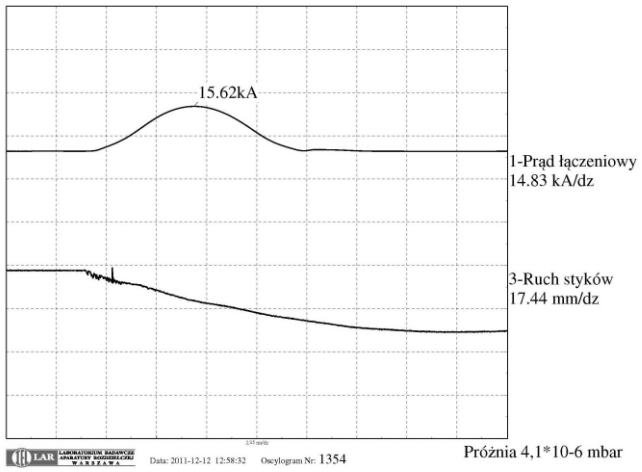
W początkowej fazie łuk ma kształt skupiony (rys. 9, fotogram nr 1), następnie rozprzestrzenia się wraz ze wzrostem prądu po powierzchni nakładki. W kolejnym etapie łuk ma postać dyfuzyjną przy maksimum prądu (rys. 9, fotogramy 2, 5). Na fotogramie nr 2 można zaobserwować znaczne zagęszczenie plamek łuku w sąsiedztwie anody.

Na rys. 10 przedstawiono styki po badaniach. Widoczne są ślady wypaleń w pobliżu nacięć na nakładkach, pozostała część styku nie została uszkodzona. Styki wyposażone w nakładki z nacięciami skośnymi wyłączały większe wartości prądu niż styki z nacięciami promieniowym.



Rys. 9. Fotogramy zarejestrowane podczas prób łączeniowych prądu 13.2 kA dla styków wyposażonych nakładki z nacięciami skośnymi

Rys. 10. Styki unipolarne (2S) po badaniach zwarciowych



Rys. 11. Oscylogram z badań łączeniowych styków z nacięciami skośnymi

Maksymalny prąd jaki wyłączył w trakcie trwania jednej półfali styk z nakładkami o nacięciach skośnych wynosił 15 kA przy częstotliwości 60 Hz. Oscylogram z rejestracją przebiegu prądowego zamieszczono na rys. 11. Kształt nacięć przy tej samej konstrukcji podstawy stykowej wpłynął na zwiększenie zdolności łączeniowej styku.

3. Podsumowanie

Badano dwa styki typu 2P i 2S różniące się jedynie rodzajem wykonanych nacięć na nakładkach stykowych. Wykonano po kilka cykli prób łączeniowych dla każdego modelu styku w zakresie prądu od 1 kA do około 15 kA. Wyładowania łukowe inicjowane są na brzegu nakładki stykowej, można to zaobserwować na fotogramie nr 1 rys. 6. Skutkuje to widocznymi wypaleniami styków (rys. 8).

Zarejestrowano przebieg badań kamerą do szybkich zdjęć, na których widoczny jest rozwój wyładowania łukowego od katody do anody. Na fotogramach widoczne są stopy łuku oraz miejsca inicjacji wyładowania łukowego w osiowym polu magnetycznym.

Zaobserwowano ślady wyładowań na katodzie oraz ślady większego zagęszczenia wyładowania łukowego na krawędziach styków i na ostrzach co nasuwa wniosek o konieczności zaokrąglenia krawędzi i ostrzy na nakładkach stykowych.

W stykach typu 2S lokalne większe nadtopienia powierzchni stykowych można będzie ograniczyć lub zupełnie wyeliminować przez zmianę kąta ustawienia styków względem siebie tzn. miejsca nacięć przesunąć np. o 30°, co może w znacznym stopniu zmniejszyć lokalne zagęszczenie strug prądowych.

Po wykonaniu licznych badań i oględzin fotogramów można stwierdzić, że przy zwiększaniu wartości prądu wyłączanego następuje stopniowo rosnące zagęszczenie strużek wyładowania łukowego w części centralnej przestrzeni międzystykowej.

Wielokrotne operacje zamykania i związane z tym uderzenia styków o siebie spowodowały znaczne deformacje zarówno nakładek jak i podstaw stykowych, co wyraźnie widać na rys. 8 i rys. 10. Wymagane jest wzmocnienie konstrukcji styków i nakładek by uzyskać większą odporność na udary mechaniczne.

Literatura

[1] Borkowski P.: Nowoczesne metody badań zestyków elektrycznych, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2013.
[2] Budzyński P.: Wyłączniki próżniowe wysokiego napięcia, Materiały konferencyjne „Łączniki 2012" Pieczyska, 33-41.
[3] Chmielak W.: Badanie prądów połukowych w wyłączniku próżniowym w układzie syntetycznym z wymuszonym obcięciem prądu. Wiadomości Elektrotechniczne, 7/2007.
[4] Grodziński A., Szymański A., Sibilski H., Dzierżyński A., Berowski P., Hejduk A., Krasuski K.: Rozbieralna komora próżniowa do badań łuku dyfuzyjnego, Elektronika: Konstrukcje, Technologie, Zastosowania, 8/2011, 45-47.
[5] Janiszewski J., Batura R., Emisja materiału elektrod łączników próżniowych podczas procesów łączeniowych, Przegląd Elektrotechniczny, 10/2008, 159-161.
[6] Janiszewski J., Józefowicz K.: Oddziaływanie elektrycznego łuku łączeniowego na powierzchnie zestyków łączników próżniowych, Przegląd Elektrotechniczny, 10/2008, 155-158.
[7] Katsumi K., Shuhei K, Shigemitsu O., Hitoshi O.: Optimization technique for electrical insulation design of vacuum interrupters, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 5, 2008.
[8] Krasuski K.: The influence of contact setting on the magnetic flux density distribution, Eletrotechnical Institute Publishing House Recent Advances in Numerical Modelling, 2009, 10-24.
[9] Sibilski H., Dzierżyński A., Grodziński A., Szymański A., Błażejczyk T, Berowski P., Hejduk A., Krasuski K.: Badanie styków dla łączników próżniowych średniego napięcia, Przegląd Elektrotechniczny, 12a/2012, 193-197.
[10] Slade P.G.: The Vacuum Interrupter, Theory, Design and Application, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008.
[11] Yu L., Liu Z., Wang J., Geng Y., Sun L. Yu R., Xue X.: Contacts Impact Phenomena in a 126 kV Vacuum Circuit Breaker, XXVth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum - Tomsk, 2012.

Mgr inż. Krzysztof Krasuski
e-mail: krasuski@iel.waw.pl

Absolwent Wydziału Elektrycznego oraz Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. Zatrudniony na stanowisku asystenta w Zakładzie Wielkich Mocy Instytut Elektrotechniki. Zajmuje się badaniem łuku elektrycznego w komorach wyłączników próżniowych.

otrzymano/received: 10.10.2013 *przyjęto do druku/accepted: 13.11.2014*

DOI: 10.5604/20830157.1159322

INNOWACYJNY PROJEKT MECHANIZMU DLA NARZĘDZI LAPAROSKOPOWYCH

Łukasz Mucha
Politechnika Śląska, Katedra Budowy Maszyn

***Streszczenie**. W artykule została przedstawiona analiza dostępnych na rynku mechanicznych układów przeniesienia napędu w narzędziach laparoskopowych. Omówiony został mechanizm przeniesienia napędu w narzędziach kątowo uchylnych zaproponowany przez autora. Przedstawiono budowę i działanie zaprojektowanego narzędzia oraz wyniki symulacji możliwych do realizacji ruchów wykonywanych przez narzędzie.*

Słowa kluczowe: Modelowanie CAD, narzędzia laparoskopowe, przeniesienie napędu, operacja laparoskopowa, roboty chirurgiczne

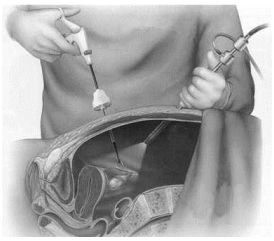
INNOVATIVE PROJECT OF MECHANISM FOR TOOLS LAPAROSCOPIC

***Abstract.** The article presents the analysis of available solutions of transmissions in laparoscopic tools. The proposed by an author a new transmission of laparoscopic tools has been described. Design and principle of operation as well as a simulations of possible movements of this tool has been also presented.*

Keywords: laparoscopic tools, design, movement, transmission, simulation

Wstęp

W ostatnich latach można zaobserwować bardzo szybki rozwój techniki w dziedzinie mało inwazyjnych operacji. Szacuje się że ok. 30% z 8 mln operacji jest wykonywana tą metodą. Chirurgia laparoskopowa zaliczana jest do chirurgii mało inwazyjnej. W porównaniu do tradycyjnych metod operowania nie jest wymagane duże nacięcie na ciele pacjenta umożliwiające przeprowadzenie zabiegu. Operacje mało inwazyjne wykonywane są za pomocą instrumentów i sond służących do podglądu operowanego miejsca, wsuniętych za pomocą trokaru do organizmu poprzez niewielkie nacięcia o średnicy nieprzekraczającej 10 mm (rysunek 1). Narzędzia stosowane w tych operacjach mają średnicę dostosowaną do otworów w trokarach (od 4 do 8 milimetrów) i umożliwiają: cięcie, preparowanie, zespolenie tkanek, zatrzymanie krwawień, itp. [6, 7].



Rys. 1. Widok operacji laparoskopowej [11]

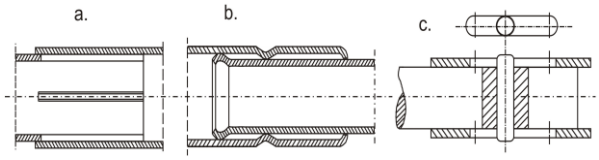
Tradycyjne stosowane narzędzia w chirurgii mało inwazyjnej są narzędziami o długim trzonku (rysunek 2), powoduje to zwiększenie amplitudy drgań końcówki narzędzia oraz odwrócenie kierunku ruchu w ciele pacjenta. W celu odciążenia chirurga od żmudnej i długotrwałej pracy w pozycji stojącej wprowadzone zostały systemy telechirurgiczne. Systemy te powielają dokładnie ruchy ręki chirurga obsługującego konsole bez odwrócenia ruchu zapewniając przy tym eliminację drgań oraz kompensację gwałtownych ruchów dłoni.

Rys. 2. Przykład narzędzia laparoskopowego i konfiguracji części wykonawczej (chwytowej) [3]

Ze względu na ograniczoną średnicę i znaczną długość rurki laparoskopowej stosowane są obecnie dwa sposoby przekazania napędu z silnika zamocowanego w kiści robota chirurgicznego do końcówki manipulacyjnej. Odbywa się to za pomocą specjalnie ukształtowanych prowadnic - popychaczy, wodzików, a także mechanizmów opartych na układach cięgnowych.

1. Prowadnice

Zadaniem prowadnicy jest przekazanie ruchu prostoliniowego w taki sposób aby zachować jego parametry początkowe. Najprostszym typem prowadnic są prowadnice walcowe bez zabezpieczenia od obrotu w postaci rur ciągnionych, ułożone w taki sposób, że jedna rura wchodzi w druga. Zabezpieczenie rur przed wypadnięciem uzyskuje się poprzez zwalcowanie, zabezpieczenie od obrotu względem osi poprzez dodatkowy kołek ślizgający się w wyfrezowanym rowku znajdującym się w ściance rury (rysunek 3).

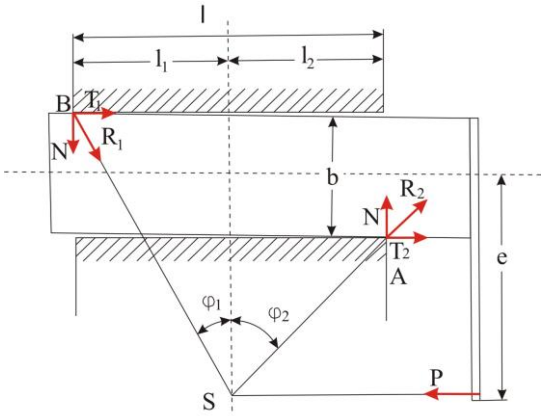


Rys. 3. Widok prowadnic walcowych a - walcowa ustalona ciernie, b - z ograniczeniem ruchu poprzez zwalcowanie, c - z zabezpieczeniem obrotu [10]

Przewagę zastosowania mechanizmów prowadnic nad układem cięgnowym daje możliwość przenoszenia ruchu w obu kierunkach jednak podstawowe problemy stanowią:

- niedokładność wykonania prowadnic,
- samozakleszczanie się prowadnic,
- opory tarcica w prowadnicach ślizgowych.

Pomimo wykonania prowadnic z tak dużą dokładnością bardzo często występuje jej zniekształcenie w trakcie pracy wynikłe z nieumiejętnego montażu, jak i ugięcia pochodzącego od elementów prowadzonych. Ponadto prowadnice walcowe muszą mieć odpowiedni luz (zależny od jej długości) uniemożliwiający zakleszczenie wywołane niestałością kształtu czy nieprostoliniowością. Przyłożenie siły równoległej do osi centralnej prowadnicy, powoduje ukośne położenie i oparcie elementu wewnętrznego o krawędzie prowadnicy. Powstają w ten sposób dwie siły tarcia skierowane przeciwnie do siły wymuszającej. Jeżeli ich suma jest równa sile wymuszającej to następuje zakleszczenie prowadnicy. Na rysunku 4 przedstawiono zjawisko samozakleszczenia prowadnicy.



Rys. 4. Rozkład sił w prowadnicy walcowej obciążonej niewspółosiowo siłą równoległą do osi [10]

Uwzględniając parametry geometryczne i przyjęte oznaczenia można zapisać następujące równanie[10]:

$$\begin{cases} P = T_1 + T_2 \\ l = 2\mu \cdot e = l_1 + l_2 = \left(e + \frac{b}{2}\right)\frac{T_1}{N} + \left(e - \frac{b}{2}\right)\frac{T_2}{N} \end{cases}$$

gdzie:
T_1, T_2 - siła tarcia $\leq N \cdot \mu$,
μ - współczynnik tarcia,
e - ramię działania siły w odniesieniu do osi prowadnicy,
l - długość prowadnicy,
b - średnica wewnętrzna prowadnicy.

Rozwiązaniem równania są warunki samozakleszczenia się prowadnicy w następujących przedziałach gdy:

- przedział $e \geq \frac{b}{2}$

Ramię działania siły znajduje się poza średnicą wewnętrzną prowadnicy:

$$e \geq \frac{l}{2\mu}$$

- przedział $0 < e < \frac{b}{2}$

Ramię działania siły znajduje się pomiędzy osią poziomą a bliższą krawędzią tarcia

$$l \geq \mu\left(e + \frac{b}{2}\right)$$

- przedział $e < 0$ i $l < \frac{b}{2}$

W rozważanym przypadku długość prowadnicy jest mniejsza od jej średnicy wewnętrznej, a punkt zaczepienia siły znajduje się po drugiej stronie osi symetrii - prowadnica zawsze samozakleszczająca się.

Sprawność prowadnicy wyrażona jest wzorem [10]:

$$\eta = 1 - \frac{2\mu}{k}$$

gdzie:

$$k = \frac{l}{a}$$

a - odległość siły od osi.

Z powyższych zależności wynika, że chcąc zmniejszyć straty w prowadnicy, musi być ona wystarczająco długa w stosunku do swojej średnicy, jednak zbytnie wydłużenie wpływa także niekorzystnie. Wzrost kątów pochylenia działającej siły $\varphi_{1,2}$ powoduje obniżenie sprawności, dlatego powinny one być jak najmniejsze.

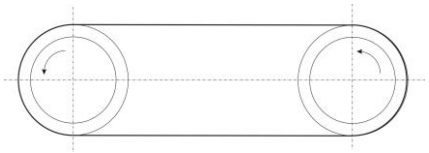
Kolejny problem stanowi tarcie. Z powodu oddziaływania czynników smarujących na organizm ludzki niemożliwe jest ich stosowanie w narzędziach chirurgicznych. Możliwe jest zbudowanie szczelnego urządzenia zabezpieczonego przed zanieczyszczeniami, lecz powoduje to znaczny rozrost mechanizmu. Opierając się na mechanizmie starannie wykonanych prowadnic ślizgowych dla powierzchni niesmarowanych metal-metal współczynnik tarcia wynosi 0,15 do 0,22 [2, 10].

Przy projektowaniu układów opartych na prowadnicach należy uwzględnić powyższe zależności, aby swoboda ich ruchu była zapewniona z odpowiednim bezpieczeństwem, uwzględniając opory ruchu powstałe z niewspółosiowości elementów, skośnego działania siły, sił tarcia.

2. Cięgna

W tego typu rozwiązaniach przekazanie napędu z silnika do układu wykonawczego końcówki laparoskopowej odbywa się także za pomocą cięgien. Charakteryzują się one dużą wytrzymałością i niewielką masą, a także możliwością przenoszenia siły po torze krzywoliniowym np. po kątowym wychyleniu narzędzia. Zasadniczą wadą tego typu rozwiązania jest to, że mogą przekazywać siłę jedynie w jednym kierunku. Ze względu na wytrzymałość zmęczeniową cięgien, średnica kół wokół których są one opasane musi być odpowiednia dobrana. Można wyróżnić dwa mechanizmy cięgnowe: działający obustronnie oraz mechanizmy z elementem magazynującym energię.

Wadą drugiego rozwiązania jest znaczny rozrost narzędzia, a także zwiększenie siły wywołującej ruch o wartość siły działania sprężyny. W przypadku mechanizmu obustronnego cięgno opasane jest wokół dwóch krążków i tworzy zamkniętą pętlę (rysunek 5). Ruch jednego z krążków wymusza przesuw cięgna które oddziałuje na przeciwległy krążek powodując jego obrót. Ze względu iż cięgna muszą być w trakcie pracy stale napięte działają na nie siły rozciągające. Powoduje to rozciąganie linek wykonanych z tworzywa, a także w przypadku linek stalowych plastyczne odkształcenie cięgna na bębnie.



Rys. 5. Przekładnia cięgnowa działająca obustronnie

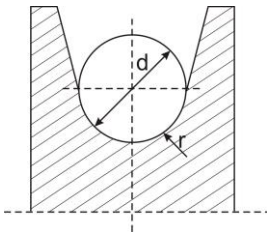
W zależności od sposobu połączenia cięgna z elementem czynnym i biernym możemy wyróżnić następujące przekładnie [10]:

- cierne - cięgno przenosi ruch z koła czynnego na koło bierne poprzez siły tarcia,
- z cięgnem kształtowym - cięgno jest dopasowane do elementów przenoszących za pomocą specjalnych perforacji w tych mechanizmach likwidujących poślizg,
- z cięgnem utwierdzonym na stałe do elementu czynnego i biernego.

Przekładnie te także możemy podzielić ze względu na rodzaj zastosowanego cięgna [10]:

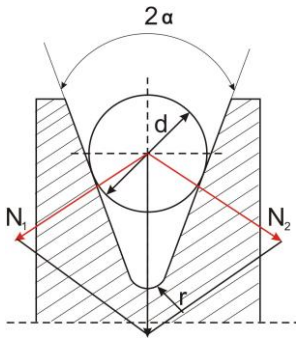
- przekładnie z cięgnami gibkimi,
- przekładnie łańcuchowe.

Ze względu na ograniczenia gabarytowe rurki laparoskopowej oraz zwiększenia stopnia skomplikowania mechanizmu przekładnie łańcuchowe, przekładnie z cięgnem kształtowym w postaci perforowanej, a także przekładnie z zastosowaniem taśm gumowych nie są wykorzystywane. W spotykanych rozwiązaniach wykorzystywany jest mechanizm z cięgnem strunowym z kołami pasowanymi zaopatrzonymi w rowek o kącie zaokrąglenia dobieranym w zależności od warunków pracy [9]. Jeżeli moment przenoszony jest na dużych odległościach to rowek dobierany jest w ten sposób, aby cięgno spoczywało na jego dnie (rysunek 6) a moment obrotowy zostaje nadany poprzez siłę tarcia. Ścianki boczne dodatkowo zabezpieczają cięgno przed spadnięciem.



Rys. 6. Koło pasowe z cięgnem gibkim z rowkiem większym od średnicy cięgna (struny)

Sytuacja gdy promień zaokrąglenia rowka jest mniejszy od średnicy cięgna przedstawiona została na rysunku 7. Takie rozwiązanie sprowadza się do likwidacji poślizgu cięgna na kole, ale powstaje ryzyko zakleszczenia się cięgna na kole pasowym i jego szybsze zużywanie, powoduje to także obniżenie sprawności układu w skutek zwiększenia strat tarcia.



Rys. 7. Koło pasowe z cięgnem gibkim - rowek mniejszy od cięgna

Dla linek bawełnianych, konopnych, metalowych i sprężyn śrubowych, kąt rozwarcia α przyjmuje się w przedziale 40÷50° w przypadku linek gumowych o wyższym współczynniku tarcia 2α = 60° [10].

Dla mechanizmu zaprezentowanego powyżej obliczeniowy współczynnik tarcia wyraża się wzorem [10]:

$$\begin{cases} \mu' = \dfrac{\mu}{\sin\alpha} \\ N_{1,2} = \dfrac{P}{\sin\alpha} \end{cases}$$

W narzędziach laparoskopowych najczęściej spotyka przekładnie z średnicą rowka większą od średnicy cięgna. Dla mechanizmów cięgnowych z cięgnem gibkim występuje także niekorzystne zjawisko poślizgu. Poślizg uzależniony jest od siły napędzającej i wzrasta wraz z momentem napędzanym, a także od materiału z którego wykonane jest cięgno. Im większy współczynnik sprężystości wzdłużnej cięgna tym mniejszy poślizg. Ze względu na wyższy współczynnik sprężystości wzdłużnej w narzędziach laparoskopowych stosowane są linki stalowe. W celu wyeliminowania poszczególnych wad wyżej wymienionych mechanizmów zaprojektowany został innowacyjny układ przeniesienia napędu dla kątowo uchylnego narzędzia chirurgicznego.

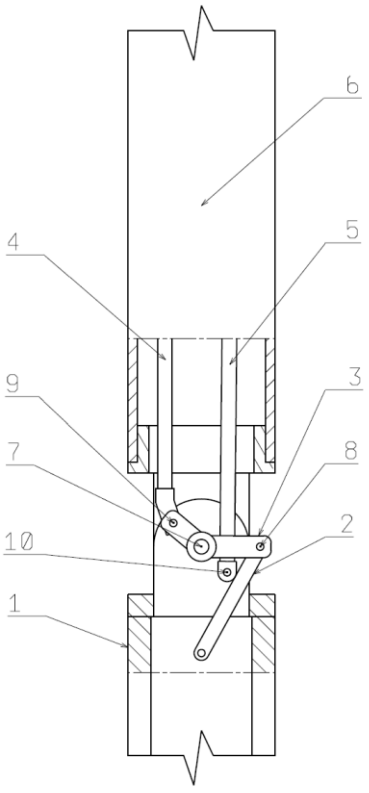
3. Projekt mechanizmu

Narzędzie chirurgiczne według projektu pozwala na przeniesienie napędu wzdłuż prowadnicy z części sterującej do instrumentu chirurgicznego z zapewnieniem możliwości kątowego wychylenia końcówki roboczej narzędzia. W zależności od wykonania końcówkę roboczą mogą stanowić kleszcze, imadła, szczypce itp.

Podczas zmiany kąta pracy przenoszona siła nie ulega zmianie. Prosta budowa narzędzia gwarantuje niezawodność działania. Zagięcie końcówki popychacza sterującego pod kątem ostrym w stosunku do jego osi wzdłużnej umożliwia jego pełne wysunięcie przy zgięciu.

Wynalazek dotyczy narzędzia chirurgicznego, w którym do sterowania instrumentu chirurgicznego narzędzia wykorzystuje się mechanizm w postaci popychacza sterującego umieszczonego wewnątrz prowadnicy, przy czym końcówka prowadnicy, na której końcu osadzony jest instrument chirurgiczny, połączona jest z zasadniczą częścią prowadnicy poprzez przegub. Istota narzędzia polega na tym, że koniec popychacza sterującego połączony jest poprzez mimośrodowy element pośredni z popychaczem wykonawczym, który przeznaczony jest do przenoszenia napędu do instrumentu chirurgicznego zamocowanego na końcu końcówki. Mimośrodowy element pośredni osadzony jest obrotowo w osi zgięcia przegubu. Popychacz sterujący i popychacz wykonawczy połączone są z mimośrodowym elementem pośrednim obrotowo, natomiast w zasadniczej części prowadnicy przebiega popychacz zginający, którego koniec zamocowany jest obrotowo do końcówki prowadnicy.

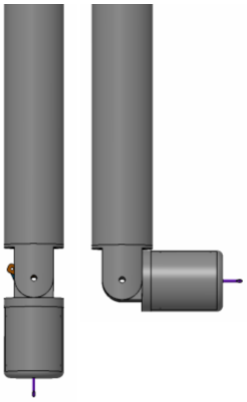
W preferowanym wykonaniu końcówka popychacza sterującego połączona z mimośrodowym elementem pośrednim zagięta jest pod kątem ostrym w stosunku do jego osi wzdłużnej. W dalszym preferowanym wykonaniu obrotowe połączenie pomiędzy popychaczem sterującym a mimośrodowym elementem pośrednim wykonane jest z wykorzystaniem sworznia. Zasadę działania obrazuje rysunek 8, ruch postępowy popychacza zginającego 5 skutkuje zgięciem końcówki 1. Ponadto w prowadnicy 6 przebiega popychacz sterujący 4, który jednym końcem połączony jest z nieprzedstawionym na rysunku silnikiem napędowym, zaś z drugiej strony zamocowany jest obrotowo poprzez mimośrodowy element pośredni 3 z popychaczem wykonawczym 2, który przeznaczony jest do przenoszenia napędu do instrumentu chirurgicznego zamocowanego na końcu końcówki zginanej 1. Końcówka popychacza sterującego 4 połączona z mimośrodowym elementem pośrednim 3 zagięta jest pod kątem ostrym w stosunku do jego osi wzdłużnej. Mimośrodowy element pośredni 3 osadzony jest obrotowo w osi zgięcia przegubu 7, zaś popychacz sterujący 4 oraz popychacz wykonawczy 2 połączone są z mimośrodowym elementem pośrednim 3 obrotowo, odpowiednio poprzez sworznie 9 i 8.



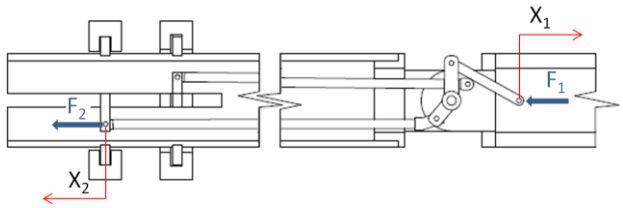
Rys. 8. Projekt mechanizmu przeniesienia napędu dla narzędzi laparoskopowych

4. Kinematyka

Dla projektu narzędzia wykonana została analiza kinematyczna możliwych do realizacji ruchów. Na rysunku 9 przedstawiono narzędzie zaopatrzone w igłę w pozycji prostej i zgięte pod kątem 90°. Dla zaprojektowanego mechanizmu wykonano badania eksperymentalne polegające na pomiarze siły oddziaływującej na wodzik sterujący F_2 przy obciążeniu popychacza w efektorze siłą F_1=6 N oraz pomiar wartości przemieszeń wodzika sterującego w kierunku X_2 i popychacza w efektorze w kierunku X_1 (rysunek 10).

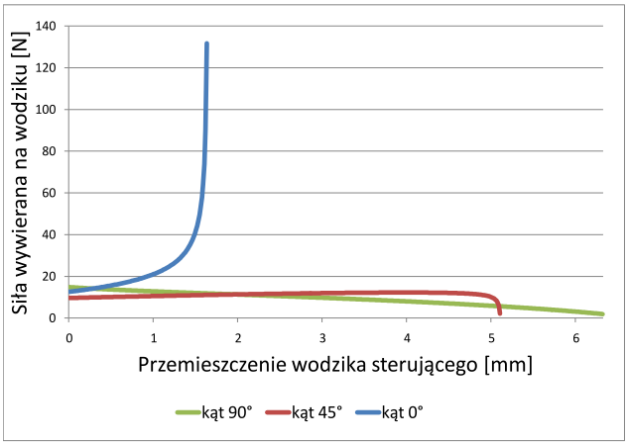


Rys. 9. Widok narzędzia w pozycji prostej i zgiętej



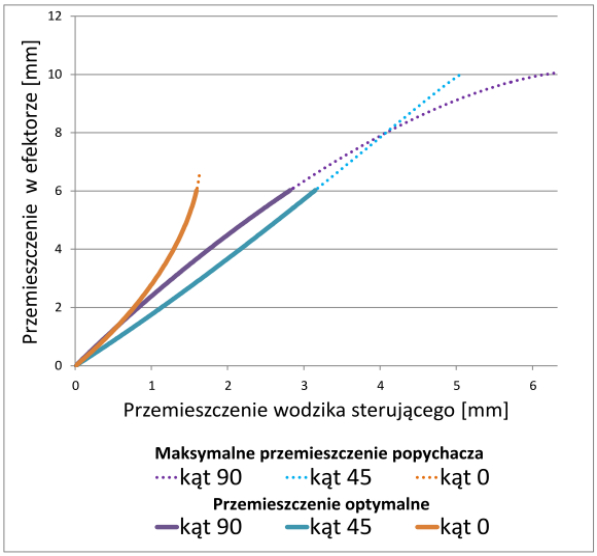
Rys. 10. Kierunki sił oraz przemieszczeń

Pomiary wykonane zostały dla następujących pozycji efektora: pozycja wyprostowana, zgięcie efektora względem rurki laparoskopowej pod kątem 45° oraz 90°. Na tej podstawie sporządzone zostały wykresy sił (rysunek 11) oraz przemieszczeń.

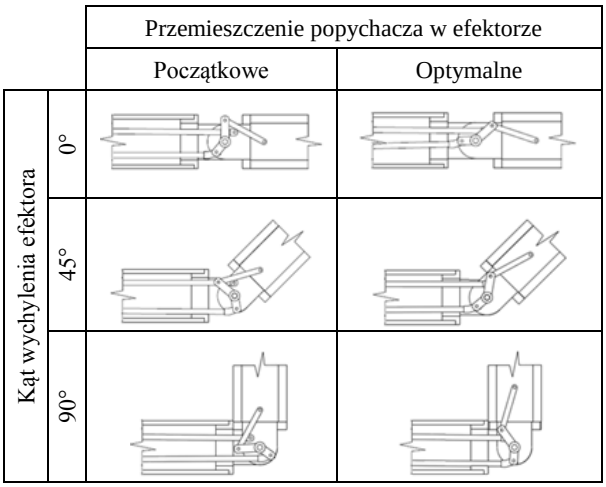


Rys. 11. Stosunek przmeiszczenia do siły wywieranej na wodzik sterujący

Dla kąta zgięcia 0° następuje znaczący wzrost siły przy wysuwaniu popychacza w efektorze, w pozostałych przypadkach, siła ta jest znacząco mniejsza. Przyjęto maksymalną wartość siły działającą na wodzik sterujący na poziomie 60 N. Na tej podstawie sporządzony został wykres przemieszczeń możliwych do zrealizowania w efektorze (linia przerywana), a także przemieszczenie optymalne (linia ciągła) dla poszczególnych wychyleń kątowych rysunek 12. Na tej podstawie ograniczono się do przemieszczenia popychacza w efektorze z pozycji początkowej 0 do 6 mm dla pozycji końcowej dla zakresu wychylenia kątowego efektora od 0° do 90°. Położenie poszczególnych elementów składowych wewnątrz przegubu, efektora i końcówki rurki laparoskopowej dla pozycji początkowej 0 mm oraz optymalnej 6 mm obrazuje rysunek 13.



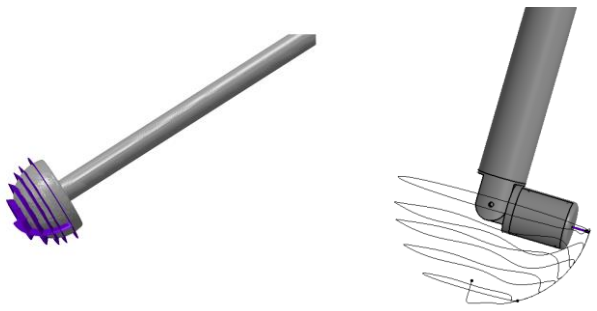
Rys. 12. Przemieszczenie popychacza w efektorze możliwe do zrealizowania – linia przerywana, przemieszczenie optymalne – linia ciągła



Rys. 13. Widok mechanizmu dla poszczególnych pozycji

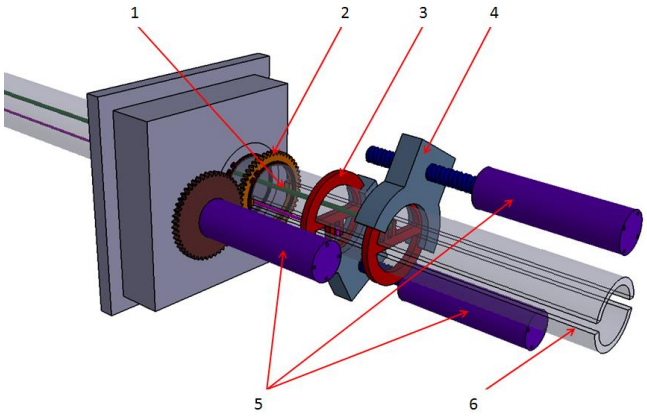
Przeprowadzona została także analiza zajmowanej przestrzeni podczas pracy narzędzia wyznaczając przestrzeń roboczą (rysunek 14) dla części zginanej i wykonawczej narzędzia – igły.

a) b)



Rys. 14. Symulacja narzędzia podczas pracy a) widok przestrzeni roboczej narzędzia b) toru roboczego igły

Opracowany został model mechanizmu sterującego (rysunek 15) umożliwiający obrót narzędzia wokół własnej osi o dowolnie zadany kąt. Mechanizm ten realizuje ruch dwóch popychaczy umożliwiających kątowe wychylenie narzędzia oraz wysuw popychacza sterującego częścią wykonawczą narzędzia.



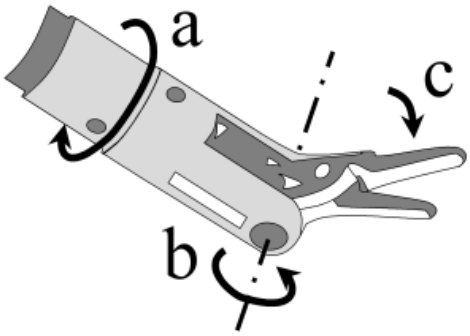
Rys. 15. Widok układu sterującego w którego skład wchodzą: 1 - popychacz, 2 - układ realizujący obrót, 3 - pierścień ślizgowy, 4 - prowadnica pierścienia, 5 - napędy, 6 - rurka laparoskopowa

5. Podsumowanie

Jednym z najintensywniej rozwijających się kierunków medycyny w ostatnich latach są techniki mało inwazyjnych operacji. Do głównych zalet chirurgii mało inwazyjnej należy zaliczyć skrócenie czasu hospitalizacji bezpośrednio po operacji, zmniejszenie powikłań i traumy pooperacyjnej.

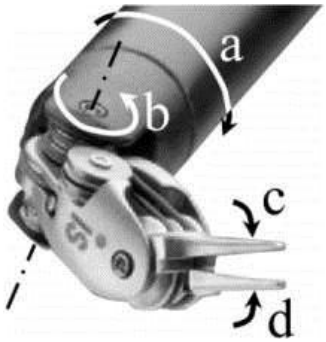
Zręczność chirurga podczas zabiegu laparoskopowego jest znacznie ograniczona. Tradycyjny instrument laparoskopowy posiada cztery stopnie swobody: trzy rotacje wokół wzajemnie prostopadłych osi przechodzących przez trokar i jedną translację wzdłuż rurki laparoskopu. Napęd mechanizmu przekazywany do efektora uzyskiwany jest poprzez wykorzystanie siły mięśni dłoni i palców chirurga za pomocą odpowiedniego uchwytu dostosowanego do dłoni człowieka. Mechaniczny układ przeniesienia napędu z uchwytu narzędzia wykorzystuje najczęściej cięgna sztywne. Układ kinematyczny narzędzi laparoskopowych takich jak kleszczyki czy nożyczki, oparty jest najczęściej na mechanizmie dźwigniowym lub jarzmowym. W celu wykonywania bardziej skomplikowanych zabiegów konieczne jest wyposażenia narzędzia w dodatkowe stopnie swobody zwiększające zdolności ruchowe narzędzia wewnątrz ciała pacjenta. Wiąże sie to z zastąpieniem narzędzi tradycyjnych systemami zrobotyzowanymi, a co za tym idzie zastąpienie napędu ręcznego człowieka poprzez napęd elektryczny robota.

Narzędzie robota Zeus przedstawione na rysunku 16 posiada 6 stopni swobody napędzanych poprzez cięgna sztywne (popychacze), co ogranicza zakres kątowy pracy efektora [8].



Rys. 16. Narzędzie robota Zeus [1]

Aby zapewnić większe możliwości ruchu konieczne jest zastosowanie dodatkowych przegubów w efektorze narzędzia. Wiąże się to ze skomplikowanym układem przeniesienia napędu. Postęp w zakresie ruchliwości końcówki roboczej można osiągnąć, wprowadzając – przynajmniej w części końcowej narzędzia – linki. W taki system zaopatrzone zostały narzędzia robota Da Vinci posiadające 7, opcjonalnie 8 stopni swobody. Stosowane napędy cięgnowe poddawane są naprężeniom skręcającym co znacznie obniża żywotność tych napędów. Z tego powodu ich producent firma Intuitive Surgical określa limit dla ponownego użycia narzędzi, który dla większości narzędzi wynosi 10 zabiegów [12].



Rys. 17. Narzędzie robota da Vinci [1]

W ramach pracy naukowo badawczej w Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrzu prowadzone są liczne badania mające na celu określenie siły potrzebnej do przebicia, przecięcia i zszycia tkanki sercowej. Na tej podstawie projektowane są nowe rozwiązania dla narzędzi i mechanizmów przeniesienia napędu, a także systemy sterowania dedykowane dla konkretnej grupy instrumentów chirurgicznych. Dotychczas stosowane narzędzia budowane są w oparciu o systemy popychaczy i cięgien co powoduje ograniczenie ich możliwości ruchowych i przenoszonych sił. Ograniczenie to powoduje zmniejszenie precyzji i utrudnienia w wykonywaniu zabiegu. Dlatego tak ważne jest aby możliwe było zastąpienie dotychczas stosownych narzędzi przez narzędzia nowej generacji [4, 5].

Literatura

[1] Al-Tabey W.A.: Micro-Robot Management. MATLAB - A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications, 3/2012 [DOI: 10.5772/39240].
[2] Dietrich M.(red): Podstawy konstrukcji Maszyn. WNT, Warszawa 2007.
[3] Katalog firmy Apparatus.
[4] Mucha Ł.: Instrumentarium do operacji małoinwazyjnych. Zeszyty Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Gliwice 2012.
[5] Nawrat Z., Kostka P., Lis K., Rohr K., Mucha Ł., Sadowski W., Krzysztofik K., Małota Z.: Interfejs operatora robota chirurgicznego- oryginalne rozwiązania sprzężenia informacyjnego i decyzyjnego. Medical Robotics Reports, Zabrze 2/2013, 13-21.
[6] Nawrat Z.: Metodologia aktywizacji zawodowej absolwentów szkół technicznych. Zabrze 2009.
[7] Nawrat Z.: Roboty medyczne. Zabrze 2007.
[8] Nawrat Z.: Robotyka Medyczna w Polsce. Medical Robotics Reports, Zabrze 1/2012, 7-16.
[9] Tryliński W. (red): Poradnik konstruktora przyrządów precyzyjnych. WNT, Warszawa 2006.
[10] Tryliński W.(red): Poradnik konstruktora przyrządów precyzyjnych i drobnych. WNT Warsyawa 1970.
[11] www.danaise.com [05.05.2015].
[12] www.intuitivesurgical.com [05.05.2015].

Mgr inż. Łukasz Mucha
e-mail: lukasz.mucha@polsl.pl

Absolwent Wydziału Mechaniczno-Technologicznego o specjalności Technologia Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Od roku 2010 doktorant w Katedrze Budowy Maszyn na stanowisku asystenta profesora. Działalność naukowa skupia się w obszarach modelowania inżynierskiego oraz technik komputerowych w budowie i eksploatacji maszyn. Dodatkowy zakres zainteresowań naukowych to projektowanie, analizy kinematyczne, programowanie maszyn sterowanych numerycznie.

otrzymano/received: 03.10.2013 *przyjęto do druku/accepted: 27.04.2015*

DOI: 10.5604/20830157.1159323

PREDICTIVE CURRENT CONTROLLER WITH MTPA CONTROL STRATEGY – SIMULATION RESULTS

Rafał Piotuch
West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Electric Department

Abstract. *Electric and hybrid vehicle drive systems are commonly equipped with Permanent Magnet Synchronous Motors, because they offer high efficiency in broad range of speed and torque, and also due to special current development techniques they can work with high speeds. The paper presents simulation results for predictive current controller used in PMSM drive system. The results were obtained for high speed operations with Maximum Torque Per Ampere (MTPA) control strategy, which allows to develop set torque value with the smallest possible currents values. Predictive current controller equations are based on IPMSM mathematical model which considers L_d and L_q inductances changes. Additionally MTPA strategy also considers inductances changes in d- and q-axis.*

Keywords: synchronous machine, predictive current controller, MTPA strategy, field analysis

PREDYKCYJNY REGULATOR PRĄDU W STRATEGII MTPA – BADANIA SYMULACYJNE

Streszczenie. *Układy napędowe samochodów elektrycznych i hybrydowych są coraz częściej wyposażane w silniki elektryczne z magnesami trwałymi. Napędy te oferują wysoką sprawność w szerokim zakresie prędkości i momentu obrotowego, a poprzez odpowiednie sterowanie zapewniają pracę przy wysokich prędkościach obrotowych. W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych predykcyjnego regulatora prądu dla silnika synchronicznego z magnesami zagnieżdżonymi. Regulator pracuje przy wykorzystaniu strategii sterowania MTPA (ang. Maximum Torque Per Ampere)., która zapewnia wypracowanie odpowiedniego momentu przy możliwie najmniejszych wartościach prądów fazowych. Równania predykcyjnego regulatora prądu zostały oparte o zmodyfikowany model matematyczny silnika synchronicznego z magnesami zagnieżdżonymi uwzględniający zmienność indukcyjności L_d i L_q. Dodatkowo w równaniach opisujących działanie strategii MTPA uwzględniono zmienność indukcyjności w funkcji prądu.*

Słowa kluczowe: maszyna synchroniczna, predykcyjny regulator prądu, strategia MTPA, analiza polowa

Introduction

PM excited machines are receiving increased attention in drive systems applications instead of induction motor because of high power density, efficiency, high torque-inertia ratio and wide speed operation capabilities which makes it particularly suitable for all automotive applications where weight and geometry dimensions are very important. In particular, an IPMSM with permanent magnets buried inside steel rotor core perform mechanically robust rotor structure which is suitable for high-speed operation applications. Very important aspect of electric vehicle drive |system is an energy efficient torque development, which can be achieved with MTPA control strategy and proper current controller or other adaptive or heuristics methods [4]. Additionally Field-Weakening (FW) strategy increases Constant Power Speed Range (CPSR). Wide speed range with constant power is required especially for the traction drive applications. CPSR depends on inductances and magnet flux values and power supply constraints. Unfortunately magnetic saturation may occur under different speed and load conditions resulting in the variation of the *d*- and *q*-axis inductances [1, 5, 6]. The variation of inductances is especially strong in IPMSMs and it is important to note that the performance of the drive is rather sensitive to machine parameters, especially for high torque regions.

In this paper there will be described the proposed algorithm starting from the mathematical model used to calculate the *d*- and *q*-axis reference currents in the constant torque region. In the constant torque region the requirements are maximum efficiency of the drive or a good dynamic performance of the drive. The paper present equation set and achieved results.

1. IPMSM modeling

Fig. 1 shows a four pole IPM motor, which was used in the simulations. The following equations that describe work of a PM Synchronous motor are basic voltage and flux-current equations described in synchronous *dq* reference frame under several assumptions [8]:

$$U_d = R_s I_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - p_b \Omega_m \Psi_q \tag{1}$$

$$U_q = RI_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + p_b \Omega_m \Psi_d \tag{2}$$

$$\Psi_d = L_d I_d + \Psi_{PM} \tag{3}$$

$$\Psi_q = L_q I_q \tag{4}$$

Torque developed by a PM excited motor can be expressed as:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \cdot p_b \cdot \left[\Psi_{PM} \cdot I_{sq} + \left(L_d - L_q \right) \cdot I_{sd} \cdot I_{sq} \right] \tag{5}$$

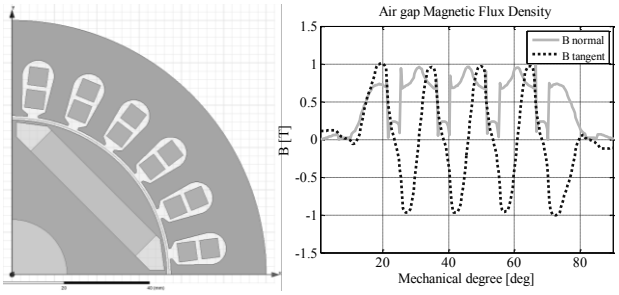


Fig. 1. IPMSM cross-section and magnetic flux distribution along pole

Table 1. Main parameters of the machine

Parameter	Value
Magnet type	XG196/96 (B=0.96T, Hc=-690kA)
Outer stator diameter	120 mm
Active machine length	65 mm
Rotor outer diameter	73 mm
Magnet length	35 mm
Magnet width	7 mm
Slot opening width	3 mm
Tooth width	7.3 mm
Slot height	13.5 mm
Air gap length	1 mm

2. IPMSM torque development

Torque developed by IPM motor can be divided into PM generated and reluctance torque components (Fig. 2).

The first term is PM generated torque, and the second term is reluctance torque which is proportional to the difference in stator inductances, L_d and L_q. In the analyzed IPMSM, L_q is higher than L_d (due to the lower *q*-axis path reluctance), because the magnetic flux flowing along the *d*-axis has to cross through the magnet cavities in addition to the rotor air gap, while the magnetic flux of the *q*-axis crosses only the air gap. The *d*-axis is also basically magnetized with PM [2].

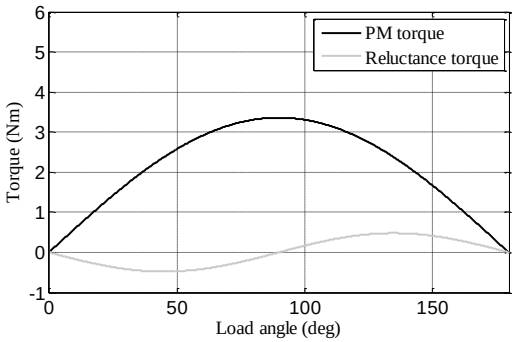


Fig. 2. Example of torque curves

Equation (5) may also consider L_d and L_q changes:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \cdot p_b \cdot \left[\Psi_{PM} \cdot I_q + \left(L_d\left(I_d\right) - L_q\left(I_q\right) \right) \cdot I_d \cdot I_q \right] \quad (6)$$

Properly controlled currents in motor windings give a possibility to control synchronous machine in a similar manner to a separately excited DC machine, where flux and torque (with constant flux) can be controlled separately [1, 4].

3. MTPA control strategy

Basic FOC (Field Oriented Control) structure consist of four PI controllers (Fig. 3).

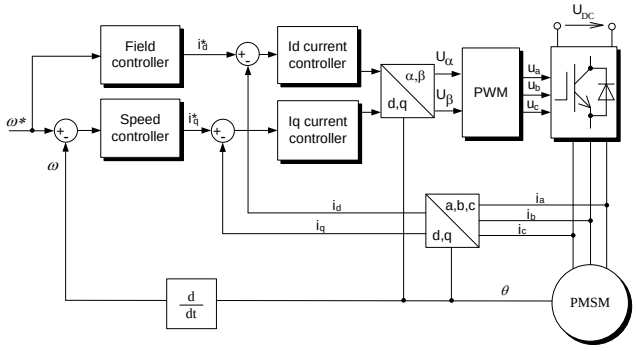


Fig. 3. Basic FOC control scheme

The aim of a current controllers is to develop proper current values in *d*- and *q*-axis according to a selected control strategy. It keeps such torque value that causes a 0 speed error value. Basically there are main four controller strategies [2]:

1) CTA (Constant Torque Angle),
2) UPF (Unity Power Factor),
3) CSF (Constant Stator Flux),
4) MTPA (Maximum Torque Per Ampere).

As shown in Fig. 2 the main torque component is developed with *q*-axis current. With MTPA control strategy application it is also possible to take advantage of reluctance torque according to (5, 6).

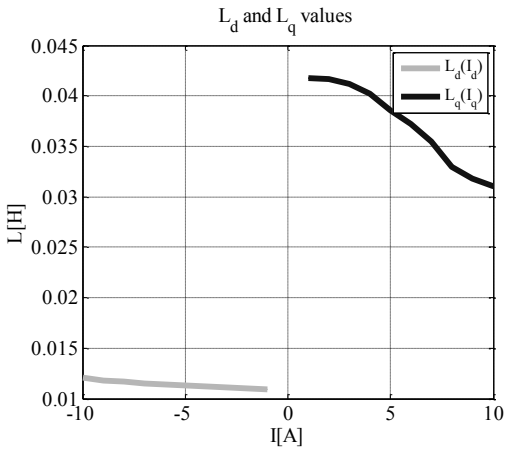


Fig. 4. Ld and Lq inductances based on FEM simulation

This way the smallest possible phase currents develop set torque value. The copper losses are minimized, and under assumption that core losses are negligible (which for low speeds and torques is generally true) the maximum efficiency of the IPMSM can be obtained.

It is needed to estimate and use L_d, L_q inductances values for different stator currents [7] – according to equation (6). Calculated inductance values for different currents are shown in the Fig. 4.

The $i_d - i_q$ planes with MTPA curve for different L_d and L_q values are presented in Fig. 5 and 6. The $i_d - i_q$ palne with MTPA considering changing values of L_d and L_q (according to Fig. 4) is shown in Fig. 7.

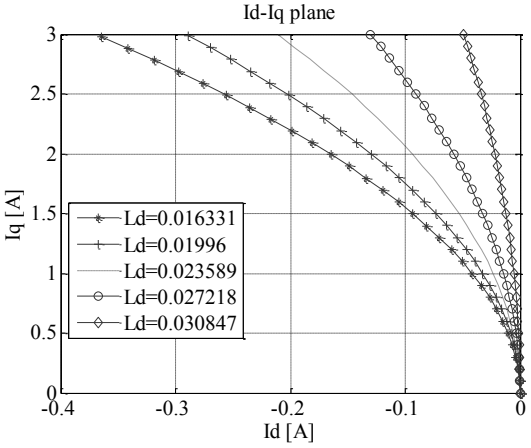


Fig. 5. MTPA curve for different Ld inductance values

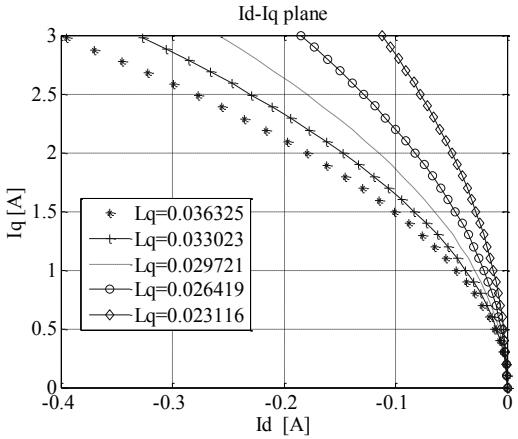


Fig. 6. MTPA curve for different Lq inductance values

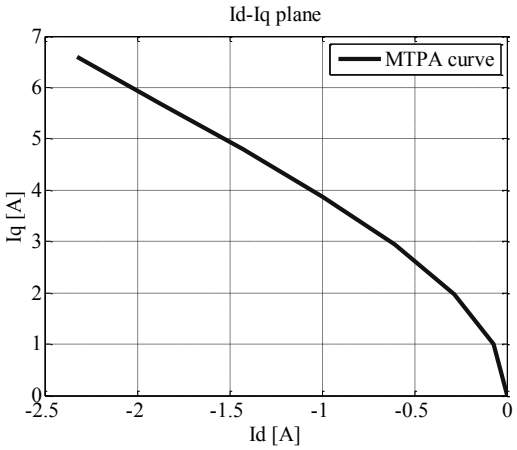


Fig. 7. MTPA curve for estimated Ld and Lq inductances values

The problem arises when the flux from magnets gives high electro-motive force, in the high speed regions, which results in exceeded supply voltage. Using *d*-axis negative current main flux is decreased and thus it is possible to stay in the voltage limit. This method is called field weakening method.

The control strategy meets several limitations:

$$U_d^2 + U_q^2 < U_N^2 \tag{7}$$

$$I_d^2 + I_q^2 < I_N^2 \tag{8}$$

Evaluating voltages and current constraints it is possible to identify two main regions [4]:

1) Constant Torque Region,
2) Constant Power Region.

The second one will be a subject of the next author paper.

4. Predictive current controller

The paper is focused on nonlinear current controllers. Each control system, which uses information of an object in order to develop optimal control signals can be included to the predictive controllers group. Fig. 8 presents the idea of a predictive current controller work.

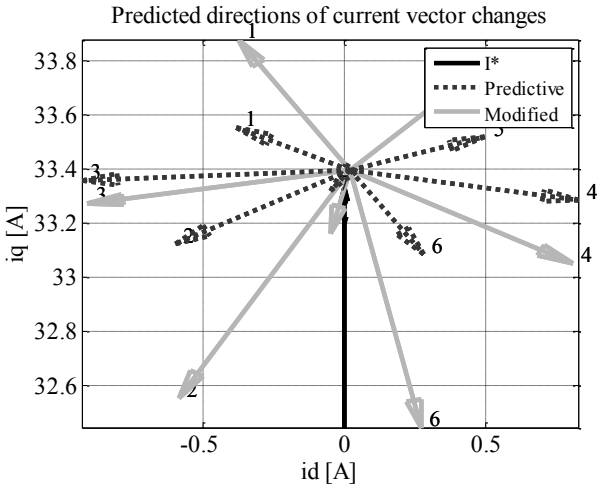


Fig. 8. Predictive algorithm work scheme

Considering (1-4) equations it is possible to define following equations for stator current derivatives:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d(t) \\ \dot{i}_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \omega(t) \\ -\omega(t) & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{\omega(t)}{L_d} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_d(t) \\ u_q(t) \\ \Psi_{PM} \end{bmatrix} \tag{9}$$

where i_d, i_q – stator currents, u_d, u_q – stator voltages, R – stator phase resistance, L_d, L_q – d- and q-axis inductances, Ψ_{PM} – permanent magnet flux in the air gap. Considering very small time step – smaller then electromechanical and electrical time constant it is possible to assume that the position and speed change is negligible. In this case equations (1, 2) can be written as:

$$\begin{bmatrix} i_d(k+1) \\ i_q(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\frac{R\cdot T}{L_d} & T\cdot\omega(k) \\ -T\cdot\omega(k) & 1-\frac{R\cdot T}{L_q} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d(k) \\ i_q(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{T}{L_q} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_d(k) \\ v_q(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{T\cdot\omega(k)}{L_d}\cdot\Psi_{PM} \end{bmatrix} \tag{10}$$

d and q voltages may be presented as follows

$$\begin{bmatrix} v_d(k) \\ v_q(k) \end{bmatrix} = \boldsymbol{M}(k)\cdot\boldsymbol{D}\cdot\boldsymbol{u}(k) \tag{11}$$

$$\boldsymbol{u}(k) = \begin{bmatrix} u_a(k) \\ u_b(k) \\ u_c(k) \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$\boldsymbol{D} = U_{DC}\cdot\frac{2}{3}\cdot\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\boldsymbol{M}(k) = \begin{bmatrix} \cos\theta(k) & \sin\theta(k) \\ -\sin\theta(k) & \cos\theta(k) \end{bmatrix} \tag{14}$$

Finally, the equations that represent future current component vector values, that are developed for the selected voltage vector may be expressed as:

$$\boldsymbol{X}_i(k+1) = \boldsymbol{F}(k)\cdot\boldsymbol{X}(k) + \boldsymbol{G}\cdot\boldsymbol{M}(k)\cdot\boldsymbol{D}\cdot\boldsymbol{u}_i(k) + \boldsymbol{H}(k) \tag{15}$$

where:

$$\boldsymbol{X}(k) = \begin{bmatrix} i_d(k) & i_q(k) \end{bmatrix}^T \tag{16}$$

$$\boldsymbol{F}(k) = \begin{bmatrix} 1-\frac{R\cdot T}{L_d} & T\cdot\omega(k) \\ -T\cdot\omega(k) & 1-\frac{R\cdot T}{L_q} \end{bmatrix} \tag{17}$$

$$\boldsymbol{G}(k) = \begin{bmatrix} \frac{T}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{T}{L_q} \end{bmatrix} \tag{18}$$

$$\boldsymbol{H}(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{T\cdot\omega(k)}{L_d}\cdot\Psi_{PM} \end{bmatrix} \tag{19}$$

$\boldsymbol{u}_i(k)$ is a input voltage vector for all seven inverter key configurations, U_{DC} is a DC bus voltage and T is sample time. Such prediction is realized according to rules of linear extrapolation, that could be based on only one sample [3, 4]. Details are presented in [2-4].

At start of a calculation period, the current and the voltage measurements are done in order to evaluate $\boldsymbol{F}$, $\boldsymbol{M}$ and $\boldsymbol{H}$ matrices. The future values of current vector are evaluated for each inverter key configuration. From this calculation it is possible to evaluate current change vector for each inverter key configuration (Fig. 8). In the classic predictive current control structure the chosen key configuration is the one that fulfils the control quality indicator. Most popular criteria is the angle between the set current vector and the future current vector or the distance between ends of set and future current vectors. The chosen aim function is expressed as:

$$\min(\left|\boldsymbol{X}_i(k+1) - \boldsymbol{X}^*(k)\right|) \tag{20}$$

On the basis of predicted current vectors three inverter key configurations (two active and one non-active) which cause current to achieve set value have to be chosen. Two non-active voltage vectors give the same current values but using the proper one it is possible to minimize number of inverter key switchings. Additionally on the basis of simple mathematical rules the times of application for each key configuration is calculated [2, 4]. Nonlinear current controller acts in this way as a voltage space vector modulator. Linear predictive controllers also use equations presented in this paragraph but take advantage of a Pulse Width

Modulator that transforms voltages in two-phase stationary coordinate system to apply proper inverter key configurations.

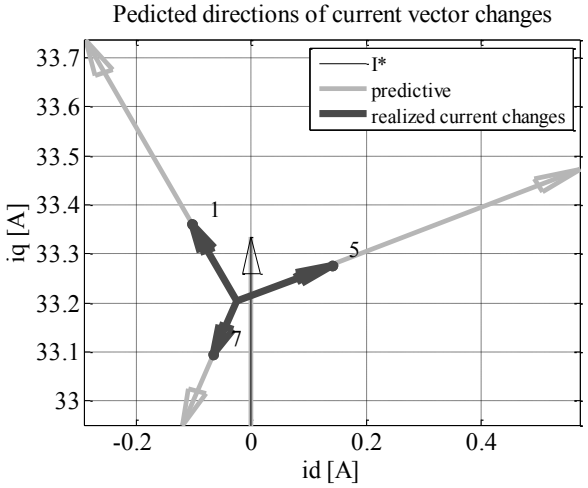


Fig. 9. Realized current vectors (without MTPA)

5. Results

Fig. 10-12 show the results obtained in the Matlab/Simulink environment for the typical work regime – sudden *q*-axis change (without speed loop) and work of a current controller in static states.

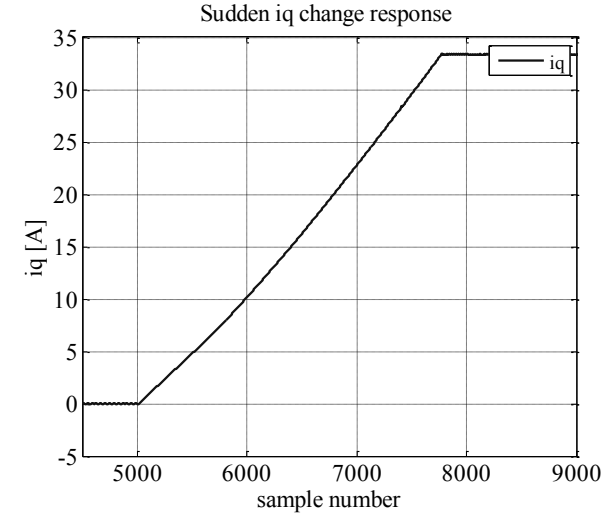


Fig. 10. Iq current dynamics (without MTPA)

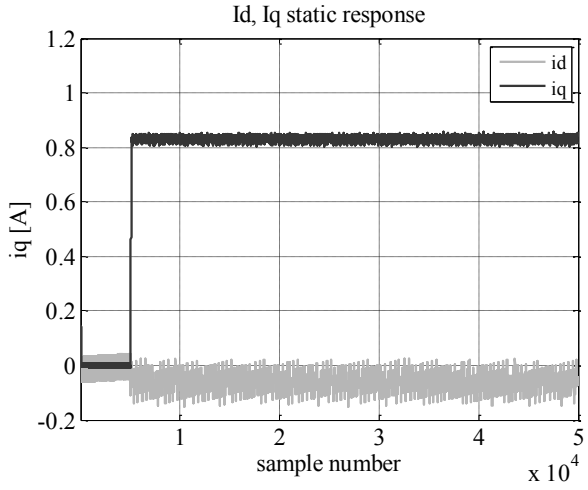


Fig. 11. Id, Iq statics (with MTPA)

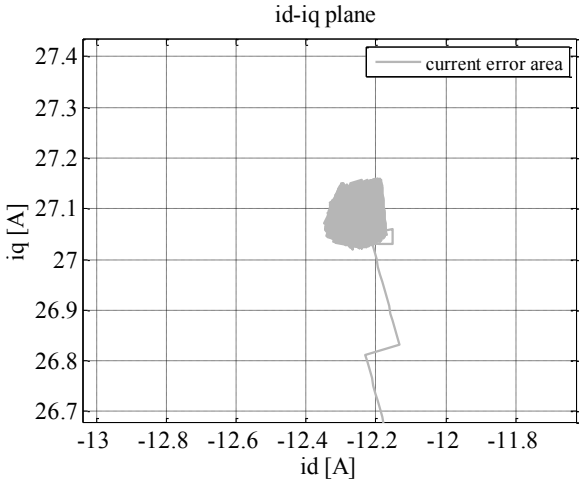


Fig. 12. Current vector error area (with MTPA)

6. Summary

Presented modified predictive current controller with MTPA control strategy and L_d, L_q changes consideration shows very good characteristics in comparison with common current controllers [2-4]. It shows excellent static characteristics and very good dynamic performance. The MTPA strategy with modified predictive current controller performs high dynamic, high efficiency and high torque capabilities which seems to fulfil the requirements for an electric vehicle drive system. A disadvantage of the proposed algorithm is number of calculations which demands powerful DSP to execute calculations in proper time. The current controller may be applied in F28335 Delfino Digital Signal Processor from T.I. thanks to its powerful calculation capabilities and many external interfaces. Not only prediction but also mathematical transformations needed for time recalculation cause high loadings for processor [2, 3].

Bibliography

[1] Gratkowski S., Pałka R.: Komputerowo wspomagana analiza i projektowanie urządzeń i układów elektromagnetycznych, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, 2001.
[2] Morel F.: Commandes directes appliquées à une machine synchrone à aimants permanents alimentée par un onduleur triphasé à deux niveaux ou par un convertisseur matriciel triphasé, PhD Thesis, France, 2007.
[3] Morel F., Xuefang L.-S., R´etif J.-M., Allard B.: A predictive current control applied to a permanent magnet synchronous machine, comparison with a classical direct torque control, ScienceDirect, 2008, France.
[4] Paplicki P., Wardach M., Bonisławski M., Pałka R.: Simulation and experimental results of hybrid electric machine with a novel flux control strategy, Archives of Electrical Engineering, Vol. 64, Iss. 1, 2015, 37-51.
[5] Piotuch R.: Selected predictive current controllers in PMSM drive systems, post-conference materials, WD 2011, Zielona Góra.
[6] Piotuch R.: Wyznaczanie indukcyjności z uwzględnieniem nasycenia obwodu magnetycznego maszyn synchronicznych z magnesami zagnieżdżonymi, IAPGOŚ 2/2013, 41-44.
[7] Rahman M., Zhou P.: Determination of saturated parameters of pm motors using loading magnetic fields, IEEE, Transactions on Magnetics, Vol. 27, No. 5, 1991.
[8] Tunia H., Kaźmierkowski M.: Podstawy automatyki napędu elektrycznego, PWN, Warszawa, 1983.

M.A. Rafał Piotuch
e-mail: rpiotuch@zut.edu.pl

Rafał Piotuch is an assistant and a Ph.D. student at West Pomeranian University of Technology in Szczecin at the Electric Department. Under prof. Ryszard Pałka supervision he carries out researches on current controllers for permanent magnet excited synchronous machines.

otrzymano/received: 15.10.2013 *przyjęto do druku/accepted: 28.04.2015*

DOI: 10.5604/20830157.1159324

OPTIMIZATION OF 3D LOCAL ORIENTATION MAP CALCULATION IN THE MATLAB FRAMEWORK

Ranya Al Darwich, Laurent Babout
Lodz University of Technology, Institute of Applied Computer Science

Abstract. *This paper presents the development and evaluation of a new approach toward the optimization of 3D local orientation map calculation in the Matlab framework. This new approach can be detailed as: optimize eigenvector calculation for PCA analysis of X-ray micro tomography images of lamellar Titanium alloys image. We use two different methods to find the eigenvector of the largest eigenvalue and compare them with the Matlab built-in function (eigs). The results show a steep decrease of the calculation time using the authors' method compared to the Matlab built-in function.*

Keywords: local orientation, PCA analysis, eigenvalue, eigenvector, matrix of inertia

OPTYMALIZACJA OBLICZEŃ TRÓJWYMIAROWYCH LOKALNYCH MAP KIERUNKOWYCH Z UŻYCIEM ŚRODOWISKA OBLICZENIOWEGO MATLAB

Streszczenie. *W artykule przedstawiono rozwój i ocenę nowego podejścia dotyczącego optymalizacji obliczeń 3D lokalnych orientacji map w środowiska Matlab. Zastosowano dwie różne metody wyznaczania wektora własnego największej wartości własnej. Wyniki są porównywane z wynikami otrzymanymi przy pomocy wbudowanych w pakiecie Matlab funkcji wyznaczające wektory i wartości własne. Wyniki porównania pokazują redukcję czasu obliczeń przy użyciu autorskiej metody w stosunku do funkcji wbudowanej w Matlab.*

Słowa kluczowe: orientacja lokalna gradientu, analiza PCA, wartość własna, wektor własny, macierz bezwładności

Introduction

There is a non-negligible amount of structured materials that show a local orientation in their microstructures. For instance the microstructure of titanium alloys can appear with a 3dimensional lamellar texture [1], or fiber composite materials can be designed with a woven pattern like textile fabrics (see fig. 1). They can be classified as texture materials and one may need to locally estimate the orientation of the features for further quality or property analysis. These orientation can be extracted from 2D/3D images and popular image processing method, which is based on gradient estimation and its matrix representation using matrix of inertia [4] or Hessian matrix [2] are frequently used. Next the local orientation can be calculated using principal component analysis (or matrix diagonalization), where the eigenvector of the largest/smallest eigenvalue represents the local direction. The main problem that arises from such methodology is the very time consuming process of matrix reduction as it is done with pixel/voxelwise operations. For instance, if one assume a 3D image of size 500^3, the Matlab built-in function (eigs), which uses the Arnoldi iteration method [6] to obtain the eigenvalues/eigenvectors, will have to be run sequentially 125 millions times, which is computationally very slow.

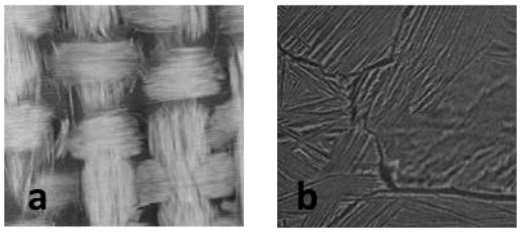


Fig. 1. Examples of microstructure, a) fibrous microstructure of glass fiber reinforced polymers (GFRP) b) lamellar microstructure of Titanium alloys (Ti)

Therefore, this paper aims at proposing alternative methods to speed up the calculation of eigenvector. The main objective is to use matrix operations and avoid loops, which are known as the main slowing elements in algorithms. The two proposed approaches are compared with the standard method based on the Matlab built-in function (eigs). Both eigenvector maps and computation times are compared to testify the usefulness of the new approaches. The aim of this paper is introducing methods to optimization of 3D local orientation. These methods are tested in 2D and 3D image of X-ray micro tomographic images of Titanium lamellar alloys (Ti) [1], and glass fiber reinforced polymers (GFRP) [7].

1. Algorithms

PCA, or Principal Component Analysis**,** is the most important 3-dimensionality reduction technique. This technique was initially employed by statisticians to reduce the variables into a lower number of orthogonal variables (factors), which are also called eigenvectors. In this paper we will calculate the eigenvectors and eigenvalues of the data covariance matrix using three methods. The eigenvector corresponding to the largest eigenvalue is the direction of greatest variation. The covariance matrix is based on the average gradient (first derivative) defined in the neighbourhood $W(p)$ of each pixel/voxel p composing the 2D/3D image I. In a more formal way, let consider the Definition domain $\Delta(N_1, N_2, N_3)= \{1,2,\dots N_1\}x\{1,2,\dots N_2\}x\{1,2,\dots N_3\}$ of an input volumetric image I: $\Delta (N_1, N_2, N_3)\rightarrow\{0,1,2,\dots,255\}$

To find the principle orientation of an image we use the matrix of inertia, we consider a neighbouring window W of size s^n (in n-dimensional space R^n) located around every point $(i,j,k) \in \Delta$, inside this window the matrix of inertia $\mathbf{J}_{ijk}$ is given by (in the 3D case):

$$J_{ijk}=\begin{pmatrix} \left\langle \frac{\partial I}{\partial x}\right\rangle^2 & \left\langle \frac{\partial I}{\partial x}\right\rangle\left\langle \frac{\partial I}{\partial y}\right\rangle & \left\langle \frac{\partial I}{\partial x}\right\rangle\left\langle \frac{\partial I}{\partial z}\right\rangle \\ \left\langle \frac{\partial I}{\partial x}\right\rangle\left\langle \frac{\partial I}{\partial y}\right\rangle & \left\langle \frac{\partial I}{\partial y}\right\rangle^2 & \left\langle \frac{\partial I}{\partial y}\right\rangle\left\langle \frac{\partial I}{\partial z}\right\rangle \\ \left\langle \frac{\partial I}{\partial x}\right\rangle\left\langle \frac{\partial I}{\partial z}\right\rangle & \left\langle \frac{\partial I}{\partial y}\right\rangle\left\langle \frac{\partial I}{\partial z}\right\rangle & \left\langle \frac{\partial I}{\partial z}\right\rangle^2 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} a_{ijk} & d_{ijk} & e_{ijk} \\ d_{ijk} & b_{ijk} & f_{ijk} \\ e_{ijk} & f_{ijk} & c_{ijk} \end{pmatrix} \quad (1)$$

where $\langle . \rangle$ denotes the averaging operation in the neighbourhood W (usually performed using convolution with a matrix of 1 in the Fourier domain for decrease processing time, especially in the 3D space).

At that stage we obtain a n-D map of matrix of inertia $\mathbf{J}$. Since $\mathbf{J_{ijk}}$ is symmetric, each point in the n-D space is represented by a vector of size $n(n+1)/2$. For instance, in the 3D case, this vector is of length 6 and can be represented as follows for a point $(i,j,k) \in \Delta$:

$$\mathbf{v}_{ijk}^{J}=\left(a_{ijk}\, d_{ijk}\, e_{ijk}\, b_{ijk}\, f_{ijk}\, c_{ijk}\right) \quad (2)$$

and the map of matrix of inertia takes the following form:

$$\mathbf{J}=\left(\mathbf{A}\,\mathbf{D}\,\mathbf{E}\,\mathbf{B}\,\mathbf{F}\,\mathbf{C}\right) \quad (3)$$

with $\mathbf{A}=\left\{\mathbf{a}_{ijk}\right\}$ where $\mathbf{a}_{ijk}=a_{ijk}$, $\mathbf{B}=\left\{\mathbf{b}_{ijk}\right\}$ where $\mathbf{b}_{ijk}=b_{ijk}$ and so on.

In what follows, we will present the 2 proposed methods that perform the eigenvector calculation on **J**.

1.1. Method 1: analytical method

This method relies on the *determinant solution*. Let **M** be an *n*-by-*n* matrix. So λ is an eigenvalue if:

$$\mathrm{Det}\left[\mathbf{M}-\lambda\mathbf{I}\right]=0 \tag{4}$$

where **I** is the *n*-by-*n* identity matrix.

This equation gives us a characteristic polynomial in λ of degree n, and the roots of this equation are the eigenvalues. In three-dimensional space we will get a cubic equation ($a\,\lambda^3+b\,\lambda^2+c\,\lambda+d=0$), that is solvable analytically using the well-known Cardano method published in 1545 [3]:

$$\mathbf{x}=\sqrt[3]{\mathbf{q}+\sqrt{\mathbf{q}^2+\left(\mathbf{r}-\mathbf{p}^2\right)^3}}+\sqrt[3]{\mathbf{q}-\sqrt{\mathbf{q}^2+\left(\mathbf{r}-\mathbf{p}^2\right)^3}}+\mathbf{p} \tag{5}$$

where:

$$\mathbf{p}=-\mathbf{b}/3a$$

$$\mathbf{q}=\mathbf{p}^3+\left(\mathbf{bc}-3a\mathbf{d}\right)/6a^2$$

$$\mathbf{r}=\mathbf{c}/3a$$

In the case of **J** (eq. 3), the set of variables defining the cubic equation are:

$$a=-1$$

$$\mathbf{b}=\mathbf{A}+\mathbf{B}+\mathbf{C}$$

$$\mathbf{c}=-\left(\mathbf{A}\circ\mathbf{C}+\mathbf{A}\circ\mathbf{B}+\mathbf{B}\circ\mathbf{C}-\mathbf{D}^2-\mathbf{E}^2-\mathbf{F}^2\right)$$

$$\mathbf{d}=\mathbf{A}\circ\mathbf{B}\circ\mathbf{C}+2\mathbf{E}\circ\mathbf{D}\circ\mathbf{F}-\mathbf{A}\circ\mathbf{F}^2-\mathbf{C}\circ\mathbf{D}^2-\mathbf{B}\circ\mathbf{E}^2$$

where $\circ$ denotes the Hadamart product (i.e. an element-wise multiplication). Knowing one root of the cubic equation representing the diagonalization of the tensor of inertia, it is straightforward to estimate the 2 other roots by reducing the polynomial by one degree.

What is important to notice here is that in the previous equations of the eigenvalue, each parameter can be considered as a 3D matrix, where each point corresponds to the local eigenvalue from the input image, following the PCA reduction of the tensor of inertia. This approach is well adapted for $n\leq 3$. For larger dimension, the next method is more appropriate.

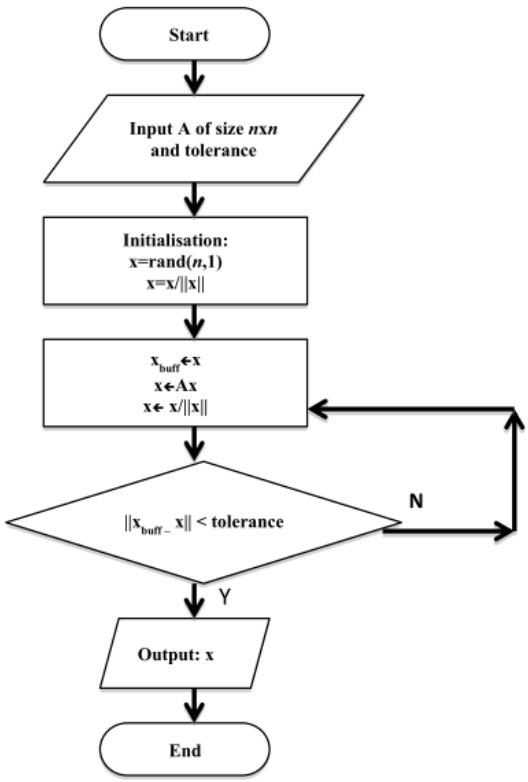


Fig. 2. Flow chart of the power iteration method

1.2. Method 2: power iteration

We implement this method to find iteratively the largest eigenvalue and its corresponding eigenvector from an initial eigenvector guess [5] (see Fig. 2 for the general power iteration flow chart). The power iteration algorithm is frequently used in the cases when the first couple of eigenvalues need to be computed, as in the case of searching the main spatial feature orientation. As in the previous method, the input is the map of matrix of inertia **J**. The iteration step is initially performed in parallel on each voxel yielding a vector corresponding to the local matrix of inertia $\mathbf{J}_{ijk}$. However, the number of points to be considered in the next iteration is decreased as the Euclidean distance between the eigenvectors at 2 successive steps is smaller than a given tolerance (typically 10^{-3}). Obviously, the number of updates of local eigenvector decreases as the number of iteration increases. This approach speeds up the iteration procedure and therefore the overall execution time of the algorithm.

1.3. Method 3: Matlab built-in function

In this method we calculate the eigenvalue and the eigenvector by using the Matlab built-in function *eigs*.

Eigs(**A**) solves the eigenvalue problem using the Arnoldi iteration [6]. While the approach is well suited for large sparse matrix, it is not designed to solve in parallel a large set of eigenvalue/vector decompositions, as in the case of the two previous methods.

Let consider, as previously, every point $(i,j,k) \in \Delta$ of an input image *I* and the corresponding matrix of inertia $\mathbf{J}_{ijk}$. The pseudo code is the following:

For $i \leftarrow 1$ *to* N_1
  For $j \leftarrow 1$ *to* N_2
    For $k \leftarrow 1$ *to* N_3
      $[\mathbf{x}_{ijk}, \lambda_{ijk}] \leftarrow \mathrm{eigs}(\mathbf{J}_{ijk})$

where $\mathbf{x}_{ijk}$ and λ_{ijk} are the eigenvectors and eigenvalues of $\mathbf{J}_{ijk}$.

2. Results

The comparison between the 3 methods is done in the following way. The results are verified qualitatively by comparing the map of eigenvector projection with respect to the main axis [001] (i.e. z-axis of the 3D image). Then comparison about the CPU time (i.e. execution time) is performed to estimate which method is the most appropriate to estimate local orientation in 3D.

Fig. 3 shows the result about the projection map for the 3 tested methods. Once can clearly see that they give very similar results. This has been done in the case of an input image of size 100^3.

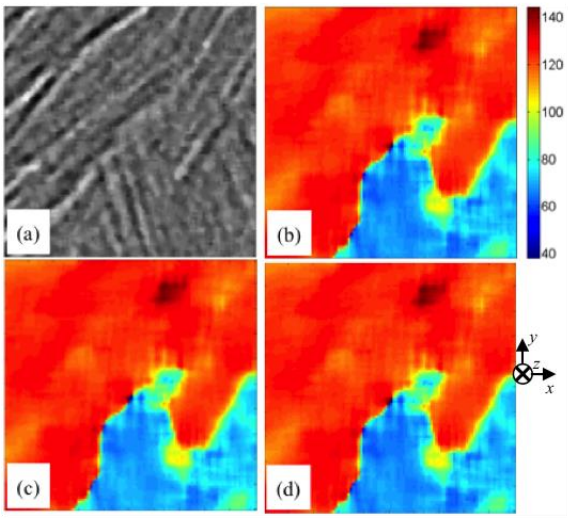


Fig. 3. a) the input image; b) the projection map calculated using method #1 (analytical method); c) the projection map calculated using method #2 (power iteration); d) the projection map calculated using method #3 (Matlab built-in function). The colour bar correspond to the projection angle (in degree)

One can also judge the accuracy of the calculation looking at the mean square error (MSE) of the 3D projection maps between method #3 (taken here as the reference method) and methods #1 and #2. In the case of the comparison between method #1 and #3, MSE is ~10^{-11}, while it is 0.09 between method #2 and #3. In the latter case, this MSE result is obtained for a tolerance value of 10^{-3}. This is considered as a good compromise between the execution time and the MSE, as shown in Fig. 4. Again, this calculation has been done in the case of an input image of size 100^3.

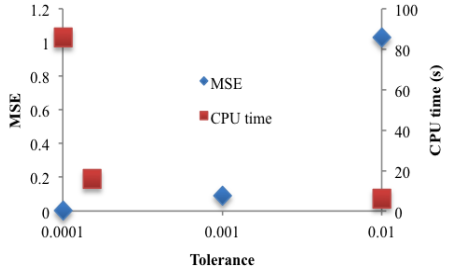


Fig. 4. Evolution of MSE and CPU time with respect to the tolerance, for an input image of size 100^3

Fig. 5 shows the evolution of the computation time as a function of the number of voxels of an input image, for the 3 tested methods. One can see that the three evolutions are linear (at least for the given range of image sizes that are lower than 100^3), but the fastest is clearly the method #1, which takes advantages of the analytical approach for the Eigen decomposition based on Hadamart product. Method #3 is particularly slow because of the algorithm that estimates voxel-by-voxel the eigenvector/eigenvalue using the Matlab built-in function *eigs*.

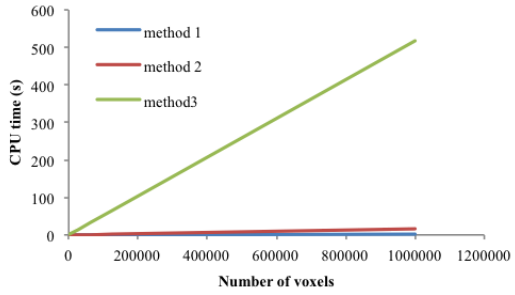


Fig. 5. Evolution of the CPU time with respect to the number of voxels for the 3 tested methods

Table 1 presents the results of our study, which once again shows that the calculation time of the determinant solution (i.e. method #1) is the smallest, which justifies the use of such method to accurately calculate main orientation of features in 3D images in the smallest time. This choice is also justified by the corresponding MSE value presented above. Also the table reveals that in average, method #1 is faster than method #2 by about 10 times, while it is ~500 times faster than method #3. Note that in this table, we disregard the calculation time for the Matlab built-in function (method #3) when the number of element is more than 100^3 because of its extremely long processing time for larger data set.

Table 1. Summary of execution time for the 3 tested methods and different 3D images sizes

Number of elements	CPU time for method #1 (analytical method) (s)	CPU time for method #2 (power iteration) (s)	CPU time for method #3 (Matlab built-in function) (s)
50^3	0.13	1.13	66.2
100^3	1.6	16	517.3
200^3	10.6	166	-
400^3	231.2	2621.5	-

Table 2 summarises the results and the properties of the 3 methods. In the case of matrix of inertia of dimension n≤3, method #1 is the best choice, considering both its computational time and accuracy. However, for largest dimensions, the power iteration should be considered, even if the accuracy depends on the chosen tolerance level. However, perspective work will aim at generalizing the Arnoldi/Lanczos method [5,6], which is used in the Eigs function (i.e. incorporating Hadamart product for matrix operations) to circumvent the main execution time drawback.

Table 2. summary of the advantages and disavantages of the 3 tested methods

Methods	Advantages	Disadvantages
Method1: The determinant solution	• very fast • analytical method • exact solution	• limited to 2D/3D case • need important RAM
Method2: power iteration	• locate the dominant eigenvalue • n-D (even quite complex to program for n>3)	• iterative method convergence speed depends on tolerance • need important RAM
Method3: Matlab built-in functions	• easy programming • n-D • exact solution	• very large CPU time

In all cases, the computation has been done on a server equipped with 2 Intel®Xeon® processors (12M Cache, 2.53 GHz, 4 cores, 8 logical threads) and 24 GB of RAM.

3. Conclusion

The current paper has presented a comparison between three methods to calculate the largest eigenvalue and corresponding eigenvector for large set of matrix of inertia calculated for 3D images. The comparison shows that the first authors' method based on analytical approach is the fastest and most accurate method compared to the two other methods (power iteration, and the Matlab built-in functions) with similar accuracy. This is of great importance when dealing with large data set as the one in 3D tomography images.

References

[1] Babout L., Jopek L., Janaszewski M.: A New Directional Filter Bank for 3D Texture Segmentation: Application to Lamellar Microstructure in titanium Alloys, MVA2013 IAPR International Conference on Machine Vision Applications, May 20-23, 2013, Kyoto, JAPAN.
[2] Eriksen E.: Principal Minors and the Hessian, BI Norwegian School of Management Department of Economics, October 01, 2010.
[3] Wituła R., Słota D.: Cardano's formula, square roots, Chebyshev polynomials and radicals, Journal of Mathematical Analysis and Applications, vol 363, Issue 2, 15 March 2010 , 639–647.
[4] Jeulin D., Moreaud M.: Segmentation of 2D and 3D textures from estimates of the local orientation, Image Anal Stereol 27, 2008, 183-192.
[5] Lanczos C.: An Iteration Method for the Solution of the Eigenvalue Problem of Linear Differential and Integral Operators, Journal of Research of the National Bureau of Standard, vol 45, No. 4, October 1950.
[6] Lehoucq R.B., Sorensen D.C.: Deflation Techniques for an Implicitly Re-Started Arnoldi Iteration, SIAMJ. Matrix Analysis and Applications, SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, Vol 17, Number 4, 1996, 789-821.
[7] Schell J.S.U., Renggli M., van Lenthe G.H., Mu¨ller R., Ermanni P.: Microcomputed tomography determination of glass fibre reinforced polymer mesostructure, Composites Science and Technologie,Vol66, Issue 13 October, 2006, 2016–2022.

M.Sc. Ranya Al Drwich
e-mail: raldarwich@kis.p.lodz.pl

Ranya Al Darwich is a Ph.D. student at Lodz University of Technology (TUL), Institute of Applied Computer Science. Her scientific interest covers image processing and analysis.

Prof. Laurent Babout
e-mail: Laurent.babout@p.lodz.pl

Prof. L. Babout obtained his Ph.D. degree in 2002 from INSA-Lyon (France) and D.Sc. degree in 2011 from the Lodz University of Technology (TUL). Currently he holds a position of associate professor at TUL. His scientific interest covers X-ray tomography and 3Dimage processing, with main focus on materials science applications. Prof. L .Babout is a SIAM member and author or co-author of more than 100 scientific papers,scientific papers, books and chapters.

otrzymano/received: 27.11.2014 *przyjęto do druku/accepted: 15.04.2015*

DOI: 10.5604/20830157.1159325

KONCEPCJA TRAKCYJNEJ PODSTACJI PROSTOWNIKOWO-FALOWNIKOWEJ W KOLEJOWYM SYSTEMIE ZASILANIA TRAKCYJNEGO 3 KV DC

Włodzimierz Kruczek
Instytut Kolejnictwa, Zakład Elektroenergetyki

Streszczenie. *Kolejowe podstacje trakcyjnego systemu zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego wyposażone są w prostowniki, których zadaniem jest przekształcanie, napięcia przemiennego o częstotliwości krajowego systemu energetycznego na napięcie stałe. Są to przekształtniki nie sterowane o jednokierunkowym przesyle mocy. W ostatnich latach praktycznie wszystkie nowo produkowane i wprowadzane do eksploatacji elektryczne pojazdy trakcyjne, to pojazdy wyposażone w silniki asynchroniczne i mające możliwość zwrotu energii do kolejowej sieci trakcyjnej podczas hamowania rekuperacyjnego. Zwrot energii jest jednak możliwy tylko w przypadku gdy w tym samym czasie w pobliżu znajduje się inny pojazd, który jest w fazie rozruchu lub jazdy z prądem, w takiej sytuacji energia ta może być wykorzystana przez ten pojazd. W każdym innym przypadku energia elektryczna pochodząca od procesu hamowania rekuperacyjnego wytracana jest w specjalnych rezystorach hamowania. Zwrot odzyskanej energii do systemu energetycznego byłby możliwy w przypadku zastosowania w kolejowych podstacjach trakcyjnych zamiast prostowników, przekształtniki dwukierunkowych czyli rodzaju przekształtnika półprzewodnikowego, mającego zdolność dwukierunkowego przesyłu mocy. Niniejszy artykuł przedstawia zarys problemów technicznych z jakimi należy się uporać przy próbie modelowania, projektowania i budowy takiego przekształtnika. Intencją autora jest rozpoczęcie przewodu doktorskiego, w którym zostanie wykonane modelowanie komputerowe, ocena możliwości, sensowności technicznej i ekonomicznej zastosowania takiego przekształtnika w kolejowych podstacjach trakcyjnych 3 kV DC. Promotorem tej rozprawy doktorskiej będzie prof. dr hab. inż. Grzegorz Skarpetowski.*

Słowa kluczowe: zasilanie trakcyjne, pojazdy elektryczne

TRACTION RECTIFIER-INVERTER SUBSTATION CONCEPT FOR 3 KV DC RAILWAY TRACTION SYSTEM

Abstract. *In recent years, all newly manufactured and put into operation electric rail vehicles are equipped with asynchronous motors and have the opportunity to return the energy to the overhead conytact line system during regenerative braking. This energy obtained from the regenerative braking process can be fed back only if on the same OHCL section there is another electric vehicle that is simultaneously generating traction force. In this case this energy can be reused by this second vehicle. In any other case the energy generated by the regenerative braking process is dissipated on braking resistors. Moreover, the energy recuperation and transmission to the local power distribution system could be possible, if the traction substations were equipped with traction rectifier-inverter substation converters instead of traditional rectifiers. Converters are a type of converter semiconductor capable of bi-directional power transmission. This article outlines the technical problems which need to be solved while trying to model, design and to build such an inverter.*

Keywords: traction power supplies, electric vehicles

Wstęp

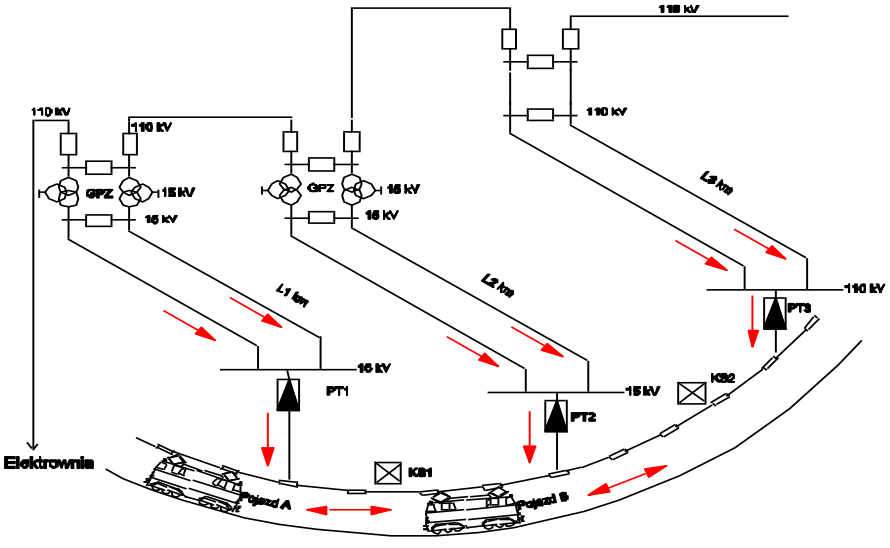
Układ zasilania w systemie zasilania trakcyjnego 3 kV DC jest to obwód elektryczny o określonej strukturze, służący do zasilania pojazdów trakcyjnych poruszających się po linii kolejowej. W skład systemu zasilania wchodzą: zasilający krajowy system elektroenergetyczny, podstacje trakcyjne, sieć trakcyjna, kabiny sekcyjne. Odbiornikami w tym obwodzie są pojazdy trakcyjne. Schemat klasycznego układu zasilania przedstawiono na rysunku 1. Na rysunku tym zaznaczono możliwe kierunki przepływu energii elektrycznej.

Przepływ energii elektrycznej w kierunku przeciwnym do kierunku zasilającego jest możliwy tylko w obszarze sieci trakcyjnej i przy spełnieniu następujących warunków:

- pojazd trakcyjny A jest pojazdem z możliwością hamowania rekuperacyjnego i hamuje w ten sposób,
- pojazd trakcyjny B znajduje się wystarczająco blisko pojazdu trakcyjnego A i jest w stanie jazdy z prądem lub w stanie rozruchu.

Odpowiedni układ i stan pracy pojazdów trakcyjnych umożliwia przekazywanie mocy elektrycznej pochodzącej z procesu hamowania rekuperacyjnego z pojazdu A do pojazdu B. Nie ma możliwości przekazywania mocy elektrycznej poza obszar sieci trakcyjnej.

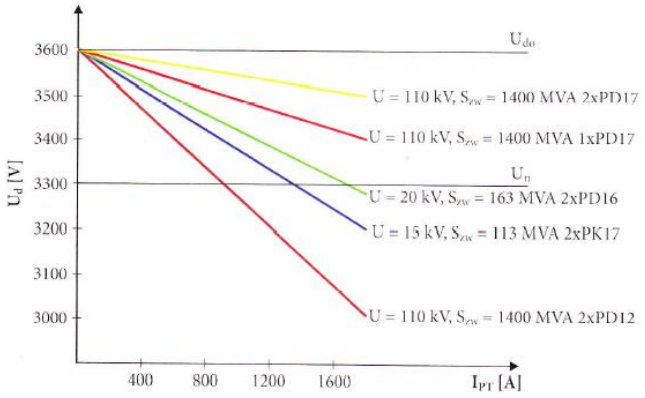
Elementem uniemożliwiającym przepływ mocy dwukierunkowo w całym obszarze zasilania trakcyjnego jest prostownik trakcyjny.



Rys. 1. Klasyczny układ zasilania w systemie zasilania trakcyjnego 3 kV DC

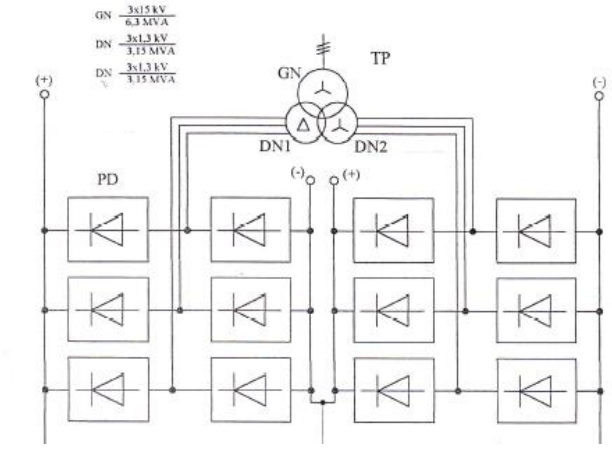
Aktualnie ze względu na większe moce pojazdów trakcyjnych istnieje tendencja do zwiększania wydajności energetycznych podstacji trakcyjnych. Stosuje się więc jednostopniową transformację napięcia. W rozwiązaniu tym napięcie do zasilania transformatora prostownikowego doprowadzane jest bezpośrednio z linii wysokiego napięcia 110 kV. Pomijana jest więc cała infrastruktura energetyczna 110/15 kV znajdująca się w GPZ-tach. W podstacjach trakcyjnych napięcie 110 kV transformowane jest jednostopniowo do poziomu wymaganego przez prostownik trakcyjny. Innym starszym rozwiązaniem o mniejszej wydajności energetycznej jest zasilanie podstacji trakcyjnej średnim napięciem 15 kV z GPZ i powtórna transformacja tego napięcia w podstacji trakcyjnej do poziomu odpowiadającego prostownikowi trakcyjnemu. Ważnym zagadnieniem jest również jakość napięcia i zmniejszenie oddziaływania prostowników na sieć zasilającą, istnieje więc tendencja do stosowania prostowników wielopulsowych [5].

Wydajność energetyczną podstacji trakcyjnej można określić za pomocą charakterystyki zewnętrznej U_d (I_{PT}) (rys. 2). Na podstawie przeprowadzonych pomiarów oraz za literaturą branżową np. [8], można powiedzieć, że przy zastosowaniu transformacji jednostopniowej i odpowiednich prostowników trakcyjnych, spadki napięcia na szynach 3 kV DC mają dwu lub trzykrotnie mniejszą wartość jak przy zasilaniu 15 kV.



Rys. 2. Przykładowe charakterystyki zewnętrzne $U_d(I_{PT})$ podstacji trakcyjnej zasilanej liniami 15 kV lub 110 kV [1]

W obu przedstawionych rozwiązaniach zasilania podstacji trakcyjnej wykorzystywane są diodowe prostowniki trakcyjne. W typowym układzie prostownika trakcyjnego (dwa mostki trójfazowe połączone szeregowo - rysunek 2) nie ma możliwości przepływu energii elektrycznej od systemu DC do krajowego systemu energetycznego.



Rys. 3. Prostownik trakcyjny w układzie mostka szeregowego

W opisywanym koncepcyjnym rozwiązaniu, przekształtnik diodowy o jednokierunkowym przepływie mocy, zostałby zastąpiony przekształtnikiem dwukierunkowym, czyli urządzeniem energoelektronicznym o możliwym dwukierunkowym przepływie mocy. Urządzenie w zależności od istniejącego poziomu napięcia w sieci trakcyjnej, miałoby możliwość przechodzenia z pracy prostowniczej na prace falownikową i odwrotnie.

Innym rozwiązaniem również umożliwiającym zwrot energii hamowania rekuperacyjnego do krajowego systemu energetycznego opisywanym w literaturze branżowej np. [2] jest wprowadzenie do podstacji trakcyjnych falowników które pracowałyby równolegle z istniejącymi prostownikami niesterowanymi a załączałyby się tylko gdy napięcie w sieci trakcyjnej przekroczy ustalony poziom.

Aktualnie trwają prace nad efektywnym wykorzystaniem energii pochodzącej z hamowania rekuperacyjnego [3]. Takie firmy jak ABB (system ENVILINETM), Alstom (tzw. HESOP) proponuje swoje systemy do podstacji trakcyjnych w komunikacji miejskiej [7].

1. Oszacowanie możliwej do odzyskania energii elektrycznej

Nowoczesny pojazd trakcyjny w procesie hamowania rekuperacyjnego stara się przekazać wytworzoną w procesie hamowania energię elektryczną do sieci trakcyjnej. Jeżeli pomimo zwiększania się napięcia na pantografie do poziomu 3600 V, nie następuje przepływ prądu z pojazdu trakcyjnego do sieci trakcyjnej, energia wytracana jest w rezystorze hamowania. Maksymalny długotrwały poziom napięcia w sieci trakcyjnej 3 kV DC nie może przekraczać wartości 3,6 kV [10], dlatego też pojazdy trakcyjne podczas procesu hamowania rekuperacyjnego nie mogą podwyższać napięcia ponad tą wartość.

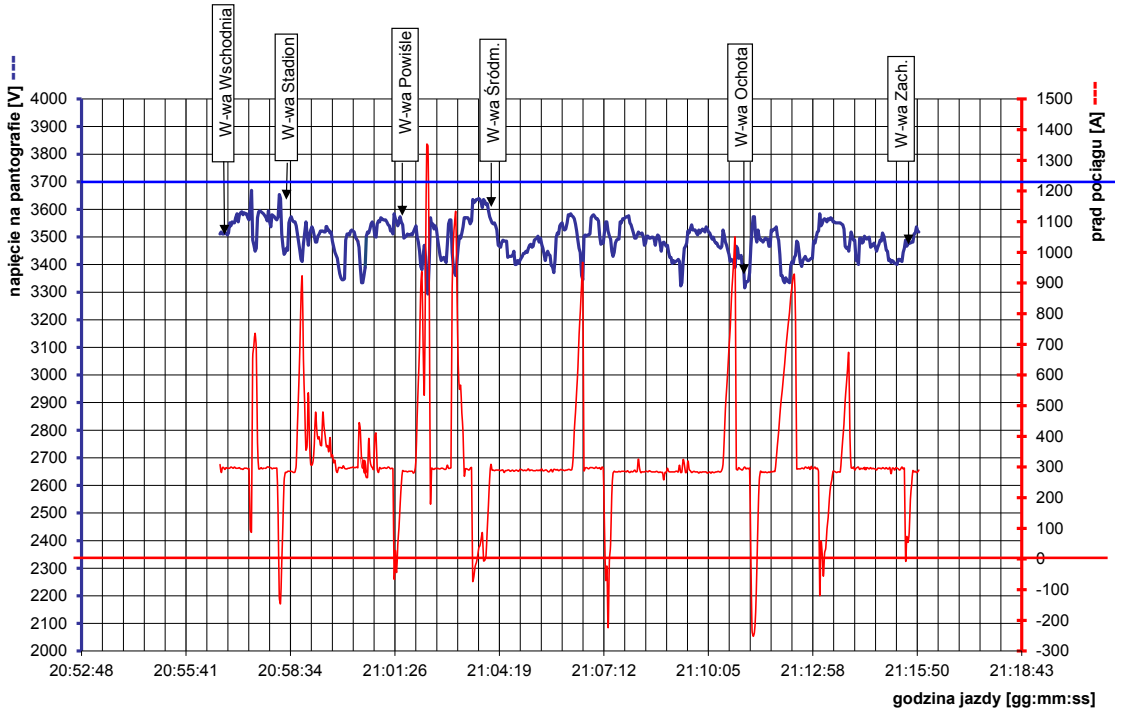
Na potrzeby niniejszego artykułu oszacowano energię wytracaną w rezystorach hamowania pojazdu trakcyjnego, na podstawie zarejestrowanego przebiegu prądu pociągu składającego się z dwóch jednostek ER75, kursującego na odcinku Warszawa Zachodnia Mińsk Mazowiecki (rysunek 4 i 5). Jeżeli wartość prądu ma znak ujemny, oznacza to, że moc pobierana jest ujemna i byłaby ona wytracana w rezystorach hamowania. Ponieważ przedstawione przebiegi były rejestrowane w jednostce trakcyjnej o celowo przeregulowanym poziomie napięcia, przy którym pojazd może jeszcze zwracać energię do sieci trakcyjnej z 3,6 kV do 3,7 kV, cała moc jest zwracana do sieci trakcyjnej. Przy prawidłowo ustawionym poziomie napięcia. moc ta byłaby wytracana na rezystorach hamowania. Opisany sposób jest zastępczy, w pracy docelowej moc tracona na rezystorach hamowania, zostanie zmierzona przez bezpośrednią rejestrację prądu w rezystorach hamowania, przy prawidłowo wyregulowanym poziomie napięcia granicznego na pantografie.

Z załączonych przebiegów prądu (rysunki 4 i 5), można wnioskować, że w obszarach gdzie ruch pociągów jest częsty np. odcinek Warszawa Zachodnia – Warszawa Wschodnia, praktycznie cała moc pochodząca z hamowania rekuperacyjnego może być wykorzystywana przez inne pojazdy, w obszarach których ruch pociągów nie jest tak częsty np. odcinek Warszawa Wesoła - Cisie moc ta jest wytracana w rezystorach hamowania.

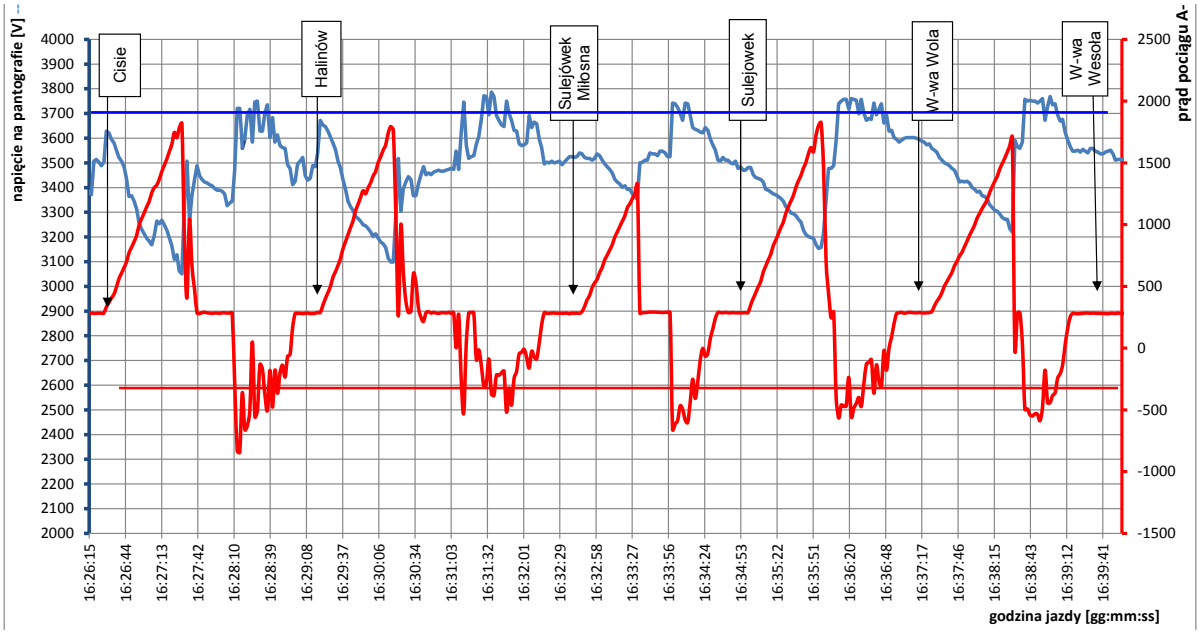
Energia pobrana przez element w przedziale czasu (t1, t2), jest to całka z mocy chwilowej pobieranej przez ten element.

$$w(t_1,t_2)=\int_{t_1}^{t_2} p(t)\,dt \qquad (1)$$

Na analizowanym odcinku o długości 12 km wytracona energia w rezystorach hamowania wynosi 170 kWh.



Rys. 4. Wartość napięcia i prądu pociągu złożonego z jednostek trakcyjnych 2 x ER75 na odcinku Warszawa Zachodnia – Warszawa Wschodnia



Rys. 5. Wartość napięcia i prądu pociągu złożonego z jednostek trakcyjnych 2 x ER75 na odcinku Warszawa Wesoła – Cisie

Znając energię traconą w rezystorach hamowania, na podanym odcinku można oszacować dobowe straty energii elektrycznej w rezystorach hamowania na całym odcinku Warszawa Wesoła – Mińsk Mazowiecki. Na odcinku tym w ciągu doby uruchamianych jest 53 pary pociągów Kolei Mazowieckich. Z prostych przeliczeń wynika że dla tego odcinka równego 24 km dobowe straty energii w rezystorach hamowania wyniosą.

$$\Delta W_{Rh} = 170 \cdot 2 \cdot 106 \qquad (2)$$

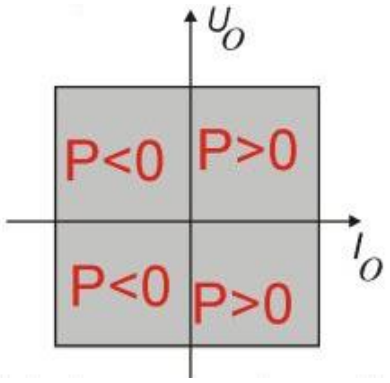
$$\Delta W_{Rh} = 36040 \ kWh$$

Oczywiście nie można tutaj mówić o dokładnym wyliczeniu, gdyż część tej energii zostałaby na pewno wykorzystana przez inne pojazdy trakcyjne, duże znaczenie ma również charakter i kierunek jazdy, jest to więc przybliżony szacunek, według autora zachęcający jednak do zajęcia się problemem, zwłaszcza w dobie nawoływania i uświadamiania do konieczności oszczędzania energii.

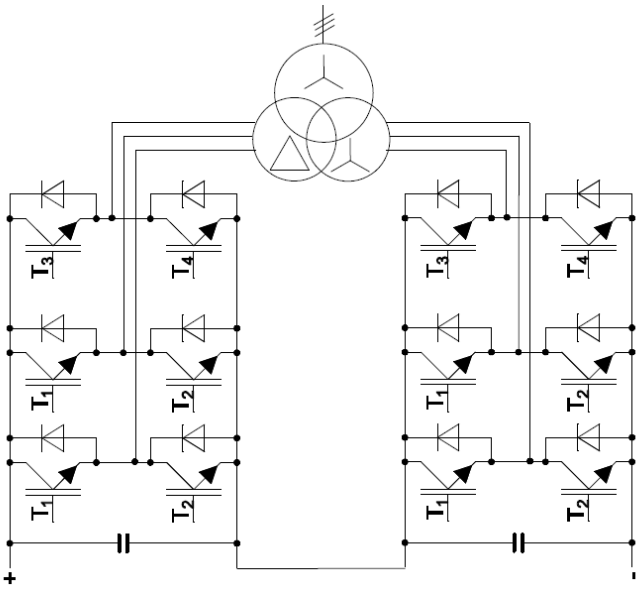
2. Przekształtnik dwukierunkowy

Klasyfikację układów przekształtnikowych można wykonać w oparciu o usytuowanie obszaru mocy przekształtnika w układzie współrzędnym prąd i napięcie wyjściowe. Dla przekształtnika czterokwadrantowego możliwy obszar mocy zawiera się w czterech ćwiartkach płaszczyzny I-U (rysunek 6).

Obecnie energoelektronika umożliwia już budowę przekształtników sterowanych, opartych o tranzystory IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) o mocach wystarczających do zastosowań w podstacjach trakcyjnych. Łącząc strukturę dwóch mostków trójfazowych w układ szeregowy, powstanie struktura która mogłaby być wykorzystana w przekształtniku do podstacji trakcyjnych (rysunek 7).

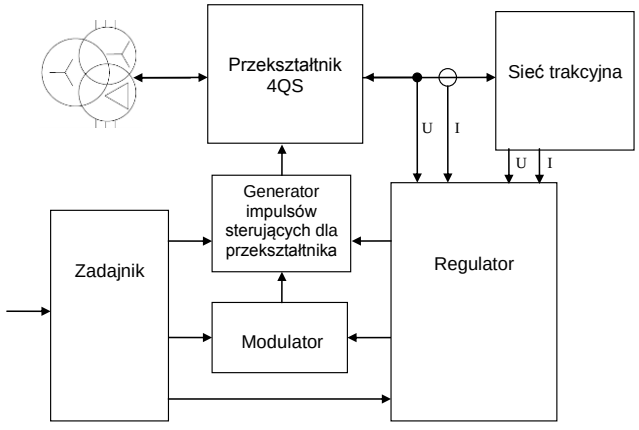


Rys. 6. Przyporządkowanie kwadrantów pracy w przekształtniku dwukierunkowym przepływie mocy na płaszczyźnie I-U



Rys. 7. Proponowana struktura przekształtnika do podstacji trakcyjnej

Na rysunku 8 przedstawiono proponowany schemat blokowy kompletnego przekształtnika trakcyjnego dla podstacji trakcyjnych.



Rys. 8. schemat blokowy przekształtnika dwukierunkowego

3. Modelowanie przekształtnika

W pracy docelowej zostanie przeprowadzone modelowanie przekształtnika dwupoziomowego i trójpoziomowego. W przekształtniku dwupoziomowym istnieje tylko możliwość przełączania pomiędzy maksymalnym i minimalnym napięciem. Modelowanie i budowa takiego przekształtnika jest prostsza od trójpoziomowego, jednak posiada wady z których najważniejsza to wysoka zawartość harmonicznych. Energia oddawana do sieci publicznej musi spełniać wymagania jakościowe podane w [11], z których najważniejszym parametrem jest współczynnik zawartości harmonicznych THD. Przy pracy prostownikowej urządzenie pracowałoby w trybie prostownika 12-pulsowego, który jest wystarczający do zastosowań trakcyjnych Należy również rozpatrywać rezystancję wewnętrzną, gdyż zgodnie z charakterystyką zewnętrzną podstacji trakcyjnej (rysunek 2), rodzaj zastosowanego przekształtnika ma podstawowe znaczenie na sztywność charakterystyki. Zgodnie z charakterystyką zewnętrzną, pomimo transformacji jednostopniowej i dużej mocy zwarciowej, przy zastosowaniu prostownika o dużej rezystancji wewnętrznej, kształt charakterystyki ma największe nachylenie.

4. Opis proponowanej metody modelowania

Wyniki przykładowego modelowania przekształtnika przedstawiono na rysunkach 9, 10, 11. Przebiegi przedstawiają pracę falownikową. Modelowanie wykonane w pakiecie Mathcad wykorzystując algorytm kształtowania harmonicznej podstawowej z zastosowaniem funkcji opisanej w patencie [9].

Metoda ta jest metodą alternatywną wytwarzania impulsów sterujących w stosunku do metod takich jak: PPM (Pulse Phase Modulation) – modulacja fazy (położenia) impulsu, PAM (Pulse Amplitude Modulation) – modulacja amplitudy impulsu, PFM (Pulse Frequency Modulation) – modulacja częstotliwości impulsów, PWM (Pulse Width Modulation) – modulacja szerokości impulsu. Wszystkie te metody są szeroko opisane w literaturze branżowej np. [1, 6].

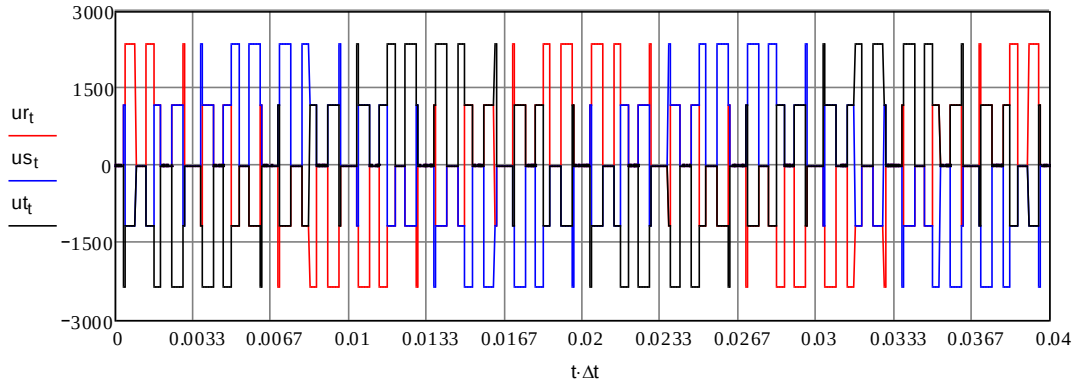
Wspomniana tutaj metoda alternatywna polega na wyliczaniu przebiegu sterującego jako dystrybucji złożonej z szeregu zmodulowanych amplitudowo harmonicznych. Równanie generacji przebiegu dla przekształtnika dwupoziomowego przyjmuje postać:

$$m(t) = m0 + 0{,}5m1\cos(\omega t - \phi - \Psi)$$
$$tsd(t) = m(t) + \frac{2}{\pi}\sum_{n}\frac{\sin(n\cdot\pi\cdot m(t))}{n}\cdot\cos\left[n\cdot k\cdot(\omega\cdot t - \Psi - \varepsilon)\right] \quad (3)$$

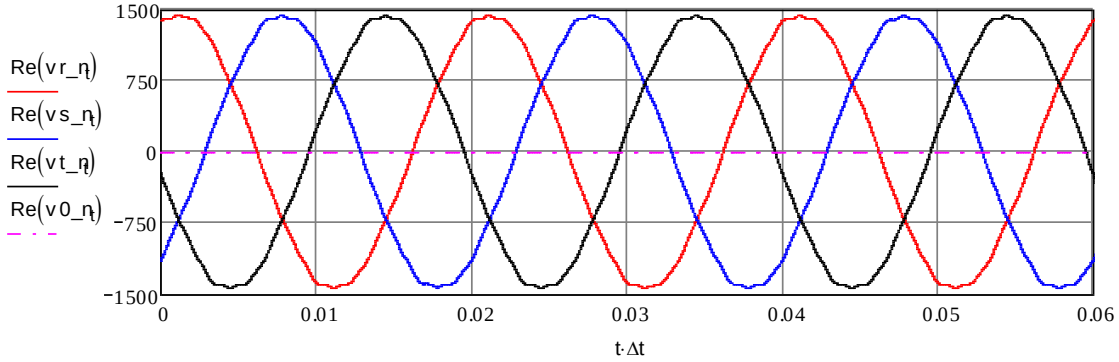
gdzie m(t) jest funkcją modulującą, która jest zarazem zadanym kształtem sygnału wyjściowego przekształtnika, t - czas, ω - pulsacja żądanego przebiegu, k - ilość impulsów przebiegu PWM na jeden okres przebiegu żądanego, m_0 - składowa stała funkcji modulującej – wpływa na składową stałą sygnału wyjściowego, m_1 - amplituda składowej zmiennej, ϕ - kąt przesunięcia fazowego przebiegu wyjściowego, Ψ - kąt przesunięcia fazowego przebiegu wyjściowego razem z impulsami przekształtnika, ε - kąt przesunięcia fazowego impulsów przekształtnika, n - ilość harmonicznych składających się na prostokąt.

Zaprezentowane przebiegi (rysunki 9 i 10) przedstawiają modelowanie jednej połówki przykładowego przekształtnika. Na rysunku 11 przedstawiono analizę w dziedzinie częstotliwości otrzymanych przebiegów prądu i napięcia.

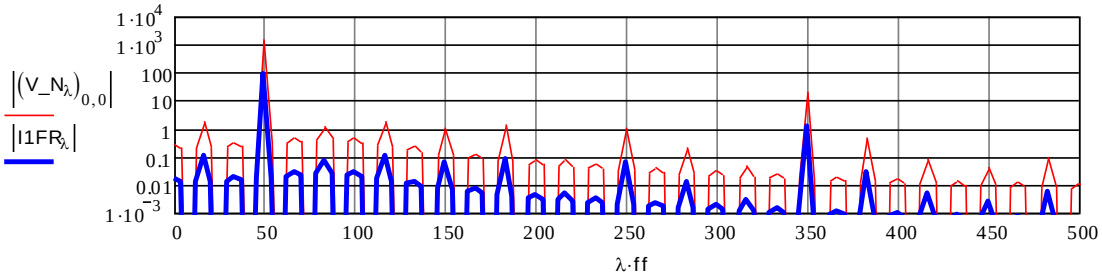
Podczas próby modelowania powstaje szereg problemów, które należy rozwiązać, między innymi odpowiednia synchronizacja pracy obu części przekształtnika, dobór filtrów, sposób wyłączania ewentualnych zwarć w sieci trakcyjnej. Ponieważ przekształtnik wymaga dużej pojemności, powstałe zwarcie musiałoby być wyłączane bardzo szybko, dotychczasowe czasy wyłączania wyłączników szybkich rzędu 20, 30 ms nie są wystarczające.



Rys. 9. Przebiegi czasowe bez filtrów i obciążenia napięcia przekształtnika w trybie pracy falownikowej



Rys. 10. Przebiegi czasowe harmonicznej podstawowej napięcia w trybie pracy falownikowej



Rys. 11. Spektrum napięcia i prądu 1 fazy

5. Wnioski

W niniejszym artykule przedstawiono koncepcję zastosowania przekształtnika dwukierunkowego w kolejowych podstacjach trakcyjnych systemu zasilania trakcyjnego 3 kV DC. Z przedstawionych wstępnych oszacowań możliwej do odzyskania energii elektrycznej autor uważa, że problemem warto się zająć, podjąć próbę modelowania a w przypadku zachęcających wyników, próbę budowy takiego przekształtnika.

Literatura

[1] Barlik R., Nowak M.: Poradnik inżyniera energoelektronika. WNT, Warszawa 1998.
[2] Bael C.H., Han M.S., Kim Y.K., Choi C.Y.: Korea Railroad Research Institute. www.researchgate.net/publication/4214376_Simulation_Study_of_Regenerative_Inverter_for_DC_Traction_Substation [02.15.2015].
[3] Cornic D.: Alstom Transport. www.researchgate.net/publication/224204695_Efficient_recovery_of_braking_energy_through_a_reversible_dc_substation [02.15.2015].
[4] Januszewski S., Świątek H., Zymmer K.: Półprzewodnikowe przyrządy mocy. Właściwości i zastosowania. WKiŁ, Warszawa, 1999.
[5] Korzycki E., Mazurek P., Świątek H., Zymmer K.: Uwarunkowania i zalety stosowania w trakcji elektrycznej 18-24 pulsowych zespołów prostownikowych. Czasopismo Techniczne E. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. 1-E/2007, 95-109.
[6] Nowak M, Barlik R.: Układy sterowania i regulacji urządzeń energoelektronicznych, WSiP Warszawa 2008.
[7] Raulin B: HESOP – innowacyjna podstacja trakcyjna z możliwością zwrotu energii rekuperacji do sieci elektroenergetycznej. Materiały XVI Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2014, Zakopane 2014.
[8] Szeląg A.: Wpływ napięcia w sieci trakcyjnej 3 kV DC na parametry energetyczno-trakcyjne zasilanych pojazdów. Instytut Naukowo-Wydawniczy "SPATIUM", Warszawa 2013.
[9] Skarpetowski G.: Sposób sterowania elektrycznym zaworem przekształtnika, Rzeczpospolita Polska, Patent nr 168286.
[10] PN - EN 50163. Zastosowania kolejowe Napięcia zasilania systemów trakcyjnych.
[11] PN - EN 50160. Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.

Mgr inż. Włodzimierz Kruczek
e-mail: wkruczek@ikolej.pl

Od 2007 r. pracownik Zakładu Elektroenergetyki Instytutu Kolejnictwa. Specjalista w zakresie miernictwa elektrycznego, pomiarów termowizyjnych, ochrony przeciwporażeniowej w systemach trakcyjnych, pojazdach trakcyjnych i wagonach osobowych. Od 2010 r. kierownik sekcji laboratoryjno pomiarowej w Zakładzie Elektroenergetyki. Zajmuje się również badaniami wyłączników szybkich, przetwornic statycznych, sieci trakcyjnej i odbieraków prądu pojazdów trakcyjnych i ich współpracy z siecią trakcyjną. Uczestnik studiów doktoranckich niestacjonarnych w Instytucie Elektrotechniki.

otrzymano/received: 23.09.2014 *przyjęto do druku/accepted: 15.02.2015*

DOI: 10.5604/20830157.1159327

WYKORZYSTANIE FORMATU IONEX DO POPRAWY POZYCJONOWANIA NA OBSZARZE POWIATU RYCKIEGO

Kamil Krasuski
Zespół Technik Satelitarnych

Streszczenie. *W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących poprawy pozycjonowania absolutnego na obszarze powiatu ryckiego. W ramach eksperymentu wykorzystano obserwacje kodowe GPS ze stacji referencyjnej RYKI. Współrzędne stacji referencyjnej RYKI zostały wyznaczone na dwa sposoby w programie RTKLIB, przy zastosowaniu metody punktowego pozycjonowania absolutnego. W pierwszym teście poprawka jonosferyczna została określona za pomocą modelu Klobuchara, zaś w drugim teście mapy jonosfery VTEC w formacie IONEX zostały zaimplementowane do obliczeń. Wstępne wyniki dokładnościowe pozycjonowania podkreślają tezę o potrzebie asymilacji lokalnego modelu jonosfery do poprawy pozycjonowania. Parametry jonosfery VTEC w teście II poprawiają dokładność pozycji nawet do 8 m, w porównaniu z testem I. Dodatkowo błąd RMS-3D został obliczony i osiąga wartości do ponad 11 m.*

Słowa kluczowe: GPS, jonosfera, IONEX, metoda punktowego pozycjonowania absolutnego, dokładność pozycjonowania

UTILIZATION IONEX FILE FOR POSITIONING CORRECTION OVER RYKI DISTRICT AREA

Abstract. *Article presents studies results regard to standalone positioning correction over Ryki District area. In the experiment GPS code observations from RYKI reference station were utilized. Station coordinates were estimated based on two ways in RTKLIB software using Single Point Positioning mathematical formulation. In first test ionosphere delay was determinated using Klobuchar model, but in second case ionosphere VTEC maps were implemented in computations also. Preliminary results of positioning accuracy underline thesis that local ionosphere model should be assimilated to positioning correction. Ionosphere VTEC parameters in test II improves positioning accuracy to 8 m, in comparison to test I. Additionally RMS-3D error was calculated and it can reach up to 11 m.*

Keywords: GPS, ionosphere, IONEX, single point positioning method, positioning accuracy

Wstęp

Wyznaczenie wiarygodnej i rzeczywistej pozycji użytkownika jest podstawową domeną każdego globalnego systemu nawigacyjnego. Obecnie taką możliwość gwarantują 4 systemy nawigacyjne takie, jak: GPS, GLONASS, BEIDOU oraz GALILEO. Spośród wyżej wymienionych komponentów, system GPS posiada największą liczbę satelitów na orbicie (około 32) i zapewnia pozycjonowanie w czasie rzeczywistym i post-processingu na całej kuli ziemskiej. Satelity rozlokowane są na 6 orbitach prawie kołowych na wysokości około 20200 km i nachylone do płaszczyzny równika pod kątem około 55°. Wszystkie satelity na orbicie są podzielone na bloki satelitarne: II-A, II-R, II-RM oraz II-F. System GPS jest w trakcie pełnej modernizacji, o czym świadczy liczba satelitów (15) z bloków nowej generacji II-RM oraz II-F. Satelity z bloków II-RM oraz II-F umożliwiają ponadto nadawanie nowych sygnałów cywilnych na częstotliwościach L2 i L5. Dodatkowo w fazie produkcyjno-testowej są satelity najnowszej generacji III, które zapewnią poprawę dokładności pozycjonowania, poprawę mocy sygnałów GPS i zwiększenie niezawodności pracy systemu [3].

System GPS poza fundamentalnymi zadaniami takimi, jak wspomniana już poprawa pozycjonowania, ale również wspomaganie nawigacji oraz określenie precyzyjnego transferu czasu, pozwala na monitoring warstw atmosfery (szczególnie troposfery i jonosfery). Troposfera jest warstwą neutralną (niedyspersyjną) atmosfery dla obserwacji GPS, dla której wskaźnik refrakcji jest zawsze większy od 1. Zatem wartość opóźnienia troposferycznego nie zależy od częstotliwości fali nośnej sygnału GPS. Dlatego w dużej mierze do wyznaczenia całkowitego opóźnienia troposferycznego przyjęto stosować modele empiryczne i teoretyczne. Wpływ refrakcji troposferycznej jest dość dobrze widoczny podczas wyznaczenia współrzędnej wertykalnej, czyli wysokości. Do najbardziej popularnych i rozpowszechnionych modeli opóźnienia troposferycznego można zaliczyć: model Hopfield, zmodyfikowany model Hopfield czy model Saastamoinena [1].

Jonosfera z kolei jest ośrodkiem dyspersyjnym (rozpraszającym), a więc prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej zależy od częstotliwości i współczynnika refrakcji. W przypadku jonosfery można wyróżnić 2 współczynniki refrakcji jonosferycznej: dla prędkości grupowej (prędkość przenoszenia informacji w fali nośnej) oraz prędkości fazowej (prędkość przesuwania się punktu o stałej fazie wzdłuż drogi określonej przez prawo Fermata). Współczynnik refrakcji jonosferycznej dla prędkości grupowej jest większy od 1, zaś dla prędkości fazowej mniejszy od 1. Stąd refrakcja jonosferyczna powoduje spowolnienie obserwacji kodowych oraz przyspieszenie obserwacji fazowych. W praktyce wpływ poprawki jonosferycznej dla obserwacji kodowych jest odejmowany od pseudoodległości, zaś dla obserwacji fazowych dodawany [2].

W nawigacji i pozycjonowaniu absolutnym, wartość poprawki jonosferycznej wyznacza się z modelu Klobuchara, który redukuje wpływ opóźnienia jonosferycznego do 60%. Model Klobuchara zakłada stałą wartość zaburzenia jonosferycznego w nocy oraz zmienną wartość w dzień, z maksimum przypadającym na godzinę 14 czasu lokalnego. Współczynniki w modelu Klobuchara (8 parametrów) są transmitowane w depeszy nawigacyjnej czasie rzeczywistym oraz zazwyczaj opisują stan jonosfery od 6 do 10 dni. Taka sytuacja powoduje niedogodności z punktu widzenia ciągłego monitoringu jonosfery, w którym wymagane są wartości rzeczywiste i aktualne stanu jonosfery na wybranym obszarze kuli ziemskiej. Liczne anomalie i odstępstwa szczególnie są widoczne w obszarze okołorównikowym, gdzie gęstość elektronów podlega silnym zmianom oraz zróżnicowaniu [5, 10].

Zdecydowanie lepszym rozwiązaniem w ramach poprawy pozycjonowania, wydaje się być zastosowanie globalnego modelu jonosfery w uniwersalnym formacie IONEX. Model jonosfery zapisany w pliku IONEX jest rzeczywistym odzwierciedleniem zmian zachodzących w jonosferze dla obszaru całej kuli ziemskiej i został opracowany na podstawie obserwacji GPS lub GPS/GLONASS. Taki model jonosfery posiada rozdzielczość czasową 2 godzin, rozdzielczość przestrzenną 2,5° na 5° w układzie geograficznym, a wysokość warstwy jonosfery wynosi około 450 km. Model jonosfery w formacie IONEX zawiera aktualne mapy jonosfery VTEC wraz z błędami średnimi RMS. Obecnie kilka ośrodków naukowych wyznacza i dystrybuuje mapy jonosfery VTEC w formacie IONEX, np. Centrum Analizy CODE w Szwajcarii, Centrum Analizy JPL w USA, Centrum Analizy ESA/ESOC w Niemczech, Politechnika Katalońska w Hiszpanii, Centrum Analizy EMR w Kanadzie. Formaty IONEX z każdego laboratorium badawczego trafiają kolejno do służby IGS, gdzie następuję przetworzenie pojedynczych plików IONEX w jeden finalny produkt, w którym mapy jonosfery VTEC są wyliczane jako średnia ważona z poszczególnych plików IONEX [6].

Mapy jonosfery VTEC mogą być również produkowane i tworzone dla regionalnego lub lokalnego obszaru. W przypadku

regionalnego zasięgu opracowywanych map jonosfery VTEC, ilość wykorzystywanych odbiorników satelitarnych jest uzależniona od kształtu sieci i obszaru pokrycia. Przykładem takiego rozwiązania jest model jonosfery dla sieci ASG-EUPOS w Polsce, opracowany przez Zespół Zaawansowanych Metod Pozycjonowania Satelitarnego w Olsztynie. Struktura takiego modelu jest oparta o wykorzystanie obserwacji GPS z ponad 100 stacji referencyjnych, przy założeniu interwału obliczeń 5 minut oraz rozdzielczości przestrzennej 0,25° na 0,25° [7]. Mapy jonosfery VTEC dla obszaru lokalnego (np. powiat czy region) są estymowane na podstawie obserwacji GPS z pojedynczej stacji referencyjnej. Takie podejście umożliwia zastosowanie kroku 0,1° dla rozdzielczości przestrzennej, ale interwał czasu jest niestety wydłużony (np. co 1 lub 2 godziny), co w dużej mierze jest spowodowane ograniczoną ilością obserwacji. Jednakże taki model jest efektywny z punktu widzenia potencjalnych odbiorców i użytkowników oraz gwarantuje poprawę pozycjonowania w skali opracowywanego obszaru. Powyższe założenia zostały sprawdzone oraz przetestowane dla obszaru powiatu ryckiego (województwo lubelskie). W ramach eksperymentów wykorzystano obserwacje GPS ze stacji referencyjnej RYKI, dla której została wyznaczona pozycja metodą Single Point Positioning (SPP). W teście nr I, pozycja stacji referencyjnej została obliczona z wykorzystaniem modelu Klobuchara dla poprawki jonosferycznej, zaś w badaniu nr II format IONEX został zaimplementowany do skorygowania poprawki jonosferycznej. Różnice w precyzji uzyskanych współrzędnych stacji oraz dokładnościach zostały przedstawione na odpowiednich wykresach.

1. Format IONEX

1.1. Opis formatu IONEX

Początki opracowywania formatu IONEX sięgają połowy lat 90. XX wieku, kiedy to grupa do spraw monitoringu i wyznaczania parametrów jonosfery w służbie IGS (tzw. IGS Ionosphere Working Group) zaproponowała stworzenie uniwersalnego formatu wymiany danych o stanie jonosfery w skali globalnej. Począwszy od połowy roku 1998, największe Centra Analizy rozpoczęły proces wyznaczania i dystrybucji map jonosfery w formacie IONEX [9]. Obecnie mapy jonosfery TEC są produkowane w następujących instytutach badawczych: Centrum Analizy CODE w Szwajcarii, Centrum Analizy JPL w USA, Centrum Analizy ESA/ESOC w Niemczech, Politechnika Katalońska w Hiszpanii oraz Centrum Analizy EMR w Kanadzie. W kolejnym etapie pliki IONEX trafiają do służby IGS, gdzie następuje wyznaczenie finalnych map jonosfery, z wykorzystaniem algorytmu średniej ważonej, dla obszaru całej kuli ziemskiej. Dodatkowo takie parametry jak opóźnienia sprzętowe DCB dla satelitów i odbiorników są estymowane w podobny sposób jak mapy jonosfery TEC oraz poddawane procesowi archiwizacji oraz upublicznienia na serwerach ftp.

Format IONEX ma prostą strukturę i składa się z 3 części [8]:

- nagłówka (rys. 1),
- sekcji z mapami jonosfery VTEC (rys. 2),
- sekcji z błędami RMS dla map jonosfery VTEC (rys. 3).

W sekcji nagłówka można wyróżnić następujące elementy:

- IONEX VERSION / TYPE - wiersz zawiera oznaczenie typu i wersji IONEXU oraz nazwę systemu satelitarnego użytego w obliczeniach,
- PGM / RUN BY / DATE - wiersz zawiera nazwę oprogramowania i instytucji naukowej tworzącej IONEX oraz datę aktualizacji pliku,
- COMMENT - wiersz zawiera nazwę modelu jonosfery dla konkretnego dnia roku,
- DESCRIPTION - wiersze zawierają krótki opis sposobu wyznaczenia map jonosfery VTEC oraz dane korespondencyjne autora,
- EPOCH OF FIRST MAP - wiersz zawiera epokę początkową dla pierwszej mapy jonosfery VTEC w danym zbiorze,
- EPOCH OF LAST MAP - wiersz zawiera epokę końcową dla ostatniej mapy jonosfery VTEC w danym zbiorze,
- INTERVAL - wiersz określa rozdzielczość czasową modelu jonosfery,
- # OF MAPS IN FILE - wiersz określa ilość map jonosfery VTEC w danym zbiorze,
- MAPPING FUNCTION - wiersz zawiera informacje o funkcji mapującej użytej w obliczeniach,
- ELEVATION CUTOFF - wiersz określa minimalną liczbę kąta elewacji dla użytych obserwacji satelitarnych,
- OBSERVABLES USED - wiersz określa informacje o rodzaju obserwacji zastosowanych w obliczeniach,
- # OF STATIONS - wiersz określa ilość stacji użytych w obliczeniach,
- # OF SATELLITES - wiersz określa ilość śledzonych satelitów w trakcie przeprowadzonych obliczeń,
- BASE RADIUS - wiersz zawiera informacje o wartości promienia Ziemi użytej w obliczeniach,
- MAP DIMENSION - wiersz określa rozmiar (wymiar) map jonosfery VTEC,
- HGT1 / HGT2 / DHGT - wiersz określa wysokość warstwy jonosfery,
- LAT1 / LAT2 / DLAT - wiersz określa rozdzielczość przestrzenną dla szerokości geograficznej,
- LON1 / LON2 / DLON - wiersz określa rozdzielczość przestrzenną dla długości geograficznej,
- EXPONENT - wiersz określa skalę liczbową (potęga) dla wartości map jonosfery VTEC,
- COMMENT - wiersze zawierają dodatkowe informacje takie, jak nazwa jednostki liczbowej czy nazwy stacji użytych w obliczeniach,
- END OF HEADER - wiersz zamykający sekcję nagłówka.

```
     1.0            IONOSPHERE MAPS     GPS                 IONEX VERSION / TYPE
SCITEC              TST                 29-JUN-14 10:23     PGM / RUN BY / DATE
Local Ionosphere Maps for day 180, 2014                     COMMENT
Local TEC maps over Ryki district are generated             DESCRIPTION
in two steps:                                               DESCRIPTION
- in first step SCITEC software estimate DCB type P1P2 for  DESCRIPTION
all visible satellites (SDCB) and receiver (RDCB) using 24  DESCRIPTION
hours GPS data from RYKI reference stations.                DESCRIPTION
- in second step VTEC for each satellite in each epoch      DESCRIPTION
is calculated (using SLM) and next has been interpolated    DESCRIPTION
on the grid with size 0.1 x 0.1 degree.                     DESCRIPTION
Contact address (e-mail): M. Sc. Kamil Krasuski             DESCRIPTION
                          e-mail: kk_deblin@wp.pl           DESCRIPTION
                          Team of Satellites Technics       DESCRIPTION
  2014     6    29     0     0     0                       EPOCH OF FIRST MAP
  2014     6    29    22     0     0                       EPOCH OF LAST MAP
  7200                                                      INTERVAL
    12                                                      # OF MAPS IN FILE
  COSZ                                                      MAPPING FUNCTION
    10.0                                                    ELEVATION CUTOFF
carrier phase leveled to code observables                   OBSERVABLES USED
     1                                                      # OF STATIONS
    31                                                      # OF SATELLITES
  6371.0                                                    BASE RADIUS
     2                                                      MAP DIMENSION
   450.0 450.0   0.0                                        HGT1 / HGT2 / DHGT
    51.8  51.5   0.1                                        LAT1 / LAT2 / DLAT
    21.5  22.2   0.1                                        LON1 / LON2 / DLON
    -1                                                      EXPONENT
TEC values in 0.1 tec units;  9999, if no value available   COMMENT
List of stations:                                           COMMENT
RYKI                                                        COMMENT
                                                            END OF HEADER
```

Rys. 1. Przykładowy nagłówek formatu IONEX

```
     1                                                      START OF TEC MAP
  2014     6    29     0     0     0                       EPOCH OF CURRENT MAP
    51.8  21.5  22.2   1.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
  112  111  111  110  109  108  107  105
    51.7  21.5  22.2   1.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
  113  112  112  111  110  110  110  106
    51.6  21.5  22.2   1.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
  109  108  107  106  104  104  105  105
    51.5  21.5  22.2   1.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
  105  103  102  100   99   98   96  101
     1                                                      END OF TEC MAP
```

Rys. 2. Przykładowy fragment sekcji z mapami jonosfery VTEC w formacie IONEX

W sekcji z wartościami map jonosfery VTEC można wyróżnić następujące elementy:

- START OF TEC MAP - wiersz zawiera indeks dla kolejnych map jonosfery VTEC,
- EPOCH OF CURRENT MAP - wiersz zawiera dokładną epokę obserwacyjną dla map jonosfery VTEC,

- LAT/LON1/LON2/DLON/H - wiersz zawiera informacje o rozdzielczości przestrzennej (szerokość i długość geograficzna oraz wysokość modelu jonosfery) dla konkretnych wartości map jonosfery VTEC,
- END OF TEC MAP - wiersz zawiera indeks dla kolejnych map jonosfery VTEC.

```
     1                                                      START OF RMS MAP
  2014     6    29     0     0     0                       EPOCH OF CURRENT MAP
    51.8  21.5  22.2   1.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
     1     1     1     1     1     1     1     1
    51.7  21.5  22.2   1.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
     1     1     1     1     1     1     1     1
    51.6  21.5  22.2   1.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
     1     1     1     1     1     1     1     1
    51.5  21.5  22.2   1.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
     1     1     1     2     2     2     2     1
     1                                                      END OF RMS MAP
```

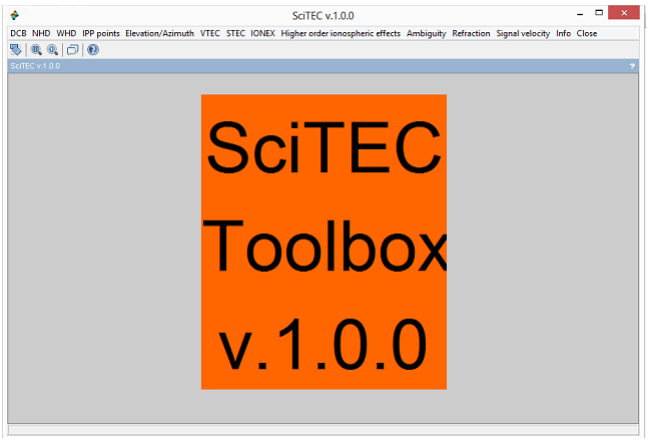
Rys. 3. Przykładowy fragment sekcji z błędami RMS dla map jonosfery VTEC w formacie IONEX

W sekcji z błędami RMS dla map jonosfery VTEC można wydzielić następujące elementy:

- START OF RMS MAP - wiersz zawiera indeks dla kolejnych wartości błędów RMS map jonosfery VTEC,
- EPOCH OF CURRENT MAP - wiersz zawiera dokładną epokę obserwacyjną dla błędów RMS map jonosfery VTEC,
- LAT/LON1/LON2/DLON/H - wiersz zawiera informacje o rozdzielczości przestrzennej (szerokość i długość geograficzna oraz wysokość modelu jonosfery) dla konkretnych wartości błędów RMS map jonosfery VTEC,
- END OF RMS MAP - wiersz zawiera indeks dla kolejnych wartości błędów RMS map jonosfery VTEC.

1.2. Metoda wyznaczenia map jonosfery VTEC w modelu lokalnym

Mapy jonosfery VTEC zostały wyznaczone przy pomocy programy SciTEC Toolbox 1.0.0 (rys. 4), napisanym przez autora w edytorze Scilab 5.4.1.



Rys. 4. Interface programu SciTEC Toolbox 1.0.0

Program SciTEC jest aplikacją przeznaczoną do wyznaczania parametrów jonosfery oraz opóźnień sprzętowych DCB, NHD oraz WHD. Program został zaimplementowany pod systemem Windows 64-bitowym, a kod źródłowy jest kompatybilny z wersjami edytora Scilab 5.3.2 oraz 5.5.0. Ogromną zaletą programu SciTEC jest jego zastosowanie nie tylko dla celów geodezyjnych, ale również w dziedzinie elektroniki, telekomunikacji, matematyki, informatyki czy geofizyki. Niemniej jednak, produkty estymowane w aplikacji SciTEC mają za zadanie poprawić pozycjonowanie na obszarze lokalnym (np. powiatu lub regionu), na którym istnieje infrastruktura techniczna pojedynczej stacji referencyjnej.

W obecnej postaci program SciTEC posiada 12 zakładek obliczeniowo-graficznych oraz 2 zakładki z narzędziami:

- DCB (moduł do wyznaczenia i wizualizacji opóźnień sprzętowych Differential Code Biases),
- NHD (moduł do wyznaczenia i wizualizacji opóźnień sprzętowych Narrow-Lane Hardware Delays),
- WHD (moduł do wyznaczenia i wizualizacji opóźnień sprzętowych Wide-Lane Hardware Delays),
- IPP points (moduł do wyznaczenia i wizualizacji punktów podjonosferycznych),
- VTEC (moduł do wyznaczenia i wizualizacji parametru VTEC),
- STEC (moduł do wyznaczenia i wizualizacji parametru STEC),
- IONEX (moduł do wyznaczenia i wizualizacji map jonosfery VTEC),
- Higher order ionospheric effects (moduł do wyznaczenia i wizualizacji efektów jonosferycznych wyższego rzędu),
- Ambiguity (moduł do wyznaczenia i wizualizacji rzeczywistej wartości nieoznaczoności fazy),
- Refraction (moduł do wyznaczenia i wizualizacji współczynników refrakcji jonosferycznej),
- Signal velocity (moduł do wyznaczenia i wizualizacji prędkości grupowej i fazowej fali elektromagnetycznej),
- Info (narzędzie informacyjne programu SciTEC),
- Close (narzędzie do zamknięcia programu SciTEC).

Zakładka „IONEX" w programie SciTEC jest odpowiedzialna za generowanie map jonosfery VTEC (wraz z błędami RMS) oraz zapis do formatu tekstowego IONEX. Pojedyncza mapa jonosfery VTEC jest tworzona na podstawie parametrów VTEC, które są wyznaczane dla każdego satelity dla punktów podjonosferycznych IPP. Kombinacja liniowa „Geometry Free" została wykorzystana do określenia wartości VTEC dla każdego satelity w procesie wyrównawczym z użyciem metody najmniejszych kwadratów. W kolejnym etapie pojedyncze wartości map jonosfery VTEC są wyznaczane z zastosowaniem średniej ważonej. Do określenia błędu RMS mapy jonosfery VTEC jest stosowany wzór na odchylenie standardowe. Taka para liczb musi być estymowana i realizowana dla każdego oczka siatki formatu IONEX. Dla obszaru powiatu ryckiego (obszar o wymiarach 51,5° na 51,8° szerokości geograficznej oraz 21,5° na 22,2° długości geograficznej) krok siatki jest ustawiony na 0,1°. Ilość map jonosfery VTEC (oraz map RMS) dla całego zbioru danych (24 godziny obserwacji) wynosi 12 w rozdzielczości czasowej 2 godzin. Wartości map jonosfery VTEC (oraz map RMS) w pliku IONEX są podawane w jednostce TECU (1 TECU oznacza 10^{16} elektronów/m^2), a format zapisu wartości liczbowych jest wyrażony do potęgi (-1). Wysokość zalegania warstwy elektronów została przyjęta na 450 km w lokalnym modelu jonosfery, a w obliczeniach użyto wartości promienia Ziemi 6371 km. Obserwacje GPS (kodowe i fazowe) ze stacji RYKI zostały wykorzystane w procesie obliczeniowym dla kąta elewacji powyżej 10°. W celu redukcji szumu pomiarowego obserwacji kodowych zaproponowano zastosowanie techniki wygładzenia kodu fazą, a przeskoki fazy (ang. cycle slips) zostały naprawione i wyeliminowane.

2. Metoda wyznaczenia pozycji użytkownika

Do wyznaczenia współrzędnych stacji referencyjnej RYKI zaproponowano metodę punktowego pozycjonowania absolutnego (ang. Single Point Positioning), jak poniżej [4]:

$$C1 = d + C\cdot(dto - dts) + Ion_1 + Trop + \mathrm{Re}l + TGD + DCB_{P1/C1} \quad (1)$$

gdzie: $C1$ - pomiar kodowy C1, d - odległość geometryczna pomiędzy satelitą a anteną odbiornika, dto - chód zegara odbiornika, dts - chód zegara satelity, Ion_1 - poprawka jonosferyczna na częstotliwości L1 w systemie GPS, $Trop$ - poprawka troposferyczna, Rel - efekty relatywistyczne, TGD - opóźnienie sprzętowe dla satelitów GPS, $DCB_{P1/C1}$ - opóźnienie sprzętowe dla satelitów GPS pomiędzy kodami C1 oraz P1.

Lewa strona równania (1) zawiera surowe obserwacje GPS dla kodu C1 i wyrażona jest w metrach. Prawa strona równania (2) zawiera czynnik geometryczny, wyznaczane parametry w procesie

wyrównania oraz błędy systematyczne. Ilość wyznaczanych w procesie iteracyjnym parametrów wynosi 4: (3 przyrosty do współrzędnych *a prori* stacji referencyjnej) oraz chód zegara odbiornika jako parametr transferu czasu. Czynnik geometryczny w równaniu (1) można wyrazić poprzez przybliżone współrzędne stacji referencyjnej oraz współrzędne satelitów GPS:

$$d = \sqrt{(x_o - Xs)^2 + (y_o - Ys)^2 + (z_o - Zs)^2} \quad (2)$$

gdzie: (*Xs*, *Ys*, *Zs*) - współrzędne satelity na orbicie w układzie geocentrycznym, (x_o, y_o, z_o) - przybliżone współrzędne anteny stacji referencyjnej.

Wpływ atmosfery na pomiar GPS jest reprezentowany w równaniu (1) za pomocą parametrów Ion_1 oraz Trop. Pozostałe błędy systematyczne (*dts*, *Rel*, *TGD*, DCB_{P1C1}) prawej strony równania (1) determinują błąd zegara satelity GPS i przy pomocy prędkości światła są wyrażone w metrach. Warto nadmienić, iż wyrażenie ($TGD+DCB_{P1/C1}$) odzwierciedla błąd instrumentalny dla satelitów GPS dla kodu C1.

Nieznane parametry w równaniu (1) są wyznaczane metodą najmniejszych kwadratów, jak poniżej [11]:

$$A \cdot \delta x + l = v \quad (3)$$

gdzie: *A* - macierz pochodnych cząstkowych względem nieznanych parametrów, δx - wektor z wyznaczanymi parametrami, *l* - wektor wyrazów wolnych, *v* - wektor poprawek.

Rozwiązanie wektora δx odbywa się z wykorzystaniem układu równań normalnych:

$$\delta x = \left(A^T \cdot A\right)^{-1} \cdot A^T \cdot l \quad (4)$$

Błędy średnie dla parametrów wektora δx opisuje równanie (5):

$$mx = m0 \cdot \sqrt{\left(A^T \cdot A\right)^{-1}} \quad (5)$$

gdzie: *mx* - błędy średnie wyznaczanych parametrów, *m0* - błąd średni pojedynczego spostrzeżenia.

Parametr *m0* jest opisany następującą zależnością:

$$m0 = \sqrt{\frac{[vv]}{n-k}} \quad (6)$$

gdzie: *n* - określa ilość pomiarów, *k* - ilość wyznaczanych parametrów, *k*=4.

3. Eksperyment i wyniki

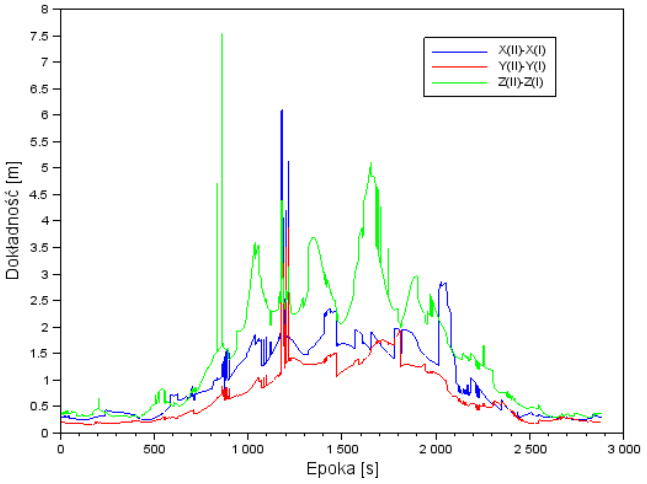
W eksperymencie zostały wykorzystane dobowe obserwacje GPS w formacie RINEX 2.11 ze stacji referencyjnej RYKI w województwie lubelskim. Stacja RYKI stanowi cześć systemu precyzyjnego pozycjonowania satelitarnego na obszarze Polski (ASG-EUPOS), a jej infrastruktura została umieszczona na dachu Starostwa Powiatowego w Rykach (rys. 5).

Rys. 5. Infrastruktura techniczna stacji referencyjnej RYKI [14]

Wyposażenie stacji referencyjnej RYKI to dwuczęstotliwościowy odbiornik TRIMBLE NETRS wraz z anteną Trimble Zephyr Geodetic w/Radome (TRM41249.00 TZGD). Odbiornik TRIMBLE NETRS może rejestrować obserwacje kodowe (C1, P2) oraz fazowe (L1, L2), które zostały wykorzystane do określenia parametrów jonosfery VTEC.

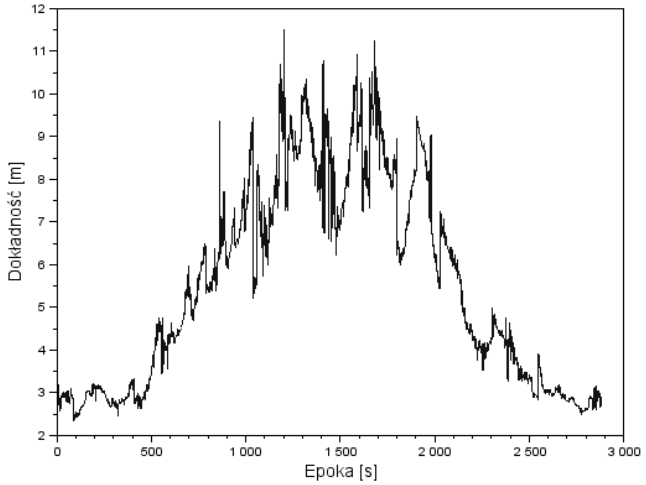
W ramach przeprowadzonego eksperymentu wykonano 2 testy numeryczne, w których do wyznaczenia współrzędnych stacji referencyjnej użyto poprawki jonosferycznej w postaci modelu Klobuchara (test nr I) oraz map jonosfery VTEC na podstawie pliku IONEX (test nr II). Obliczenia pozycji zrealizowano w programie RTKLIB (w module RTKPOST) dla danych z dnia 29.06.2014 r. RTKLIB jest darmowym programem „open-source", który umożliwia wyznaczenie pozycji użytkownika w czasie rzeczywistym i post-processingu [15]. W opcjach programu ustawiono i skonfigurowano następujące parametry:

- typ formatu RINEX: 2.11,
- źródło danych efemerydalnych: depesza nawigacyjna GPS [13],
- korekcja przebiegu pseudoodległości od satelity do anteny odbiornika: zastosowana,
- efekt obrotu Ziemi: zastosowany,
- źródło danych o chodzie zegara satelity: depesza nawigacyjna GPS [13],
- metoda wyznaczenia błędu zegara satelity: wielomian interpolacyjny 2-ego stopnia,
- efekty relatywistyczne: zastosowane,
- opóźnienie sprzętowe TGD: zastosowane,
- korekcja opóźnienia sprzętowego dla kodu C1: na podstawie pliku DCB P1/C1 z Centrum Analizy CODE w Szwajcarii [12],
- efekt wielotorowości: pominięty,
- model troposfery: Saastamoinen,
- model jonosfery: Klobuchar,
- mapy jonosfery VTEC: na podstawie pliku IONEX,
- korekcja centrum fazowego anteny satelity: pominięta,
- korekcja centrum fazowego anteny odbiornika: pominięta,
- typ pozycjonowania: Single,
- tryb pozycjonowania: statyczny,
- typ obserwacji: obserwacje kodowe C1,
- metoda wyznaczenia pozycji: metoda najmniejszych kwadratów,
- wagowanie obserwacji: brak,
- kąt obcięcia obserwacji: 10°,
- układ odniesienia: WGS-84,
- ilość obserwacji: n>4,
- ilość wyznaczanych parametrów: k=4,
- przybliżone współrzędne stacji referencyjnej: na podstawie pliku RINEX,
- format zapisu współrzędnych: współrzędne XYZ w układzie geocentrycznym,
- chód zegara odbiornika: wyznaczany.



Rys. 6. Różnica błędów średnich dla współrzędnych XYZ z testu nr I oraz II

Na rysunku 6 przedstawiono dokładności pozycjonowania dla współrzędnych XYZ dla testu nr I oraz II. Kolorem niebieskim oznaczono różnicę błędów średnich dla współrzędnej X, kolorem czerwonym odpowiednio różnicę błędów średnich dla współrzędnej Y, zaś kolorem zielonym różnicę błędów średnich dla współrzędnej Z. W przypadku współrzędnej X, średnia wartość dokładności pomiędzy rozwiązaniem I oraz II wynosi 1,011 m z odchyleniem standardowym 0,736 m. Rząd wielkości różnicy błędów średnich dla współrzędnej X waha się od 0,244 m a 6,117 m. Dodać należy, iż największe odchyłki występują od epoki 500 do 2500, podczas maksimum dziennego zaburzenia jonosferycznego. Dla współrzędnej Y, średnia wartość dokładności pomiędzy rozwiązaniem I oraz II wynosi 0,716 m z odchyleniem standardowym 0,538 m. Przedział liczbowy różnicy dokładności dla współrzędnej Y mieści się od 0,168 m a 3,879 m. Warto zauważyć, iż różnice błędów średnich dla współrzędnej Y są najmniejsze w porównaniu z dokładnościami współrzędnych X oraz Z. Największe odchyłki dla dokładności pomiędzy rozwiązaniem I oraz II występują dla współrzędnej wertykalnej Z. Minimalna i maksymalna różnica błędów średnich dla współrzędnej Z wynosi 0,303 m oraz 7,538 m. Średnia wartość dokładności dla tej współrzędnej pomiędzy rozwiązaniem I oraz II wynosi 1,503 m z odchyleniem standardowym 1,169 m. Na podstawie analizy rysunku 6 można wywnioskować, iż użycie map jonosfery VTEC (w teście nr II) w znaczny sposób poprawiło dokładność otrzymanych współrzędnych XYZ. Szczególnie jest to dobrze widoczne pomiędzy epokami 500 a 2500, gdzie błędy średnie pozycji uległy zmniejszeniu nawet o kilka metrów.



Rys. 7. Błąd RMS-3D dla współrzędnych XYZ z testu nr I oraz II

Błąd RMS-3D został obliczony dodatkowo w ramach analizy dokładności pozycjonowania:

$$RMS_3D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} \quad (7)$$

gdzie: $\Delta X = X_{II} - X_I$, różnica pomiędzy współrzędną X dla testu I oraz II; $\Delta Y = Y_{II} - Y_I$, różnica pomiędzy współrzędną Y dla testu I oraz II; $\Delta Z = Z_{II} - Z_I$, różnica pomiędzy współrzędną Z dla testu I oraz II.

Na rysunku 7 zaprezentowano wartości dla parametru RMS-3D uzyskane z testu nr I oraz II. Średnia wartość błędu RMS-3D wyniosła 5,498 m dla przedziału liczbowego od 2,339 m do 11,517 m. Tylko 21% wyników znajduję się poniżej wartości 3 m, zaś prawie 50% dla dokładności poniżej 5 m. Ponad 70% wartości parametru RMS-3D występuję w przedziale od 0 m do 7 m, ale dla przedziału od 0 m do 9 m, ilość procentowa wyników wzrasta do 90%. Podobnie jak w przypadku rysunku 6, błąd RMS-3D wzrasta aż do 12 m pomiędzy epokami 500 a 2500.

4. Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących poprawy pozycjonowania na obszarze powiatu ryckiego w województwie lubelskim. W ramach przeprowadzonego eksperymentu wykonano 2 testy, których celem było wyznaczenie współrzędnych stacji referencyjnej RYKI. W pierwszym teście poprawka jonosferyczna została obliczona na podstawie modelu Klobuchara, którego współczynniki są transmitowane w depeszy nawigacyjnej GPS. Drugi test bazował na wykorzystaniu map jonosfery VTEC, zapisanych w uniwersalnym formacie IONEX. W celu wygenerowania map jonosfery VTEC posłużono się autorskim program SciTEC Toolbox 1.0.0. którego kod źródłowy został napisany w edytorze numerycznym Scilab 5.4.1. Format IONEX został opisany szczegółowo wraz z podaniem przykładów (rys. 1 - 3). Dodatkowo zamieszczono krótki opis sposobu wygenerowania map jonosfery VTEC (wraz z błędami RMS) w programie SciTEC. Wyniki dokładnościowe pozycjonowania zostały zaprezentowane w formie graficznej na rysunkach 6 i 7. Błędy średnie współrzędnych XYZ uległy zdecydowanej poprawie w teście nr II tak, że różnica dokładności pomiędzy testami I oraz II dochodzi nawet do wartości 8 m. Błąd RMS-3D, który określa różnicę precyzji współrzędnych, został obliczony na podstawie współrzędnych z testu I oraz II. Średnia wartość tego parametru wynosi ponad 5 m, ale wartości maksymalne osiągają ponad 11 m.

Podziękowania

Autor artykułu składa podziękowania dla: serwisu BKG za udostępnienie plików nawigacyjnych RINEX, serwisu ASG-EUPOS za udostępnienie plików obserwacyjnych RINEX, Centrum Analizy CODE za udostępnianie plików DCB oraz Panu T. Takasu za udostępnienie w internecie programu RTKLIB.

Literatura

[1] Bosy J.: Precyzyjne opracowanie satelitarnych obserwacji GPS w lokalnych sieciach położonych w ternach górskich. Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Nr 522, 2005.
[2] Figurski M.: Określenie wybranych parametrów atmosfery na podstawie permanentnych obserwacji GPS i ich wpływ na dokładność opracowań pomiarów satelitarnych, Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 2001.
[3] Figurski M.: Walka o milimetry. GEODETA: dodatek NAWI nr 1(19), 2009.
[4] Gao Y.: GNSS biases, their effect and calibration. IGS Workshop 2008, Florida, USA.
[5] Klobuchar J. A.: Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. IEEE Transactions on Aerospace and Elcetronic Systems, vol. AES-23, no. 3, 1987.
[6] Krankowski A.: Stan obecny oraz przyszły rozwój produktów jonosferycznych wytwarzanych w ramach IGS. Konferencja Satelitarne metody wyznaczania pozycji we współczesnej geodezji i nawigacji, Warszawa, 20-21 listopada 2008.
[7] Krypiak-Gregorczyk A., Wielgosz P., Krukowska M.: A New ionosphere monitoring service over the ASG-EUPOS Network Stations. The 9th International Conference Environmental Engineering, 22–23 May 2014, Vilnius, Lithuania.
[8] Schaer S., Gurtner W., Feltens J.: IONEX: The IONosphere Map Exchange Format Version 1., Proceedings of the IGS Analysis Centers Workshop, Darmstadt, Germany, 1997, 233-247.
[9] Schaer S.: Mapping and predicting the Earth's ionosphere using Global Positioning System, Dissertation thesis. Neunundfünfzigster Band volume 59, Zürich, Switzerland, 1999.
[10] Stępniak K., Wielgosz P., Paziewski J.: Accuracy analysis of the Klobuchar ionosphere model transmitted by the GPS system, The 9th International Conference Environmental Engineering, 22–23 May 2014, Vilnius, Lithuania.
[11] Takasu T.: RTKLIB ver. 2.4.2 Manual, 2013.
[12] ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/2014/, aktualna na 2015.
[13] http://igs.bkg.bund.de/file/rinexsearch/, aktualna na 2015.
[14] www.asgeupos.pl, aktualna na 2015.
[15] www.rtklib.com, aktualna na 2015.

Mgr inż. Kamil Krasuski
e-mail: kk_deblin@wp.pl

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej. Autor programu SciTEC Toolbox 1.0.0 oraz lokalnego modelu jonosfery dla obszaru powiatu ryckiego (http://zts-deblin.16mb.com/produkty.html).
Obszar zainteresowania: nawigacja, geodezja, geofizyka, programowanie, metody numeryczne.
Od 2014: Zespół Technik Satelitarnych.

otrzymano/received: 23.03.2015 *przyjęto do druku/accepted: 05.05.2015*

DOI: 10.5604/20830157.1159328

WYKORZYSTANIE METODY ÅNGSTRÖMA DO SZACOWANIA DYFUZYJNOŚCI CIEPLNEJ WSADU W UKŁADZIE NAGRZEWANIA INDUKCYJNEGO

Adam Cieślak, Jerzy Zgraja
Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej

Streszczenie. *Przedmiotem niniejszej pracy było poszukiwanie metody szacowania dyfuzyjności cieplnej wsadu nagrzewanego indukcyjnie. Przedstawiono próbę wykorzystania metody ÅNGSTRÖMA w układzie, w którym wymuszenie generowano metodą indukcyjną. Analiza objęła zagadnienie wrażliwości badanej metody na wybrane parametry układu. Zaprezentowane wyniki pokazują, że przy zachowaniu odpowiednich wymiarów geometrycznych próbki oraz odpowiednio rozmieszczonych punktów pomiarowym możliwe jest uzyskanie wyników szacowania dyfuzyjności cieplnej z poziomem błędu poniżej 50%.*

Słowa kluczowe: dyfuzyjność cieplna, właściwości materiałowe, nagrzewanie indukcyjne

UTILISATION OF ÅNGSTRÖM METHOD FOR ESTIMATING A THERMAL DIFFUSIVITY OF CHARGE IN INDUCTION HEATING SETUP

Abstract. *Main aim of this article is to find method for determination thermal diffusivity of induction heated charge. Unique try of utilisation ÅNGSTRÖM's method and it's sensitivity on various parameters of setup was presented. Summary allows to say that with respect to shown precautions it is possible to achieve results on satisfactory level of accuracy.*

Keywords: thermal diffusivity, material properties, induction heating

Wstęp

Znajomość rzeczywistych temperaturowych charakterystyk materiałowych indukcyjnie nagrzewanego wsadu stanowi jeden z podstawowych warunków zarówno poprawnego zaprojektowania jak i zrealizowania technologicznego procesu nagrzewania indukcyjnego. W aplikacjach przemysłowych wskazane jest, aby proces identyfikacji parametrów materiałowych był prowadzony in situ i to najlepiej bez konieczności zatrudniania wykwalifikowanych specjalistów, zapewniając tym samym minimalizację nakładów finansowych. Przedmiotem niniejszej pracy jest próba poszukiwania metody spełniającej powyższe warunki w odniesieniu do cieplnych parametrów materiałowych wsadu. W praktyce stosowane są metody polegające na dostarczeniu zmiennego w czasie lub impulsowego strumienia ciepła i badaniu odpowiedzi temperaturowej w wybranych punktach badanej próbki. W ramach prowadzonych prac, bazując m.in. na [3 - 5], podjęto próbę adaptacji falowej metody Ångströma [1] do wyznaczania dyfuzyjności cieplnej, w celu jej zastosowania w układzie nagrzewania indukcyjnego. Na podstawie wyników z symulacji numerycznych przeprowadzono analizę możliwości wykorzystania nagrzewania indukcyjnego jako wymuszającego źródła ciepła oraz analizę możliwość wykorzystania w badaniach próbki o kształcie walcowym – łatwej do wykonania i dającej możliwość zastosowania stosunkowo nieskomplikowanego modelu w obliczeniach elektromagnetyczno – cieplnych.

1. Metoda Ångströma

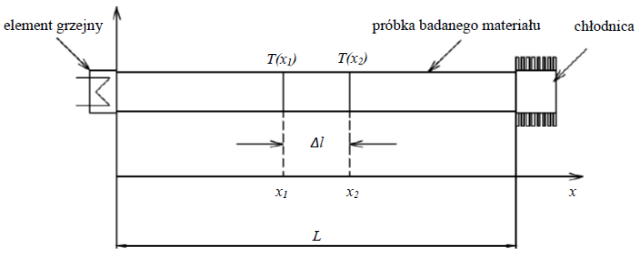
Sformułowana w 1863 roku przez A.J. Ångströma metoda [1] należy do najstarszych metod analizy przewodnictwa temperaturowego w stanie niestacjonarnym (nieustalonym). Głównym założeniem metody jest periodyczne wymuszenie cieplne w celu wytworzenia fali temperaturowej wewnątrz badanego przewodnika - pręta, a następnie pomiar temperatury w punktach odpowiednio rozłożonych na jego długości.

Dyfuzyjność cieplna a definiowana zależnością (1) jest miarą szybkości wyrównywania się temperatury w trakcie stanów nieustalonych termicznie.

$$a = \frac{\lambda}{\delta c_p}\left[\frac{m^2}{s}\right] \tag{1}$$

gdzie: λ – przewodność cieplna właściwa, c_p - ciepło właściwe, δ - gęstość.

W metodzie Ångströma wyznaczenie dyfuzyjności cieplnej odbywa się w oparciu o pomiar przesunięcia fazowego fali temperaturowej rejestrowanej w kolejnych punktach pomiarowych na długości wsadu. Warunek ten determinuje brak możliwości zastosowania wsadu o kształcie płytek, grubości poniżej kilku milimetrów.



Rys. 1. Schemat układu do wyznaczania dyfuzyjności cieplnej metodą Ångströma

Przedstawiony na rys. 1 schemat prezentuje przykładową konfigurację układu służącego do pomiaru dyfuzyjności cieplnej. Do jednego z końców próbki ($x=0$) przyłączony jest element grzejny zasilany w sposób umożliwiający wymuszenie periodycznie zmiennego strumienia cieplnego. Drugi koniec próbki ($x=L$) połączony jest z chłodnicą zapewniającą stałą w czasie temperaturę i sprawny odbiór ciepła z końca próbki. W celu zapewnienia równoległego do osi Ox przepływu strumienia ciepła, powierzchnia boczna próbki jest izolowana cieplnie. Do wyznaczenia dyfuzyjności cieplnej a wymagane jest wykonanie pomiaru wartości temperatury w minimum dwóch punktach badanej próbki oddalonych o Δl.

Dla przyjętego układu oraz wymuszenia harmonicznego temperaturę w dowolnym miejscu próbki wzdłuż kierunku przepływu ciepła można wyrazić zależnością:

$$\mathrm{T}(\mathrm{x},\mathrm{t}) = \mathrm{T}_0 e^{-ax}\cos(\omega t + c + bx) \tag{2}$$

gdzie c i b to współczynniki zależne od częstości przebiegu temperaturowego ω i dyfuzyjności cieplnej a w wymieniony poniżej sposób:

$$cb = \frac{\omega}{2a} \tag{3}$$

Temperatura w punktach oznaczonych jako x_1 i x_2 zgodnie z (2) wynosi:

$$\mathrm{T}(\mathrm{x}_1,\mathrm{t}) = \overbrace{\mathrm{T}_0 e^{-ax}}^{\mathrm{T}_1}\cos(\omega t + c + bx_1) \tag{4}$$

$$T(x_2,t) = \overbrace{T_0 e^{-ax}}^{T_2} \cos(\omega t + c + bx_2) \quad (5)$$

gdzie T_1 i T_2 to amplitudy czasowych przebiegów temperatury w punktach kolejno x_1 i x_2.

Zgodnie z [2], przy założeniu wolnozmiennych przebiegów temperatury, można pominąć zmianę częstości ω przy temperaturze zmieniającej się według (2) i wtedy stosunek amplitud T_1 i T_2 wynosi [2]

$$\frac{T_1}{T_2} = e^{a(x_2 - x_1)} \quad (6)$$

Po przekształceniu równania (6) otrzymujemy:

$$c = \frac{\ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right)}{\Delta l} \quad (7)$$

Z układu równań (4,5) wynika różnica przesunięć fazowych obu przebiegów temperatury $\Delta\varphi = b(x_2 - x_1)$, co pozwala wyznaczyć [2]:

$$b = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} \quad (8)$$

Z równania (3) wynika [2], że:

$$\frac{\omega}{2a} = \frac{2\pi}{2\pi a} = cb \quad (9)$$

gdzie: τ to okres periodyczności fali temperaturowej równy $\tau = \tau_1 + \tau_2$, gdzie τ_1 i τ_2 to czas, w którym element grzejny jest odpowiednio: włączony i wyłączony.

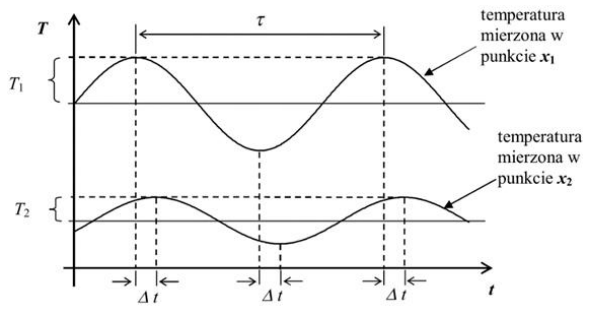
Ostatecznie, poszukiwaną wartość dyfuzyjności cieplnej określono jako [2]:

$$a = \frac{\pi(\Delta l)^2}{\Delta\varphi\tau \ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right)} \quad (10)$$

gdzie: Δl – odległość między punktami pomiarowymi; $\Delta\varphi$ – wartość przesunięcia fazowego między temperaturą maksymalną mierzoną w punktach pomiarowych.

Czasowy przebieg temperatury rejestrowany jednocześnie w obu punktach badanego materiału przedstawiono na rys. 2 Niezbędną do obliczenia dyfuzyjności cieplnej wartość przesunięcia fazowego $\Delta\varphi$ można wyznaczyć przy pomocy przesunięcia czasowego Δt (między minimami lub maksimami temperatury) z zależności [2]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\tau} \cdot \Delta t \quad (11)$$



Rys. 2. Czasowy, ustalony przebieg mierzonych temperatur w punktach x1 i x2 [4]

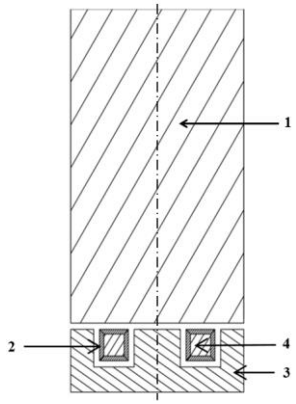
Uzyskana w powyższy sposób wartość dyfuzyjności cieplnej a, przy założeniu znajomości ciepła właściwego c_p służy wyznaczeniu wartości przewodności cieplnej właściwej λ z zależności (1):

$$\lambda = \alpha \cdot c_p \cdot \delta \quad (12)$$

2. Wykorzystanie metody Ångströma w układzie nagrzewania indukcyjnego w układzie „od czoła”

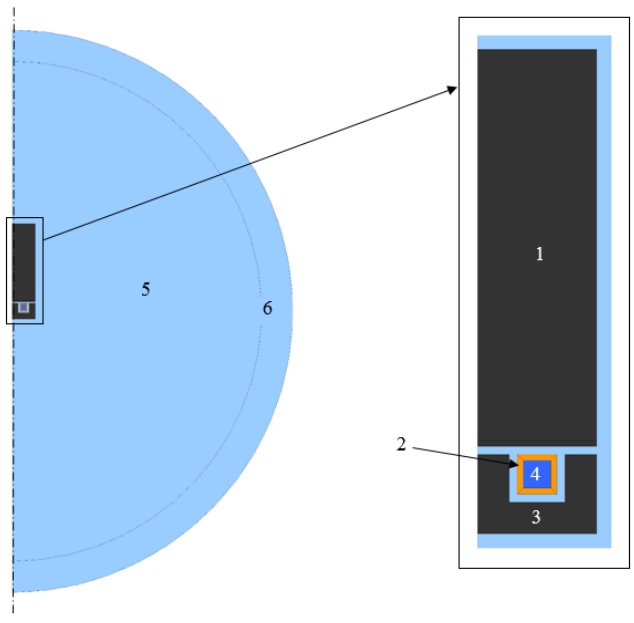
Metoda ta polega na badaniu prędkości przemieszczania się czoła fali cieplnej wewnątrz analizowanej próbki materiału. Przedmiotem niniejszej analizy było poszukiwanie rozmieszczenia punktów pomiarowych temperatury oraz dobór odpowiednich parametrów układu elektrycznego generującego wymuszenie cieplne. Do obliczeń numerycznych wykorzystano próbkę wsadu o średnicy 30 mm i długości 50 mm.

Układ nagrzewania indukcyjnego, który został wykorzystany do obliczeń numerycznych przedstawiono na rys. 3. Jego główne elementy to próbka wsadu *1* o poszukiwanych parametrach materiałowych, wzbudnik jednozwojny *2*, bocznik magnetyczny *3* i płyn chłodzący *4*. Na podstawie przeprowadzonych symulacji stwierdza się, że układ „od czoła” jest zbliżony do układu realizującego jednokierunkowy przepływ ciepła we wsadzie, mimo występującej tu nierównomierności rozkładu gęstości mocy dostarczanej przez powierzchnię czołową (w części środkowej gęstość mocy równa jest zeru).



Rys. 3. Schemat ideowy układu próbka wsadu – wzbudnik „od czoła” (1 – wsad, 2 – wzbudnik, 3 –bocznik magnetyczny, 4 – płyn chłodzący)

Na rys. 4 przedstawiono numeryczny model symulacyjny układu nagrzewania „od czoła" z rys. 3. Przedstawiony układ jest symetryczny względem osi odciętych, dzięki czemu możliwe jest ograniczenie geometryczne jego modelu numerycznego, co skraca czas obliczeń.



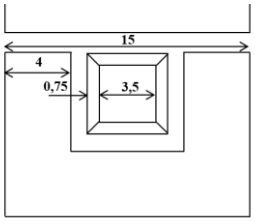
Rys. 4. Model numeryczny symulacyjnego układu nagrzewania "od czoła" (1 – wsad, 2 – wzbudnik, 3 – rdzeń magnetyczny, 4 – czynnik chłodzący wzbudnik, 5 – otoczenie (powietrze), 6 – obszar nieskończony)

Wybrane parametry obliczeniowego modelu numerycznego, przyjęte na potrzeby badań przedstawiono w tabeli 1. W pracy przeprowadzono analizy obliczeniowe dla dwóch różnych długości wsadu: 30 i 50 mm, w celu określenia wrażliwości metody na wymiary geometryczne próbki i dokonania ostatecznego doboru jej wymiarów. Dodatkowym czynnikiem decydującym o wyborze kształtu i długości wsadu jest łatwość wykonania próbki w warunkach przemysłowych.

Tabela 1. Wybrane parametry materiałowe elementów wykorzystanych w modelu obliczeniowym

Parametr /element	Przenikalność magnetyczna względna μ_r	Rezystywność ρ	Przewodność cieplna właściwa λ	Objętościowe ciepło właściwe c_{pv}	Gęstość δ
	-	$\Omega \cdot m$	$\frac{W}{m \cdot K}$	$\frac{J}{m^3 \cdot K}$	$\frac{kg}{m^3}$
Wsad	200	$0{,}25 \cdot 10^{-6}$	40 400	$0{,}39 \cdot 10^{7}$	7860
Wzbudnik	1	$1{,}72 \cdot 10^{-8}$	401	$0{,}34 \cdot 10^{7}$	8920
Rdzeń magnetyczny	5000	-	200	-	-
Powietrze	1	-	0,025	-	1,2

Pozostałe wymiary geometryczne elementów modelu obliczeniowego przedstawiono w tabeli 2 i na rys. 5.

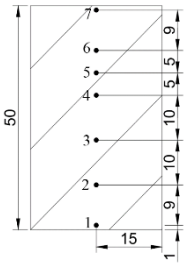


Rys. 5. Wymiary geometryczne elementów modelu obliczeniowego [opracowanie własne]

Tabela 2. Podstawowe wymiary geometryczne elementów wykorzystanych w modelu obliczeniowym

Element	Długość wzdłuż osi rzędnych [mm]	Szerokość wzdłuż osi odciętych [mm]
Wsad	30 i 50	30
Wzbudnik	5	
Rdzeń magnetyczny	4	
Szczelina powietrzna układu Wzbudnik – rdzeń magnetyczny	1	
Szczelina powietrzna układu Wzbudnik/rdzeń magnetyczny - wsad	1	

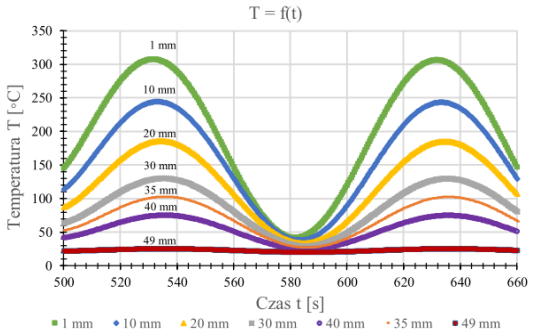
Na podstawie przeprowadzonych, lecz nieprzedstawionych w niniejszej pracy obliczeń stwierdzono, że odwzorowanie pierwotnych założeń metody tj. generacji sinusoidalnego impulsu mocy powinno być możliwie dokładnie zrealizowane. Próba zastąpienia funkcji sinusoidalnej funkcjami prostokątnymi czy trapezoidalnymi nie gwarantuje uzyskania satysfakcjonujących wyników, przy przyjętych (relatywnie małych) długościach wsadu. Z tego względu w dalszej części niniejszego opracowania zostanie przedstawiony model, w którym nagrzewanie wsadu zostało wymuszone poprzez odpowiednio skonfigurowany przebieg prądowy we wzbudniku dający w rezultacie przebieg sinusoidalnie zmiennej mocy wewnątrz wsadu. Do tego celu został wykorzystany komercyjny program Flux w wersji 11 firmy CEDRAT. Jako próbkę wykorzystano wsad wykonany z dwóch rodzajów materiału testowego o przyjętych wartościach przewodności cieplnej właściwej λ_1=40 i λ_2=400 W/m/K. Wsad był nieizolowany cieplnie, wymiana ciepła odbywała się poprzez zjawisko konwekcji naturalnej oraz radiacji. W celu wymuszenia jednokierunkowego przepływu ciepła w próbce dokonano modyfikacji modelu o układ chłodzenia, który został zrealizowany za pomocą warunku brzegowego na górnej powierzchni czołowej walca. Jej temperaturę przyjęto na stałym poziomie 20 °C. Istnieje realna możliwość pominięcia aktywnego układu chłodzenia na rzecz pasywnego zrealizowanego poprzez zaizolowanie cieplne powierzchni bocznej walca, jednak do celów obliczeniowo – symulacyjnych wykorzystano model z chłodzeniem wymuszonym gwarantującym szybkie osiągnięcie stanu cieplnie ustalonego. Parametrami zmiennymi w układzie elektrycznym wykorzystanym w modelu była wartość prądu zasilającego wzbudnik i okres sinusoidalnego przebiegu mocy we wsadzie. Badane punkty pomiaru temperatury zostały rozmieszczone w osi walcowej próbki wsadu na wysokości 1, 10, 20, 30, 35, 40, 49 mm od nagrzewanego czoła wsadu. Na rysunku 6 przedstawiono schematyczne rozmieszczenie punktów pomiarowych.



Rys. 6. Schematyczne rozmieszczenie punktów pomiarowych o numerach od 1 do 7 w próbce wsadu

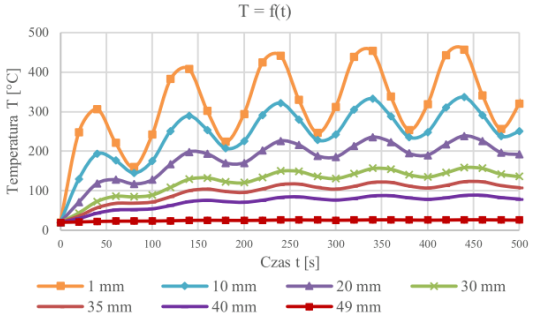
3. Wyniki symulacji numerycznych

W pracy przeanalizowano przebiegi fali temperaturowej wewnątrz próbki wsadu. Wyznaczony numerycznie w dziedzinie czasu przebieg temperatury w przedstawionych na rys. 6 punktach pozwolił na obliczenie przesunięć fazowych i wartości maksymalnych przebiegów. Na podstawie wymienionych powyżej danych dokonano obliczenia dyfuzyjności cieplnej i błędu jej wyznaczenia. Na rys. 7 przedstawiono przykładowy przebieg temperatury w analizowanych punktach pomiarowych.



Rys. 7. Przykładowy przebieg fali temperaturowej we wsadzie w punktach o określonej odległości od czoła próbki wsadu

W dalszym etapie pracy zostanie przedstawiony proces oceny wpływu zmiany parametrów modelu na błąd względny wyznaczenia dyfuzyjności cieplnej *a*. Analiza przedstawionego powyżej układu została przeprowadzona dla trzech wartości skutecznych prądu zasilającego wzbudnik: 500, 750 i 1000 A oraz czterech długości trwania okresu przebiegu sinusoidalnego mocy dostarczanej do wsadu: 50, 100, 150, 200 s. Wybór okresu zdeterminowany był wstępnym założeniem, że metoda powinna cechować się stosunkowo krótkim czasem pomiaru. Przykładowy proces ustalania się stanu cieplnego wsadu przedstawiono na rys. 8.

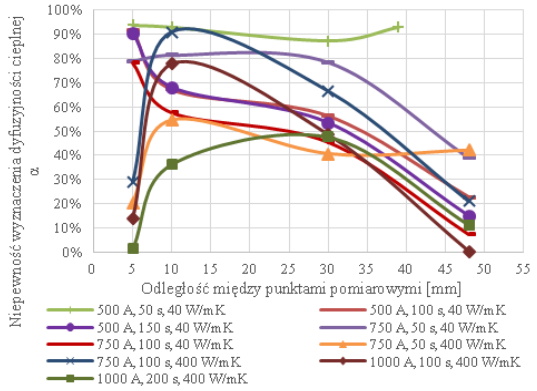


Rys. 8. Przykładowy przebieg temperatury w punktach kontrolnych wsadu - proces ustalania cieplnego wsadu nagrzewanego indukcyjnie

Analiza możliwości zastosowania metody Ångströma wymagała przeprowadzenia szeregu doświadczeń dla różnych kombinacji parametrów (wartości prądu i okresu wymuszenia) i poszukiwania zależności pomiędzy uzyskiwanymi wynikami a zmienianymi parametrami. Zbiorcze zestawienie wyników przedstawiono na rys. 9. Na potrzeby omawianej analizy dokonano wyboru czterech par punktów pomiarowych, które posłużyły ocenie wrażliwości metody Ångströma na różne konfiguracje modelu. Zestawienie par i wynikające stąd odległości między punktami pomiarowymi przedstawiono w tabeli 3.

Tabela. 3. Zestawienie par punktów pomiarowych

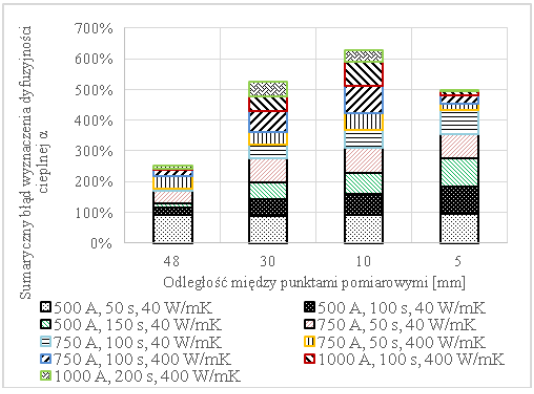
Numer pary	Numer punktów pomiarowych (z rys. 6)	Wysokość punktów liczona od czoła próbki [mm]	Odległość między punktami [mm]
1	1 i 7	1 i 49	48
2	2 i 6	10 i 40	30
3	3 i 5	20 i 30	10
4	4 i 5	30 i 35	5



Rys. 9. Zbiorcze zestawienie wyników obliczeń służących analizie metody Ångströma

4. Wnioski

Przeprowadzone obliczenia pozwalają stwierdzić, że rozmieszczenie punktów pomiarowych jest decydujące dla ostatecznego wyniku obliczeń. Dla większości dokonanych obliczeń najmniejszym błędem obarczone są wyniki uzyskane przy rozmieszczeniu punktów pomiarowych w możliwie dużej odległości od siebie. Należy jednak zauważyć, że dla pewnych konfiguracji modelu przebieg funkcji pokazuje możliwość uzyskania wyników poprawnych przy rozmieszczeniu punktów pomiarowych zarówno w bliskiej jak i dalekiej odległości od siebie. Taki przebieg wyników ujawnia dużą wrażliwość metody Ångströma na rodzaj wymuszenia oraz przewodność cieplną właściwą materiału. Dodatkowe zestawienie powyższych wyników zaprezentowano na rys. 10.



Rys. 10. Zestawienie wyników obliczeń - analiza metody Ångströma

Sumaryczne zestawienie niepewności wyników dla wszystkich analizowanych konfiguracji pozwala ocenić, która z konfiguracji rozmieszczenia punktów pomiarowych przynosi najlepsze efekty. Najkorzystniejsze wydaje się rozmieszczenie punktów pomiarowych w odległości 48 mm tj. na głębokości 1 mm od dołu i 1 mm od góry próbki wsadu (punkty 1 i 7, rys. 6). W takiej konfiguracji uzyskane rezultaty obarczone są błędem zawierającą się w przedziale poniżej 50 % bez względu na okres, moc wymuszenia i rodzaj materiału za wyjątkiem jednej z dziewięciu konfiguracji tj. przy wymuszeniu 500 A, okresie 50 s i próbce o przewodności 40 W/m/K – błąd w tym przypadku przekroczył próg 90%. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdza się, że w celu uzyskania wyników pozwalających na oszacowanie dyfuzyjności cieplnej materiału celowe jest:

- zastosowanie sygnału prądowego o okresie dłuższym niż 50 s. i wartości skutecznej z zakresu (750 ÷ 1000) A, generującego sinusoidalny przebieg mocy wewnątrz próbki wsadu.

Należy mieć również na uwadze trudności, które napotkano w trakcie wykonywania obliczeń i które mogą okazać się istotnym ograniczeniem w zastosowaniu metody Ångströma w rzeczywistym układzie. Są nimi:

- konieczność rejestracji przebiegu czasowego temperatury w dwóch punktach próbki wsadu z dokładnością co najmniej 0,1 s.;
- konieczność precyzyjnego umieszczenia i pomiaru odległości pomiędzy zastosowanymi czujnikami temperatury;
- konieczność wyznaczenia przesunięcia fazowego pomiędzy wartościami maksymalnymi ww. przebiegów;
- niewielka wartość amplitudy przebiegu w najbardziej oddalonym od „źródła ciepła" punkcie 7 (rys. 6);
- konieczność wymuszenia jednokierunkowego przepływu strumienia ciepła;
- zagrożenia dla czujnika temperatury umieszczonego najbliżej wzbudnika – punkt 1 (zakłócenia, wysoka temperatura);
- konieczność zadania sygnału zasilającego wzbudnik tak, aby został wygenerowany sinusoidalny przebieg mocy wewnątrz nagrzewanego wsadu.

Literatura

[1] Ångström A.J.: Phil. Mag. 25, 130, 1863.
[2] Szczeniowski S.: Fizyka doświadczalna, cz. II, Ciepło i fizyka drobinowa, PWN, Warszawa, 1964.
[3] Vandersande J.W., Pohl R.O.: Simple apparatus for the measurement of thermal diffusivity between 80–500 K using the modified Ångström method, Review of Scientific Instruments 51, 1694, 1980.
[4] Zgraja J.: Eksperymentalne szacowanie materiałowych parametrów cieplnych w procesie pośredniego wyznaczania charakterystyk materiałowych indukcyjnie nagrzewanego wsadu. Przegląd Elektrotechniczny, 7/2011, 72-75.
[5] Zgraja J.: The stand for determining of thermal-electrical material properties of induction heated charge, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 30, Iss. 5, 2011, 1487 – 1498.

Mgr inż. Adam Cieślak
e-mail: acieslak@kis.p.lodz.pl

Absolwent Politechniki Łódzkiej, kierunków: Energetyka i Elektrotechnika w Instytucie Elektroenergetyki. Obecnie doktorant w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. Działalność naukowa w dyscyplinie elektrotechnika.
Zainteresowania naukowe: zagadnienia obliczeń i zjawisk elektromagnetyczno – cieplnych, nagrzewanie indukcyjne, sieci elektroenergetyczne i transformatory mocy.

Dr hab. inż. Jerzy Zgraja, prof. PŁ
e-mail: jzgraja@p.lodz.pl

Profesor nadzwyczajny w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. Dyscyplina naukowa elektrotechnika, ukierunkowana na specjalności z obszaru modelowania pól elektromagnetycznych, nagrzewania indukcyjnego i optymalizacji zagadnień polowych. Członek stowarzyszony Sekcji Elektrotermii i Techniki Świetlnej Komitetu Elektrotechniki PAN, od 2010 r. przewodniczący Polskiego Komitetu Elektrotechnologii SEP.

otrzymano/received: 25.11.2014 *przyjęto do druku/accepted: 11.05.2015*

PL-BY-UA 2007-2013

Współfinansowane ze środków Unii Europejskiej

DOI: 10.5604/20830157.1159329

METODY ELIMINACJI ARTEFAKTÓW W SYGNAŁACH EEG

Małgorzata Plechawska-Wójcik
Politechnika Lubelska, Instytut Informatyki

Streszczenie. *Rejestracja sygnałów elektroencefalograficznych (EEG) jest niemal zawsze związana z zapisem różnego rodzaju artefaktów, które zaszumianą odczyt i utrudniają analizę zebranych danych. Artefakty te mogą być zauważalne w pojedynczych kanałach, ale bardzo często muszą być korygowane na przestrzeni kilku kanałów jednocześnie. Ich pochodzenie może być różnorodne. Wyróżnia się artefakty sieciowe, sprzętowe jak również kilka rodzajów artefaktów mięśniowych, pochodzących od badanej osoby. W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania badaniami EEG nie tylko w zastosowaniach ambulatoryjnych i klinicznych, ale także w analizach psychologicznych oraz w budowie nowoczesnych interfejsów człowiek-maszyna. Artykuł przedstawia studium przypadku zastosowania analiz klasyfikacyjnych w zagadnieniach korekcji artefaktów sygnału EEG.*

Słowa kluczowe: elektroencefalogram, pomiar elektroencefalograficzny, pomiar szumu, artefakty EEG

МЕТОДИ УСУНЕННЯ АРТЕФАКТІВ У СИГНАЛАХ ЕЕГ

Анотація. *Реєстрація електроенцефалографічних сигналів (ЕЕГ) майже завжди пов'язана із записом різних видів артефактів, які перешкоджають при відчитуванні запису і утруднюють аналіз зібраних даних. Ці артефакти можуть бути помітні в окремих каналах, але дуже часто потрібно їх коректувати по декількох каналах одночасно. Вони мають різне походження. Розрізняють артефакти мережі, обладнання, а також кілька типів м'язових артефактів, отриманих від досліджуваної особи. В останні роки спостерігається підвищений інтерес до вивчення ЕЕГ не тільки при амбулаторному і клінічному застосуванні, але і в психологічному аналізі та при створенні сучасних інтерфейсів людина-машина. Дана стаття являє собою тематичне дослідження аналізу застосування класифікації з питань корекції артефактів сигналів ЕЕГ.*

Ключові слова: електроенцефалограма, електроенцефалографічний вимір, вимір шуму, артефакти ЕЕГ

METHODS OF EEG ARTIFACTS ELIMINATION

Abstract. *Registration of electroencephalography signals (EEG) is almost always associated with recording different kinds of artifacts that makes it difficult to read and analyze collected data. These artifacts may be noticeable in the individual channels, but very often they have to be adjusted over several channels simultaneously. Their origin can be varied. Among the most typical are network and hardware artifacts as well as several types of muscle artifacts, derived from the tested person. In recent years increased interest in EEG studies might be noticed. EEG signals are applied not only in the outpatient and clinical applications, but also in psychological analyses and in construction of modern human-machine interfaces. This article presents*
a case study of classification analysis application in EEG artifact correction tasks.

Keywords: electroencephalogram, electroencephalography measurement, noise measurement, EEG artifacts

Wstęp

Elektroencefalograf (EEG) to urządzenie umożliwiające nieinwazyjny pomiar aktywności elektrycznej mózgu. Pomiar ten realizowany jest z zastosowaniem elektrod umieszczanych na głowie, na ogół w sposób zgodny z międzynarodowymi standardami, takimi jak standard 10-20.

Sygnały EEG są zróżnicowane. W szczególności charakterystyki tych sygnałów różnią się od siebie, w zależności od stanu, w jakim znajduje się badana osoba. Przykładowo, inny sygnał widoczny będzie w przypadku relaksu, inny snu a jeszcze inny podczas normalnej codziennej aktywności.

Klasycznie rozróżnia się pięć podstawowych rodzajów fal mózgowych o różnych charakterystykach i zakresach częstotliwości:

1) Fale alfa – aktywność w paśmie 8-12 Hz występująca podczas stanu relaksu. Fala ta jest widoczna w szczególności, gdy badany ma zamknięte oczy i znajduje się w fazie przedsennej. Ten typ fali jest zauważalny przede wszystkim w odprowadzeniach tylnych, czyli miejscach, odpowiedzialnych za przetwarzanie informacji wzrokowych. Szczególnym typem fali alfa jest rytm mu rejestrowany w okolicach kory motorycznej i wskazujący na wykonywanie lub zamierzenie wykonywania ruchu (rys. 1).
2) Fale beta – niskoamplitudowa aktywność w paśmie 12-30 Hz, w której dodatkowo wyróżnia się trzy przedziały: fale wolne (12-15 Hz, pasmo średnie, 15-18 Hz – właściwe pasmo beta oraz fale o częstotliwości powyżej 19 Hz klasyfikowane jako szybkie fale beta). Fale beta są widoczne przed wszystkim w okolicy czołowej i reprezentują słabo zsynchronizowaną pracę neuronów charakterystyczną dla codziennych, typowych

Вступ

Електроенцефалограф (ЕЕГ) це пристрій, який дозволяє неінвазивно вимірювати електричну активність мозку. Цей вимір проводять з використанням електродів, які розміщають на голові відповідно до міжнародних стандартів, такі, як стандарт 10-20.

Сигнали ЕЕГ різнорідні. Характер цих сигналів відрізняється одн від одного, в залежності від стану, в якому людина знаходиться, наприклад, один сигнал буде видно у випадку релаксу, інший під час сну, а ще інший під час повсякденної діяльності.

Класично виокремлюють п'ять основних типів мозкових хвиль з різними характеристиками і частотою:

1) Альфа-хвилі - активність в межах 8-12 Гц, вона спостерігається під час стану розслаблення. Цю хвилю видно, коли досліджуваний закрив очі і знаходиться в фазі перед сном. Цей тип сигналу помітно насамперед у задніх частинах мозку, які відповідають за обробку візуальної інформації. Особливий тип альфа-хвилі є ритм, який реєструється в моторній області кори головного мозку і повідомляє про виконання, або намір виконати рух (мал. 1).
2) Бета-хвилі – низькочастотна активність в межах 12-30 Гц, яка виділяє три діапазони: повільні хвилі (12-15 Гц, середній діапазон 15-18 Гц - нормальний діапазон і бета-хвилі з частотами вище 19 Гц, що класифікуються, як високі бета-хвилі). Бета-хвилі спостерігаються в лобних частинах і представляють слабо синхронізовану роботу нейронів, яка характерна для щоденної активності кори

aktywności kory mózgowej obejmujących pracę umysłową oraz percepcję zmysłową a także koncentrację uwagi objawiającą się pojawieniem się fal o małej amplitudzie.

3) Fale delta – aktywność w niskoczęstotliwościowym paśmie 0-4 Hz. Fale te wykazują się krótkim czasem trwania (do ¼ sekundy) i wysoką amplitudą. W szczególności fale o amplitudzie powyżej 75μV są określane jako fale wolne i charakteryzują się wysokim poziomem synchronizacji neuronów. Fale delta obserwowane są przede wszystkim podczas głębokiego snu oraz podczas medytacji.
4) Fale theta – aktywność w paśmie 3-7 Hz, typowa dla snu płytkiego, kiedy utrwalane są przyswojone treści, choć spotykana także podczas transu czy intensywnych emocji. Fale te mają charakterystyczną rozpiętość międzypikową rzędu kilkudziesięciu μV. Szczególnym typem fali theta jest rytm FMθ, związany ze skupieniem i aktywnością poznawczą. Fale te są obserwowane przede wszystkim w przedniej, przyśrodkowej części mózgu.
5) Fale gamma – aktywność w paśmie 30-80 Hz, która jednak najczęściej występuje w okolicach 40 Hz i związana jest z procesami poznawczymi oraz z pamięcią. Ponadto wyróżnia się wysokoczęstotliwościową falę gamma (tzw. high gamma) występującą w paśmie 80-200 Hz, która związana jest z reakcją na bodźce zarówno zewnętrzne jak i wewnętrzne.

головного мозку, включаючи розумову роботу, чуттєве сприйняття і концентрацію уваги, які проявляються при виникненні хвиль малої амплітуди.

3) Дельта-хвилі - активність в низькочастотному діапазоні 0-4 Гц. Ці хвилі мають коротку тривалість (до чверті секунди) і високу амплітуду. Зокрема, хвилі, що мають амплітуду більше, ніж 75 мікровольт, називаються вільними і мають високий рівень синхронізації нейронів. Дельта хвилі спостерігаються в основному під час глибокого сну і медитації.
4) Хвилі тета - активність в межах 3-7 Гц, характерні для поверхневого сну, коли фіксується засвоєна інформація, також зустрічається під час трансу або сильних емоцій. Ці хвилі мають характерний спектр декількох десятків мікровольт μV. Особливий тип хвилі тета-ритму FMθ пов'язаний з концентрацією та пізнавальною діяльністю. Ці хвилі спостерігаються в основному в передній частини мозку.
5) Гамма-хвилі - активність в діапазоні 30-80 Гц, яка найчастіше відбувається в межах 40 Гц і пов'язана з пізнанням і пам'яттю. Крім того, виділяються хвилі гамма високих частот, які знаходяться в діапазоні 80-200 Гц, пов'язані з реакцією на зовнішні та внутрішні подразники.

Rys. 1. Sygnał EEG z widoczną falą alfa
Мал. 1. Сигнал ЕЕГ з фіксованою альфа-хвилею

Pojedyncze badanie EEG realizowane jest zwykle w okresie od kilkudziesięciu minut do kulki godzin i służyć może diagnostyce (śpiączka, padaczka, zaburzenia snu, monitoring pacjenta podczas operacji), badaniu zaburzeń neurologicznych i właściwości funkcjonalnych mózgu jak również budowie interfejsów mózg-komputer oraz wspomaganiu gier komputerowych. Dodatkową zaletą badania EEG jest wysoka rozdzielczość czasowa, szczególnie w porównaniu do takich technik obrazowania jak MRI i CT.

Celem artykułu jest analiza artefaktów spotykanych w sygnałach EEG oraz analiza aktualnego stanu wiedzy na temat metod wykorzystywanych do ich identyfikacji i korekcji.

1. Analiza sygnałów EEG

Struktury widoczne w sygnale EEG mogą i często nadal są analizowane wzrokowo. Wadą analizy wzrokowej są ograniczona powtarzalność i dość wysoki koszt a także niejednoznaczności standaryzacji. Niejednoznaczne kryteria analizy wzrokowej są powodem utrudnień implementacji metod komputerowej analizy sygnałów EEG.

Analizę sygnałów EEG realizuje się komputerowo zarówno w dziedzinie czasu jak i w dziedzinie częstotliwości. Analiza w dziedzinie czasu związana jest często z potencjałami wywołanymi (ang. evoked potentials, EP), będącymi reakcją

Одне дослідження ЕЕГ зазвичай проводиться в межах від декількох хвилин до декількох годин і може служити для діагностики (коми, епілепсії, порушення сну, моніторинг пацієнта під час операції), вивчення неврологічних і функціональних властивостей головного мозку, а також будівництво інтерфейсів мозок-комп'ютер, і як допомога для комп'ютерних ігор. Додатковою перевагою ЕЕГ є висока роздільна здатність в часі, особливо в порівнянні з методами візуалізації, такими як МРТ і КТ.

Метою статті є аналіз артефактів, які зустрічаються в сигналах ЕЕГ і аналіз актуального стану знань про методи, що використовуються для їх виявлення та корекції.

1. Аналіз сигналів ЕЕГ

Структури, які видно в сигналі ЕЕГ часто аналізують візуально. Недоліком візуального аналізу є обмежена відтворюваність і неоднозначність стандартизації. Неоднозначні критерії візуального аналізу є причиною труднощів для реалізації методів комп'ютерного аналізу сигналів ЕЕГ.

Аналіз сигналів ЕЕГ виконує комп'ютер, як в області часу, так і в області частотній. Аналіз у часовій області часто пов’язаний з викликами (ang. evoked potentials, EP), які є реакцією мозку на подразники, інтерпретація яких,

mózgu na bodźce, których interpretacja wymaga zwykle stosowania techniki uśredniania wyrównanych wcześniej wielu odpowiedzi na określony bodziec. Odpowiednio zrealizowane uśrednianie umożliwia analizę załamków otrzymanych w odpowiedzi na bodziec.

Drugim sposobem pracy z sygnałami EEG jest analiza widmowa, która obejmuje opis własności sygnału w dziedzinie częstotliwości. Do analiz tych wykorzystuje się metody nieparametryczne, polegające na wyznaczaniu widma bezpośrednio z wartości sygnału (transformata Fouriera, transformata Z) oraz metody parametryczne wykorzystujące parametryczne modele danych (model autoregresyjny).

Zarówno w dziedzinie czasu jak i w dziedzinie częstotliwości analizować można też zjawisko potencjałów wywołanych stanu ustalonego (ang. Steady State Evoked Potentials, SSEP), będących rodzajem procesu modulacji sygnału. Analizowany sygnał EEG otrzymany poprzez działanie serię okresowo powtarzających się stymulacji wzrokowych, słuchowych lub czuciowych [40].

2. Artefakty sygnału EEG

Niezależnie od rodzaju przeprowadzanej analizy jakość pomiaru oraz czystość sygnału EEG mają kluczowe znaczenie dla wyników. Otrzymanie dobrej jakości sygnału ma bardzo duże znaczenie, ponieważ tylko taki elektroencefalogram stanowi właściwe odzwierciedlenie aktywności elektrycznej mózgu. Jakość sygnału jest szczególnie istotna w kontekście bardzo niskiej amplitudy sygnału.

Artefakty są niepożądanymi sygnałami o pochodzeniu pozamózgowym rejestrowanymi przez elektrody EEG. Obecność artefaktów w sygnale ogranicza użyteczność kliniczną badania i prowadzić może do mylnych diagnoz, w tym w szczególności wykrycia nieistniejących zaburzeń neurologicznych.

Istnieje kilka rodzajów artefaktów spotykanych podczas rejestracji sygnału EEG. Artefakty te można podzielić na dwie grupy: artefakty techniczne związane z samą rejestracją sygnału oraz artefakty biologiczne pochodzące od osoby badanej.

Do pierwszej grupy zalicza się:

- Niewłaściwe lokalizacje umocowania elektrod. Elektrody powinny być rozmieszczane zgodnie z przyjętymi standardami, aby w odpowiedni sposób zmierzyć aktywność kory mózgowej związanej z określoną czynnością behawioralną. Sygnał EEG pochodzący z elektrody umieszczonej w niewłaściwymi miejscu (np. przesuniętej o 1 cm) będzie znacznie stłumiony, ponieważ słaby sygnał EEG szybko zanika wraz z odległością. Korekcja tego typu artefaktów nie jest możliwa, ponieważ sygnały powstałe na skutek błędu mocowania są bardzo słabe.
- Niewłaściwy kontakt elektrody ze skórą. Skóra osoby badanej musi zostać odpowiednio przygotowana. Musi zostać ona odtłuszczona oraz pozbawiona zanieczyszczeń. Ponadto konieczne wykorzystanie dedykowanego żelu do elektrod, aby zapewnić szczelny kontakt elektrody ze skórą oraz aby uzyskać niski opór elektryczny. Korekcja niewłaściwie podłączonych elektrod nie jest bardzo trudna, dlatego układ skóra-elektroda powinien być stale monitorowany. Niepoprawnie zamocowana elektroda spowodować może trudne do zauważenia zmiany potencjału, pojawiające się na pojedynczych sygnałach.
- Wpływ pola elektrycznego sieci zasilającej. Zakłócenie sygnału EEG związane z obecnością sieci związane jest z pojawieniem się harmonicznego, wysoko-amplitudowego sygnału o częstości 50-60 Hz, w zależności od regionu geograficznego. Korekcję tego artefaktu realizuje się poprzez pasmowo-zaporowy filtr sieciowy.
- Pole elektryczne zewnętrznych urządzeń elektronicznych. Urządzenia takie jak komputery, sprzęt medyczny, telefony komórkowe czy urządzenia wszczepione, jak rozruszniki i stymulatory serca powodować mogą zakłócenia częstotliwościowe sygnału EEG.

як правило, вимагає використання способів усереднення раніше вирівняних багатьох відповідей на конкретний стимул. Належним чином здійснювати усереднення дозволяє аналіз хвилі, отриманої у відповідь на стимул.

Інший спосіб роботи з сигналами ЕЕГ є спектральний аналіз, який включає в себе опис властивостей сигналу в частотній області. Для аналізу використовують непараметричні методи, що полягають на визначенні спектра безпосередньо зі значення сигналу (перетворення Фур'є, перетворення Z) і параметричні методи, які використовують параметричні моделі даних (модель авторегресійна).

Як в області часу, так і в частотній області можна проаналізувати явище потенціалів викликаних стаціонарним станом (анг. Steady State Evoked Potentials, SSEP), які є процесом модуляції сигналу. Аналізований сигнал ЕЕГ отриманий дією ряду періодично повторюваних стимуляцій зорових, слухових або сенсорних [40].

2. Артефакти сигналу ЕЕГ

Незалежно від типу аналізу якість вимірювання і якість сигналу ЕЕГ мають важливе значення для результату. Отримати якісний сигнал дуже важливо, тому що тільки електроенцефалограма точно відображає електричну активність мозку. Якість сигналу має особливо важливе значення в контексті дуже низької амплітуди.

Артефакти є небажаними сигналами, які походять не з мозку, але реєструються електродами ЕЕГ. Наявність артефактів в сигналі обмежує клінічну корисність тесту і може призвести до помилкових діагнозів, в тому числі, виявлення неіснуючих неврологічних розладів.

Є кілька видів артефактів, що спостерігаються під час запису сигналу ЕЕГ. Ці артефакти можуть бути розділені на дві групи: технічні артефакти, пов'язані з тією ж синхронізацією сигналу і біологічні артефакти, отримані від досліджуваного.

Перша група включає в себе:

- Електроди повинні бути розташовані відповідно до прийнятих стандартів, щоб адекватно виміряти активність кори головного мозку, пов'язану з певними поведінковими функціями. Сигнал ЕЕГ, що виходить від електрода, поміщеного в недозволеному місці (напр., зсунутий на 1см) буде значно ослаблений, оскільки слабкий сигнал ЕЕГ швидко зникає зі збільшенням відстані. Корекція цього типу артефактів не представляється можливою, тому що сигнали, при неправильному прикріпленні дуже слабкі.
- Неправильний контакт електродів зі шкірою. Шкіра пацієнта повинна бути належним чином підготовлена. Повинна бути знежирена і чиста. Крім того, необхідно використовувати спеціальний гель для електрода, щоб забезпечити щільний контакт електрода з шкірою і отримати низький електричний опір. Корекція неправильно підключених електродів не складна, тому система шкіраел-ектрод повинна знаходитися під постійним контролем. Неправильно встановлений електрод може призвести до змін, які відбуваються в окремих сигналах, і їх важко зауважити.
- Вплив електричного поля електромережі. Перешкоди ЕЕГ сигналу, пов'язані з наявністю в мережі гармонійного сигналу, високої амплітуди з частотою 50-60 Гц, залежно від географічного регіону. Виправлення цього артефакту виконується за допомогою мережевого фільтру.
- Зовнішнє електричне поле електронних пристроїв. Такі пристрої, як комп'ютери, медичне обладнання, мобільні телефони і імплантовані пристрої, наприклад, кардіостимулятори можуть спричинити перешкоди частоти сигналу ЕЕГ.

- Nieodpowiednie warunki badania. Na badanie EEG może mieć wpływ chodzenie w pobliżu badanej osoby, które powoduje pojawienie się w elektroencefalogramie artefaktu zbliżonego do fal ostrych.

Druga grupa artefaktów to artefakty biologiczne, związane bezpośrednio z fizjologią osoby badanej (rys. 2). Do tej grupy zaliczyć można:

- Pocenie się badanej osoby. Skutkuje ono pogorszeniem się wydajności układu skóra-elektroda, zwiększeniem wartości impedancji a nawet powstawaniem zwarć pomiędzy elektrodami. Artefakty te są zauważalne w zapisie EEG pojedynczych sygnałów jako wolne, kilkusekundowe fale.
- Mruganie powodujące nawet kilkumiliwoltową różnicę potencjałów pomiędzy rogówką i siatkówką oraz kilkumikrowoltową amplitudę sygnału odwzorowującego czynność elektryczna siatkówki. Ruch oka występujący podczas mrugania powoduje bardzo silny artefakt, który może być widoczny nawet na wszystkich elektrodach, w tym w szczególności na tych umieszczonych na odprowadzeniach przedczołowych i czołowych. Rogówka i siatkówka oka tworzą układ dipola elektrycznego, który podczas ruchu zmienia orientację w przestrzeni i silnie zaburza tym samym rozkład natężenia pola elektrycznego. Artefakty tego typu charakteryzują się wyższą amplitudą i mniejszą częstotliwością niż sygnał EEG. Redukcja tego artefaktu jest bardzo trudna a jego występowania nie można wyeliminować stosując nawet uśrednianie po wielu realizacjach. Do wykrywania artefaktów ocznych wykorzystuje się często zapis elektrookulograficzny (EOG), będący zapisem czynności elektrycznej oczu.
- Artefakty mięśniowe głowy. Do artefaktów tych zalicza się te pochodzące od mięśni głowy i twarzy odpowiedzialnych za mimikę, ruchy szczęki, języka oraz ruchy gałek ocznych. Ich wpływ na sygnał jest szczególnie widoczny na odczytach elektrod czołowych i skroniowych. Szczególnie artefakty powstałe w wyniku ruchów języka, który, podobnie jak oko, pełni w przybliżeniu rolę dipola elektrycznego.
- Drżenia mięśni. Poza mięśniami głowy artefakty mogą powodować także drgania mięśni całego ciała, w tym kończyn. Długotrwałe przebywanie w niewygodnej pozycji lub choroba (np. Parkinsona) mogą powodować drżenia głowy, które uwidaczniają się w wynikowym sygnale. Takie zakłócenia mięśniowe (zarówno głowy jak i całego ciała) określane są mianem potencjałów miogennych i widoczne są na zapisach eletromigroaficznych (EMG). Zwykle potencjały generowane w mięśniach charakteryzują się krótszym czasem trwania niż te generowane w mózgu i są łatwo je zidentyfikować. Jednak drżenia samoistne i choroba Parkinsona mogą powodować rytmiczne 4-6 Hz sinusoidalne artefakty, które są trudne do identyfikacji, ponieważ ich charakterystyka jest podobna do sygnałów EEG.
- Duża w stosunku do sygnału EEG siła tych artefaktów uniemożliwia ich korektę, dlatego podczas badania należy zapewnić badanemu komfort poprzez zadbanie o oparcie dla głowy, rąk i nóg oraz przewidzenie przerw.
- Czynność elektryczna serca. Rytmicznie pojawiający się artefakt o charakterystycznym kształcie związany z biciem serca (elektrokardiogram) widoczny szczególnie w przypadku sygnału z elektrod umieszczonych np. w okolicach tętniczek. Detekcja tego artefaktu jest możliwa poprzez zrównoleglenie pomiaru EEG i EKG.

W zależności od rodzaju artefaktów sygnały EEG są obarczone zakłóceniami na pojedynczych kanałach lub też na wszystkich. Dodatkowo w przypadku zakłóceń widocznych na wszystkich lub większości sygnałów pomiarowych artefakty pojawiać się mogą w różnych proporcjach, w zależności od rozkładu przestrzennego.

Poza wymienionymi, na zarejestrowane sygnały EEG wpływ, często nieznany i losowy, mogą mieć także oprzyrządowanie, w szczególności wzmacniacz, zewnętrzne aktywności elektromagnetyczne itp. Modelowane są one zwykle jako dodatkowy losowy szum.

- Невідповідні умови для проведення. На дослідження ЕЕГ може вплинути ходіння особи біля досліджуваного, це викликає появу в електроенцефалограмі артефакту, хвиль подібні до різких.

Друга група артефактів біологічні артефакти, пов'язані безпосередньо з фізіологією досліджуваної особи (мал. 2). До цієї групи відносяться:

- Пітливість досліджуваного. Це призводить до погіршення ефективності поєднання шкіра-електрод, збільшенням значень імпедансу і навіть до утворення короткого замикання між електродами. Ці артефакти помітні в поодиноких сигналах ЕЕГ, як вільні декілька секундні хвилі.
- Моргання спричиняє навіть кількахвилинну різницю потенціалів між рогівкою і сітківкою і кількахвилинну амплітуду сигналу електричної активності сітківки. Рух ока, який відбувається під час моргання викликає дуже потужний артефакт, який можна побачити навіть на всіх електродах, особливо на лобних і передлобних проводах. Рогівка і сітківка ока утворюють систему електричного диполя, яка змінює орієнтацію руху в просторі і сильно змінює напруженість електричного поля. Артефакти цього типу мають більш високу амплітуду і низьку частоту, ніж сигнал ЕЕГ. Ліквідувати цей артефакт дуже важко, він не може бути усунений навіть при використанні усереднення за багатьма реалізаціям. Для виявлення очних артефактів, часто використовують запис електричної активності очей.
- Артефакти м'язів голови. До цих артефактів включають ті, які отримані від голови і лицьових м'язів, відповідальних за міміку, рухи нижньої щелепи, мову та рухи очей. Їх вплив на сигнал є особливо помітний на лобних і скроньових показниках електродів. Зокрема, артефакти, викликані рухами язика які, як і око, виконують роль електричного диполя.
- Не лише м'язи голови можуть спричиняти артефакти, також можуть викликати вібрацію м'язи тіла і кінцівок. Тривале перебування в незручному положенні, або хвороба (напр., Хвороба Паркінсона) можуть викликати тремтіння голови, яке відображається у сигналі. Таке втручання м'язів (як голова і тіло) називається міогенні потенціали, які видимі на електроміогенних записах. Як правило, потенціали створювані в м'язах, мають меншу тривалість, ніж ті, які генерується в головному мозку і їх легко ідентифіувати. Тим не менш, тримтіння і хвороба Паркінсона можуть викликати ритмічні 4-6 Гц синусоїдальні артефакти, які важко визначити, тому що їх характеристики схожі на сигнали ЕЕГ.
- По відношенню до сигналу ЕЕГ сила цих артефактів є високою і унеможливює їх корекцію, тому під час дослідження потрібно забезпечити комфорт для досліджуваного, для його голови, рук і ніг, а також передбачити перерви.
- Електрична активність серця. Ритмічно утворюваний артефакт, який має характерну форму пов’язану з роботою серця (ЕКГ), видимий особливо у випадку сигналів з електродів розташованих наприклад, в області артеріол. Виявлення цього артефакту відбувається за допомогою розпаралелювання вимірювань ЕЕГ і ЕКГ.

Залежно від типу артефактів сигнали ЕЕГ, обтяжені неточностями на окремих або на всіх сигналах. Додатково, в разі видимих перешкод на всіх або більшості сигналах вимірювання, артефакти можуть відображатися в різних пропорціях, залежно від просторового розподілу.

Окрім перерахованих, на запис сигналів ЕЕГ часто впливають незначні і випадкові перешкоди, вони можуть мати вимірювальний підсилювач, зокрема, зовнішньої електромагнітної активності і т.д. Вони, як правило, моделюються, як додатковий випадковий шум.

Rys. 2. Sygnał EEG z widocznymi artefaktami ruchu oka oraz artefaktami mięśniowymi
Мал. 2. Сигнал ЕЕГ з артефактами руху ока і артефактами м'язів

Detekcję i korektę szumu oraz artefaktów przeprowadza się na samym początku analizy sygnału. Cyfrowy pomiar i zapis EEG umożliwia filtrowanie częstotliwościowe i odpowiedni dobór montażu już po realizacji badania, co ułatwia interpretację zapisu EEG o obniżonej jakości. Możliwości takiej analizy są jednak ograniczone, ponieważ np. stosowanie filtrowania wymaga separowalności sygnału EEG oraz artefaktów. Dlatego korekcja artefaktów typu post-hoc (bo realizacji badania) jest możliwa w przypadku np. obecności artefaktów na wspólnej elektrodzie referencyjnej [5].

3. Metody eliminacji artefaktów

3.1. Artefakty oczne

Aktywność oczu jest źródłem jednych z najczęściej występujących artefaktów sygnałów EEG [7]. Artefaktów tych ciężko się ustrzec, a mogą one w znacznym stopniu zaburzyć zarejestrowany sygnał EEG, dlatego ich korekcja jest bardzo istotna z praktycznego punktu widzenia. Detekcja i usunięcie tego typu artefaktów bez jednoczesnej utraty jakości sygnału EEG jest zadaniem bardzo trudnym. Istnieje rozbudowana literatura naukowa na temat redukcji tego typu zakłóceń [4, 7, 8, 16, 17, 25, 31, 37]. Jednym z szeroko stosowanych podejść jest budowa klasyfikatora uwzględniającego wpływ artefaktów ocznych na sygnał EEG [22]. Inne metody identyfikują artefakty oczne na podstawie dodatkowo zapisanego podczas badania elektrookulogramu [16] i z wykorzystaniem metod opartych na regresji liniowej [8]. Zarejestrowane sygnały EOG są odejmowane od zarejestrowanego sygnału EEG z uwzględnieniem proporcji wpływu artefaktu ocznego. Jednak proporcja ta musi być właściwie oszacowana.

Do analizy artefaktów ocznych stosowane często są też takie metody jak Principal Component Analysis (PCA) [5, 17, 25] oraz Independent Component Analysis (ICA) [7, 18, 37]. Metoda PCA dokonuje dekompozycji sygnału na nieskorelowane składowe, z których pierwsza z największą wariancją jest uznawana za artefakt oczny. Artefakty o dużej amplitudzie można stosunkowo łatwo w ten sposób izolować. Jednak separacja artefaktów o zbliżonych amplitudach nie jest łatwa do uzyskania tą metodą [19].

Wiele prac naukowych poświęconych jest wykorzystaniu metody Independent Component Analysis (ICA), która dekomponuje sygnał na wzajemnie niezależne komponenty. Do problemów działania metody ICA zaliczyć można utratę części danych EEG spowodowaną niedokładną separowalnością składowych [7], szczególnie w przypadku artefaktów o charakterze zbliżonym do sygnału EEG [1, 12].

Виявлення і корекція шуму і артефактів здійснюються на початку аналізу сигналу. Цифрове вимірювання і запис ЕЕГ дозволяють фільтрувати частоту і правильний вибір монтажу після проведення обстеження, що полегшує інтерпретацію ЕЕГ з низькою якістю. Можливість такого аналізу обмежена, бо, наприклад, використання фільтрації вимагає сепарабельного сигналу ЕЕГ і артефактів. Тому корекція артефактів типу post-hoc (до реалізації дослідження) є можливою у випадку, наявності артефактів на загальному електроді [5].

3. Методи усунення артефактів

3.1. Артефакти очей

Діяльність очей є джерелом найбільш поширених артефактів, сигналів ЕЕГ [7]. Цих артефактів, важко уникнути, а вони можуть значно погіршити реєстрацію сигналів ЕЕГ, тому їх корекція є дуже важлива з практичної точки зору. Виявлення і видалення цього типу артефактів без шкоди для якості сигналу ЕЕГ є дуже важким завданням. Існує велика кількість наукової літератури, де описується, як можна зменшити перешкоди цього типу [4, 7, 8, 16, 17, 25, 31, 37]. Один з широко використовуваних підходів полягає у створенні класифікатора, який бере до уваги ефект очних артефактів в сигналах ЕЕГ [22]. Іншим способом ідентифікації очних артефактів є додатково під час дослідження робити електричний запис активності ока [16] і за допомогою методів на основі лінійної регресії [8]. Зареєстровані сигнали віднімають з записаного сигналу ЕЕГ, з урахуванням впливу очного артефакту. Тим не менш, це співвідношення має бути належним чином оцінене.

Для аналізу очних артефактів, також часто використовуються такі методи, як Principal Component Analysis (PCA) [5, 17, 25] і Independent Component Analysis (ICA) [7, 18, 37]. Метод PCA розкладає компонент сигналу на нескорельовані складові, з яких перший з найбільшою дисперсією вважається за очний артефакт. Артефакти великої амплітуди можуть бути таким чином відносно легко ізольовані. Тим не менш, відділення артефактів з подібною амплітудою важко отримати за допомогою цього методу [19].

Багато наукових праць присвячені використанню методу Independent Component Analysis (ICA), який розкладає сигнал на взаємно незалежні компоненти. Проблемою в роботі методу ICA є втрата частини інформації ЕЕГ, це викликано неточністю розділення компонентів [7], особливо у випадку артефакту, який має аналогічний сигнал ЕЕГ [1, 12].

Metoda ICA ma też inne ograniczenia. Szczególnie problematyczna jest sytuacja, gdy źródła sygnałów EEG i EOG nie dają się reprezentować przez odrębne składowe niezależne. Dlatego też szuka się innych podejść do tego problemu. Wyniki badań pokazują, że lepsze wyniki uzyskać można łącząc metodę ICA z innymi metodami, takimi jak Auto-Regressive eXogenous (ARX) [39]. Takie podejście umożliwia budowę modelu sygnału EEG w oparciu zarówno o sygnały otrzymane po korekcji artefaktów metodą ICA jak i oryginalne referencyjne sygnały EEG. Umożliwia to niwelowanie negatywnego wpływu metody ICA na jakość wyjściowego sygnału EEG.

3.2. Artefakty mięśniowe

Artefakty mięśniowe [2, 11, 13] to jedne z najbardziej istotnych zaburzeń sygnału EEG widocznych jako wysokoczęstotliwościowa składowa sygnału w dziedzinie czasu i jako zaburzenie pasm beta i gamma w widmie częstotliwościowym. W porównaniu do analiz artefaktów związanych z ruchem oka istnieje niewiele prac badawczych dedykowanych artefaktom mięśniowym. Jeszcze mniejsze zainteresowanie (ok. 3% prac poświęconych korekcji artefaktów) poświęcone jest automatycznej ich redukcji [11].

Najbardziej obiecujące wyniki detekcji i korekcji artefaktów mięśniowych dają metody oparte o analizę komponentową, które dekomponują wielokanałowe sygnały EEG. Do takich metod należą Blind Source Separation (BSS) [9], Independent Component Analysis (ICA) [19, 26, 27, 28, 35] oraz Principle Component Analysis (PCA). Zastosowanie tych metod umożliwia identyfikację elementów mięśniowych sygnału, dzięki czemu możliwa jest rekonstrukcja oczyszczonego sygnału EEG. W literaturze spotkać można różne modyfikacje oraz połączenia wyżej wymienionych metod. Przykładem może być metoda BSS-ICA [9] wykorzystująca jako kryterium metodę Canonical Correlation Analysis (CCA). Metody te jednak wymagają dużych ilości danych aby ich wyniki mogły być uznane za wiarygodne. W szczególności długość analizowanego sygnału powinna być co najmniej dziesięciokrotnością kwadratu liczby kanałów, aby mogła być przeprowadzona dekompozycja ICA [28].

Wykorzystanie wspomnianych metod wymaga ręcznej, wizualnej oceny wykrytych składowych mięśniowych, szczególnie tych o najniższych rangach. Na ocenie wizualnej oparte są również inne metody [19].

3.3. Artefakty złożone

Poza metodami dedykowanymi korekcji pojedynczych rodzajów artefaktów istnieją też rozwiązania dedykowane jednoczesnej korekcji różnego rodzaju artefaktów. Tego typu analizy wykorzystują często odpowiednio zintegrowane grupy metod i oparte są zwykle na wieloetapowych obliczeniach obejmujących [36]:

- Separacja źródła sygnału (ang. *Source separation*). Najpopularniejszą metodą tego typu wykorzystywaną w badaniach jest metoda BSS (Blind Source Separation), która zakłada niezależność źródeł sygnału EEG oraz powstałych artefaktów. W ostatnich latach powstało wiele metod tego typu. Działają one przede wszystkim w oparciu o metody typu HOS (High Order Statistics) lub też we współpracy z metodami takimi jak ICA lub SOS (Second Order Statistics) [6, 15]. Metody te sprawdzają się dobrze nawet w przypadku źródeł o strukturach złożonych [20, 21, 32, 34]. Przykładem tak działającego algorytmu jest SOBI [3] oparty o macierze kowariancji wyliczone dla mierzonych sygnałów.
- Ekstrakcja cech. Po separacji identyfikację źródeł artefaktów można przeprowadzić wizualnie [29] ale takie podejście nie jest wydajne ani praktyczne. Nowoczesne metody realizują automatyczną identyfikację źródeł artefaktów automatycznej. Metody te funkcjonują dwuetapowo. Etap pierwszy polega na wyodrębnieniu z danych cech, które będą uwzględnione

Метод ICA має й інші обмеження. Особливо проблематичною є ситуація, коли джерела сигналів ЕЕГ і очей не можуть бути представлені, як окремі незалежні складові. Тому триває пошук альтернативних підходів до вирішення цієї проблеми. Дослідження показують, що кращі результати можуть бути досягнуті шляхом об'єднання методів ICA з іншими методами, такими як Auto-Regressive Xogenous (ARX) [39]. Такий підхід дозволяє побудувати модель сигналу ЕЕГ на основі обох сигналів, отриманих після корекції артефактів методом ICA, як і оригінальні референційні сигналіи ЕЕГ. Це дає можливість виключити негативний вплив методу ICA на якість сигналу ЕЕГ.

3.2. М'язові артефакти

М'язові артефакти [2, 11, 13] є одними з найбільш важливих розладів сигналу ЕЕГ, що показують сигнал високочастотної складової в області часу, і як розлад бета і гамма діапазонів спектру частот. У порівнянні з аналізом артефактів, пов'язаних з рухом очей, є невелика кількість досліджень, присвячене м'язовим артефактам. Ще менший інтерес (бл. 3% робіт, описують корекцію цих артефактів) присвячений автоматичній їх редукції [11].

Найбільш багатообіцяючі результати для виявлення і корекції м'язових артефактів забезпечують методи, засновані на аналізі компонентів, які розчеплюють багатоканальні сигнали ЕЕГ. До таких методів належать Blind Source Separation (BSS) [9],], Independent Component Analysis (ICA) [19, 26, 27, 28, 35] і Principle Component Analysis (PCA). Використання цих методів дозволяє ідентифікувати елементи сигналу м'язів, тим самим дозволяючи реконструкцію очищеної ЕЕГ. У літературі можна зустріти різні модифікації та комбінації зазначених вище способів. Прикладом може бути метод BSS-ICA [9] використовується, як критерій методу Canonical Correlation Analysis (CCA). Тим не менше, ці методи вимагають великих обсягів даних, щоб їх результати можна було вважати надійними. Зокрема, довжина аналізованого сигналу повинна бути, принаймні в десять разів збільшити квадрат числа каналів, щоб можна було проводити метод ICA [28].

Використання цих методів вимагає візуальної оцінки ідентифікованих компонентів м'язів, особливо з низьким рівнем. На візуальній оцінці опираються і інші методи [19].

3.3. Складені артефакти

Поза методами корекції окремих видів артефактів, є рішення, присвячені одночасній корекції всіх видів артефактів. Для цього типу аналізування часто використовують відповідно зінтегровані групи методів, які опираються на багатоступеневих розрахунках [36]:

- Поділ джерела сигналу (анг. *Source separation*). Найбільш поширеним методом, який використовується в цьому типі досліджень є метод BSS (Blind Source Separation), який передбачає незалежність джерел сигналу ЕЕГ і артефактів. В останні роки зросла кількість методів цього типу. Вони діють в першу чергу на основі методу типу HOS (High Order Statistics) або в поєднанні з такими методами, як ICA або SOS (Second Order Statistics) [6, 15]. Ці методи працюють добре, навіть при складених структурах [20, 21, 32, 34]. Прикладом такої дії є алгоритм SOBI [3] працює на основі коваріаційних матриць, які обчислені для виміряних сигналів.
- Екстракція характеристик. Ідентифікацію джерел артефактів можна зробити візуально [29], але цей підхід не є ефективним і практичним. Сучасні методи виконують автоматичну ідентифікацію джерел автоматичних артефактів. Ці методи працюють у два етапи. Перший етап полягає у витяганні особливостей даних, які будуть включені на другому етапі класифікації. Є цілий ряд

w drugim etapie - klasyfikacji. Istnieje cały szereg metod wykorzystywanych do ekstrakcji cech. Podzielić je można na następujące grupy [36]:

- Parametry i własności statystyczne. Do grupy tej należą: kurtoza, entropia, trendy i wartości odstające. Kurtoza wykorzystywana do detekcji rozkładów charakterystycznych dla określonych rodzajów artefaktów, entropii używa się do identyfikacji sygnałów skoncentrowanych występujących w małych odstępach czasowych (zwykle artefaktów) [10, 14].
- Sygnały wzorcowe. Jeśli jest to możliwe, wykorzystuje się zmierzone artefakty (EOG, EKG) jako sygnały wzorcowe. W badaniach [15, 23, 24, 30, 33, 38] widoczna jest wysoka korelacja zaszumionych sygnałów EEG z takimi wzorcami [41].
- Charakterystyki częstotliwościowe. Źródła mogą być opisane za pomocą energii zawartej w różnych pasmach częstotliwości [23, 32].
- Charakterystyki przestrzenne. Wyodrębnione cechy są integrowane z topografią głowy, co umożliwia sprawdzenie pochodzenia biologicznego sygnałów [24, 32].

- Klasyfikacja. Wyodrębnione cechy mogą zostać wykorzystane w procesie klasyfikacji, w którym konkretne źródła oznaczane są jako artefakty na podstawie wcześniej określonych wartości progowych. Najczęściej wykorzystywanymi klasyfikatorami są klasyfikator Bayesa liniowy lub kwadratowy oparty o analizę dyskryminacyjną [32] lub też maszynę wektorów nośnych (Support Vector Machines) [33].

4. Podsumowanie

Istnieje wiele rodzajów artefaktów w sygnałach EEG. Wszystkie poważnie zaburzają odczyt i utrudniają analizę danych. Niektóre z nich mogą zostać wyeliminowane przez właściwie przygotowany sprzęt i badanie. Wielu z nich jednak, szczególnie artefaktów pochodzenia biologicznego, nie da się uniknąć. W artykule przedstawiono przegląd najnowszych metod dedykowanych wykrywaniu i korekcji różnego rodzaju artefaktów, w szczególności artefaktów mięśniowych oraz ocznych.

Podziękowania

Praca powstała w ramach projektu *PL-NTU Transgraniczna wymiana doświadczeń* PBU.03.01.00-06-386/11-00 współfinansowanego w ramach Programu Współpracy Transgranicznej Polska-Białoruś-Ukraina 2007-2013 finansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Instrumentu Sąsiedztwa i Partnerstwa.

Niniejsza publikacja została stworzona przy pomocy Unii Europejskiej. Wyłączną odpowiedzialność za zawartość niniejszej publikacji ponosi Małgorzata Plechawska-Wójcik oraz w żaden sposób nie może być ona postrzegana jako odzwierciedlenie poglądów Unii Europejskiej.

- Параметри і статистичні властивості. Ця група включає в себе: куртозу, ентропію, тенденції та викиди. Куртоза використовується для виявлення характерних розподілів для окремих видів артефактів, ентропія використовується для ідентифікації сигналів, які зустрічаються на невеликих часових інтервалах (як правило, артефактів) [10, 14].
- Опорні сигнали. Якщо це можливо, то використовуються при вимірюванні артефактів (ЕКГ) в якості опорного сигналу. У дослідженнях [15, 23, 24, 30, 33, 38] видно високу кореляцію зашумлених сигналів ЕЕГ з такими сигналами [41].
- Частотні характеристики. Сигнали можна описати з використанням енергії, що міститься в різних частотних діапазонах [23, 32].
- Просторові характеристики. Виокремлені характеристики інтегрують з томографією голови, що дозволяє перевірити сигнали біологічного походження [24, 32].

- Класифікація. Виокремлені ознаки можуть бути використані в процесі класифікації, де конкретні сигнали визначені, як артефакти на основі заданих порогових значень. Найбільш поширеним є класифікатор Bayesa лінійний або квадратичний в основі якого дискримінантний аналіз [32], або пристрій опорних векторів (Support Vector Machines) [33].

4. Висновок

Є багато типів артефактів у сигналах ЕЕГ, які перешкоджають відчитувати і аналізувати дані. Деякі з них можуть бути усунені за допомогою правильно налаштованого обладнання. Однак, багато артефактів, особливо біологічного походження не вдасться уникнути. В даній статті розглядаються сучасні методи виявлення і корекції різних типів артефактів, зокрема артефактів м'язів та очей.

Завдяки

Робота створена в рамках проекту ПЛ-НТУ Транскордонний обмін досвідом PBU.03.01.00-06-386/11-00, співфінансованого в рамках Програми Транскордонного Співробітництва Польща-Білорусь-Україна 2007-2013, що фінансується Європейським Союзом в рамках Європейського Інструменту Сусідства та Партнерства.

Ця публікація була створена за допомогою Європейського Союзу. Відповідальність за зміст цієї публікації лежить на Малгожаті Плехавській-Вуйцік, і жодним чином не може розглядатися як відображення поглядів Європейського Союзу.

Literatura || Література

[1] Barbati G., Porcaro C., Zappasodi F., Rossini P.M., Tecchio F.: Optimization of an independent component analysis approach for artifact identification and removal in magnetoencephalographic signals, Clin. Neurophysiol, 115, 2004, 1220–1232.
[2] Barlow JS.: Artifact processing (rejection and minimization) in EEG data processing. In: Lopes da Silva FH, Storm van Leeuwan W, Remond A, editors. Handbook of electroencephalography and clinical neurophysiology. Revised series 1986; vol. 2. Amsterdam: Elsevier; 1986, 15–62.
[3] Belouchrani A., Abed-Meraim K., Cardoso J., Moulines E.: A blind source separation technique using second-order statistics, IEEE Transactions on Signal Processing 45 (2), 1997, 434–444.
[4] Berg P., Scherg M.: A multiple source approach to the correction of eye artifacts. Electroencephalogr. Clin.Neurophysiol. 90, 1994, 229–241.
[5] Blinowska K., Kamiński M.: Multivariate Signal Analysis by Parametric Models. Handbook of Time Series Analysis. Björn Schelter, Matthias Winterhalder, Jens Timmer, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006, Weinheim.
[6] Cichocki A., Amari S.: Adaptive Blind Signal and Image Processing Learning Algorithms and Applications, John Wiley & Sons, New York, USA, 2002.
[7] Croft R.J., Barry R.J.: Removal of ocular artifact from the EEG: a review, Neuro physiol. Clin. 30, 2000, 5–19.
[8] Croft R.J., Barry R.J.: EOG correction: a new perspective, Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.107, 1998, 387–394.
[9] De Clercq W., Vergult A., Vanrumste B., Van Paesschen W., Van Huffel S.: Canonical correlation analysis applied to remove muscle artifacts from the electroencephalogram. IEEE Trans Biomed Eng 2006, 53:2583–7.
[10] Delorme A., Sejnowski T., Makeig S.: Enhanced detection of artifacts in EEG data using higher-order statistics and independent component analysis, NeuroImage 34, 2007, 1443–1449.
[11] Fatourechi M., Bashashati A., Ward RK., Birch GE.: EMG and EOG artifacts in brain computer interface systems: a survey. Clin Neurophysiol, 2007; 118:480–94.
[12] Frank R.M., Frishkoff G.A.: Automated protocol for evaluation of electromagnetic component separation (APECS): application of a framework for evaluating statistical methods of blink extraction from multichannel EEG, Clin. Neurophysiol. 118, 2007, 80–97.

[13] Goncharova II., McFarland DJ., Vaughan TM., Wolpaw JR.: EMG contamination of EEG: spectral and topographical characteristics. Clin Neurophysiol 2003; 114:1580–93.
[14] Greco A., Mammone N., Morabito F., Versaci M.: Kurtosis, Renyi's entropy and independent component scalp maps for the automatic artifact rejection from EEG data, International Journal of Signal Processing 2 (4), 2006, 240–244.
[15] James C., Gibson O.: Temporally constrained ICA: an application to artifact rejection in electromagnetic brain signal analysis, IEEE Transactions on Biomedical Engineering 50 (9), 2003, 1108–1116.
[16] Jervis B.W., Coelho M., Morgan G.W.: Effect on EEG responses of removing ocular artefacts byproportional EOG subtraction, Med. Biol. Eng. Comput 27, 1989, 484–490.
[17] Joyce C.A., Gorodnitsky I.F., Kutas M.: Automatic removal of eye movement and blink artifacts from EEG data using blind components eparation, Psychophysiology 41, 2004, 313–325.
[18] Jung TP., Humphries C., Lee T, Makeig S., McKeown M.J., Iragui V., Sejnowski T.J.: Extended ICA removes artifacts from electroencephalographic recordings, Adv. NeuralInform. Process. Syst. 10, 1998, 894–900.
[19] Jung TP., Makeig S., Humphries C., Lee TW., McKeown MJ., Iragui V., et al.: Removing electroencephalographic artifacts by blind source separation. Psychophysiology 2000, 37:163–78.
[20] Kierkels J., van Boxtel G., Vogten L.: A model-based objective evaluation of eye movement correction in EEG recordings, IEEE Transactions on Biomedical Engineering 53 (2), 2006, 246–253.
[21] Klemm M., Haueisen J., Ivanova G.: Independent component analysis: comparison of algorithms for the investigation of surface electrical brain activity, Medical & Biological Engineering & Computing 47, 2009, 413–423.
[22] Lei X., Yang P., Yao D.: An empirical Bayesian framework for brain–computer interfaces, IEEETrans.NeuralSyst.Rehabil.Eng.17, 2009, 521–529.
[23] LeVan P., Urrestarazu E., Gotman J.: A system for automatic artifact removal in ictal scalp EEG based on independent component analysis and Bayesian classification, Clinical Neurophysiology 117 (4), 2006, 912–927.
[24] Li Y., Ma Z., Lu W., Li Y.: Automatic removal of the eye blink artifact from EEG using an ICA-based template matching approach, Physiological Measurement, 27 (4), 2006, 425.
[25] Liu T., Yao D.: Removal of the ocular artifacts from EEG data using a cascaded spatio-temporal processing,Comput.MethodsProgr.Biomed. 83, 2006, 95–103.
[26] Ma J., Bayram S., Tao P., Svetnik V.: High-throughput ocular artifact reduction in multichannel electroencephalography (EEG) using component subspace projection. J. Neurosci. Meth. 2011, 196:131–40.
[27] Ma J., Tao P.,, Bayram S., Svetnik, V.: Muscle artifacts in multichannel EEG: Characteristics and reduction. Clinical Neurophysiology 123, 2012, 1676–1686.
[28] Makeig S., Bell AJ., Jung TP., Sejnowski TJ.: Independent component analysis of electroencephalographic data. In: Advances in neural information processing systems. Cambridge, Mass: MIT Press 1996, 8:145–51.
[29] Melissant C., Ypma A., Frietman E., Stam C.: A method for detection of Alzheimer's disease using ICA-enhanced EEG measurements, Artificial Intelligence in Medicine 33 (3), 2005, 209–222.
[30] Nicolaou N., Nasuto S.: Automatic artefact removal from event-related potentials via clustering, Journal of VLSI Signal Processing 48 (1), 2007, 173–183.
[31] Qin Y., Xu P., Yao D.: A comparative study of different references for EEG default mode network: the use of the infinity reference, Clin. Neurophysiol. 121, 2010, 1981–1991.
[32] Romero S., Mananas M., Barbanoj M.: A comparative study of automatic techniques for ocular artifact reduction in spontaneous EEG signals based on clinical target variables: a simulation case, Computers in Biology and Medicine 38 (3), 2008, 348–360.
[33] Shao S., Shen K., Ong C., Wilder-Smith E., Li X.: Automatic EEG artifact removal: a weighted support-vector-machine approach with error correction, IEEE Transactions on Biomedical Engineering 56 (2), 2009, 336–344.
[34] Ting K., Fung P., Chang C., Chan F.: Automatic correction of artifact from singletrial event-related potentials by blind source separation using second order statistics only, Medical Engineering and Physics 28 (8), 2006, 780–794.
[35] Urrestarazu E., Iriarte J., Alegre M., Valencia M., Viteri C., Artieda J.: Independent component analysis removing artifacts in ictal recordings. Epilepsia 2004, 45:1071–8.
[36] Vázquez R., Vélez-Péreza, H., Rantab R., Dorr V., Maquin D., Maillard L.: Blind source separation, wavelet denoising and discriminant analysis for EEG artefacts and noise cancelling. Biomedical Signal Processing and Control 7, 2012, 389–400
[37] Vigario R.N.: Extraction of ocular artefacts from EEG using independent component analysis, Electroencephalogr.Clin.Neurophysiol.103, 1997, 395–404.
[38] Wallstrom G., Kass R., Miller A., Cohn J., Fox N.: Automatic correction of ocular artifacts in the EEG: a comparison of regression-based and component-based methods, International Journal of Psychophysiology 53 (2), 2004, 105–119.
[39] Wang Z., Peng X., TieJun L., Yin T., Xu L., DeZhong Y.: Robust removal of ocular artifacts by combining Independent Component Analysis and system identification. Biomedical Signal Processing and Control,10, 2014, 250–259.
[40] Żygierewicz J., Malinowska U., Suffczyński P., Piotrowski T., Durka P.: Event-related desynchronization and synchronization in evoked K-complexes. Acta Neurobiologiae Experimentalis, 69, 2009, 254-261.
[41] Żygierewicz J., Mazurkiewicz J., Durka P., Franaszczuk P., Crone N.: Estimation of short-time cross-correlation between frequency bands of event related EEG. Journal Of Neuroscience Methods, 157, 2, 2006, 294-302.

Dr inż. Małgorzata Plechawska-Wójcik
e-mail: m.plechawska@pollub.pl

Małgorzata Plechawska-Wójcik pracuje jako adiunkt w Instytucie Informatyki WEiI Politechniki Lubelskiej. Tytuł doktora nauk technicznych w dyscyplinie Informatyka otrzymała w roku 2011 na Politechnice Śląskiej.
Jej zainteresowania naukowe obejmują bioinformatykę, analizę danych biomedycznych, analizę sygnałów EEG oraz nowoczesne interfejsy człowiek-komputer.

К.т.н. інж. Малгожата Плехавська-Ву йцік
e-mail: m.plechawska@pollub.pl

Малгожата Плехавська-Вуйцік працює лектором в Інституті інформатики Люблінської Політехніки. Ступінь К.т.н. в дисципліні інформатики в 2011році отримала в Шльонській Політехніці.
Її наукові інтереси включають біоінформатику, біомедичний аналіз даних, аналіз сигналів ЕЕГ і сучасні інтерфейси людина-комп'ютер.

otrzymano/отримано/received: 04.03.2015 *przyjęto do druku/прийнято до друку/accepted: 15.03.2015*

PL-BY-UA 2007-2013

Współfinansowane ze środków Unii Europejskiej

DOI: 10.5604/20830157.1159330

WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNE NANOKOMPOZYTÓW $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ WYTWORZONYCH ROZPYLANIEM WIĄZKĄ ARGONU I TLENU JAKO UKŁADY KONDENSATOROWE

Konrad Kierczyński, Tomasz Norbert Kołtunowicz
Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Techniki Wysokich Napięć

Streszczenie. *W pracy przedstawiono wyniki pomiarów określających właściwości elektryczne nanokompozytów $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ wytworzonych przy użyciu metody rozpylania jonowego. Do badań wykorzystano próbki wykonane jako kondensatorowy układ pomiarowy w celu zmniejszenia wpływu rezystancji badanej próbki. Określono temperaturowe i częstotliwościowe zależności pojemności, konduktancji, kąta stratności i kąta przesunięcia fazowego. Pomiary wykonano przy użyciu prądu zmiennego o częstotliwości z przedziału od 42 Hz do 1 MHz w temperaturach z zakresu od 77 K do 373 K.*

Słowa kluczowe: nanokompozyty, właściwości elektryczne, układ kondensatorowy

ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОКОМПОЗИТІВ $(FECOZR)_X(AL_2O_3)_{(100-X)}$ В КОНДЕНСАТОРНІЙ СИСТЕМІ УТВОРЕНИХ РОЗПИЛЕННЯМ АРГОНУ І КИСНЮ

Анотація. *У роботі представлені результати вимірювань електричних властивостей нанокомпозитів $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$, отриманих за допомогою методу іонного розпилення. У дослідженні були використані зразки, виконані у вигляді конденсаторної вимірювальної системи, щоб зменшити вплив опору досліджуваного зразка. Визначено температурні і частотні залежності ємності, провідності, кута діелектричних втрат і фазового кута. Вимірювання проводилися з використанням змінного струму в діапазоні частот від 42 Гц до 1 МГц в межах температур від 77 К до 373 К.*

Ключові слова: нанокомпозити, електричні властивості, конденсатор системи

ELECTRICAL PROPERTIES OF $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ NANOCOMPOSITES PRODUCED BY SPUTTERING OF ARGON AND OXYGEN BEAM AS CAPACITOR SYSTEMS

Abstract. *The paper presents the results of measurements which determine the electrical properties of nanocomposites $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ which were produced using the ion-sputtering. In the research samples, which were made as capacitor measurement system, were used to reduce the impact of resistance of the sample. Temperature and frequency dependence on capacity, conductance, loss angle and phase angle were determined. Measurements were performed using alternating current at a frequency range from 42 Hz to 1 MHz at temperatures range from 77 K to 373 K.*

Keywords: nanocomposites, electrical properties, capacitor system

Wstęp

Od dłuższego czasu wiele uwagi poświęca się materiałom, których wymiary zbliżone są do wymiarów nanometrowych. Materiały takie nazywamy nanomateriałami. Wiele ośrodków naukowo-badawczych na całym świecie wierzy, że materiały te mogą zmienić wiele dziedzin życia. Wielkie znaczenie naukowe jak i praktyczne mają również badania mające na celu określenie ich właściwości elektrycznych, magnetycznych, mechanicznych i wielu innych. Właściwości tych materiałów zależą w dużym stopniu od wielkości ziaren oraz ich połączeń tworzących całą strukturę materiału, jak również od właściwości stopów elementów, z których zostały wykonane oraz stosunek fazy metalicznej *x* do fazy dielektrycznej (100-*x*).

Bardzo ciekawe pod tym względem są nanokompozyty, w których ziarna metalu wielkości kilku nanometrów znajdują się w matrycy z materiału izolacyjnego. Materiały o wymiarach mikro i milimetrowych posiadają szereg różnych właściwości fizyko-chemicznych.

Ze względu na bardzo interesujące właściwości magnetyczne oraz elektryczne takie jak dodatkowa termicznie aktywowana polaryzacja w materiałach o przewodzeniu elektrycznym materiały te mogą znaleźć zastosowanie w technice.

We wcześniejszych pracach dotyczących nanokompozytów wytwarzanych przez rozpylanie za pomocą wiązki czystego argonu [2, 7] oraz kombinowanej wiązki argonu i tlenu [4, 8] przedstawiono częstotliwościowe zależności konduktywności σ oraz wpływu wygrzewania na właściwości elektryczne. Model przewodnictwa skokowego i jego eksperymentalną weryfikacja na prądzie przemiennym i stałym zostały przedstawione w pracach [1, 3, 5].

Вступ

Протягом довгого часу, багато уваги приділяється матеріалам, розміри яких наближені до нанометрових. Такі матеріали називаються наноматеріалами. Багато науково-дослідних центрів по всьому світу вважають, що ці матеріали можуть змінити різні сфери життя. Велике наукове і практичне значення мають дослідження пов'язані з визначенням їх електричних властивостей, а також магнітних, механічних та інших. Властивості цих матеріалів багато в чому залежить від розміру зерен і їх зв'язків, які формують всю структуру матеріалу, а також від властивостей сплаву елементів з яких були виготовлені, а також співвідношення металевої фази *x* до діелектричної фази (100-*x*).

Цікавими у цьому відношенні є нанокомпозити, в яких зерна металу, розміром в декілька нанометрів, знаходяться в матриці з ізоляційного матеріалу. Матеріали мікро і міліметрових розмірів мають ряд різних фізико-хімічних властивостей.

З погляду на цікаві магнітні та електричні властивості, такі як додаткова теплова активована поляризація в електропровідних матеріалах, ці матеріали можуть знайти застосування в техніці.

У попередніх роботах, які стосувалися нанокомпозитів, що отримані шляхом розпилення за допомогою в'язки чистого аргону [2, 7], а також комбінованих в'язки аргону і кисню [4, 8] показано частотну залежність провідності σ і вплив відпалювання на електричні властивості. Модель стрибкової провідності і її експериментальна верифікація на змінному і постійному струмі наведені в роботах [1, 3, 5].

Jak wiadomo z prac [2, 4, 7, 8] w nanokompozytach metal-dielektryk, w zależności od zawartości fazy metalicznej x i progu perkolacji x_c, występują różne mechanizmy przewodzenia. Obserwowany wzrost konduktywności wraz ze wzrostem temperatury świadczy o występowaniu w nanokompozycie przewodzenia typu „dielektrycznego". Zawartość fazy metalicznej w tym przypadku jest mniejsza od progu perkolacji ($x < x_c$). Obniżenie konduktywności wraz ze wzrostem temperatury pomiarowej świadczy o tym, że w nanokompozycie mamy do czynienia z przewodzeniem typowym dla metali. Dla tego przypadku zawartość fazy metalicznej w nanokompozycie jest większa od progu perkolacji ($x \geq x_c$). Gdy wartość fazy metalicznej x przekroczy wartość progu perkolacji x_c zachodzi zmiana mechanizmu przewodzenia z dielektrycznego na metaliczny. Zmiany te zaobserwowano w nanokompozytach $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ wytworzonych rozpylaniem złożonej tarczy ze stopu metali i dielektryka wiązką składającą się z jonów argonu [7].

Materiały wybrane do badań wykonane są jako kondensatorowy układ pomiarowy w celu zmniejszenia wpływu rezystancji badanej próbki. Zawierają one nanostruktury i są nanokompozytami składającymi się z nanocząsteczek fazy metalicznej na bazie żelaza i kobaltu $Fe_{45}Co_{45}Zr_{10}$, które są losowo rozmieszczone w matrycy dielektrycznej z Al_2O_3.

Celem pracy było przedstawienie wyników pomiarów kondensatorowego układu, w którym rolę dielektryka pełnią warstwy nanokompozytu $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ wytworzonego metodą rozpylania jonowego w atmosferze mieszaniny gazów argonu i tlenu. Określono temperaturowe i częstotliwościowe zależności pojemności, konduktancji, tangensa kąta strat dielektrycznych oraz kąta przesunięcia fazowego dla nanokompozytu o zawartościach fazy metalicznej x = 82,28 at.%.

1. Sposób wytwarzania nanokompozytów $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$

Metodą, którą wytworzono nanokompozyty o strukturze metal-dielektryk jest metoda dwuźródłowego rozpylania jonowego dwóch jednakowych tarcz. Paski dielektryka Al_2O_3 przymocowane do płytki ze stopu metalu $Co_{45}Fe_{45}Zr_{10}$ tworzą tarczę (rys. 1), której ukształtowanie pozwala wykonać cienkie warstwy nanokompozytu o grubości od 1 do 6 μm o różnym stosunku fazy metalicznej do dielektrycznej.

Metalowy stop wykonano w próżni z wykorzystaniem pieca indukcyjnego łącząc czyste kobalt (99,98 %), żelazo (99,9 %) oraz cyrkon (99,8 %) o składzie atomowym Co_{45}, Fe_{45} i Zr_{10}. Płytki tlenku aluminium miały grubość 2 mm i szerokość 9mm. Rozmieszczone w odległości od 3mm na jednym brzegu tarczy do 24 mm na drugim. Zmiana odległości między nimi wpływała na zmianę stosunku pomiędzy objętością metalu i dielektryka, co dawało możliwość zmiany składu kompozytu.

Przy rozpyleniu dwóch tarcz na obracającym się podłożu równocześnie osadzane były atomy obu komponentów. Składnik metaliczny, ze względu na większą wartość energii powierzchniowej, będzie formował się jako ziarna o kształcie bliskim do kulistego. Dzięki temu powstają struktury składające się z nanoziaren metalicznych rozmieszczonych losowo w matrycy dielektrycznej.

Як відомо з робіт [2, 4, 7, 8] в нанокомпозитах метал-діелектрик, залежно від вмісту металевої фази x і порога перколяції x_c, існують різні механізми провідності. Збільшення провідності разом зі зростом температури вказує на те, що в нанокомпозиті має місце "діелектрична" провідність. Вміст металевої фази в цьому випадку менший, ніж поріг перколяції ($x < x_c$). Зменшення провідності при підвищенні температури вимірювання показує, що нанокомпозит має тип провідності характерний для металів. У цьому випадку, вміст металевої фази в нанокомпозиті більший порога перколяції ($x \geq x_c$). Коли вміст металевої фази x перевищує значення порогу перколяції x_c відбувається зміна механізму провідності з діелектричної на металічну. Ці зміни спостерігалися в нанокомпозитах $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ утворених розпиленням складної мішені зі сплаву металів і діелектрика в'язкою яка складається з іонів аргону [7].

Матеріали, вибрані для випробувань виконані у вигляді конденсаторної вимірювальної системи, щоб зменшити опір досліджуваного зразка. Вони включають в себе наноструктури і є нанокомпозитами, що складаються з наночастинок металевої фази на основі заліза і кобальту $Fe_{45}Co_{45}Zr_{10}$, які випадковим чином розподілені в діелектричній матриці Al_2O_3.

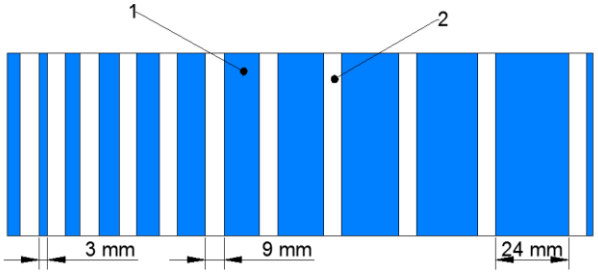
Метою дослідження було представлення результатів вимірювань конденсаторної системи, в якій в якості діелектрика використаний шар нанокомпозиту $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ отриманого шляхом розпилення в атмосфері газової суміші аргону і кисню. Визначено температурні і частотні залежності ємності, провідності, тангенса кута діелектичних втрат і кута зсуву фаз нанокомпозиту з вмістом металевої фази x = 82,28 ат.%.

1. Спосіб отримання нанокомпозитів $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$

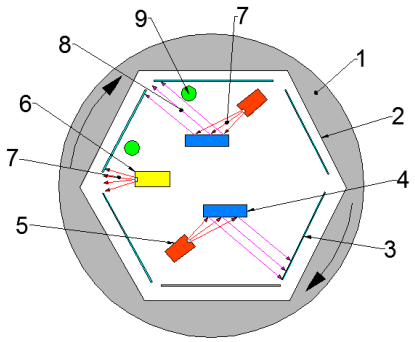
Спосіб, яким було отримано нанокомпозити зі структурою метал-діелектрик є способом іонного напилення двох однакових мішеней. Пластини діелектрика Al_2O_3, прикріплені до металевого сплаву $Co_{45}Fe_{45}Zr_{10}$ утворюють мішень (рис. 1), форма якої дозволяє створювати плівки нанокомпозиту, що мають товщину від 1 до 6 мкм з різним співвідношенням металевої фази до діелектрика.

Металевий сплав створений у вакуумі з використанням індукційної печі поєднуючи чистий кобальт (99,98%), залізо (99,9%) і цирконій (99,8%) з атомним складом Co_{45}, Fe_{45} і Zr_{10}. Пластини оксиду алюмінію мають товщину 2 мм і ширину 9мм. Розташовані на відстані від 3мм з одного кінця пластини і до 24 мм, з іншого. Зміна відстані між ними впливає на зміну співвідношення між вмістом металу і діелектрика, що дає можливість змінювати склад композиту.

При розпиленні двох мішеней на обертову підкладку одночасно осаджувались атоми двох компонентів. Металевий компонент через більш високе значення поверхневої енергії був сформований, як зерна близькі до сферичної форми. Завдяки цьому утворюються структури, що складаються з металевих нанозерен розподілених випадковим чином в діелектричній матриці.



Rys. 1. Widok rozpylanej tarczy składającej się ze stopu metalu $Fe_{45}Co_{45}Zr_{10}$ (1) oraz z płytek z tlenku aluminium Al_2O_3 (2)
Рис. 1. Форма розпилюваної мішені, що складається з металевого сплаву $Fe_{45}Co_{45}Zr_{10}$ (1) і пластинок з оксиду алюмінію Al_2O_3 (2)



Rys. 2. Widok z góry części stanowiska do dwuźródłowego rozpylania jonowego [6]: 1 – komora próżniowa; 2 – obracający się bęben do mocowania jednocześnie sześciu podłóż; 3 – podłoża dielektryczne, szklano-ceramiczne o rozmiarze 200 mm × 60 mm; 4 – rozpylane tarcze chłodzone bieżącą wodą; 5 – źródło jonowo-wiązkowego rozpylania; 6 – źródło do jonowego oczyszczania podłóż; 7 – strumienie jonów z gazem (argon lub argon i tlen); 8 – strumienie rozpylanych atomów; 9 – źródła elektronów tzw. kompensatory

Рис. 2. Вигляд зверху частини пристрою до двухджерельного розпилення [6]: 1 – вакуумна камера; 2 – обертовий барабан для закріплення одразу шести підкладок; 3 – діелектрична підкладка, скляно-керамічна розміром 200 мм × 60 мм; 4 – розпилювані мішені охолоджувані водою; 5 – джерело іонно-пучкового розпилення; 6 – джерело для іонного очищення підкладок; 7 – струмінь іонів з газом (аргон або аргон і кисень); 8 – струмені розпилюваних атомів; 9 – джерела електронів, так звані компенсатори

Rysunek 2 przestawia widok z góry stanowiska do źródłowego rozpylania jonowego. Dwa źródła jonowo-wiązkowego rozpylania (*5*) służą do rozpylania materiału, z którego wykonana jest tarcza (*4*). Trzecie źródło (*6*) wspólnie ze źródłami elektronów (*7*) służą do oczyszczania podłoża. Wszystkie elementy zamontowane są w komorze próżniowej (*1*). (*2*) obraca się z prędkością do 2 obr./min. w komorze próżniowej (*1*), a na jego zewnętrznej części rozmieszczono sześć sztuk szklano-ceramicznych podłóż (*3*) o wymiarach 200 mm × 60 mm każde. Ze źródła jonowo-wiązkowego rozpylania (*5*) strumienie jonów argonu i tlenu (*8*) padają na tarczę wybijając z niej atomy metalu i dielektryka tworząc strumień atomów (*8*), który tworzy warstwę nanokompozytu $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$. W celu eliminacji dodatniego potencjału, który pojawia się podczas rozpylania materiałów dielektrycznych na powierzchni podłoża izolacyjnego zastosowano źródło intensywnego promieniowania elektronowego (*9*) do rozładowania podłóż.

Aby uzyskać materiały o różnych zawartościach fazy metalicznej należy zmienić parametry osadzania, ciśnienie gazów technologicznych (argonu lub argonu z tlenem) oraz prędkość obrotu podłóż.

Do wytworzenia próbek nanokompozytu $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ do źródła doprowadzana była mieszanina argonu z tlenem o ciśnieniu $9{,}6\cdot10^{-2}$ Pa przy ciśnieniu tlenu $4{,}41\cdot10^{-2}$ Pa.

Analizator promieni rentgenowskich w skaningowym mikroskopie elektronowym LEO 1455VP pozwolił na określenie stężenia składników w wytworzonym nanokompozycie z błędem mniejszym niż 1%. Grubości cienkich warstw w przybliżeniu określone były za pomocą SEM na powierzchni wytworzonej próbki z błędem nie większym niż 3 – 4%. Całkowity błąd nie przekroczył 5%.

2. Pomiary

Pomiar parametrów oraz badanie właściwości elektrycznych materiałów można przeprowadzić za pomocą urządzeń wykorzystujących prąd stały jak i prąd przemienny. Stanowisko do badań częstotliwościowo-temperaturowych zależności znajdujące się w laboratorium Katedry Urządzeń Elektrycznych i Techniki Wysokich Napięć Politechniki Lubelskiej i umożliwia przeprowadzenie badań właściwości elektrycznych nanokompozytów $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$. Wykorzystanie prądu zmiennego do badań parametrów elektrycznych pozwala na określenie wielu istotnych parametrów, takich jak pojemność, konduktancja, konduktywność, kąt stratności dielektrycznej czy kąt przesunięcia fazowego w funkcji częstotliwości.

Pomiary właściwości elektro-fizycznych przy napięciu zmiennym w szerokim zakresie częstotliwości pozwalają uzyskać dodatkowe informacje o mechanizmie przenoszenia ładunku. W przypadku zwykłego przewodnictwa w jednym z pasm

Рисунок 2 представляє вид зверху пристрою для іонного розпилення. Два джерела іонно-пучкового розпилення (5) використовуються для розпилення матеріалу, з якого зроблена мішень(4). Третє джерело (6) разом з джерелами електронів (7) використовується для очищення підкладки. Всі компоненти закріплені у вакуумній камері (1).

Барабан (2) обертається зі швидкістю 2 об./хв. у вакуумній камері (1), і на його внутрішній стороні розташовані шість скляно-керамічних підкладок (3) розміром 200 мм × 60 мм кожна. З джерела іонно-пучкового розпилення (5) струмені іонів аргону і кисню (8) потрапляють на мішень вибиваючи з неї атоми металу і діелектрика утворюючи струмінь атомів (8), який утворює шар нанокомпозиту $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$. З метою усунення додатнього потенціалу, який з'являється під час розпилення діелектричних матеріалів на поверхні ізоляційної підкладки застосовується джерело інтенсивного електронного випромінювання (9) для розрядження підкладок.

Щоб отримати матеріали з різним вмістом металічної фази потрібно змінити параметри осадження, тиск технологічних газів (аргону або аргону з киснем) і швидкість обертання підкладок.

Для утворення зразків нанокомпозиту $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ до джерела подавалась суміш аргону і кисню під тиском $9{,}6\cdot10^{-2}$ Па при тиску кисню $4{,}41\cdot10^{-2}$ Па.

Аналізатор рентгенівських променів в скануючому електронному мікроскопі LEO 1455VP дозволив визначити концентрації компонентів в отриманому нанокомпозиті з похибкою меншою ніж 1%. Товщина тонких шарів в наближені була визначена за допомогою SEM на поверхні отриманого зразка з похибкою не більше 3 - 4%. Сумарна похибка не більше ніж 5%.

2. Вимірювання

Вимірювання параметрів і вивчення електричних властивостей матеріалів можна виконати за допомогою пристроїв, що використовують постійний і змінний струм. Установка для досліджень частотно-температурних залежностей, знаходиться в лабораторії кафедри електричних приладів і технологій високої напруги Люблінської Політехніки і дозволяє досліджувати електричні властивостей нанокомпозитів $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$. Використання змінного струму для вимірювання електричних параметрів дозволяє визначити ряд важливих параметрів, таких як ємність, провідність, кондуктивність, кут діелектричних втрат, кут зсуву фаз як функції частоти.

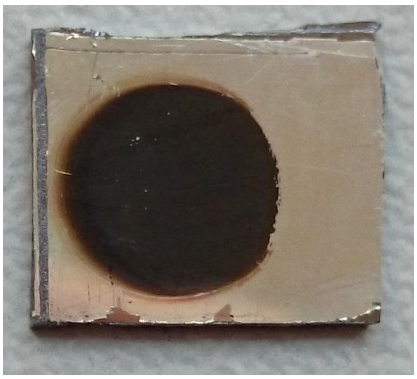
Вимірювання електрофізичних властивостей на змінній напрузі у широкому діапазоні частот дозволяє отримати додаткову інформацію про механізм переносу заряду. У випадку звиклої провідності в одній з дозволених зон немає

dozwolonych brak jest zależności częstotliwościowej, natomiast wzrost konduktywności wraz ze wzrostem częstotliwości obserwowany jest podczas skokowego przenoszenia ładunków.

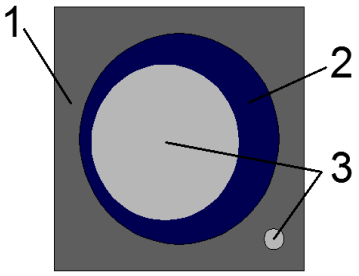
Widok z góry badanej próbki przedstawiony jest na rysunku 3.

частотної залежності, в той час, як збільшення провідності зі збільшенням частоти, спостерігається в ході стрибкового переміщення заряду.

Вид згори досліджуваного зразка показано на рисунку 3.



Rys. 3. Fotografia (widok z góry) badanej próbki kompozytu $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$
Рис. 3. Фото (вигляд зверху) досліджуваного зразка композиту $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$



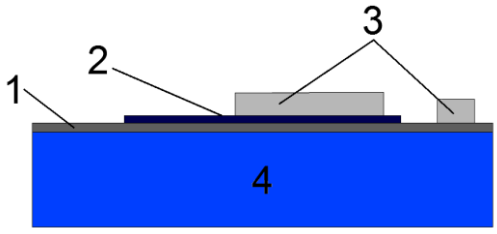
Rys. 4. Widok z góry próbki nanokompozytu $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$: 1 – cienka warstwa srebra; 2 – nanokompozyt $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$; 3 – styki z pasty srebrnej
Рис. 4. Вигляд згори зразоку нанокомпозиту $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$: 1 – тонкий шар срібла; 2 – нанокомпозит $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$; 3 – контакти з срібної пасти

Styki wykonano ze srebra o znikomo małej rezystancji w celu zwiększenie powierzchni styku oraz wyeliminowanie możliwości wystąpienia niekorzystnej sytuacji styku punktowego. Jeden styk umieszczono na materiale kompozytowym, drugi zaś na cienkiej warstwie srebra utworzonej pod warstwą kompozytu, tworząc w ten sposób kondensatorowy układ pomiarowy. Widok z góry oraz przekrój poprzeczny badanej próbki przedstawione są odpowiednio na rysunkach 4 i 5.

Pomiary właściwości elektrycznych $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ wykonywane były na stanowisku przy użyciu prądu zmiennego. Dokonano pomiaru takich parametrów elektrycznych jak: kąt przesunięcia fazowego θ, tangens kąta strat tgδ oraz pojemności C_p i rezystancji R_p w układzie zastępczym równoległym w przedziale temperatur od 77 K (temperatura ciekłego azotu) do 373 K z krokiem pomiarowym 5 K dla wybranych częstotliwości z zakresu od 42 Hz do 1 MHz.

Контакти виготовлені зі срібла з малим опором для того, щоб збільшити поверхню контакту і елімінувати можливість некорисного впливу на вимірювання їх опору в точці контакту. Один контакт був зроблений на композитному матеріалі, другий на тонкому шарі срібла, утвореного під шаром композиту, тим самим утворюючи конденсаторну систему вимірювання. Вигляд згори і поперечний переріз досліджуваного зразка представлені на рис. 4 і 5.

Вимірювання електричних властивостей $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ були виконані на установці з використанням змінного струму. Були виміряні електричні параметри, такі як, кут зсуву фаз θ, тангенс кута втрат tgδ, ємності C_p, і опору R_p в паралельній схемі заміщення в діапазоні від 77 К (температура рідкого азоту) до 373 К з кроком вимірювання 5 К для обраних частот в діапазоні від 42 Гц до 1 МГц.



Rys. 5. Przekrój poprzeczny badanych próbek kompozytu $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$: 1 – cienka warstwa srebra; 2 – nanokompozyt $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$; 3 – styki z pasty srebrnej; 4 – płytka krzemowa
Рис. 5. Поперечний переріз досліджуваних зразків композиту $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$: 1 – тонкий шар срібла; 2 – нанокомпозит $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$; 3 – контакти срібної пасти; 4 – пластина з кремнію

Do badań wybrano nanokompozyty metal-dielektryk wytworzone przy użyciu rozpylania wiązką mieszaniny jonów argonu i tlenu tarczy składającej się ze stopu $Fe_{45}Co_{45}Zr_{10}$ oraz pasków dielektryka Al_2O_3. Wytworzono próbki w postaci kondensatorów, gdzie dolna okładzina została wykonana z warstwy srebra, naparowanej próżniowo na podłoże z krzemu. Następnie na warstwę srebra metodą rozpylania jonowego

Для досліджень вибрані нанокомпозити метал-діелектрик отримані з використанням розпилення мішені пучком суміші іонів аргону і кисню, що складається зі сплаву $Fe_{45}Co_{45}Zr_{10}$ і смужок діелектрика Al_2O_3. Утворено зразки у вигляді конденсаторів, де нижній шар підкладки виконаний з шару срібла, шляхом напилення у вакуумі на кремнієву підкладку. Потім на шар зі срібла методом іонного розпилення нанесено

naniesiono nanokompozyty $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ o różnych zawartościach fazy metalicznej x w zakresie od 72,52 at.% do 89,74 at.%. Grubość warstwy nanokompozytu wynosiła około 1μm. Druga okładzina została wykonana z pasty srebrnej, naniesionej bezpośrednio na powierzchnię warstwy nanokompozytu. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów dla nanokompozytu o zawartości fazy metalicznej x = 82,28 at.%.

3. Wyniki pomiarów i ich omówienie

Rozdział ten przedstawia wyniki badań nanokompozytów metal-dielektryk $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ o zawartości fazy metalicznej x = 82,28at.% wytworzonego metodą jonowo wiązkowego rozpylania w atmosferze mieszaniny argonu i tlenu, polegających na określeniu częstotliwościowych i temperaturowych zależności pojemności, konduktancji, kąta stratności tgδ oraz kąta przesunięcia fazowego θ.

Próbki zmierzono dla częstotliwości z przedziału od 50 Hz do 1 MHz i temperatur pomiarowych z zakresu od 77 K (temperatura ciekłego azotu) do 323 K z krokiem 5 K.

Rysunek 6 przedstawia częstotliwościową zależność pojemności odpowiednio dla próbki $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ o zawartości fazy metalicznej x = 82,28 at.%. Zauważyć można, że dla niskich temperatur pomiarowych dla częstotliwości ok. 100 Hz widoczne są wyraźne minima, które wraz ze wzrostem temperatury pomiarowej staje się coraz mniejsze, a krzywe stają się coraz gładsze. Dla temperatury 293 K minimum to praktycznie zanika a charakterystyka w całym zakresie częstotliwości jest płaska. Dla częstotliwości, dla której widoczne jest wyraźnie minimum mamy do czynienia z występowaniem rezonansu napięć. Dla wyższych częstotliwości wartości pojemności oscylują w granicach poniżej 0,1 nF.

Na rysunku 7 przedstawiono częstotliwościowe zależności konduktancji, na których zauważyć można zmiany konduktancji w szerokim zakresie częstotliwości. Minima funkcji dla wszystkich wybranych temperatur pomiarowych „przesuwają się" w zakres niższych częstotliwości wraz ze wzrostem temperatury pomiarowej T_p. Wyjątkiem jest krzywa dla temperatury 293 K, gdzie nie dostrzeżemy żadnego minimum konduktancji. Dla częstotliwości dla których widoczne są minima konduktancji występuje rezonans prądów.

нанокомпозити $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ з різним вмістом металевої фази x в межах 72,52 ат.% до 89,74 ат.%. Товщина шару нанокомпозиту близько 1μm. Другий шар виконаний зі срібної пасти, нанесеної безпосередньо на поверхню нанокомпозитного шару. У роботі представлені результати вимірювань нанокомпозиту з вмістом металевої фази x = 82,28 ат.%.

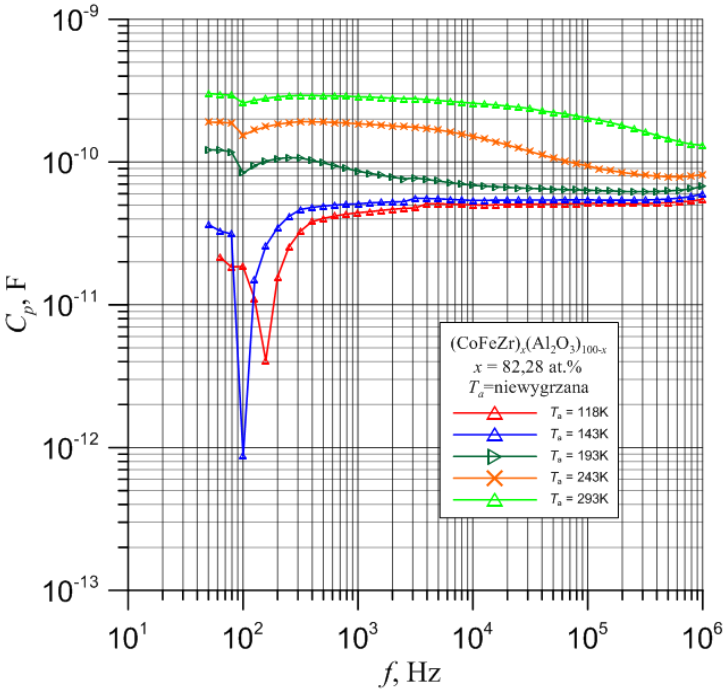
3. Результати вимірювань та їх обговорення

У цьому розділі представлені результати досліджень нанокомпозитів метал-діелектрик $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ з вмістом металевої фази x = 82,28ат.% утвореного методом іонно-пучкового розпилення в атмосфері суміші аргону і кисню, які полягають на визначенні частотних і температурних залежностей ємності, провідності, кута втрат tgδ і кута зсуву фаз θ.

Зразки були досліджені для діапазону частот від 50 Гц до 1 МГц і температур вимірювання від 77 К (температура рідкого азоту) до 323 К з кроком 5 К.

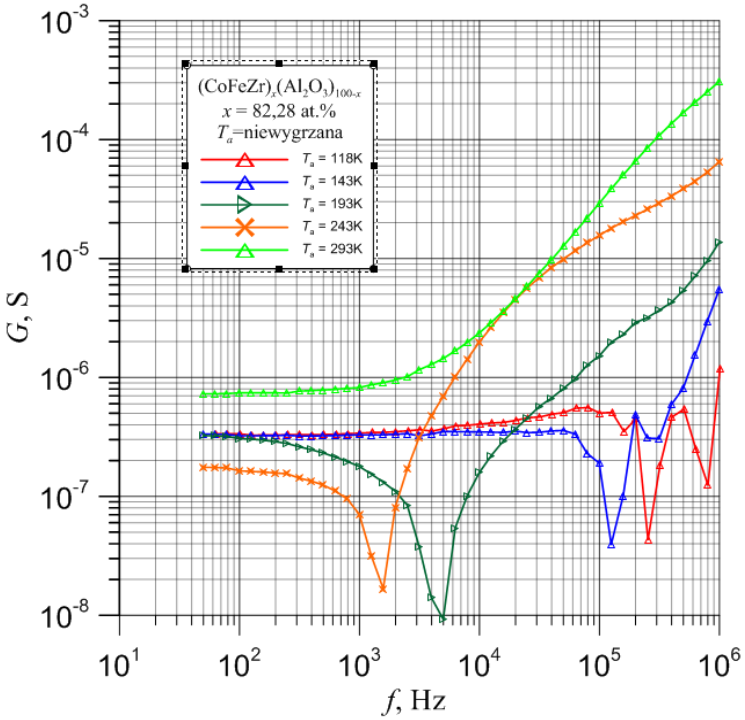
Рисунок 6 показує частотну залежність ємності, для зразка $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$, що має вміст металевої фази x = 82,28 ат.%. Можна зауважити, що при низьких температурах вимірювання для частоти приблизно 100 Гц, виразно видно мінімуми, що зі збільшенням температури вимірювання стають все менші, а криві стають більш гладкими. Для температури 293 К мінімум практично зникає, а характеристика у всьому діапазоні частот є пласкою. При частоті, для якої чітко видно мінімум маємо справу з явищем резонансу напруги. Для більш високих частот значення ємності коливається в межах менше 0,1 наноФ.

На рисунку 7 показано частотні залежності провідності, на яких можемо спостерігати зміни в широкому діапазоні частот. Мінімуми функцій для всіх обраних температур вимірювання „пересуваються" в діапазон низьких частот зі збільшенням температури вимірювання T_p. Виняток становить крива для температури 293 К, де не помітно жодного мінімуму провідності. Для частот, для яких спостерігаються мінімуми провідності, виникає резонанс струму.



Rys. 6. Częstotliwościowe zależność pojemności dla próbki nanokompozytu o składzie $(CoFeZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ i zawartości fazy metalicznej x = 82,28 at.% dla wybranych temperatur pomiarowych T_p

Рис. 6. Частотна залежність ємності зразка нанокомпозиту $(CoFeZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ з вмістом металевої фази при x = 82,28 ат. % для вибраних температур вимірювання T_p.

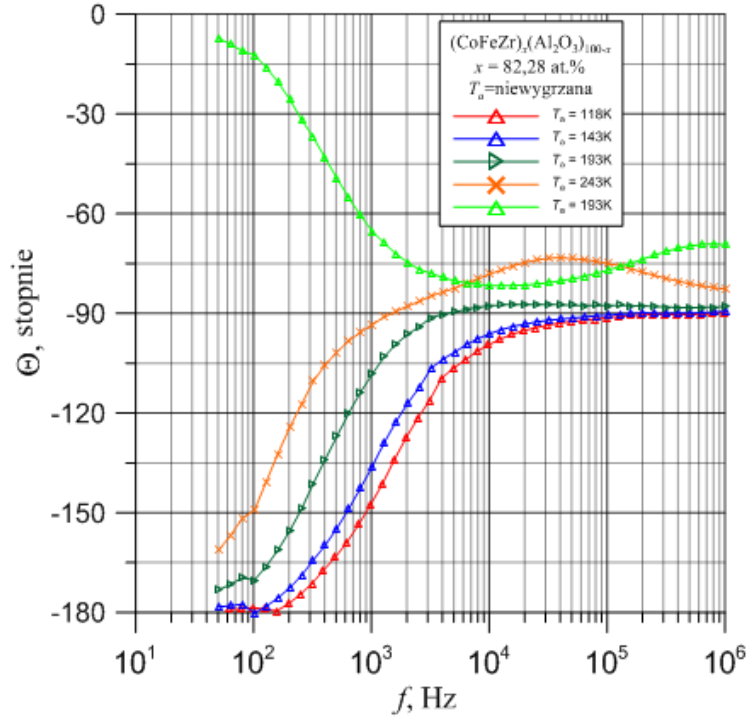


Rys. 7. Częstotliwościowa zależność konduktancji dla próbki nanokompozytu o składzie $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ i zawartości fazy metalicznej x = 82,28 at.% dla wybranych temperatur pomiarowych T_p

Рис. 7. Частотна залежність провідності для зразка нанокомпозиту $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ з вмістом металевої фази при x = 82,28 ат.% для вибраних температур вимірювання T_p

Zależności kąta przesunięcia fazowego θ w funkcji częstotliwości przedstawiono na rysunku 8. Zauważyć można, że dla niskich temperatur pomiarowych oraz paśmie niskich częstotliwości kąt fazowy θ osiąga wartości ok. θ = -180°. Wzrost temperatury pomiarowej powoduje, że kąt ten rośnie do wartości ok. θ = -90°. Wyjątkiem jest temperatura T_p = 293 K, dla której wartość kąta przesunięcia fazowego wraz ze wzrostem częstotliwości maleje od wartości ok. θ = -90° a dla niskiej częstotliwości osiąga wartość bliską θ = 0°. Przejście kąta przez wartość θ = -90° związane jest z występowaniem rezonansu prądów.

На рисунку 8 показані залежності кута зсуву фаз θ в функції від частоти. Можна зауважити, що при низьких температурах вимірювання і низькій частоті кут θ досягає значення приблизно θ = -180°. Підвищення температури вимірювання призводить до того, що кут збільшується до значення приблизно θ = -90°. Винятком є температура T_p = 293 K, для якої значення кута зсуву фаз разом зі збільшенням частоти зменшується від значення приблизно θ = -90°, а для низькочастотних досягає значення, приблизно θ = 0°. Проходження залежності через значення θ = -90° пов'язане з виникненням резонансних струмів.

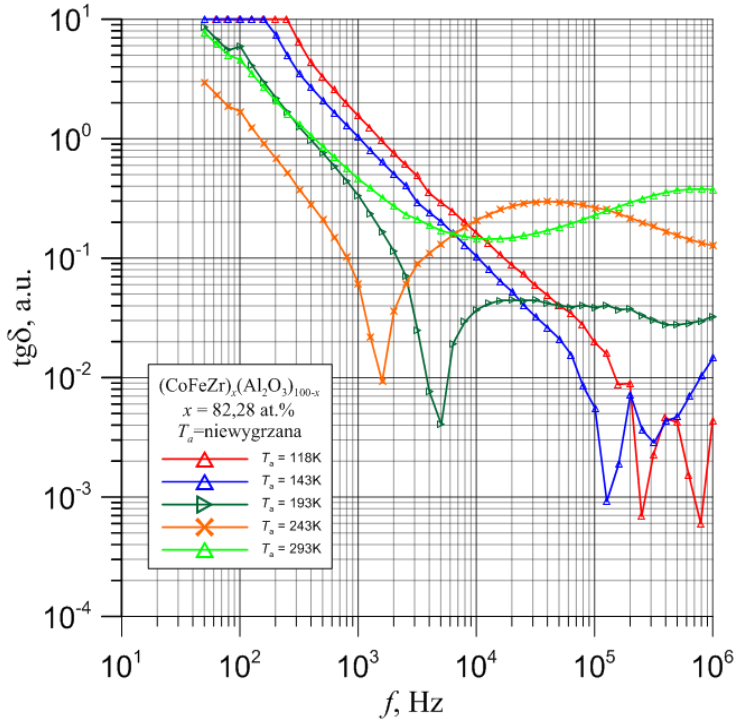


Rys. 8. Częstotliwościowa zależność kąta przesunięcia fazowego θ dla próbki nanokompozytu o składzie $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ i zawartości fazy metalicznej x = 82,28 at.% dla wybranych temperatur pomiarowych T_p

Рис. 8. Частотна залежність кута фазового зсуву θ для зразка нанокомпозиту $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ з вмістом металевої фази x = 82,28 ат.% для вибраних температур вимірювання T_p

Na rysunku 9 określone zostały częstotliwościowe zależności kąta stratności dielektrycznej tgδ. Dostrzec na nim można wzrost wartości kąta stratności wraz ze zmniejszającą się częstotliwością dla wszystkich temperatur pomiarowych. Na przebiegach tgδ(*f*) wyraźnie widać częstotliwości występowania rezonansu napięć, co oznacza, że wartość tgδ powinna wzrastać w nieskończoność. Zastosowane mierniki impedancji mają górny zakres pomiarów tgδ ograniczony do wartości 10, co wyraźnie widać na rysunku 8. Na częstotliwościach, dla których θ przyjmuje wartości -90°, występują wyraźne minima wartości tgδ.

На рисунку 9 представлені частотні залежності кута діелектричних втрат tgδ. На ньому можна побачити збільшення значення кута втрат разом з пониженням частоти для всіх температур вимірювання. На залежностях tgδ(*f*) виразно видно частоту резонансу напруги, що означає, що значення tgδ повинно зростати до нескінченності. Застосовані вимірювачі імпеданції мають верхній діапазон вимірювань tgδ обмежений до значення 10, що чітко видно на рисунку 8. Для частот, при яких θ приймає -90°, з'являються чіткі мінімуми значення tgδ.



Rys. 9. Częstotliwościowa zależność kąta stratności tgδ dla próbki nanokompozytu o składzie $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ i zawartości fazy metalicznej x = 82,28 at.% dla wybranych temperatur pomiarowych T_p

Рис. 9. Частотна залежність кута діелектричних втрат tgδ для зразка нанокомпозиту $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$ з вмістом металевої фази при x = 82,28 ат.% для вибраних температур вимірювання T_p

Z powyższych wykresów można zaobserwować pewne zależności. Można stwierdzić, że przesuwając się w zakres wyższych częstotliwości, od minimum pojemności, wzrasta wartość kąta przesunięcia fazowego. Zaobserwować można również, że przesuwając się w zakres wyższych częstotliwości, od minimum konduktancji, przestaje wzrastać kąt przesunięcia fazowego i stabilizuje się na poziomie θ = -90°.

З наведених вище характеристик, можна прослідкувати деякі залежності. Можна зробити висновок, що переходячи в діапазон високих частот, від мінімуму ємності, збільшується значення кута зсуву фаз. Можна також спостерігати, що переміщаючись в діапазон високих частот, від мінімуму провідності, кут фазового зсуву перестає рости і стабілізується на рівні θ = -90 °.

4. Podsumowanie

W pracy zbadano częstotliwościowe i temperaturowe zależności kąta przesunięcia fazowego θ, kąta strat tgδ, pojemności C_p i konduktancji G dla kondensatorów, w których jako dielektryk wykorzystano nanokompozyt $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$, wytworzony metodą rozpylania jonowego.

Ustalono, że na zależnościach $C_p(f)$, $G(f)$ oraz tgδ(*f*) występują wyraźne minima. Część z nich związana jest z występowaniem rezonansu napięć. Pozostałe związane są z występowaniem rezonansu prądów.

4. Висновок

В роботі досліджено частотні і температурні залежності кута фазового зсуву θ, кут втрат tgδ, ємність C_p і провідність G для конденсаторів, в яких був використаний, в якості діелектрика, нанокомпозит $(FeCoZr)_x(Al_2O_3)_{(100-x)}$, утворений шляхом іонного розпилення.

Було встановлено, що на залежностях $C_p(f)$, $G(f)$ і tgδ(*f*) є виразні мінімуми. Деякі з них пов'язані з виникненням резонансу напруги. Інші пов'язані з виникненням резонансу струму.

Podziękowania

Praca powstała w ramach projektu PL-NTU Transgraniczna wymiana doświadczeń PBU.03.01.00-06-386/11-00 współfinansowanego w ramach Programu Współpracy Transgranicznej Polska-Białoruś-Ukraina 2007-2013 finansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Instrumentu Sąsiedztwa i Partnerstwa.

Niniejsza publikacja została stworzona przy pomocy Unii Europejskiej. Wyłączną odpowiedzialność za zawartość niniejszej publikacji ponoszą Konrad Kierczyński i Tomasz N. Kołtunowicz oraz w żaden sposób nie może być ona postrzegana jako odzwierciedlenie poglądów Unii Europejskiej.

Badania są finansowane z projektu badawczego Nr IP2012 026572 w ramach konkursu Iuventus Plus Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego pt: „*Właściwości strukturalne, elektryczne i magnetyczne nanokompozytów stop ferromagnetyczny-matryca dielektryczna oraz określenie możliwości ich zastosowania*".

Konrad Kierczyński i Tomasz N. Kołtunowicz są uczestnikami projektu „*Kwalifikacje dla rynku pracy – Politechnika Lubelska przyjazna pracodawcy*", współfinansowany przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Społecznego.

Завдяки

Робота створена в рамках проекту ПЛ-НТУ Транскордонний обмін досвідом PBU.03.01.00-06-386/11-00, співфінансованого в рамках Програми Транскордонного Співробітництва Польща-Білорусь-Україна 2007-2013, що фінансується Європейським Союзом в рамках Європейського Інструменту Сусідства та Партнерства.

Ця публікація була створена за допомогою Європейського Союзу. Відповідальність за зміст цієї публікації лежить на Конраді Кєрчиньському і Томашу Н. Колтуновічу, і жодним чином не може розглядатися як відображення поглядів Європейського Союзу.

Дослідження фінансуються з науково-дослідного проекту Nr IP2012 026572 в межах конкурсу Iuventus Plus Міністерства освіти та науки під назвою *"Структурні, електричні і магнітні властивості нанокомпозитів сплав феромагнітний-діелектрична матриця і визначення можливості їх використання"*.

Конрад Кєрчиньскі і Томаш Н. Колтуновіч є учасниками проекту *"Кваліфікації для ринку праці - Люблінська Політехніка дружня для роботодавця"*, що співфінансується Європейським Союзом в рамках Європейського соціального фонду.

Literatura || Література

[1] Kołtunowicz T.N., Zhukowski P., Fedotova V.V., Saad A.M., Larkin A.V., Fedotov A.K.: The features of real part of admittance in the nanocomposites $(Fe_{45}Co_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$ manufactured by Ion-Beam Sputtering Technique with Ar Ions. Acta Physica Polonica A 120(1), 2011, 35-38.

[2] Kołtunowicz T., Żukowski P., Fedotova Y.A., Larkin A.V.: Experimental verification of a model of hopping conductivity at alternating current in nanocomposites produced by ion-beam sputtering. International Conference Radiation Interaction with Material and its Use in Technologies 2008, 24-27 September, 2008, 274-278.

[3] Larkin A.V., Fedotov A.K., Fedotova J.A., Koltunowicz T.N., Zhukowski P.: Temperature and frequency dependences of impedance real part in the FeCoZr-doped PZT nanogranular composites. Materials Science-Poland, 30(2), 2012, 75-81.

[4] Zhukowski P., Kołtunowicz T.N., Fedotova J.A., Larkin A.V.: An effect of annealing on electric properties of nanocomposites $(CoFeZr)_x(Al_2O_3)_{1-x}$ produced by magnetron sputtering in the atmosphere of argon and oxygen beyond the percolation threshold. Przegląd Elektrotechniczny 86(7), 2010, 157-159.

[5] Zhukowski P., Kołtunowicz T.N., Węgierek P., Fedotova J.A., Fedotov A.K., Larkin A.V.: Formation of Noncoil-Like Inductance in Nanocomposites $(Fe_{0.45}Co_{0.45}Zr_{0.10})_x(Al_2O_3)_{1-x}$ Manufactured by Ion-Beam Sputtering of Complex Targets in $Ar+O_2$ Atmosphere. Acta Physica Polonica 120(1), 2011, 43-45.

[6] Żukowski P., Kołtunowicz T., Partyka J., Fedotova Yu.A., Larkin A.V.: Hopping conductivity of metal-dielectric nanocomposites produced by means of magnetron sputtering with the application of oxygen and argon ions. Vacuum 83(1), 2009, S280-S283.

[7] Żukowski P., Kołtunowicz T., Partyka J., Węgierek P., Fedotova J.A., Fedotov A.K., Larkin A.V.: The effect of annealing on electrical properties of $(CoFeZr)_x+(Al_2O_3)_{1-x}$ nanocomposites. Przegląd Elektrotechniczny 84(3), 2008, 244-246.

[8] Żukowski P., Kołtunowicz T., Partyka J., Węgierek P., Kolasik M., Larkin A.V., Fedotova J.A., Fedotov A.K., Komarov F.F., Vlasukova L.A.: Model przewodności skokowej i jego weryfikacja dla nanostruktur wytwarzanych technikami jonowymi. Przegląd Elektrotechniczny 84(3), 2008, 247-249.

Mgr inż. Konrad Kierczyński
e-mail: k.kierczynski@pollub.pl

Urodzony w Zamościu w 1988 roku. Ukończył studia magisterskie i otrzymał tytuł magistra inżyniera w 2012 roku na kierunku elektrotechnika, specjalność: Projektowanie urządzeń elektrycznych na Politechnice Lubelskiej. Pracuje jako asystent w Katedrze Urządzeń Elektrycznych i Techniki Wysokich Napięć Politechniki Lubelskiej. Jego zainteresowania badawcze obejmują mechanizm elektrycznego przenoszenia ładunków w nanokompozytach o strukturze metal-dielektryk oraz diagnostykę izolacji w transformatorach wysokiego napięcia.

Магістр інж.Конрад Кєрчинський
e-mail: k.kierczynski@pollub.pl

Народився в м. Замость в 1988. Закінчив магістратуру і отримав ступінь магістра в 2012 році, за напрямком електротехніка, спеціальність: Проектування електричних приладів в Люблінській Політехніці. Працює асистентом на кафедрі електричних приладів і технологій високої напруги в Люблінській Політехніці. Його дослідницькі інтереси включають механізм перенесення електричного заряду в нанокомпозитах зі структурою метал-діелектрик та діагностики ізоляції в трансформаторах високої напруги.

Dr inż. Tomasz Norbert Kołtunowicz
e-mail: t.koltunowicz@pollub.pl

Urodził się w 1979 roku. W Katedrze Urządzeń Elektrycznych i Techniki Wysokich Napięć Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej pracuje od października 2004 roku początkowo na stanowisku asystenta a od marca 2011 roku adiunkta. W swojej pracy naukowej zajmuje się badaniami wpływu procesów technologicznych na właściwości elektryczne nanokompozytów i półprzewodników wytwarzanych technikami jonowymi.

К.т.н. інж. Томаш Норберт Колтуновіч
e-mail: t.koltunowicz@pollub.pl

Народився в 1979 році. На кафедрі електричних приладів і технологій високої напруги факультету електротехніки та інформатики Люблінської Політехніки працює з жовтня 2004 року спочатку, як асистент, а з березня 2011 року на посаді ад'юнкта. У своїй науково-дослідній роботі займається вивченням впливу технологічних процесів на електричні властивості нанокомпозитів і напівпровідників утворюваних методами іонізації.

otrzymano/отримано/received: 11.03.2015 *przyjęto do druku/прийнято до друку/accepted: 15.03.2015*

PL-BY-UA 2007-2013

Współfinansowane ze środków Unii Europejskiej

DOI: 10.5604/20830157.1159331

ZASTOSOWANIA ANALIZY RUCHU OCZU W DIAGNOSTYCE CHORÓB NEURODEGENERACYJNYCH

Magdalena Borys
Politechnika Lubelska, Instytut Informatyki

Streszczenie. *Badania okulograficzne są nieinwazyjne, a sprzęt okulograficzny coraz bardziej dostępny, dlatego też rośnie jego popularność w diagnostyce medycznej oraz innych obszarach zastosowań. Artykuł prezentuje możliwości dotyczący zastosowania badań okulograficznych w diagnostyce chorób neurodegeneracyjnych takich jak Parkinson, czy Alzheimer. Autorka koncentruje się na przestawieniu charakterystyki badania okulograficznego, modelu detekcji podstawowych zdarzeń takich jak fiksacje i sakkady, a także na przykładach badań zaburzeń okoruchowych w wybranych chorobach neurodegeneracyjnych.*

Słowa kluczowe: eye tracking, przetwarzanie sygnałów biomedycznych, diagnostyka wspierana komputerowo

ЗАСТАСУВАННЯ АНАЛІЗУ РУХУ ОЧЕЙ В ДІАГНОСТИЦІ НЕЙРОДЕГЕНЕРАТИВНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ

Анотація. *Дослідження окулографічні є неінвазивними, а окулографічне обладнання стає більш доступним і тому підвищується його популярність в медичній діагностиці та інших галузях. В статті наведено приклади для використання результатів окулографічних досліджень у діагностиці нейродегенеративних захворювань, таких як хвороба Паркінсона або Альцгеймера. Авторка звертає увагу на характеристиці окулографічних досліджень, на моделі виявлення основних подій, таких як фіксація і саккади, а також на прикладах досліджень окорухових розладів, обраних нейродегенеративних захворювань*

Ключові слова: eye tracking, біомедична обробка сигналів, комп'ютерна діагностика

EYE-TRACKING IN DIAGNOSIS OF NEURODEGENERATIVE DISEASE

Abstract. *Eye-tracking allows for non-invasive examination and the same eyetrackers are becoming more available, thus its popularity in medical diagnosis and other fields of application is increasing. The paper presents the possibilities for using eye-tracking in the diagnosis neurodegenerative disease such as Parkinson or Alzheimer diseases. The autor describes the exetracking experiment, the model of fixations and saccedes detection, as well as the selected examples of eye-tracking research conducted among patients with neurodegenerative diseases.*

Keywords: eye tracking, biomedical signal processing, computer aided diagnosis

Wstęp

Choroby neurodegeneracyjne są istotnym problemem nie tylko medycznym, lecz także społecznym i ekonomicznym. Wraz ze starzeniem się społeczeństwa, częstość występowania chorób neurodegeneracyjnych, takich jak choroba Alzheimera czy choroba Parkinsona, się zwiększa.

Za ruch gałek ocznych oraz kontrolę wzroku odpowiedzialne są: kresomózgowie, pień mózgu oraz móżdżek. Jakiekolwiek zmiany w tych częściach mózgu, wpływają na funkcje okulomotoryczne człowieka. Dlatego też analiza ruchu oczu umożliwia weryfikację sprawności ośrodkowego układu nerwowego, a zaburzenia ruchu oczu mogą wskazywać na obecność neurodegeneracji. Część zaburzeń ruchu oczu występuje we wczesnym etapie choroby, na przykład przed problemami z pamięcią w chorobie Alzheimera lub problemami ruchowymi w przypadku choroby Parkinsona, dlatego też tak ważna jest ich identyfikacja.

Urządzenia, które umożliwiają rejestrację aktywności wzrokowej człowieka, nazywane są eye-trackerami, czy też okulografami (od łac. oculus, czyli oko), zaś same badania badaniami eye-trackingowymi lub okulograficznymi. Najczęściej w badaniach wykorzystywane są okulografy optyczne pozwalające na bezkontaktowe metody pomiaru ruchu oka lub oczu. Nieinwazyjność metody pomiaru ma bardzo duże znaczenie, ponieważ pozwala na przeprowadzenie badania u osób w dowolnym wieku oraz o różnym stopniu zaawansowania choroby.

Badań okulograficznych w medycynie wykorzystywane są od wielu lat [9]. W diagnostyce chorób neurodegeneracyjnych badanie te użyteczne są głównie we wczesnym etapie choroby. Co więcej, stanowią istotny dodatek do badań klinicznych – dostarczają cennych informacji na temat zaawansowania choroby, są stosowane do śledzenia postępu lub regresu choroby w czasie, a nawet jako element obiektywnej oceny skuteczności podjętej terapii.

Вступ

Нейродегенеративні захворювання є серйозною проблемою не тільки медичною, а й соціальною та економічною. В умовах старіння населення, частота нейродегенеративних захворювань, таких як хвороба Альцгеймера або Паркінсона зростає.

За рух очних яблук і контролювання зору відповідають: головний мозок, стовбур головного мозку і мозочок. Будь-які зміни в цих частинах мозку, впливають на окуломоторні функції людини. Таким чином, аналіз руху очей дозволяє перевірити ефективність роботи центральної нервової системи, а розлади руху очей можуть вказувати на наявність нейродегенерації. Частина рухових розладів очей вказує на ранню стадію захворювання, наприклад, перед проблемами з пам'яттю при хворобі Альцгеймера, або проблемами руху при хворобі Паркінсона, і тому важливо їх ідентифікувати.

Пристрої, які дозволяють реєстрацію діяльності людського зору називаються eye tracker-ами, або окулографами (від лат. *oculus*, або око), а саме дослідження називається дослідженням eye tracking або окулографічним. Найчастіше в дослідженнях використовуються оптичні окулографи, які дозволяють безконтактний метод вимірювання руху ока або очей. Неінвазивність методу вимірювання є дуже важливою, тому що дозволяє діагностувати людей будь-якого віку і з різним ступенем тяжкості захворювання.

Окулографічні дослідження використовуються в медицині протягом багатьох років [9]. У діагностиці нейродегенеративних захворювань, ці дослідження використовуються, в основному, в початковій стадії хвороби. Більш того, це важливе доповнення до циклічних досліджень - дають цінну інформацію про тяжкість захворювання, використовуються для відстеження прогресу або регресу захворювання в часі, і навіть, як елемент об'єктивної оцінки ефективності терапії.

Pojawiają się również nowe metody diagnozy chorób neurodegeneracyjnych, które łącza badania ruchu oczu z innymi metodami diagnozy. Przykładem może być wykorzystanie eyetrackera i systemu wykrywania ruchu do badania koordynacji wzrokowo-motorycznej [16].

1. Badanie okulograficzne

Jakość danych otrzymanych w badaniu okulograficznych w głównej mierze zależna jest od właściwości sprzętu, za pomocą którego wykonywane jest badanie. Do najważniejszych właściwości eye-trackerów należy częstotliwość próbkowania (rozdzielczość czasowa), precyzja i dokładność pomiaru (rozdzielczość przestrzenna) oraz opóźnienie urządzenia.

1.1. Urządzenia pomiarowe

Ze względu na metodę śledzenia ruchu oka współczesne okulografy można podzielić na następujące kategorie [2]:

- system z soczewkami twardówkowymi i cewką (ang. scleral contact lens/search coil),
- elektrookulograf (ang. electrooculography, EOG),
- system oparty o obraz wideo (ang. video-oculography, VOG),
- system oparty o obraz wideo ze źrenicą i odbiciem rogówkowym (ang. video-based combined pupil/corneal reflection).

Ze względu na podobną charakterystykę, wiele źródeł klasyfikuje okulografy oparte o sam obraz wideo oraz o obraz wideo ze źrenicą i odbiciem rogówkowym pod wspólną nazwą okulografów optycznych [11].

System z soczewkami twardówkowymi i cewką oparty jest o pomiar napięcia indukcji elektromagnetycznej. Wymaga on założenia na oko badanego soczewki kontaktowej z zatopioną w niej cewką odbiorczą oraz prowadzenia badań w pomieszczeniu laboratoryjnym, w którym zainstalowane jest pierwotne uzwojenie transformatora. Okulografy tego typu wykorzystywane są głównie do badań wymagających dużej precyzji pomiaru [11]. Mimo, że metoda ta jest najbardziej precyzyjną metodą pomiarów ruchów oka, niemniej jest to również najbardziej inwazyjna metoda. Dodatkowo zastosowanie specjalnych soczewek kontaktowych może powodować opóźnienia sakkad u osób badanych [2].

Elektrookulograf wykorzystuje potencjał elektryczny skóry mierzony przy pomocy elektrod umieszczonych w pobliżu oczu. Oko, ze względu na swoją budowę, można uznać za dipol elektryczny, a więc ruch oka wywołany poruszeniem mięśni oka, wywołuję zamianę biopotencjałów. Metoda ta umożliwia pomiar o wysokiej częstotliwości próbkowania, ale dokładność pomiaru jest niska [4]. Stosowana jest głównie w diagnostyce okulistycznej oraz w badaniach elektroencefalograficznych do identyfikacji zakłóceń związanych z ruchami oczu/powiek.

W systemach opartych o obraz wideo pomiar ruchu oka realizowany jest na podstawie nagrania wideo lub zdjęć oczu. Wybrane, widoczne atrybuty oka, takie jak kształt źrenicy, krawędź tęczówki, czy punkty odbicia na rogówce źródła światła, są mierzone klatka po klatce, a następnie przekształcane na pozycję oka. System VOG może być zbudowany ze zwykłej kamery internetowej, niemniej częstotliwość pomiaru danych będzie wtedy zależna od szybkości rejestracji obrazu, rozdzielczości kamery, jak i warunków oświetlenia. Parametry uzyskane tą metodą to około 0,5° rozdzielczości przestrzennej i częstotliwość próbkowania do 50Hz, co pozwala określić położenia punktu fiksacji wzroku w przestrzeni. W przypadku konieczności uzyskania większej rozdzielczości przestrzennej wymagane jest unieruchomienie głowy [11], tym samym zastosowanie tej metody jest ograniczone.

Aby uzyskać lepsze parametry pomiaru stosowane są systemy oparte o obraz wideo ze źrenicą i odbiciem rogówkowym. W metodzie tej badane jest położenie punktów odbicia światła (najczęściej w podczerwieni lub bliskiej podczerwieni) na rogówce względem środka źrenicy (rys. 1), następnie położenie to jest przekształcane na pozycję oka w przestrzeni. Identyfikacja

Є також нові методи діагностики нейродегенеративних захворювань, які пов'язують дослідження руху очей з іншими методами діагностики. Прикладом може служити використання eye trackera і системи виявлення руху для тестування зорово-моторної координації [16].

1. Дослідження окулографічне

Якість отриманих даних у окулографічному дослідженні в значній мірі залежать від властивостей обладнання, за допомогою якого виконується дослідження. Найбільш важливими властивостями eye tracking є частота дискретизації (подільність часу), точність вимірювань (просторова подільність) і затримка пристрою.

1.1. Вимірювальні прилади

З погляду на спосіб відстеження руху очей сучасні окулографи можна розділити на наступні категорії [2]:

- система з склеральними контактними лінзами і котушкою (англ. scleral contact lens/search coil),
- електроокулограф (англ. electrooculography, EOG),
- відео-окулографія (англ. video-oculography, VOG),
- система на основі відео з зіницею і відображенням рогівки (англ. video-based combined pupil/corneal reflection).

З погляду на подібну характеристику, багато джерел класифікують відео-окулографи та окулографи на основі відео з зіницею і відображенням рогівки під спільною назвою оптичні окулографи [11].

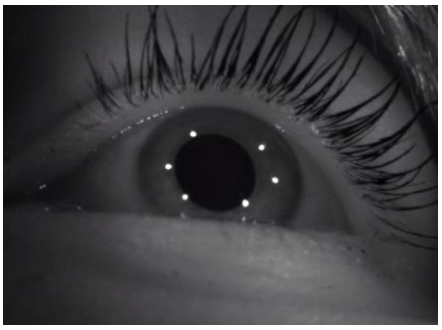
Система з склеральними контактними лінзами і котушкою опирається на вимірюванні напруги електромагнітної індукції. Вимагає накладання на око досліджуваного контактної лінзи з вбудованою в неї котушкою і проведення досліджень в лабораторному приміщенні, де вона встановлена на первинній обмотці трансформатора. Окулографи цього типу використовуються в основному для досліджень, що вимагають високої точності вимірювань [11]. Цей метод є найбільш точним методом вимірювання руху очей, але найбільш інвазивним. Крім того, використання спеціальних контактних лінз може привести до затримок саккад у досліджуваних осіб [2].

Електроокулограф використовує електричний потенціал шкіри вимірюваний за допомогою електродів, розміщених біля очей. Око, з погляду на структуру, можна розглядати як електричний диполь, і так рух очей, викликаний рухом очних м'язів, викликає обмін біопотенціалів. Цей метод дозволяє вимірювання з високою частотою дискретизації, але низькою точністю вимірювань [4]. В основному використовується в очній діагностиці і при електрофізіологічних дослідженнях для виявлення порушень, пов'язаних з рухами очей/повік.

У системах, заснованих на відео зображенні, вимірювання руху очей здійснюється на основі відеозйомки або фотографування очей. Вибрані видимі ознаки ока, такі як форма зіниці, край райдужної оболонки або точки відображення джерела світла на рогівці вимірюються кадр за кадром, а потім перетворюються в позицію ока. Система VOG може бути побудована із звичайної веб-камери, але частота даних вимірювань буде залежати від швидкості відеозапису, роздільної здатності камери і умов освітлення. Параметри, отримані за допомогою цього методу складають близько 0,5° коефіцієнту просторового дозволу і частоти дискретизації до 50 Гц, що дозволяє визначити положення пункту фіксації в просторі. Якщо необхідно отримати більш високу просторову роздільну здатність потрібно знерухомити голову [11], таким чином, використання методу обмежується.

Щоб отримати кращі параметри вимірювання використовуються системи на основі відео з зіницею і відображенням рогівки. У цьому способі, досліджують розташування точок відбиття світла (зазвичай інфрачервоного або наближеного

punktów odbicia światła, nazywanych obrazami Purkinjego, precyzuje rejestrację ruchu oka. Okulografy tej kategorii pozwalają osiągnąć do 0,2ms rozdzielczości czasowej (500Hz) przy rozdzielczości przestrzennej (wg wskazań producentów) od 0,1° do 1° bez unieruchomienia głowy. Niemniej tak wysoka rozdzielczość przestrzenna może być osiągnięta jedynie dla pomiaru ruchu oka w osi poziomej, ponieważ pomiar ruchu w osi pionowej jest silnie zakłócany przez ruch powiek [11].



Rys. 1. Zdjęcie lewego oka wykonane eyetrackerem SMI Eye Tracking Glasses 2.0 z wyraźnie zaznaczoną czarną źrenicą oraz odbicami na rogówce 6 źródeł światła
Мал. 1. Фото лівого ока зроблене eye trackerem SMI Eye Tracking Glasses 2.0 з чітко зазначеною чорною зіницею і відбитими на рогівці 6 джерелами світла

Obecnie okulografy wykorzystujące podczerwień używane są w trzech formach aparatów – eyetrackera nagłownego (ang. head-mounted eyetracker), systemu zdalnego (ang. remote eyetracker) oraz ultraszybkiego eyetrackera wymagającego stabilizacji głowy (ang. tower-mounted eyetracker). W większości tych systemów, aby powiązać pozycję oczu z bodźcem wizualnym konieczne jest przeprowadzenie procesu kalibracji dla każdego uczestnika badania indywidualnie.

1.2. Personel

Prowadzenie badań w celach diagnostycznych oznacza, że pomiar musi być możliwy do wykonania w każdych warunkach – w przychodni, szpitalu, czy domu pacjenta. Oznacza to również, że osoba wykonująca badanie nie będzie ekspertem w dziedzinie pomiaru ruchu oka [2], dlatego też obsługa okulografu, jak i protokół badania powinny być na tyle proste, aby badanie mógł przeprowadzić technik medyczny lub pielęgniarka, i tylko w nielicznych przypadkach lekarz.

System pomiarowy powinien automatycznie przeprowadzić wszystkie niezbędne regulacje tak, aby zapewnić odpowiednią jakość mierzonego sygnału. Również analiza uzyskanego w ten sposób sygnału powinna być przeprowadzona automatycznie.

1.3. Ruchy oczu

Ruchy oka możemy podzielić na ruchy przemieszczające spojrzenie oraz utrzymujące spojrzenie. W badaniach eyetrackingowych spośród ruchów przemieszczających spojrzenie jako istotne wyróżnia się sakkady oraz wolne ruchy śledzenia, zaś wśród ruchów utrzymujących spojrzenie fiksacje i związane z nimi mikroruchy. Ogólna charakterystyka wybranych ruchów oka została przestawiona w tab. 1. Parametry te są na tyle istotne, że determinują wybór okulografu, który umożliwi rejestrowanie danych z odpowiednią rozdzielczością czasową i przestrzenną.

Sakkady, czy też ruchy skokowe, to szybkie, skojarzone ruchy gałek ocznych przemieszczające obraz obiektu (bodźca wizualnego) z obwodowej części siatkówki do jej centrum, aby był on lepiej widziany. W czasie wykonywania ruchu skokowego nie jest możliwe widzenie ani zmiana zaplanowanej wcześniej trajektorii [5]. Sakkady charakteryzują się krótkim czasem trwania oraz dużą amplitudą, przy czym amplituda jest sakkady jest ściśle związana z prędkością ruchu (rys. 2).

до інфрачервоного) на рогівці з огляду на центр зіниці (мал. 1), потім це положення змінюють на положення ока в просторі. Ідентифікація точок відбиття світла, відома як зображення Пуркіньє, стверджує реєстрацію руху очей. Окулографи цієї категорії дозволяють досягти до 0,2мс часової подільності (500Гц) з просторовою подільністю (згідно показників виробника) від 0,1° до 1° без знерухомлення голови. Однак така висока просторова подільність може бути досягнута тільки для вимірювання руху очей по горизонтальній осі, а вимірювання вертикального руху осі сильно змінюється через рух повік [11].

Tabela 1. Charakterystyka wybranych ruchów oka (na podstawie [4])
Таблиця 1. Характеристики вибраних рухів очей (на основі [4])

Rodzaj ruchu **Різновид руху**	**Czas trwania** **Тривалість**	**Amplituda** **Амплітуда**	**Prędkość** **Швидкість**
Sakkada Саккади	30-80 ms	4-20°	30-500°/s
Wolne ruchy śledzenia Повільні рухи стеження	-	-	10-30°/s
Fiksacja Фіксація	100-300 ms	-	-
Mikrosakady Мікросаккади	10-30 ms	10-40’	15-50°/s
Mikrodrżenie (Tremor) Мікротремтіння (Тремтіння)	-		20’/s
Mikrodryft Мікродрифт	200-1000	1-60’	6-25’/s
Mrugnięcie Моргання	75-425ms		

В даний час окулографи, які використовують інфрачервоне світло використовуються в трьох формах апаратів - (англ. *remote eyetracker*), дистанційної системи (англ. *remote eyetracker*) і ультрашвидкого eye tracker, який вимагає стабілізації голови (англ. *tower-mounted eyetracker*). У більшості цих систем, щоб пов’язати положення очей з візуальним стимулом необхідно виконати процес калібрування, окремо для кожного учасника дослідження.

1.2. Персонал

Проведення досліджень в діагностичних цілях означає, що вимірювання можливо виконати в будь-яких умовах - в поліклініці, лікарні чи вдома у пацієнта. Це також означає, що людина, яка виконує процедуру не буде експертом в галузі вимірювання руху очей [2], отже, обслуговування окулографа, як і протокол дослідження повинні бути досить простими, щоб була можливість проведення дослідження медичним працівником або медсестрою, і тільки в деяких випадках лікарем.

Вимірювальна система повинна автоматично зробити всі необхідні корективи, щоб забезпечити якість виміряного сигналу. Крім того, аналіз отриманого таким чином сигналу повинен здійснюватися автоматично.

1.3. Рухи очей

Рухи очей можемо поділити на рухи, які переводять погляд і утримують погляд. У дослідженні eye tracking серед рухів переміщуючих погляд, в якості важливих, виділяються саккади і повільні рухи стеження, серед рухів утримуючих погляд, фіксація і пов'язані з нею мікро-рухи. Загальні характеристики обраних рухів очей показані в табл. 1. Ці параметри є досить суттєвими, адже визначають вибір окулографа, що дозволяє реєстрацію даних з достатнім часовим і просторовим дозволом.

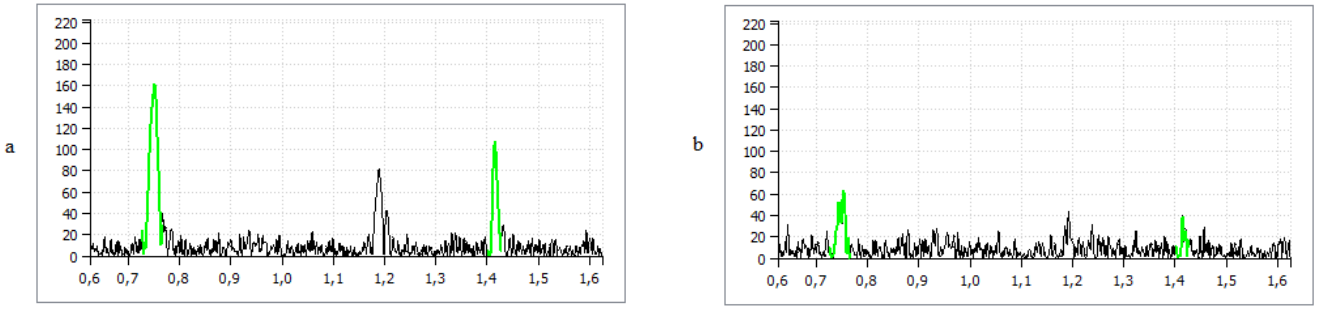
Саккади, або різкі рухи, це швидкі, пов'язані рухи очних яблук, що переміщують зображення об'єкта (візуальний стимул) з периферійних частин сітківки в центр, щоб, його було краще видно. Під час виконання різкого руху неможливо побачити або змінити заплановану траєкторію [5]. Саккади характеризується короткою тривалістю і великою амплітудою, яка тісно пов'язана зі швидкістю руху (мал. 2).

Wolne ruchy śledzenia to płynne, skojarzone ruchy gałek ocznych, których zadaniem jest zapobieganie rozmazaniu na siatkówce obrazu obiektu, który wolno poruszającego się na tle otoczenia. Prędkość oka podczas tego ruchu jest stale dostosowywana do prędkości poruszającego się obiektu w mechanizmie sprzężenia zwrotnego [5].

Fiksacja to utrzymywanie w dołku środkowym siatkówki obrazu wybranego obiektu stacjonarnego. Poczas trwania fiksacji pobierane i przetwarzane są informacje wzrokowe z otoczenia. Mimo, że czas trwania fiksacji jest stosukowo długi, oczy nie pozostają nieruchome, lecz wykonują niedostrzegalne gołym okiem miniaturowe ruchy służące poszerzeniu pola precyzyjnego widzenia. Wyróżnia się trzy rodzaje takich ruchów: mikrosakkady, mikrodryf i mikrodrżenie [4]. Rolą mikrosakkad korekcja obrazu na siatkówce wynikająca z drobnych ruchów oka (niestabilności). Mikrodryf zapobiega zanikaniu nieruchomego obrazu na siatkówce związanemu z adaptacją receptorów [5]. Natomiast mikrodrżenie to stała aktywność ruchowa gałek ocznych podczas fiksacji.

Повільні рухи стеження, це плавні пов'язані рухи очних яблук, їх завданням є запобігти розмитому зображенню об'єкта на сітківці, який повільно рухається на тлі оточення. Швидкість ока при цьому русі є постійно пристосована до швидкості рухомого об’єкту, у механізмі зворотного зв'язку [5].

Фіксація, це утримування в середині ями сітківки зображення, вибраного стаціонарного об'єкту. Протягом фіксації збирається і обробляється візуальна інформація з навколишнього середовища. Хоча тривалість фіксації є відносно довгою, очі не залишаються нерухомими, але виконують невидимі неозброєним оком мініатюрні рухи, щоб розширити поле зору. Є три типи таких рухів: мікросаккади, мікродриф і мікротремтіння [4]. Завдання мікросаккад - корекція зображення на сітківці яка виникає в результаті незначних рухів очей (нестабільності). Мікродриф запобігає зникненню нерухомого зображення на сітківці, пов'язаного з адаптацією рецепторів [5]. Мікротремтіння це постійна рухова активність очних яблук при фіксації.



Rys. 2. Wykres prędkości [deg/s] w funkcji czasu[ms] prawego oka w poziomie (a) oraz w pionie (b) z zaznaczonymi sakkadami pacjenta z chorobą Parkinsona
Мал. 2. Графік швидкості [град/с] в функції часу [мс] для правого ока горизонтально(а) і вертикально (б) з вираженими саккадами пацієнта з хворобою Паркінсона

Do poprawnego przeprowadzenia badania z wykorzystaniem okulografu konieczny jest dobór odpowiedniego protokołu badania. Najczęściej badania zaburzeń neurodegeneracyjnych w ruchach oczu oparte są o określone zadania wizualne.

Для правильного проведення дослідження за допомогою окулографа потрібно вибрати відповідний протокол дослідження. Найчастіше дослідження нейродегенеративних розладів в рухах очей опираються на певних візуальних завданнях.

1.4. Zadania ruchu oczu

Najprostsze zadanie wizualne, pozwalające ocenić sakkady, oparte jest na bezpośrednim spoglądaniu przez uczestnika badania na cel, który pojawia się w losowych miejscach ekranu w różnych odstępach czasu (zróżnicowany odstęp czasowy pozwala m.in. na badanie opóźnienia sakady). Innym zadaniem badającym sakkady, ale wymagającym zaangażowania poznawczego, jest skierowanie przez badanego wzroku na cel, który pojawił się i zniknął. Podczas wykonywania tego zadania uczestnik badania musi stłumić sakkadę odruchową i zapamiętać lokalizację celu. Natomiast zadania ruchów oczu, polegające na tłumieniu sakkad i patrzeniu w kierunku przeciwnym (ang. *antisaccade*) lub na następujące po sobie punkty występujące regularnie na określonym odcinku (predykcyjne sakady), umożliwiają naukowcom zmierzyć dokładność sakkad oraz ich opóźnienie [1].

W badaniach pojawiają się również bardziej naturalne zadania, które pozwalają sprawdzić ruchy oczu w realnych sytuacjach, jak również zadania związane z wolnym ruchem śledzenia.

1.4. Завдання руху очей

Найпростіше наочне завдання, що дозволяє оцінити саккади, засноване на безпосередньому погляді учасником дослідження на ціль, яка з'являється у випадкових місцях на екрані через різні проміжки часу (різні часові інтервали дозволяють, вивчити затримки саккад). Іншим завданням досліджуючим саккади, яке вимагає пізнавальної участі досліджуваного, це направити погляд на ціль, яка з’являється і зникає. При виконанні цього завдання, суб'єкт повинен придушити саккади і запам'ятати розташування цілі. Завдання руху очей, полягає на придушенні саккад і скеруванні погляду в протилежному напрямку (англ. *antisaccade*) або на виступаючі послідовні точки, які з’являються регулярно протягом заздалегідь визначеного відрізку (прогнозуючі саккади), дозволяють науковцям виміряти точність саккад і їх затримки [1].

В дослідженнях також з’являються більш природні завдання, які дозволяють перевірити рухи очей в реальних ситуаціях, а також завдання, пов'язані з вільним рухом слідкування.

2. Wykrywanie fiksacji oraz sakkad

Dane rejestrowane przez okulografy mają zazwyczaj postać sekwencji współrzędnych (x,y) pozycji wzroku z dołączonym znacznikiem czasu lub numerem próbki (również często do danych dołączana jest wartość średnicy źrenicy). Dane te niekiedy nazywany są zapisem okulograficznym.

Aby możliwe było przeprowadzenie analizy zgromadzonych danych konieczna jest identyfikacja poszczególnych ruchów oka.

2. Виявлення фіксації і саккад

Дані, зафіксовані за допомогою окулографів, як правило, мають послідовність координат (x, y), положення зору з прикріпленим фіксатором часу, або номером проби (також часто дані супроводжуються значенням діаметра зіниці). Ці дані іноді називають окулографічним записом.

Для того щоб проаналізувати зібрані дані, необхідна ідентифікація окремих рухів очей. Більшість відомих

Większość znanych zaburzeń neudrodegeneracyjnych dotyczących ruchów oka związana jest z sakkadami, fiksacjami oraz ich parametrami, dlatego też bardzo ważny jest odpowiedni dobór algorytmu identyfikacji tych ruchów oka.

Dostępnych jest kilka metod automatycznej analizy i klasyfikacji danych okulograficznych. Metody te można podzielić na dwie podstawowe grupy. Pierwszą grupę stanowią algorytmy bazujące na analizie prędkości zmiany pozycji wzroku, drugą zaś algorytmy analizujące charakter rozproszenia przestrzennego próbek sygnału. Podział pięciu wybranych algorytmów identyfikacji fiksacji oraz sakkad został przedstawiony w tab. 2.

нейродегенеративних проблем, що пов'язані з рухами очей пов'язані з саккади, фіксаціями та їх параметрами, тому дуже важливо вибрати відповідний алгоритм для визначення руху очей.

Є кілька методів для автоматичного аналізу та класифікації окулографічних даних. Ці методи можна розділити на дві основні групи. В першу групу входять алгоритми засновані на аналізі швидкості зміни положення погляду, в другу алгоритми, що аналізують характер просторової дисперсії відліків сигналу. Поділ п'яти обраних алгоритмів, для виявлення фіксації і саккад представлені в табл. 2.

Tabela 2. Klasyfikacja wybranych algorytmów identyfikacji fiksacji oraz sakkad
Таблиця 2. Класифікація деяких алгоритмів для виявлення фіксації і саккад

Kryterium **Критерії**	**I-VT**	**I-HMM**	**I-KF**	**I-DT**	**I-MST**
Oparte na prędkości На підставі швидкості	+	+	+		
Dyspersyjne Дисперсійні				+	+

2.1. Opis modelu

Wszystkie metody identyfikacji fiksacji oraz sakkad mają podobną zasadę działania. Jako dane wejściowe algorytmu przyjmowany jest zbiór kolejnych zajerestrowanych współrzędnych (punktów) pozycji wzroku oraz odpowiednia wartość (lub wartości) progowa kryterium wykorzystywanego do klasyfikacji poszczególnych punktów jako części fiksacji lub części sakkady. Po klasyfikacji poszczególnych punktów wykonywana jest funkcja łączenia („*merge function*") pojedynczych punktów w fiksacje oraz sakkady. Funkcja łączenia jest identyczna dla wszystkich metod (tab. 3).

2.1. Опис моделі

Всі методи ідентифікації фіксації і саккад мають подібний принцип роботи. Як вхідні дані алгоритму, приймають набір послідовних фіксованих координат (точок) положення очей і відповідного значення (або значень) порогового критерію, використовуваного для класифікації окремих точок в рамках фіксації або частини саккади. Після класифікації окремих точок виконується функція підключення („*merge function*") окремих точок фіксації і саккади. Функція поєднання однакова для всіх методів (табл. 3).

Tabela 3. Pseudokod funkcji łączenia [7]
Таблиця 3. Псевдокод функції поєднання [7]

***Input**: array of pre-classified fixation and saccade points*
***Output**: array of fixations and saccades*

Foreach fixation point
    Marge every group of consecutive fixation points into a fixation
    with center coordinates and duration
Remove fixations that are below minimum fixation duration threshold

Foreach saccade point
    Marge every group of consecutive saccade points into a saccede
    with an onset, offset, amplitude and duration
Remove micro and corrupted saccedes

Return saccades and fixations

W funkcji łączenia zbiór następujących po sobie punktów zaklasyfikowanych jako punkty należące do fiksacji jest łączony w pojedynczy segment fiksacji o współrzędnych środka zdefiniowanych jako centroid. Następnie kolejne segmenty fiksacji łączone są w jeden większy segment na podstawie dwóch parametrów: odstępu czasu pomiędzy nimi oraz długością Euklidesową między środkami tych segmentów. Jako maksymalna wartość odstępu czasowu między segmentami wykorzystywany jest czas trwania mrugnięcia tj. 75ms, natomiast jako filtr długości Euklidesowej wykorzystywana jest amplituda mikrosakkady (amplituda mniejszej niż 0,5°). Dla nowego segmentu ponowanie obliczane są współrzędne środka (jako centroid łączonych segementów) oraz czas trwania. Fiksacje, których czas trwania jest krótszy niż 100ms, są odrzucane.

W przypadku zbioru kolejnych punktów zaklasyfikowanych jako elementy sakkad, punkty te są łączone w pojedynczą sakkadę z oznaczonymi współrzędnymi początku oraz końca sakkady. Sakkady, w których pojawiły się próbki z brakiem danych dotyczących pozycji wzroku, są odrzucane.

В функції поєднується набір послідовних точок, який класифікується, як належні до точок фіксації, об'єднані в єдиний сегмент фіксації координати центру і визначається, як центр ваги. Потім наступні сегменти фіксації об'єднують в один великий сегмент на основі двох параметрів: інтервалу часу між ними і Евклідовою довжиною між центрами цих сегментів. Як мксимальне значення інтервалу часу, між сегментами, використовується час тривалості моргання 75мс, а як фільтр Евклідової довжини використовується амплітуда мікросаккади (амплітуда менша, ніж 0,5°). Для нового сегмента знову обчислюються координати центру (центроїда об'єднаних сегментів) та час тривання. Фіксації, час тривання яких, становить менше 100мс відхиляються.

У разі набору послідовних точок, класифікованих як елементи саккад, ці точки будуть об'єднані в єдину саккаду з визначеними координатами початку і кінця саккади. Саккади, в яких з'явилися зразки з відсутністю даних, які стосуються позиції зору відхиляються.

2.2. Algorytmy klasyfikacji

Algorytm *Velocity Threshold Identification* (I-VT) jest najprostszą metodą identyfikacji fiksacji oraz sakkad. W algorytmie tym wartość prędkości jest obliczana dla każdego punktu pozycji wzroku. Następnie wartość ta jest porównywana do wartości progowej prędkości (ang. velocity threshold). W przypadku, gdy wartość ta jest mniejsza od wartości progowej, punkt jest klasyfikowany jako element fiksacji, w przeciwnym wypadku jako składowa sakkady (tab. 4) [6]. Wartość progową prędkości można szacować na podstawie zgromadzonych zbiorów danych w oparciu o analizę tych danych. W przypadku, gdy odległość badanego od bodźca wizualnego jest znana, wartość progowa może być wnioskowana na podstawie uzasadnionego progu prędkości kątowej [13].

Tabela 4. Pseudokod algorytmu I-VT
Таблиця 4. Псевдокод алгоритму I-VT

***Input**: array of eye positions point, velocity threshold*
***Output**: array of fixations and saccades*

Calculate point-to-point velocities for each point in the eye position array

If (velocity for point < velocity threshold)
    Mark point as a fixation point
Else
    Mark as a saccade point

Return *array of pre-classified fixation and saccade points*

Algorytm *Hidden Markov Model Identification* (I-HMM) jest bardziej zaawansowaną wersją algorytmu I-VT wykorzystującą ukryte modele Markova (ang. *Hidden Markov Model*). W tym przypadku jest to automat skończony złożony z dwóch stanów (fiksacja oraz sakkada) o określonym rozkładzie prędkości oraz przejść między nimi o określonym prawdopodobieństwie. Algorytm I-HMM złożony jest z trzech etapów. W pierwszym etapie każdy punkt jest klasyfikowany jako element fiksacji lub sakkady w oparciu o wartość progową prędkości. W drugim etapie w oparciu o algorytm Viterbiego, każdy punkt może być reklasyfikowana jako fiksacja lub sakkada w celu maksymalizacji prawdopodobieństwa przyporządkowania danego stanu modelu. Ponieważ na tym etapie parametry modelu nie są optymalne, w ostatnim etapie wykorzystywany jest algorytm Bauma-Welcha odnajdywania nieznanych parametrów HMM w celu minimalizacja liczby błędnie przypisanych punktów do stanów. Ostatni etap może być powtarzany wielokrotnie w celu optymalizacji modelu [7].

Algorytm *Kalman Filter Identification* (I-KF) opiera się na modelu złożonym z dwóch stanów: położenia oraz prędkości. W modelu tym przyśpieszenie oka modelowane jest jako biały szum z określonym przyśpieszeniem maksymalnym [14]. Model ten po nałożeniu na zapis okulograficzny, generuje przewidywaną wartość prędkości wzroku. W celu klasyfikacji punktów sygnału jako sakkady lub fiksacji, wartość zmierzona (obliczona na podstawie danych) oraz przewidywana wartość przyśpieszenia są badane za pomocą testu chi-kwadrat

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{p} \frac{\left(\hat{\theta}_i^- - \dot{\theta}_i\right)^2}{\sigma^2},$$

gdzie $\hat{\theta}_i^-$ - wartość przewidywana prędkości wzroku obliczona za pomocą filtru Kalmana, $\dot{\theta}_i$ - wartością zmierzona, a σ - odchyleniem standardowym zmierzonej prędkości wzroku dla określonego interwału [8]. Punkty powyżej obliczonej wartości progowej chi-kwadrat są klasyfikowane jako punkty należące do sakkad, a punkty poniżej jako elementy fiksacji.

Algorytm *Dispersion Threshold Identification* (I-DT) bada rozmieszczenie oraz sąsiedztwo punktów w przestrzeni dla zapisanego sygnału okulograficznego za pomocą okno czasowe, które przesuwa się o jeden punkt w danym kroku algorytmu (tab. 5). Rozproszenie przestrzenne, utworzone przez punkty

2.2. Алгоритми класифікації

Алгоритм *Velocity Threshold Identification* (I-VT) є простим способом для виявлення, фіксації та саккад. У цьому алгоритмі, швидкість обчислюється для кожної точки положення очей. Це значення потім порівнюється з пороговою швидкістю (англ. *velocity threshold*). У випадку, коли значення менше, ніж порогове значення, то точка класифікується, як елемент фіксації, в іншому випадку, як компонент саккади (табл. 4) [6]. Порогове значення швидкості може бути оцінене на підставі зібраних наборів даних, опираючись на аналізі цих даних. У випадку, коли відстань від досліджуваного до візуального стимулу відома, порогове значення може бути запропоноване на підставі кутового порога швидкості [13].

Алгоритм *Hidden Markov Model Identification* (I-HMM) є більш відомою версією алгоритму I-VT, що використовує приховані моделі Маркова (анг. *Hidden Markov Model*). У цьому випадку, це кінцевий автомат, що складається з двох станів (фіксація і саккада) із заданою швидкістю розподілу і переходами між ними з деякою ймовірністю. Алгоритм I-HMM складається з трьох етапів. В першому етапі, кожна точка класифікується, як фіксація або саккади на основі значення порогової швидкості. На другому етапі, на основі алгоритму Вітербо, кожна точка може бути класифікована, як фіксація або саккада, щоб максимізувати ймовірність призначення даного стану моделі. На цьому етапі, параметри моделі не є оптимальними, в останньому етапі використовується алгоритм Baum-Welch знаходження невідомих параметрів HMM, ціллю є мінімалізація кількості неправильно приписаних точок для станів. Останній етап може бути повторений кілька разів, щоб оптимізувати модель [7].

Алгоритм *Kalman Filter Identification* (I-KF) заснований на моделі, що складається з двох станів: положення і швидкості. У цій моделі, прискорення очей моделюється у вигляді білого шуму з конкретним максимальним прискоренням [14]. Ця модель, при застосуванні окулографічного запису генерує очікувані значення швидкості зору. Для того, щоб класифікувати точки сигналу, як саккади або фіксації, виміряне значення (розраховане на основі даних), а також передбачене значення прискорення тестуються за допомогою хі-квадрат тесту

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{p} \frac{\left(\hat{\theta}_i^- - \dot{\theta}_i\right)^2}{\sigma^2}, \qquad (1)$$

де $\hat{\theta}_i^-$ - передбачене значення швидкості зору, розраховане за допомогою використання фільтра Калмана, $\dot{\theta}_i$ - виміряне значення, а σ - стандартне відхилення виміряної швидкості зору для даного інтервалу [8]. Крапки, за порогом розрахованого значення хі-квадрату класифікуються, як крапки, що належать до саккад, а нижчі точки, як елементи фіксації.

Алгоритм *Dispersion Threshold Identification* (I-DT) вивчає розподіл і сусідство точок в просторі для окулографічного сигналу записаного за допомогою часового вікна, що рухається по одній точці, в даному алгоритмі (табл. 5).

znajdujące się w oknie czasowym, jest porównywane z wartością progową. Jeśli rozproszenie jest poniżej wartości progowej punkty w oknie czasowym klasyfikowane są jako fiksacja. W przeciwnym wypadku okno jest przesuwane o jeden punkt, a pierwszy punkt poprzedniego okna czasowego jest klasyfikowany jako sakkada. Początkowy rozmiar okna czasowego jest ustawiony na minimalny czas trwania fiksacji tj. 100ms. Rozproszenie przestrzenne punktów jest obliczane ze wzoru [6]:

Просторова дисперсія, утворена точками, що містяться в даному часовому вікні, порівнюються з пороговим значенням. Якщо дисперсія нижча порогового значення, точки у часовому вікні класифікуються, як фіксація. В іншому випадку, вікно зсувається на одну точку і перша точка попереднього часового вікна класифікується, як саккада. Початковий розмір часового вікна встановлено на мінімальну тривалість фіксації, тобто 100мс. Просторова дисперсія точок розраховується за формулою [6]:

$$D = [\max(X) - \min(X)] + [\max(Y) - \min(Y)], \quad (2)$$

gdzie X i Y reprezentują zestawy położenia wzroku w osi OX i OY w obrębie okna czasowego.

де X і Y представляють положення зору в осі OX і OY в даному часовому вікні.

Tabela 5. Pseudokod algorytmu I-DT [6]
Таблиця 5. Псевдокод алгоритму I-DT [6]

***Input**: array of eye positions points. dispersion threshold, temporal window size*
***Output**: array of fixations and saccades*

Initialize temporal window over the first points in the remaining
Calculate dispersion of points in window

If (dispersion < dispersion threshold)
    While dispersion < dispersion threshold
        Add one more point to window
        Calculate dispersion of points in window
    Mark the points inside of the window as fixations
    Clear window
Else
    Remove the first point from window
    Mark the first point as a saccade

Return *array of pre-classified fixation and saccade points*

Algorytm *Minimum Spanning Tree Identification* (I-MST) różni się od przestawionych wcześniej modeli. Jest on oparty na strukturze drzewa rozpinającego z minimalną odległością Euklidesową. Algorytm I-MST buduje minimalne drzewo rozpinające za pomocą algorytmu Prima wykorzystując predefiniowaną liczbę punktów z zapisu okulograficznego. I-MST przemierza grupę punktów i klasyfikuje każdy punkt położenia wzroku na podstawie wartości progowej dla odległości między sąsiadującymi punktami. Punkty poniżej wartości progowej są sklasyfikowane jako punkty fiksacji, a punkty powyżej progu są sklasyfikowane jako część sakkady [7]. Zaletą I-MST jest prawidłowa identyfikacja punktów fiksacji, nawet jeśli brakuje znacznej części sygnału okulograficznego z powodu szumów [13].

Przedstawione algorytmy stanowią jedynie część dostępnych algorytmów klasyfikacji. Wiele algorytmów klasyfikacji jest tworzonych i dostarczanych wraz ze sprzętem przez producentów, niemniej rzadko oni ujawniają szczegóły dotyczące implementacji algorytmów.

Właściwy dobór wartości progowej dla algorytmów klasyfikacji jest kluczowy do otrzymania znaczących wyników analizy. Dobór wartości progowej uzależniony jest od parametrów okulografu, uwarunkowania eksperymentu, czy też charakterystyki uczestników badania.

3. Ruchy oka a zaburzenia neurodegeneracyjne

Pierwszy eksperyment z okulografem na pacjentach z zaburzeniami neurodegeneracyjnymi przeprowadzono w latach sześćdziesiątych XX wieku. Eksperyment ten zapoczątkował wiele późniejszych badań. Niemniej wiele z tych badań cechuje mała liczba uczestników, co przekłada się na brak mocy statystycznej. Z drugiej strony, w przypadku choroby Parkinsona, różnorodność prezentacji choroby doprowadziła do niezgodności pomiędzy wynikami poszczególnych badań [1].

Przykładowe badania na pacjentach z zaburzeniami neurodegeneracyjnymi zostały przedstawione na zestawieniu w tablicy 6. Zestawienie to zawiera nazwę choroby, informację o zidentyfikowanym zaburzeniu ruchów oka oraz krótką charakterystykę badania.

Алгоритм *Minimum Spanning Tree Identification* (I-MST) відрізняється від раніше представлених моделей. Він заснований на структурі сполучного дерева з мінімальною Евклідовою відстанню. Алгоритм I-MST будує мінімальне дерево за допомогою алгоритму Прима, використовуючи задане число точок із окулографічного запису. I-MST проходить точкову групу і класифікує кожну точку розташування зору на основі порогового значення для відстані між сусідніми точками. Точки нижче порогового значення класифікуються, як точоки фіксації, а точки вище порогового значення класифікуються, як частина саккади [7]. Перевага I-MST є точне визначення точок фіксації, навіть якщо не вистачає значної частини окулографічного сигналу через шум [13].

Запропоновані алгоритми складають тільки частину наявних алгоритмів класифікації. Багато алгоритмів класифікації створюються і поставляються виробниками разом з обладнанням, але вони рідко розкривають деталі реалізації алгоритмів.

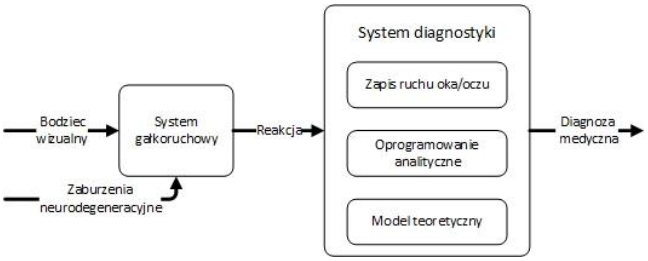
Правильний вибір порогового значення, для алгоритмів класифікації, має вирішальне значення для отримання конкретного аналізу результатів. Вибір порогового значення залежить від параметрів окулографа, умов експерименту і характеристики учасників дослідження.

3. Рухи очей і нейродегенеративні розлади

Перший експеримент з окулографом, на пацієнтах з нейродегенеративними захворюваннями проведено в шістдесятих роках двадцятого століття. Цей експеримент розпочав набагато пізніші дослідження. Тим не менш, багато з цих досліджень характеризуються малим числом учасників, що пояснюється відсутність статистичної міцності. З іншого боку, у випадку хвороби Паркінсона, різні презентації захворювання призвели до розбіжностей між результатами окремих досліджень [1].

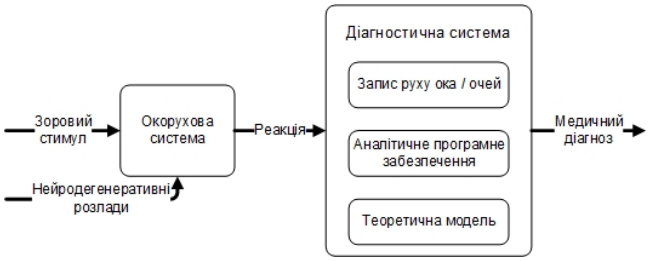
Приклади досліджень пацієнтів з нейродегенеративними розладами представлені для порівняння в таблиці 6. Ця таблиця містить назву хвороби, інформацію про ідентифікований розлад руху очей, і короткий опис дослідження.

Opublikowane wyniki badań w postaci informacji o charakterystycznych zaburzeniach ruchów oczu mogą stanowić podstawę do opracowania modelu teoretycznego zaburzeń dla poszczególnych chorób neurodegenaracyjnych. Model teoretyczny połączony z oprogramowaniem analitycznym umożliwiłby analizę zapisu ruchu oczu i postawienie diagnozy medycznej. Model koncepcyjny takiego systemu został przedstawiony an rys. 3.



Rys. 3. Model koncepcyjny systemu do diagnostyki medycznej w oparciu o analizę ruchów oczu [11]

Опубліковані результати досліджень у вигляді інформації про конкретні порушення рухів очей, можуть бути основою, для розробки теоретичної моделі конкретних порушення, для нейродегенеративних захворювань. Теоретична модель у поєднанні з програмним забезпеченням для аналізу дозволить аналіз запису рухів очей і установлення медичного діагнозу. Концептуальна модель такої системи показана на мал. 3.



Мал. 3. Концептуальна модель системи для медичної діагностики на основі аналізу рухів очей [11]

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono typy okulografów, ogólną zasadę działania modelu identyfikacji ruchów oka oraz pięć głównych algorytmów klasyfikacji stosowanych w tym modelu. Informację te są niezbędne do zaplanowania badania okulograficznego w obszarze medycznym, a także do zrozumienia możliwości zastosowania tych badań w procesie diagnozowania.

Ruchy oczu są rejestrowane bezboleśnie oraz szybko dostarczając precyzyjnych i obiektywnych danych dotyczących zaburzeń okoruchowych. Niemniej, aby było możliwe wykorzystanie badań okulograficznych w diagnostyce medycznej, zaburzenia te muszą być wystarczająco specyficzne, a ich związek z chorobą jest dostatecznie mocny.

4. Висновок

У статті представлені різні типи окулографів, загальний принципом роботи моделі ідентифікації рухів очей і виділено п'ять основних алгоритмів класифікації, що використовуються в цій моделі. Ця інформація необхідна для планування окулографічного дослідження в галузі медицини, а також для розуміння можливості застосування цих досліджень в діагностиці.

Рухи очей записуються безболісно і швидко даючи точні і об'єктивні дані про окорухові порушення. Однак, щоб можна було використовувати окулографічні дослідження в медичній діагностиці, ці порушення повинні бути досить конкретними, а їхній зв’язок з хворобою досить міцним.

Tabela 6. Zestawienie wybranych badań zaburzeń okoruchowych w chorobach neurodegeneracyjnych

Zaburzenie neurodegeneracyjne	Zidentyfikowane zaburzenia ruchów oka	Publikacja	Charakterystyka badania
Choroba Parkinsona (PD)	Wzrost opóźnienia sakkady	[15]	Badanie przeprowadzono na 66 pacjentach z PD oraz 87 osobowej grupie kontrolnej dopasowanej wiekowo. Dodatkowo przeprowadzone badanie zaawansowanie PD za pomocą *Unified Parkinson's Disease Rating Scale*, do korelacji wyników badań okulogarficznych ze stanem pacjentów. Do badania zastosowano EOG o częstotliwości 500Hz, przeprowadzono wstępną kalibrację.
Choroba parkinsona z otępieniem (PDD)	Spadek ilości sakkad predykcyjnych	[10]	Badanie przeprowadzona na grupie dopasowanych wiekowo oraz pod względem wykształcenia na 20 pacjentach z PDD, 20 pacjentach z otępieniem z ciałami Lewy'ego, 22 z AD, 24 z PD oraz 24 osobową grupą kontrolną. Dodatkowo oceniono stan pacjentów za pomocą *Unified Parkinson's Disease Rating Scale* oraz zbadano wiedzenie kolorów za pomocą testu Ishihary. Do badania zastosowano EOG o częstotliwości 1kHz, przeprowadzono wstępną kalibrację ruchów w płaszczyźnie poziomej.
Choroba Alzheimera (AD)	Wzrost błędów antysakkad	[3]	Badanie przeprowadzono na 28 pacjentach z AD, 27 osobowej grupie kontrolnej oraz 25 osobowej grupie osób z zaburzeniami neurologicznymi. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem eyetrackera wykorzystującego system *video-based combined pupil/corneal reflection* (Dual Purkinje Image Eye Tracker). Badania przeprowadzano w ciemnym pomieszczeniu, rejestrowano jedynie ruch prawego oka z częstotliwością 330Hz.
Choroba Huntingtona (HD)	Wzrost opóźnienia sakkady	[12]	Badanie przeprowadzono na 9 pacjentach z HD oraz 9 osobowej grupie kontrolnej dopasowanej wiekowo oraz pod względem płci. Dodatkowo przeprowadzone badanie zaawansowanie HD za pomocą *Unified Huntington's Disease Rating Scale*, aby możliwa była korelacja wyników ze stopniem zaawansowania choroby. Do badania zastosowano EOG o częstotliwości 1kHz, rejestrowano ruchu oczu w poziomie.

Таблиця 6. Обрані дослідження окорухових порушень при нейродегенеративних захворюваннях

Розлад нейродегенеративний	Виявлені розлади рухів ока	Публікація	Характеристики дослідження
Хвороба Паркінсона (PD)	Зріст затримки саккади	[15]	Дослідження було проведено на 66 хворих з PD і 87 особовою контрольною групою, вік досліджуваних приблизно однаковий. Додатково проведені дослідження важкої форми PD за допомогою *Unified Parkinson's Disease Rating Scale*, для співвідношення результатів випробувань окулографічних зі станом пацієнтів. У дослідженні було використано EOG з частотою 500Гц, було проведено попереднє калібрування.
Хвороба Паркінсона з деменцією (PDD)	Зниження кількості інтелектуальних саккад	[10]	Дослідження, проведене в групі 20 осіб з PDD досліджувані одного віку і з подібним рівнем освіти , 20 пацієнтів з деменцією з тільцями Леві, 22 з AD, 24 з PD і 24 особовою контрольною групою. Додатково оцінено стан хворих за допомогою *Unified Parkinson's Disease Rating Scale*, і досліджено бачення кольорів за допомогою тесту Ісихара. У дослідженні було використано EOG з частотою 1кГц, було проведено попереднє калібрування рухів у горизонтальній площині.
Хвороба Альцгеймера (AD)	Збільшення помилок антисаккад	[3]	Дослідження було проведено на 28 хворих з AD, 27 особовій контрольній групі і 25 особовій групі людей з неврологічними розладами. Дослідження було проведено з використанням eye trackera за допомогою системи *video-based combined pupil/corneal reflection* (Dual Purkinje Image Eye Tracker). Дослідження було проведено в темній кімнаті, реєструвався тільки рух правого ока з частотою 330Гц.
Хвороба Гентінгтона (HD)	Збільшення затримки саккади	[12]	Дослідження було проведено на 9 пацієнтах з HD і 9 особовій контрольній групі, яка була підібрана за віком і статтю. Додатково проведені дослідження важкої форми HD за допомогою *Unified Huntington's Disease Rating Scale*, щоб можна було провести кореляцію результатів для прогресування захворювання. У дослідженні було використано EOG з частотою 1кГц, реєструвалися вертикальні рухи очей .

Podziękowania

Praca powstała w ramach projektu PL-NTU Transgraniczna wymiana doświadczeń PBU.03.01.00-06-386/11-00 współfinansowanego w ramach Programu Współpracy Transgranicznej Polska-Białoruś-Ukraina 2007-2013 finansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Instrumentu Sąsiedztwa i Partnerstwa.

Niniejsza publikacja została stworzona przy pomocy Unii Europejskiej. Wyłączną odpowiedzialność za zawartość niniejszej publikacji ponosi Magdalena Borys oraz w żaden sposób nie może być ona postrzegana jako odzwierciedlenie poglądów Unii Europejskiej.

Завдяки

Робота створена в рамках проекту ПЛ-НТУ Транскордонний обмін досвідом PBU.03.01.00-06-386/11-00, співфінансованого в рамках Програми Транскордонного Співробітництва Польща-Білорусь-Україна 2007-2013, що фінансується Європейським Союзом в рамках Європейського Інструменту Сусідства та Партнерства.

Ця публікація була створена за допомогою Європейського Союзу. Відповідальність за зміст цієї публікації лежить на Магдалені Борис, і жодним чином не може розглядатися як відображення поглядів Європейського Союзу.

Literatura || Література

[1] Anderson T.J., MacAskill M.R.: Eye movements in patients with neurodegenerative disorders. Nature Reviews Neurology, 9(2), 2013, 74-85.
[2] Duchowski, A.: Eye tracking methodology: Theory and practice, Vol. 373, Springer Science & Business Media, 2007.
[3] Garbutt S., Matlin A., Hellmuth J., Schenk A.K., Johnson J.K., Rosen H., Boxer A.L.: Oculomotor function in frontotemporal lobar degeneration, related disorders and Alzheimer's disease. Brain, 131(5), 2008, 1268-1281.
[4] Holmqvist K., Nyström M., Andersson R., Dewhurst R., Jarodzka H, Van de Weijer J.: Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures. Oxford University Press, 2011.
[5] Jadanowski K., Budrewicz S., Koziorowska-Gawron E.: Zaburzenia gałkoruchowe w chorobach ośrodkowego układu nerwowego. Polski Przegląd Neurologiczny, 6(4), 2010, 202-211.
[6] Komogortsev O.V., Gobert D.V., Jayarathna S., Koh D.H., Gowda S.M.: Standardization of automated analyses of oculomotor fixation and saccadic behaviors. Biomedical Engineering, IEEE Transactions, 57(11), 2010, 2635-2645.
[7] Komogortsev O.V., Jayarathna, S., Koh D.H., Gowda S.M.: Qualitative and quantitative scoring and evaluation of the eye movement classification algorithms. Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research & Applications ACM, 2010, 65-68.
[8] Komogortsev O.V., Khan J.I.: Kalman filtering in the design of eye-gaze-guided computer interfaces. Human-Computer Interaction. HCI Intelligent Multimodal Interaction Environments, Springer Berlin Heidelberg, 2007, 679-689.
[9] Kuechenmeister C.A., Linton P. H., Mueller T.V., White H.B.: Eye Tracking in Relation to Age, Sex, and Illness. Arch Gen Psychiatry, 34(5), 1977, 578-579.
[10] Mosimann U.P., Müri R.M., Burn D.J., Felblinger J., O'Brien J.T., McKeith I.G.: Saccadic eye movement changes in Parkinson's disease dementia and dementia with Lewy bodies. Brain, 128(6), 2005, 1267-1276.
[11] Ober J., Dylak J., Gryncewicz W., Przedpelska-Ober E.: Sakkadometria–nowe możliwości oceny stanu czynnościowego ośrodkowego układu nerwowego. [Saccadometryp-new possibilities of evaluating the state of the central nervous system activity]. Nauka, 4, 2009, 109-135.
[12] Peltsch, A., Hoffman, A., Armstrong, I., Pari, G., Munoz, D.P.: Saccadic impairments in Huntington's disease. Experimental brain research, 186(3), 2008, 457-469.
[13] Salvucci D.D., Goldberg J.H.: Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. Proceedings of the 2000 symposium on Eye tracking research & applications. ACM, 2000, 71-78.
[14] Sauter D., Martin B.J., Di Renzo N., Vomscheid C.: Analysis of eye tracking movements using innovations generated by a Kalman filter. Medical and biological Engineering and Computing, 29(1), 1991, 63-69.
[15] Terao Y., Fukuda H., Yugeta A., Hikosaka O., Nomura Y., Segawa M., Ugawa Y.: Initiation and inhibitory control of saccades with the progression of Parkinson's disease–changes in three major drives converging on the superior colliculus. Neuropsychologia, 49(7), 2011, 1794-1806.
[16] Verheij S., Muilwijk D., Pel J.J., van der Cammen T.J., Mattace-Raso F.U., van der Steen J.: Visuomotor impairment in early-stage Alzheimer's disease: changes in relative timing of eye and hand movements. Journal of Alzheimer's Disease, 30(1), 2012, 131-143.

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

Magdalena Borys jest absolwentką Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej na kierunku Informatyka. Od 2008 roku pracownik naukowy Politechniki Lubelskiej, zatrudniona na stanowisku asystenta w Instytucie Informatyki PL.
Obszar zainteresowań naukowych to przede wszystkim projektowanie oraz badanie użyteczności interfejsów aplikacji, badania okulograficzne i ich zastosowania w medycynie, .przetwarzanie sygnałów biomedycznych, grywalizacja.

Магістр інж. Магдалена Борис
e-mail: m.borys@pollub.pl

Магдалена Борис випускниця факультету Електротехніки та Інформатики Люблінської Політехніки в галузі Інформатика. З 2008 року науковий працівник Люблінської Політехніки, працює асистентом в Інституті Інформатики ЛП.
Наукові інтереси проектування і дослідження користі інтерфейсів, окулографічні дослідження і їх застосування в медицині, перетворення біомедичних сигналів, гривалізація (англ.gamification).

otrzymano/отримано/received: 23.03.2015 *przyjęto do druku/прийнято до друку/accepted: 30.03.2015*

PL-BY-UA 2007-2013

Współfinansowane ze środków Unii Europejskiej

DOI: 10.5604/20830157.1159333

SYSTEMY FOTOWOLTAICZNE W BUDYNKACH – MODEL PRACY W WARUNKACH KLIMATYCZNYCH LUBLINA A ASPEKTY ŚRODOWISKOWE

Agnieszka Żelazna
Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii Odnawialnych Źródeł Energii, Zakład Zrównoważonego Rozwoju

Streszczenie. *Z uwagi na rosnącą konsumpcję oraz wyczerpywanie złóż kopalin jednym z istotnych problemów jest zaopatrzenie w energię. W związku z tym odnawialne źródła energii, takie jak energia słoneczna, stają się coraz bardziej popularne, jednak wprowadzaniu na rynek nowych technologii powinna zawsze towarzyszyć analiza ich oddziaływania na środowisko. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki porównania emisji ditlenku węgla na bazie metodologii zarządzania środowiskowego Life Cycle Assessment (Ocena Cyklu Życia) wybranych systemów fotowoltaicznych. Symulacja pracy instalacji obejmowała uwzględnienie lokalnych warunków klimatycznych. W porównaniu ze wskaźnikami emisji dla konwencjonalnych źródeł energii, wymienione technologie wykazują znaczny spadek wskaźników emisji gazów cieplarnianych w perspektywie cyklu życia i dlatego też mogą być stosowane w celu realizacji uregulowań międzynarodowych w tym zakresie.*

Słowa kluczowe: ślad węglowy, energia słoneczna, konwersja fotowoltaiczna, ocena cyklu życia, zarządzanie środowiskowe, wskaźnik Global Warming Potential

ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ В БУДІВЛЯХ - МОДЕЛЬ РОБОТИ В КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ ЛЮБЛІНА ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ

Анотація. *У зв'язку зі збільшенням використання і виснаженням родовищ корисних копалин, енергопостачання є однією з головних проблем. Таким чином, відновлювані джерела енергії, такі як сонячна енергія, стають все більш поширеними, але впровадження нових технологій завжди має супроводжуватися аналізом їх впливу на навколишнє середовище. В даній статті наведено результати порівняння викидів діоксиду вуглецю на основі методології екологічного менеджменту Life Cycle Assessment (Оцінка Життєвого Циклу), обраних фотоелектричних систем. В роботі місцевий клімат був браний під увагу. У порівнянні з викидами для звичайних джерел енергії, ці технології демонструють значне зниження рівня викидів та парникових газів в перспективі Життєвого Циклу, і тому можуть бути використані для здійснення міжнародних нормативних документів у цій галузі.*

Ключові слова: вуглецевий слід, сонячна енергія, фотоелектрична конверсія, оцінка життєвого циклу, управління навколишнім середовищем, показник глобального потепління

PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN BUILDINGS – MODEL OF WORK IN LUBLIN CLIMATE CONDITIONS AND ENVIRONMENTAL ASPECTS

Abstract. *Due to the increasing consumption and depletion of fossil fuels' resources, one of the nowadays major problems is energy supply. Consequently, renewable energy sources, such as solar energy, are becoming more and more popular. However, introduction of new technologies should always be accompanied by the analysis of their impact on the environment. This article presents the results of the comparison of carbon dioxide emissions from selected photovoltaic systems on the basis of the environmental management method Life Cycle Assessment. Model of the installation work included local climate conditions. In comparison with the emission indicators of conventional energy sources, solar technologies bring a significant decrease of greenhouse gas emissions throughout the life cycle, and therefore can be used for the implementation of the international regulations in this area.*

Keywords: carbon footprint, solar energy, photovoltaic, life cycle assessment, environmental management, Global Warming Potential

Wprowadzenie

Pojęcie zrównoważonego rozwoju odnosi się do równowagi pomiędzy trzema obszarami natury ekologicznej, ekonomicznej i społecznej. W dobie społeczeństwa konsumpcyjnego utrzymanie tej równowagi nie jest to kwestią łatwą, dlatego też konieczne jest wprowadzenie środków prawnych w celu wyznaczenia pożądanych kierunków rozwoju społeczeństw. Obecnie idea zrównoważonego rozwoju jest traktowana jako priorytet w większości aktów prawnych na poziomie zarówno Unii Europejskiej, jak też poszczególnych krajów. W działalności gospodarczej, w tym dla producentów energii, zrównoważony rozwój oznacza uwzględnienie aspektów ekologicznych w określaniu kierunków rozwoju, zgodność z normami środowiskowymi i dostosowanie potrzeb rozwojowych do lokalnych warunków [1, 12].

Znaczenie branży energetycznej w realizacji zasady zrównoważonego rozwoju jest istotne z uwagi na fakt, że w ciągu ostatnich 25 lat światowe zapotrzebowanie energii pierwotnej wzrosło o 63%, podczas gdy liczba ludności wzrosła o 45% [16]. Z perspektywy minionego stulecia, zużycie paliw wzrastało o 3% rocznie. Biorąc pod uwagę prognozy, zużycie to będzie stale wzrastać, co pociąga za sobą niebagatelne skutki zarówno społeczne, jak tez ekonomiczne i środowiskowe.

Proponowane rozwiązania dla problemu przyszłości branży energetycznej skłaniają do inwestowania w nowe, ekologiczne

Введення

Поняття зрівноваженого розвитку відноситься до балансу між трьома областями природи: екологічними, економічними та соціальними. В епоху консумпційного суспільства підтримка цього балансу є не легким завданням, тому необхідно вжити законодавчих заходів для визначення необхідного напрямку розвитку суспільства. Сьогодні ідея зрівноваженого розвитку стала пріоритетом в більшості правових актах, як на рівні Європейського Союзу, так і окремих країн. У господарчій діяльності, в промисловості, для продуцентів енергії, зрівноважений розвиток означає врахування екологічних аспектів у визначенні напрямку розвитку, дотримання екологічних норм та потреб розвитку для місцевих умов [1, 12].

Важливість енергетичного сектору в реалізації принципу зрівноваженого розвитку має важливе значення у зв'язку з тим, що за останні 25 років свытовий попит на первинну енергію зріс на 63%, в той час як населення зросло на 45% [16]. З точки зору минулого століття, витрата палива збільшилася на 3% в рік. Враховуючи прогнози, то споживання буде продовжувати рости, що тягне за собою значні наслідки соціальні, а також економічні і екологічні.

Запропоновані рішення для розв'язання проблеми майбутнього в енергетичній галузі, заохочують інвестувати

technologie, takie jak odnawialnych źródeł energii (OŹE). Polska, jako członek Organizacji Narodów Zjednoczonych i Unii Europejskiej, jest zobowiązana do promowania OŹE poprzez podpisanie Ramowej Konwencji w sprawie zmian klimatu i protokołu z Kioto. Ramową Konwencję Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu, podejmująca kwestię zagrożeń powodowanych przez globalne ocieplenie, przyjęto podczas Szczytu Ziemi w Rio de Janeiro w czerwcu 1992 r. Jej kontynuacją był Protokół z Kioto z 1997 r. Państwa biorące udział w jego podpisaniu zobowiązały się do redukcji emisji CO_2 o wynegocjowane wielkości, wynoszące minimum 5% w stosunku do stanu wyjściowego.

Ponadto zatwierdzony w końcu 2008 roku przez Parlament Europejski pakiet klimatyczny 3x20 zakłada zmniejszenie produkcji CO_2, zwiększenie efektywności energetycznej oraz wzrost udziału w rynku odnawialnych źródeł energii [1, 12].

Obecnie większość energii wytwarzanej na polskim rynku opiera się na węglu [13]. Inicjatywa wprowadzenia technologii czystej energii powinna być poprzedzona przez stosowne analizy i badania, które wskażą na prawidłowe decyzje o rodzaju odnawialnych źródeł energii i skuteczne sposoby ich wykorzystania. Techniką zarządzania środowiskowego umożliwiającą całościową analizę produktu bądź systemu jest Ocena Cyklu Życia (Life Cycle Assessment, LCA).

Jedną z popularnych metod oceny wpływu cyklu życia jest technika obliczania emisji gazów cieplarnianych, wyrażonej jako $kgCO_{2eq}$ [17]. Celem niniejszej pracy jest określenie emisji ekwiwalentu ditlenku węgla dla dwóch popularnych technologii fotowoltaicznych z wykorzystaniem Oceny Cyklu Życia poprzez określenie potencjału globalnego ocieplenia w perspektywie stu lat (Metoda GWP100a).

1. Środowiskowe aspekty pracy instalacji słonecznych

W literaturze naukowej ostatniej dekady pojawiły się artykuły dotyczące oceny cyklu życia energii pochodzącej z odnawialnych źródeł. Większość analiz dotyczy bilansu ekologicznego systemów ciepłej wody i systemów fotowoltaicznych w oparciu o przykłady urządzeń pracujących w Europie Południowej lub uwzględnia ocenę cyklu życia na etapie produkcji komponentów systemu.

Ardente [3] zastosował metodologię Oceny Cyklu Życia do analizy emisji ditlenku węgla związanej z fazą produkcji kolektora słonecznego (2,13 m^2 powierzchni efektywnej). Autor oszacował wykorzystanie energii pierwotnej na etapie produkcji modułu jako 11,5 GJ i emisję ditlenku węgla jako 721 $kgCO_{2eq}$. Większość energii pierwotnej jest związane z fazą wydobywania surowców. W podsumowaniu autor podkreślił, że bezpośrednie zużycie energii jest mniej istotne, niż zużycie pośrednie.

Kalogirou [9, 10] zastosował Ocenę Cyklu Życia do analizy wpływu na środowisko płaskich kolektorów słonecznych z punktu widzenia zużycia energii pierwotnej. Pierwszy system działa jako zintegrowany z zasobnikiem ciepłej wody użytkowej, wykorzystanie energii pierwotnej do produkcji oszacowano jako 2,7 GJ. Dla standardowego systemu z dwoma mediami (glikol polipropylenowy dla kolektorów i ciepła woda w instalacji) autor obliczył zużycie energii pierwotnej jako 3,5 GJ.

Battisi i Corrado [4] poddali analizie system kolektora słonecznego termicznego zintegrowanego z zasobnikiem. Wykorzystanie energii pierwotnej dla produkcji, dostawy i końcowego zagospodarowania badanego systemu zostało obliczone jako 3,1 GJ, a emisja gazów cieplarnianych jako 219,4 $kgCO_{2eq}$. Większość wskaźników jest związana z fazą produkcji (97,8%). Ze względu na szczególną budowę systemu (kolektor pojemnościowy jako magazyn ciepła), który nie wymaga żadnych dodatkowych środków do pracy (brak konieczności pompowania), fazy operacyjna cyklu została pominięta. Należy wspomnieć, że tego rodzaju system nie może pracować

в нові екологічно чисті технології, такі як відновлювані джерела енергії (ВДЕ). Польща, як член Організації Об'єднаних Націй та Європейського союзу зобов'язана сприянню ВДЕ, підписавши Конвенцію з питань зміни клімату і Кіотський протокол. Рамкова конвенція Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату, яка підіймає питання ризику, пов'язаного з глобальним потеплінням, прийнята на Саміті Землі в Ріо-де-Жанейро в червні 1992 році. Її продовженням був Кіотський протокол в 1997 році, країни, що брали участь у підписанні зобов'язалися скоротити викиди CO_2 до договірних розмірів мінімум 5% щодо вихідного рівня.

Крім того, затверджено наприкінці 2008 року Європейським парламентом Кліматичний Пакет 3x20 націлений на скорочення виробництва CO_2, підвищення енергоефективності та збільшення частки ринку поновлюваних джерел енергії [1, 12].

В даний час велика частина енергії, що виробляється на польському ринку є на основі вугілля [13]. Ініціативі впровадження екологічно чистих енергетичних технологій мають передувати відповідні дослідження, які будуть вказувати правильні рішення для типу відновлюваних джерел енергії та ефективних способів їх використання. Техніка управління навколишнім середовищем, що дозволяє проводити комплексний аналіз продукту або системи є Оцінка Життєвого Циклу (Life Cycle Assessment, LCA).

Одним з популярних методів Оцінки Життєвого Циклу є техніка розрахунку викидів парникових газів, виражена $кгCO_{2eq}$ [17]. Метою даної статті є визначення викидів у еквіваленті діоксиду вуглецю для двох популярних фотоеоектричних технологій з використанням Оцінки Життєвого Циклу, ідентифікації потенціалу глобального потепління в перспективі через сто років (метод GWP100a).

1. Екологічні аспекти роботи сонячних установок

У науковій літературі останнього десятиліття, з'явилися статті про Оцінку Життєвого Циклу енергії з відновлюваних джерел. Більша частина аналізу стосується екологічного балансу системи гарячого водопостачання і фотоелектричних систем на основі пристроїв, що працюють в Південній Європі, і включає в себе оцінку стадії життєвого циклу виробничих компонентів.

Арденте [3] застосував методику Оцінки Життєвого Циклу для аналізу викидів вуглекислого газу, пов'язаних з етапом виробництва сонячного колектора (2,13 m^2 ефективної поверхні). Автор оцінює використання первинної енергії на стадії виробничого модуля як 11,5 ГДж і викидів діоксиду вуглецю, як 721 $кгCO_{2eq}$. Більшість первинної енергії пов'язана з видобутком сировини. Підсумовуючи, автор зазначив, що пряме використання енергії є менш важливим, ніж проміжне споживання.

Калогіроу [9, 10] застосував оцінку Життєвого Циклу для аналізу впливу сонячних батарей на довколишнє середовище з точки зору споживання первинної енергії. Перша система співпрацює з системою для підігріву води, використання первинної енергії щодо продукції оцінюється в 2,7 ГДж. Для стандартної системи з двома середовищами (поліпропілен гліколь для колекторів і гаряча вода в інсталяції) автор розрахував споживання первинної енергії як 3,5 ГДж.

Баттісі і Коррадо [4] проаналізували систему сонячного колектора термічно інтегрованого з енергозбереженням. Споживання первинної енергії для виробництва, постачання і кінцевого управління тестованої системи розраховано як 3,1 ГДж, а викиди парникових газів, як 219,4 $кгCO_{2eq}$. Більшість показників пов'язані з виробничою фазою (97,8%). Завдяки спеціальній конструкції системи (коллектор ємності, служить в якості сховища тепла), яка не вимагає жодних додаткових ресурсів для роботи (немає необхідності для перекачування) експлуатаційна фаза циклу була опущена.

w warunkach polskiego klimatu ze względu na możliwość zamrożenia w sezonie zimowym.

We wszystkich przypadkach wyniki badań wskazują na niskie w porównaniu do konwencjonalnych źródeł emisje ditlenku węgla z systemów solarnych do przygotowania ciepłej wody użytkowej. Ponadto czas zwrotu dla emisji z fazy produkcji jest krótszy, niż całkowity okres cyklu życia.

W przypadku systemów fotowoltaicznych wyniki Oceny Cyklu Życia fazy ich produkcji dla różnych typów paneli można znaleźć w kilku pozycjach literatury [2, 6, 7]. Prace badawcze wymienione powyżej przedstawiają wyniki ocen za pomocą różnych technik, na przykład emisje metali ciężkich, gazów toksycznych i gazów cieplarnianych.

W artykule Fthenkalis [8] emisje gazów cieplarnianych zostały obliczone w gCO_{2eq} przypadających na 1 kWh (jednostka funkcjonalna) dla warunków nasłonecznienia Europy południowej i dla kilku typów modułów fotowoltaicznych oraz pomocniczych elementów systemu. Przedział wartości emisji rozpoczynał się od około 20 gCO_{2eq}/kWh dla modułów CdTe i przy wykorzystaniu danych dotyczących produkcji energii elektrycznej z bazy danych Ecoinvent i kończył na wartości 55 gCO_{2eq}/kWh dla modułów krzemowych monokrystalicznych i szacunkach emisji z produkcji elektryczności opartych na bazie danych Franklin.

We wszystkich przypadkach wskaźniki obliczone przez autorów oszacowano jako przynoszące realne korzyści dla środowiska poprzez redukcję emisji gazów cieplarnianych, osiągającą poziom 89-98%.

2. Metoda badawcza

Metodą badawczą niniejszej pracy jest środowiskowa Ocena Cyklu Życia. Metoda ta jest oparta na ocenie zużycia energii i materiałów oraz produkcji zanieczyszczeń i odpadów, które są związane z całym okresem życia danego produktu. Schemat techniczny LCA obejmuje następujące kroki [11, 15]:

1. definicja celu i zakresu analizy,
2. inwentaryzacja zbioru danych,
3. ocena wpływu cyklu życia,
4. interpretacja.

LCA jest traktowana jako analiza od kołyski do grobu, obejmuje zatem cały cykl istnienia produktu, w szczególności składa się z następujących elementów:

- identyfikacja i kwantyfikacja zanieczyszczeń wprowadzanych do środowiska, zużywanych materiałów i energii,
- ocena możliwych skutków wyżej wymienionych,
- wskazanie ewentualnych ulepszeń mających na celu ograniczenie tego wpływu [11].

Okres cyklu życia powinien obejmować preprodukcję (wydobycie surowców) oraz etapy produkcji, użytkowania i ostatecznego zagospodarowania.

Metodyka Oceny Cyklu Życia jest często stosowana jako element umożliwiający planowanie strategiczne i prognozowanie długofalowych skutków środowiskowych przedsięwzięć. Wyniki ocen usprawniają procesy decyzyjne z różnych dziedzinach gospodarki. Z uwagi na uwzględnianie pełnego cyklu życia w analizie, wyniki Oceny Cyklu Życia mogą być przydatne w procesach decyzyjnych mających na celu minimalizację negatywnego wpływu wyrobów i usług na środowisko naturalne.

2.1. Definicja celu i zakresu

Celem analizy była ocena emisji gazów cieplarnianych związanej z produkcją energii elektrycznej przez systemy fotowoltaiczne wykorzystujące panele z krzemu mono i polikrystalicznego pracujące w warunkach klimatycznych Lublina (Polska południowo-wschodnia).

Слід зазначити, що така система не може працювати в польських кліматичних умовах через можливість замерзання в зимовий період.

У всіх випадках, низькі результати досліджень в порівнянні зі звичайними джерелами викиду діоксиду вуглецю з сонячних систем для приготування гарячої води. Крім того, час відновлення для випромінювання продуктивної фази коротший, ніж загальний період життєвого циклу.

У випадку фотоелектричних систем Оцінка Життєвого Циклу, їх фази виробництва для різних типів панелей можна прочитати в декількох джерелах [2, 6, 7]. Науково-дослідні роботи, перераховані вище, являють собою результати оцінок з використанням різних методів, таких, як викиди важких металів, токсичних газів і парникових газів.

В статті Фтенакіс [8], викиди парникових газів були розраховані $гCO_{2eq}$ в 1 кВт•год (функціональна одиниця) для кількості сонячного світла в південній Європі для декількох типів фотоелектричних модулів і допоміжних компонентів. Діапазон значень викидів розпочинається з 20 $гCO_{2eq}$/кВтг для CdTe модулів і з використанням даних про виробництво електроенергії з Ecoinvent і закінчується на значенні 55 $гCO_{2eq}$/кВтг для монокристалічних кремнієвих модулів і оцінок викидів від виробництва електроенергії на основі бази даних Франкліна.

У всіх випадках, співвідношення розраховані авторами оцінюються, як такі, що приносять користь для навколишнього середовища за рахунок скорочення викидів парникових газів, досягнувши рівня 89-98%.

2. Методи дослідження

Методом дослідження даної роботи є Оцінка Циклу Життя навколишнього середовища. Цей метод опирається на оцінці споживання енергії і матеріалів, та утворенні забруднюючих речовин і відходів, які пов'язані з цілим періодом життя даного продукту. Технічна схема LCA включає наступні кроки [11, 15]:

1. визначення мети та сфери аналізу,
2. інвентаризація збору даних,
3. оцінка впливу життєвого циклу,
4. інтерпретація.

LCA розглядається, як аналіз від народження до смерті, охоплює цілий період існування продукту, складається з таких компонентів:

- ідентифікація та кількісне вимірювання шкідливих речовин, які потрапили в навколишнє середовище, витрачених матеріалів та енергії,
- оцінка можливих наслідків вище перерахованих,
- зазначення можливих поліпшень, спрямованих на зниження впливу [11].

Життєвий цикл повинен включати підготовку виробництва (видобуток сировини) та етапи виробництва, використання і остаточне видалення.

Методологія Оцінки Життєвого Циклу часто використовується, як засіб для стратегічного планування і прогнозування довгострокових екологічних наслідків проектів. Результати оцінок оптимізують процеси прийняття рішень в різних секторах економіки. Беручи до уваги повний життєвий цикл в аналізі, результати можуть бути корисними в процесі прийняття рішень, спрямованих на мінімізацію негативних наслідків продуктів і послуг на навколишнє середовище.

2.1. Визначення мети й обсягу

Мета аналізу полягала в оцінці викидів парникових газів, пов'язаних з виробництвом електроенергії фотоелектричними панелями з використанням кремнію моно і полікристалічного, працюючи в кліматичних умовах Любліна (південно-східна Польща).

Zakres analizy obejmuje produkcję elementów składowych systemu z uwzględnieniem fazy przedprodukcyjnej, budowę instalacji fotowoltaicznych (elementy składowe: panele z krzemu mono- i polikrystalicznego, inwerter, okablowanie, złączki, liczniki energii i zabezpieczenia) i fazę użytkowania.

Faza zagospodarowania końcowego z uwagi na wysoki odsetek części oddawanych do recyklingu oraz brak danych odnośnie energochłonności procesów ich ponownego uzdatnienia nie została uwzględniona.

Jednostką funkcjonalną jest 1 kWh energii wyprodukowanej w trakcie eksploatacji systemu w warunkach klimatycznych Lublina w oparciu o symulacyjne parametry pracy dostępne za pomocą portalu Wspólnego Centrum Badawczego Komisji Europejskiej [14].

2.2. Inwentaryzacja zbioru danych

Do analizy nakładów materiałowych i energetycznych wykorzystano bazę danych Ecoinvent, jak również dane producentów systemów funkcjonujących na rynku polskim. Inwentaryzacja obejmuje zużycie materiałów i energii w wymienionych etapach cyklu życia.

2.3. Ocena wpływu cyklu życia

Dla oceny wpływu cyklu życia, wykorzystano metodę oceny końcowej wyników LCA – Global Warming Potential (GWP100a), przy wykorzystaniu oprogramowania SimaPro v7.1. Technika ta pozwala na obliczenie wielkości emisji gazów cieplarnianych w jednostce masy - $kgCO_{2eq}$ [5].

Jednostka ta – masa ekwiwalentu ditlenku węgla – służy do oszacowania potencjału tworzenia efektu globalnego ocieplenia na podstawie emisji różnych gazów cieplarnianych w oparciu o charakterystyczny przelicznik na jednostkę masową CO_{2eq} w zależności od przyjętego horyzontu czasowego [17]. W niniejszej pracy przyjęto wskaźniki dla stuletniego okresu oddziaływania.

2.4. Interpretacja

Wyniki analizy (emisja gazów cieplarnianych wyrażona w masie CO_{2eq}) przedstawiono w jednostce funkcjonalnej (1 kWh wytworzonej energii). Aby zagwarantować prawidłową interpretację, końcowe wyniki porównano z tradycyjnym systemem opartym na energii elektrycznej wytwarzanej, transportowanej i wykorzystywanej w Polsce.

3. Analiza systemów fotowoltaicznych

3.1. System I

Analizowany system ma na celu zapewnienie dostaw energii elektrycznej poprzez współpracę z wewnętrzną instalacją w budynku oraz siecią o niskim napięciu. Moc szczytowa systemu wynosi 6 kW_p. Jego elementami składowymi są panele oparte na modułach krzemowych monokrystalicznych o łącznej powierzchni brutto 37,5 m^2, okablowanie, złączki, elementy zabezpieczające oraz inwerter.

Montaż paneli został określony jako ekspozycja południowa o kącie nachylenia 45°. Instalacja pracuje w połączeniu z siecią, co umożliwia płynną pracę układu w warunkach niedostatecznej lub nadmiernej produkcji energii elektrycznej w zależności od aktualnego nasłonecznienia.

Sprawność modułów określona przez producenta jako 15,2% została skorygowana o straty wynikające z przesyłu energii oraz nierównomiernych warunków pracy układu.

3.2. System II

System II również ma na celu zapewnienie dostaw energii elektrycznej poprzez współpracę z wewnętrzną instalacją

Обсяг аналізу включає в себе виробництво компонентів системи, включаючи етапи попереднього виробництва, монтаж фотоелектричних систем (елементів: панелі кремнію моно і полікристалічних, інвертор, проводка, роз'єми, лічильники енергії та безпеки) і фазу використання.

Заключний етап освоєння у зв'язку з високим відсотком частин направлених на переробку і відсутності даних про споживання енергії, процеси повторного очищення не були брані до уваги.

Функціональною одиницею є 1 кВт•год енергії, що виробляється під час роботи системи в кліматичних умовах Любліна на основі параметрів симуляції роботи доступних через портал Об'єднаного дослідницького центру Європейської комісії [14].

2.2. Інвентаризація збору даних

Для аналізу матеріальних та енергетичних ресурсів, використано бази даних Ecoinvent, а також дані виробників систем, які працюють на польському ринку. Інвентаризація включає в себе використання матеріалів і енергії в перерахованих стадіях життєвого циклу.

2.3. Оцінка впливу життєвого циклу

Для оцінки впливу життєвого циклу, ми застосували метод кінцевих результатів оцінки LCA - Global Warming Potential (GWP100a), використовуючи програмне забезпечення SimaPro v7.1. Ця техніка дозволяє розрахувати викиди парникових газів на одиницю маси - кгCO_{2eq} [5].

Ця одиниця - маса еквівалента діоксиду вуглецю - використовується для оцінки потенціалу створюючого ефект глобального потепління по викидах різних парникових газів на основі розрахунку на одиницю маси CO_{2eq} залежно від передбачуваного часового горизонту [17]. У цій статті показники для столітнього періоду впливу.

2.4. Інтерпретація

Результати аналізу (викиди парникових газів виражені в масі CO_{2eq}) представлені в функціональній одиниці (1 кВт•год виробленої енергії). Щоб гарантувати правильну інтерпретацію, остаточні результати були порівняні з традиційною системою, яка опирається на електроенергії, яка виробляється, транспортується і використовується в Польщі.

3. Аналіз фотоелектричних систем

3.1. Система I

Проаналізована система призначена для забезпечення постачання електроенергії за допомогою співпраці з внутрішньою інсталяцією в будинку та електромережею низької напруги. Максимальна потужність для системи 6 кВТп. Складовими компонентами є панелі в основі яких монокристалічні кремнієві модулі загальною площею брутто 37,5 $м^2$, електропроводка, з'єднувачі, предементи безпеки і інвертор.

Установка працює спільно з мережею, яка забезпечує плавне функціонування системи в термінах недостатнього або надлишкового виробництва електроенергії в залежності від поточного сонячного світла.

Ефективність модулів, визначена виробником в 15,2% була скоректована з огляду на збитки, що виникають при постачанні електроенергії та нерівномірних умовах роботи системи.

3.2. Система II

Система II також спрямована на забезпечення постачання електроенергії за допомогою співпраці з внутрішньою

w budynku oraz siecią o niskim napięciu, przy czym opiera się on na technologii modułów zbudowanych z polikryształów krzemu. W celu zapewnienia właściwych warunków dla analizy porównawczej zaproponowano moc szczytową na jednakowym poziomie, korygując różnicę w sprawności modułów poprzez zwiększenie powierzchni paneli polikrystalicznych.

Elementami składowymi Systemu II są panele oparte na modułach krzemowych polikrystalicznych o łącznej powierzchni brutto 42,5 m^2, okablowanie, złączki, elementy zabezpieczające oraz inwerter. Montaż i ekspozycja są jednakowe w przypadku Systemu I i II. Sprawność modułów określona przez producenta jako 13,4% została również skorygowana z uwagi na dodatkowe straty wynikające przesyłowe i związanie z nierównomiernością pracy.

3.3. Cykl życia instalacji

Analizowane etapy cyklu życia obejmują fazę preprodukcji (dane z bazy Ecoinvent), produkcji elementów składowych układu, transportu oraz montażu. Uzysk energetyczny Systemów I i II w fazie użytkowania oszacowano z wykorzystaniem opisanej uprzednio aplikacji. W celu zwiększenia dokładności analizy przyjęto dwa horyzonty czasowe w każdym z dwóch analizowanych przypadków. Horyzont pierwszy to odpowiednio 35 i 30 lat pracy dla Systemu I i Systemu II, horyzont drugi to standardowe długości gwarancyjne (odpowiednio 30 i 25 lat).

Roczny uzysk energetyczny Systemu I w pierwszym roku jego pracy przedstawiono na rysunku 1. W dalszej analizie uwzględniono spadek wydajności ogniw w czasie pracy układu (90% po 10 latach, 80% po 25 latach).

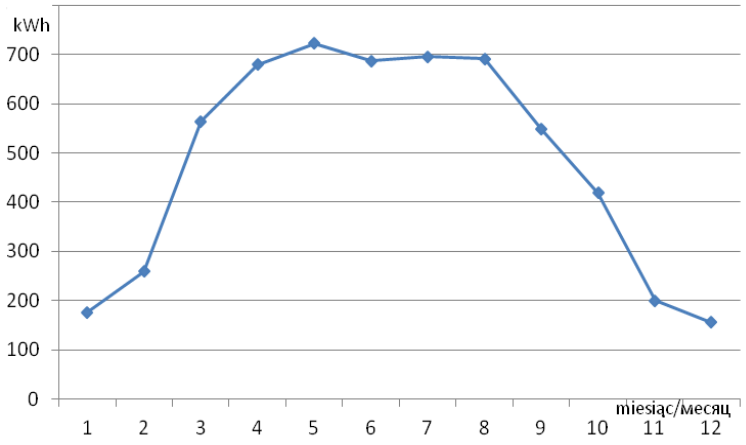
установкою в будівлі та мережею низької напруги, основаної на технології модулів побудованих з полікристалічного кремнію. Для того, щоб забезпечити належні умови для порівняльного аналізу запропоновано тримати пікову потужність на тому ж рівні, коректуючи різницю продуктивності модулів збільшенням площі полікристалічних панелей.

Складовими компонентами панелей Системи II є панелі в основу яких входять полікристалічні кремнієві модулі загальною площею брутто 42,5 m^2, електропроводка, з'єднувачі, система безпеки і інвертор. Установка і експозиція однакові в системі I і II. Ефективність модулів, зазначена виробником 13,4% була також переглянута у зв'язку з додатковими втратами при передачі і притаманною нерівномірністю роботи.

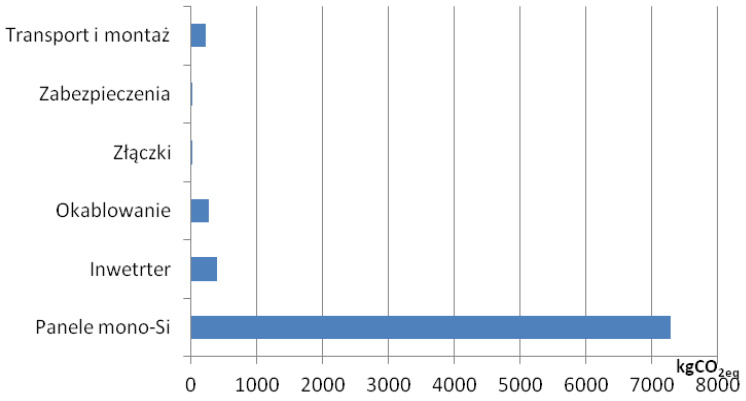
3.3. Життєвий цикл установки

Проаналізовані етапи Життєвого Циклу включають фазу підготовки виробництва (дані з бази даних Ecoinvent), компонентів системи, транспортування та монтаж. Вихід енергетичний систем I і II в фазі використання оцінено з описаними раніше додатками. Для того щоб збільшити точність аналізу прийнято два тимчасові горизонти в кожному з двох аналізованих випадків. Перший горизонт відповідно 35 і 30 років для системи I і System II, другий горизонт це стандартний термін гарантії (30 і 25 років).

Річний вихід енергії і система в її перший рік роботи показані на малюнку 1. У подальшому аналізі включає в себе зниження продуктивності під час роботи системи (90% після 10 років, 80% після 25 років).



Rys. 1. Uzysk energetyczny z instalacji fotowoltaicznej o mocy 6 kW_p zlokalizowanej w Lublinie w poszczególnych miesiącach na bazie modelu JRC
Мал. 1. Енергетичний ефект фотоелектричної системи з потужністю 6 кВт в кожному місяці на базі моделі JRC, знаходиться в Любліні



Rys. 2. Emisja CO_{2eq} dla Systemu I
Мал. 2. Викид CO_{2eq} для системи I

3.4. Wyniki ocen

Wyniki oceny Systemu I w podziale na poszczególne składowe systemu przedstawiono na rysunku 2.

Z uwagi na wysoką energochłonność procesów produkcji ogniw z krzemu monokrystalicznego, 89% emisji gazów cieplarnianych związane jest z wytwarzaniem paneli. Emisja ta w przypadku rozważanej instalacji wynosi ponad 7,2 tCO_{2eq}. Kolejne istotne składniki bilansu to produkcja inwertera, okablowania oraz transport.

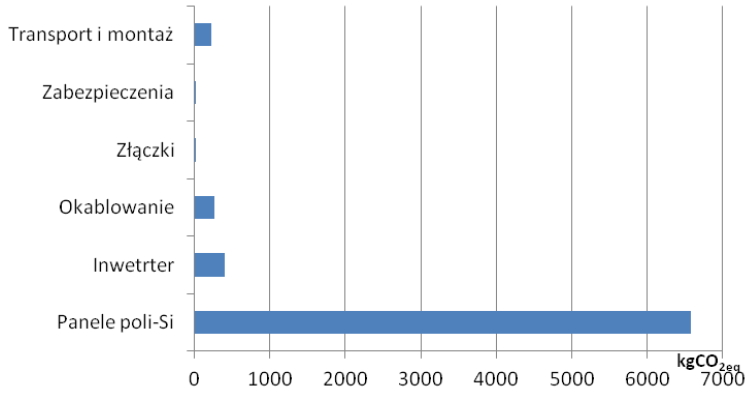
Wyniki oceny Systemu II w podziale na poszczególne składowe instalacji przedstawiono na rysunku 3.

3.4. Результати оцінок

Результати оцінки Системи I в розбитті на окремі компоненти системи, показані на мал. 2.

Через високу енергоємність виробничих процесів монокристалічних кремнієвих елементів, 89% викидів парникових газів, пов'язані з виробництвом панелей. Ця проблема у випадку правильної установки виносить понад 7,2 tCO_{2eq}. Інші важливі компоненти білансу це виробництво інвертора, проводів і транспортування.

Результати оцінки Системи II в розподілі на окремі компоненти установки показані на малюнку 3.



Rys. 3. Emisja CO_{2eq} dla Systemu II
Мал. 3. Викиди CO_{2eq} для Системи II

Procesy wytwórcze dla ogniw z krzemu polikrystalicznego pozwalają na dość znaczne oszczędności energii w porównaniu z technologią monokrystaliczną, jednak w analizowanym przypadku różnica ta jest częściowo kompensowana przez zwiększoną powierzchnię paneli w Systemie II. W tym przypadku produkcja paneli także odpowiada za większość emisji, dla rozważanego systemu jest to 88% udziału w wyniku końcowym.

Wyniki końcowe analizy w odniesieniu do jednostki funkcjonalnej w pierwszym horyzoncie czasowym przedstawiają się następująco:

- System I – 46 gCO_{2eq} na 1 kWh wytworzonej energii przy 35-letniej pracy układu,
- System II – 49 gCO_{2eq} na 1 kWh wytworzonej energii przy 30-letniej pracy układu.

Przy uwzględnieniu mniej korzystnego wariantu czasu pracy instalacji, wyniki przedstawiają się następująco:

- System I – 53 gCO_{2eq} na 1 kWh wytworzonej energii przy 30-letniej pracy układu,
- System II – 58 gCO_{2eq} na 1 kWh wytworzonej energii przy 25-letniej pracy układu.

Процеси виробництва осердь з полікристалічного кремнію дозволяють на досить значну економію енергії в порівнянні з монокристалічною технологією, але в даному випадку, різниця частково компенсується збільшенням поверхні панелей в системі II. У цьому випадку, виробництво панелей також несе відповідальність за більшість викидів, для розглянутої системи це 88% участі в кінцевому результаті.

Остаточні результати аналізу по відношенню до функціональної частини першого часового горизонту виглядають наступним чином:

- Система I – 46 гCO_{2eq} за 1 кВт•год енергії, що виробляється за 35 років функціонування системи,
- Система II – 49 гCO_{2eq} за 1 кВт•год енергії, що виробляється за 30 років функціонування системи.

Беручи до уваги менш крисний час роботи установки, результати наступні:

- Система I – 53 гCO_{2eq} за 1 кВт•год енергії, що виробляється за 30 років функціонування системи,
- Система II – 58 гCO_{2eq} за 1 кВт•год енергії, що виробляється за 25 років функціонування системи.

3.5. Dyskusja

Przytoczone powyżej scenariusze uwzględniają krótszy czas użytkowania instalacji z panelami opartymi na krzemie polikrystalicznym. W literaturze światowej stosowane są jednak powszechnie oceny nieuwzględniające tego zagadnienia.

Przy scenariuszu trzydziestoletniej pracy obydwu instalacji porównanie wypada korzystniej dla paneli z krzemu polikrystalicznego (System II). W pozostałych przypadkach, przy niejednolitej długości fazy użytkowania, wpływ czasu trwania cyklu życia jest na tyle istotny, że wskaźniki jednostkowe dla Systemu I przyjmują wartości niższe, niż analogicznie rozpatrywane wskaźniki dla Systemu II. Jest to na tyle istotne, że panele polikrystaliczne są z reguły postrzegane jako mniej energochłonne, co przełoży się na efekt środowiskowy wyłącznie w przypadku ich długoletniej i efektywnej pracy.

W celu właściwej oceny wielkości emisji, obliczone wskaźniki należy porównać z analogiczną emisją związaną

3.5. Обговорення

Зазначені вище сценарії включають в себе коротший час використання установки з панелями на основі полікристалічного кремнію. У світовій літературі, як правило, використовують загальні оцінки без урахування цього питання.

При тридцятилітній роботі обох установок кращі результати у панелі з полікристалічного кремнію (Система II). В інших випадках, при нерівномірній довжині використаної фази, вплив тривалості життєвого циклу настільки суттєвий, що показники для Системи I приймають значення нижчі, ніж аналогічно розглянуті показники для Системи II. Це є настільки значним, що полікристалічні панелі, як правило, розглядаються, як менш енергоємні, що дозволить вплинути на екологічну ситуацію тільки у разі тривалої та ефективної роботи.

При оцінці розрахунку викидів їх слід порівняти з аналогічним випромінювання у виробництві енергії з тради-

z produkcją energii ze źródeł konwencjonalnych. Wykorzystano bazę danych Ecoinvent jako źródło informacji o emisjach związanych energetyką w poszczególnych państwach.

Według przytoczonego źródła wskaźnik emisji gazów cieplarnianych szacowany metodą GWP100a wynosi 0,711 kgCO_{2eq}/kWh, co jest wielkością o rząd większą, niż przytoczone powyżej wyniki analiz. Pozwala to na sformułowanie podstawowego wniosku, iż fotowoltaika w postaci instalacji przyłączonych do sieci posiada wysoki potencjał ograniczania emisji ekwiwalentów ditlenku węgla. Redukcja emisji przy całkowitej substytucji wyniosłaby 92 – 93%, jednak z uwagi na specyfikę rozpatrywanych instalacji redukcja emisji zależeć będzie od stopnia pokrycia zapotrzebowania na energię w ujęciu całorocznym.

W odniesieniu do uzyskanych wyników należy ponadto zwrócić uwagę na kwestie źródeł danych. W pracy oparto się na jednym typie bazy danych o zasięgu europejskim, cytowanym wielokrotnie w podobnych analizach. Niemniej dla szerszego ujęcia problemu modelowania cyklu życia instalacji fotowoltaicznych należy oprzeć wyniki końcowe na konkurencyjnych źródłach.

Dodatkowo należy podkreślić, że przeprowadzona analiza nie uwzględnia fazy końcowego zagospodarowania produktów. Zagadnienie to obejmuje złożone kwestie recyklingu materiałów i ponownego ich wykorzystania i będzie stanowiło przedmiot odrębnej analizy.

Kolejnym aspektem jest kwestia pozostałych zanieczyszczeń emitowanych do gleby, wody i atmosfery w procesach produkcyjnych. W niniejszej pracy omówiono wyłącznie zagadnienie emisji ditlenku węgla i innych gazów cieplarnianych w przeliczeniu na jego ekwiwalent. Wielkość pozostałych istotnych dla środowiska emisji odniesieniu do elementów systemu stanowić będzie przedmiot kolejnych analiz.

4. Podsumowanie

Jako uczestnik wielu międzynarodowych konwencji i państwo zrzeszone w Unii Europejskiej, Polska jest zobowiązana do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych i dostosowania przemysłu do wymagań wspólnoty. Jedną z istotnych kwestii jest zmiana struktury sektora energii przez zwiększenie udziału energii odnawialnej, co ma na celu obniżenie wielkości emisji gazów cieplarnianych, która dla Polski z uwagi na energetykę węglową przyjmuje znaczące wartości.

Koncepcja rozwoju energii odnawialnych jest zasadniczo zgodna z wymogami zrównoważonego rozwoju i prowadzi do redukcji zanieczyszczeń do środowiska i zmniejszenia wyczerpywania zasobów naturalnych. Wykorzystanie energii słonecznej jest jedną z metod realizacji tej koncepcji. Na podstawie przeprowadzonych analiz i oszacowanej emisji ekwiwalentu ditlenku węgla stwierdzono, że panele fotowoltaiczne mono- i polikrystaliczne mogą być traktowane jako proekologiczne i niskoemisyjne technologie.

Pomimo obliczonych znacznych emisji w procesie produkcji, w porównaniu do konwencjonalnych źródeł energii elektrycznej wytwarzanej w Polsce, oba analizowane systemy słoneczne charakteryzują się relatywnie niskimi wskaźnikami w odniesieniu do 1 kWh. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż znaczący wpływ na wielkości wskaźników ma przyjęty w analizie horyzont czasowy, dlatego należy zaakcentować konieczność stosowania rozwiązań warunkujących stabilną i długotrwałą pracę instalacji.

Technologie fotowoltaiczne znajdują się obecnie w fazie szybkiego rozwoju. Doniesienia medialne odnośnie coraz wyższych sprawności osiąganych w warunkach laboratoryjnych świadczą o wysokim zaangażowaniu czołowych producentów i laboratoriów światowych w rozwój tej gałęzi energetyki. Należy tutaj podkreślić, iż praca nad zmniejszeniem energochłonności procesów produkcyjnych przy jednoczesnym zwiększeniu wydajności ogniw i wydłużeniu ich żywotności może się w przyszłości przyczynić do znacznego spadku wskaźników emisyjności obliczanych dla instalacji fotowoltaicznych.

ційних джерел. Використовуючи базу даних Ecoinvent, як джерело інформації з питань, пов'язаних з енергетикою в кожній країні.

Згідно з зазначеним джерелом посилання, вказана кількість викидів парникових газів оцінюється 0,711 кгCO_{2eq}/кВтг, що є на порядок більше, ніж у згаданих вище результатах. Це дозволяє нам сформулювати основний висновок, що фотовольтаїчні установки, підключені до мережі мають високий потенціал щодо скорочення викидів в еквіваленті діоксиду вуглецю. Скорочення викидів виносить 92 – 93%, але через специфіку даних установок скорочення викидів буде залежати від рівня попиту на енергію протягом усього року.

Щодо отриманих результатів, потрібно звернути увагу на джерела даних. Робота опирається на одному типі баз даних - європейському, який неодноразово цитувався у подібних аналізах. Тим не менш, для більш широкого визначення проблеми моделювання Життєвого Циклу фотоелектричних систем кінцеві результати повинні опиратися на конкуруючих джерелах.

Крім того, слід підкреслити, що проведений аналіз не врахував кінцевої фази утилізації продукту. Дана тема включає в себе питання утилізації і повторного використання, і буде предметом окремого аналізу.

Наступним аспектом є питання інших забруднюючих речовин, що викидаються в грунт, воду та повітря при виробничих процесах. У цій статті розглянуто виключно питання викидів двоокису вуглецю та інших парникових газів в обчисленні еквіваленту. Розмір інших істотних для середовища викидів по відношенню до компонентів системи будуть предметом подальших досліджень.

4. Підсумок

Як учасник низки міжнародних конвенцій і держава, яка входять в Європейський Союз, Польща прагне знизити викиди парникових газів та адаптувати промисловість до вимог співтовариства. Одним з важливих питань є зміна структури енергетичного сектору за рахунок збільшення частки відновлюваних джерел енергії, ціллю Польщі є зниження викидів парникових газів з огляду на вартість вугілля.

Концепція розвитку відновлюваних джерел енергії в цілому відповідає вимогам сталого розвитку і веде до зниження забруднення навколишнього середовища та зменшення виснаження природних ресурсів. Використання сонячної енергії є одним із способів реалізації цієї концепції. На основі аналізу і оцінок викидів еквівалента діоксиду вуглецю, було виявлено, що фотоелектричні панелі монокристалічні і полікристалічні можна розглядати, як екологічно чисті і низьковуглецеві технології.

Незважаючи на значні викиди, в процесі виробництва, в порівнянні зі звичайними джерелами електроенергії, виробленої в Польщі, обидві проаналізовані сонячні системи характеризуються відносно низькими показниками з розрахунку до 1 кВт•год. Варто підкреслити, що значний вплив на розмір показників приймається в аналізі горизонту часу, тому потрібно підкреслити необхідність використання рішень, що забезпечують стабільну та довгострокову роботу пристрою.

Фотоелектричні технології в сьогоденні швидко розвиваються. В доповідях ЗМІ, що стосуються більш високої ефективності енергії, яка досягається в лабораторних умовах говориться про високу заінтересованість провідних виробників і лабораторій по всьому світу в розвитку енергетичного сектора. Слід підкреслити, що робота зі зниження енергоємності виробничих процесів при одночасному підвищенні ефективності сонячних крлекторів і продовженням їхнього терміну служби може в майбутньому привести до істотного зниження викидів

Podziękowania

Praca powstała w ramach projektu PL-NTU Transgraniczna wymiana doświadczeń PBU.03.01.00-06-386/11-00 współfinansowanego w ramach Programu Współpracy Transgranicznej Polska-Białoruś-Ukraina 2007-2013 finansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Instrumentu Sąsiedztwa i Partnerstwa.

Niniejsza publikacja została stworzona przy pomocy Unii Europejskiej. Wyłączną odpowiedzialność za zawartość niniejszej publikacji ponosi Agnieszka Żelazna oraz w żaden sposób nie może być ona postrzegana jako odzwierciedlenie poglądów Unii Europejskiej.

Завдяки

Робота створена в рамках проекту ПЛІ-НТУ Транскордонний обмін досвідом PBU.03.01.00-06-386/11-00, співфінансованого в рамках Програми Транскордонного Співробітництва Польща-Білорусь-Україна 2007-2013, що фінансується Європейським Союзом в рамках Європейського Інструменту Сусідства та Партнерства.

Ця публікація була створена за допомогою Європейського Союзу. Відповідальність за зміст цієї публікації лежить на Агнєшці Желязній, і жодним чином не може розглядатися як відображення поглядів Європейського Союзу.

Literatura || Література

[1] Adamczyk J.: Koncepcja zrównoważonego rozwoju w zarządzaniu przedsiębiorstwem, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Krakowie, Kraków 2006.
[2] Alsema E.A.: Energy Pay-back Time and CO_2 emissions of PV systems. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 8, I. 1, 2000, 17-25.
[3] Ardente F., Beccali G., Cellura M., Lo Brano V.: Life cycle assessment of solar thermal collector. Renewable Energy, Vol. 30, 2005, 1031-1054.
[4] Battisti R.G, Corrado A.: Environmental assessment of solar thermal collectors with integrated water storage. Journal of Cleaner Production, Vol. 13, 2005, 1295-1300.
[5] Cel W., Pawłowski A., Cholewa T.: Ślad węglowy jako miara zrównoważoności odnawialnych źródeł energii / Carbon footprint as the sustainability indicator for renewable energy sources. Prace Komisji Ekologii i Ochrony Środowiska Bydgoskiego Towarzystwa Naukowego, Vol. IV, 2010, 15-22.
[6] Frankl P., Corrado A., Lombardelli S.: Photovoltaic (PV) systems, final report ECLIPSE. European Commission 2004.
[7] Fthenakis V.M.: Life Cycle Impact analysis of cadmium in CdTe PV production. Renevable & Sustainable Energy Review, Vol. 8, 2004, 303-334.
[8] Fthenakis V.M., Kim H.C., Alsema E.: Emissions from Photovoltaic Life Cycles. Environmental Science Technology, Vol. 42, 2008, 2168-2174.
[9] Kalogirou S.: Environmental benefits of domestic solar energy systems. Energy Conversion and Management, Vol. 45, 2004, 3075-3092.
[10] Kalogirou S.: Thermal performance, economic and environment al life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters. Solar Energy, Vol. 83, 2009, 39-48.
[11] Kowalski Z., Kulczycka J., Góralczyk M.: Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych (LCA)/Ecological Life Cycle Assessment of manufacturing processes (LCA), PWN, 2007.
[12] Pawłowski A.: Rewolucja rozwoju zrównoważonego. Problemy Ekorozwoju/Problems of Sustainable Development, Vol. 4, No 1, 2009, 65-76.
[13] Popczyk J.: Ocena potencjału realizacji celów Pakietu 3x20, w szczególności w aspekcie redukcji emisji za pomocą różnych technologii. Zmiany klimatu – wyzwania dla gospodarki, Vol. 4, 2009, http://csm.org.pl/
[14] www.jrc.ec.europa.eu, Joint Research Centre, 01.2015.
[15] Zbiciński I., Staveniuter J., Kozłowska B., Van De Covering H.P.M.: Product Design and Life Cycle Assessment, Book 3 in a series on Environmental Management, The Baltic University Press, Uppsala 2006.
[16] Zdyb A.: Badania nad zwiększeniem wydajności barwnikowych ogniw słonecznych. Monografie PAN, Vol. 94, Lublin, 2012.
[17] Żelazna A., Pawłowski A.: Korzyści środowiskowe z wykorzystania systemów solarnych na przykładzie budynku jednorodzinnego, Proceedings of ECOpole, Vol. 5(2), 2011, 649.

Mgr inż. Agnieszka Żelazna
e-mail: a.zelazna@wis.pol.lublin.pl

Mgr inż. Agnieszka Żelazna, ur. 05.03.1985, pracuje jako asystent w Instytucie Odnawialnych Źródeł Energii w Politechnice Lubelskiej. Jest absolwentką kierunku Inżynieria Środowiska o specjalności Ogrzewnictwo, Wentylacja i Klimatyzacja, a także studiów podyplomowych Zarządzanie Energią. Od roku 2009 jest pracownikiem Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Lubelskiej.
Autorka jest uczestniczką programów współpracy z przemysłem, laureatką licznych stypendiów i wyróżnień, twórcą ponad 30 publikacji naukowych, a także polsko i anglojęzycznych podręczników poświęconych komputerowym metodom wspomagania projektowania.
Obecnie pracuje nad rozprawą doktorską poświęconą tematyce ocen środowiskowych instalacji wykorzystujących energię słoneczną.

Магістр інж. Агнєшка Желязна
e-mail: a.zelazna@wis.pol.lublin.pl

Магістр інж. Агнєшка Желязна, народилася 05.03.1985, працює асистентом в Інституті Відновлювальних Джерел Енергії в Люблінській Політехніці. Випускниця факультету Інженерії Середовища за спеціальністю Опалення, Вентиляції та Кліматизація, а також післядипломного навчання за спеціальністю управління енергоспоживанням. З 2009 року є працівником факультету Інженерії Середовища в Люблінській Політехніці. Учасник програми співпраці з промисловістю, володар численних стипендій і відзнак, автор понад 30 наукових публікацій польською та англійською мовами, а також підручників з комп'ютерних методів проектування. В даний час працює над докторською дисертацією, на тему екологічних оцінок сонячних установок

otrzymano/отримано/received: 23.03.2015 *przyjęto do druku/прийнято до друку/accepted: 30.03.2015*

PL-BY-UA 2007-2013

Współfinansowane ze środków Unii Europejskiej

DOI: 10.5604/20830157.1159334

AUTOMATYCZNE STEROWANIE COFANIA CIĄGNIKA SIODŁOWEGO Z NACZEPĄ

Pavlo Gumenyuk
Łucki Narodowy Uniwersytet Techniczny, Ukraina, Katedra Automatycznego Sterowania Procesami Produkcyjnymi

Streszczenie. *W artykule opracowano sposób poprawy manewrowości pojazdu za pomocą blokowania kąta łamania. Opisany model umożliwia dokładne przeanalizowanie ruchu ciągnika siodłowego. Zaproponowano oprogramowanie do kontroli ruchu dwuosiowego obiektu przy obciążeniu. Stworzono algorytm sterowania podstawowymi mechanizmami danego obiektu, tak aby zapewnić stabilność ruchu. Pokazano niektóre z istniejących mechanizmów sterowania naczepami oraz zaproponowano nową konstrukcję, która pomaga sterować zestawem siodłowym podczas cofania.*

Słowa kluczowe: inteligentne pojazdy, bezpieczeństwo pojazdów, pojazdy drogowe, korekta kursu

АВТОМАТИЗАЦІЯ РУХУ СІДЕЛЬНОГО АВТОПОЇЗДА ЗАДНІМ ХОДОМ

Анотація. *У статті розглядається спосіб покращення маневреності транспортного засобу за допомогою блокування кута складання. Описана модель, за допомогою якої зручно проводити дослідження руху сідельного автопоїзда. Розроблено програмне забезпечення для керування рухом дволанкового колісного об'єкта з опорним навантаженням. Побудовано алгоритм управління основними механізмами цього об'єкта для забезпечення стабільності руху. Показані деякі з наявних механізмів керування причіпною ланкою, запропоновано нову конструкцію, що допомагає керувати автопоїздом при русі заднім ходом*

Ключові слова: інтелектуальні транспортні засоби, безпеки транспортних засобів, автомобільні, коректування курсу

AUTOMATION OF ROAD TRAIN MOTION IN REVERSE

Abstract. *The article considers the way to improve maneuverability of the vehicle by locking assembly angle. A model is described that makes the study of truck-train movement more convenient. Software for the multilink vehicle is designed. The algorithm to control basic mechanisms of the model is described. Some of the existing mechanisms to manage trailed link are shown, a new design that helps to manage road train when reversing is proposed.*

Keywords: intelligent vehicles, vehicle safety, road vehicles, course correction

Wstęp

Doświadczenie eksploatacyjne pojazdów drogowych, w tym specjalistycznych, pokazuje ich zalety w porównaniu do konwencjonalnych samochodów: wysoka wydajność (wyższa dwa lub więcej razy); koszty transportu o 25 ... 30% niższe; zużycie paliwa na tonę przewożonego ładunku o jedną trzecią mniejsze oraz inne.

W międzynarodowym transporcie drogowym używane są ciągniki siodłowe z jedną lub więcej przyczepami. Gdy liczba jednostek przyczep zwiększa się to pogarsza się manewrowość pojazdu, więc podczas tworzenia i projektowania pociągów drogowych należy określić zakres ich stosowania pod względem manewrowości [1]. Ten problem nie może być rozwiązany bez analizy warunków eksploatacyjnych i określenia wymaganego poziomu manewrowości danego pojazdu w określonych warunkach.

Dobra manewrowość pojazdu drogowego polega na możliwości wykonania skrętów (które występują na trasach ruchu) i manewrowania (wykonanie skrętów, a w razie potrzeby cofania się) w punktach załadunku i rozładunku [11].

Funkcje eksploatacyjne obejmują dziewięć wskaźników manewrowości, z których sześć jest kinematycznych oraz trzy - dynamiczne. Jednakże, do głównych wskaźników manewrowości pojazdu drogowego należą dwa pojedyncze wskaźniki kinematyczne [10], a mianowicie:

- ogólna szerokość pasa ruchu, która równa się różnicy promienia skrętu punktów pojazdu, najbardziej oddalonych i najbardziej zbliżonych do środka skrętu;
- możliwość ruchu do tyłu.

Nowoczesny przemysł motoryzacyjny coraz częściej korzysta z technologii informacyjnych w celu zwiększenia niezawodności, poprawy bezpieczeństwa, optymalizacji zużycia paliwa i trasy [2].

Вступ

Досвід експлуатації автопоїздів, у тому числі спеціалізованих, показує їх переваги порівняно зі звичайним автомобілем: підвищену продуктивність (у два рази й більше); собівартість перевезень на 25 ... 30 % нижча; витрата пального на тонну перевезеного вантажу на третину менша та інші.

У міжнародних автомобільних перевезеннях використовуються сідельні та причепні дво- і багатоланкові автопоїзди. При збільшенні кількості ланок автопоїзда погіршується його маневренність, тому при формуванні або проектуванні автопоїздів необхідно визначати межу їх використання по маневреності [1]. Це завдання не може бути вирішено без аналізу умов експлуатації і виявлення необхідного рівня маневреності конкретного автопоїзда в конкретних умовах експлуатації.

Хороша маневреність автопоїзда виражається в можливості його вписування в повороти, що зустрічаються на маршрутах руху, і маневрування (здійснення поворотів і у разі потреби руху заднім ходом) в пунктах вантаження і розвантаження [11].

Експлуатаційні властивості включають дев'ять показників маневреності, шість з яких є кінематичними, а три динамічними. Проте для автопоїзда основними слід вважати два кінематичні одиничні показники маневренності [10], а саме:

- габаритну смугу руху, рівну різниці радіусів повороту точок автопоїзда, найбільш віддаленої та найбільш близької до центру повороту;
- можливість рухатися заднім ходом.

Сучасне автомобілебудування все більше використовує інформаційні технології, які дозволяють підвищити надійність, покращити безпеку руху, оптимізувати витрату пального і маршрут [2].

Proces projektowania systemu sterowania obiektami jest ściśle powiązany z dwoma innymi fazami opracowania systemów, a mianowicie: projektowanie części sprzętowej i testowanie oprogramowania. Opracowanie algorytmów do tworzenia automatycznego systemu sterowania ruchem obiektów wymaga informacji na temat dynamiki ruchu i jego zależności od czynników zewnętrznych. Wykorzystanie realnych obiektów do badań eksperymentalnych jest dość kosztowne i niebezpieczne. Jedną z metod rozwiązania tego problemu jest modelowanie. Opracowanie symulacyjnego modelu ruchu obiektu rozwiązuje problem badania sterowania ruchem tego obiektu. Wykorzystanie pakietów oprogramowania do symulacji wirtualnej aplikacji dostarcza informacji o obiekcie i jego zachowaniu w różnych warunkach pod wpływem różnych czynników zewnętrznych. Zastosowanie tego modelu umożliwia badania czynników wpływających na stabilność ruchu obiektu bez kosztownych i niebezpiecznych eksperymentów fizycznych.

Na dzień dzisiejszy, pytanie o wsteczny ruch pojazdu nadal jest niedopracowane. Celem niniejszej pracy jest analiza ruchu pojazdu podczas cofania się, wybór kompatybilnych i elastycznych zasobów komputerowego wspomagania projektowania i modelowania, opracowanie oprogramowania, które pozwala na sprawdzenie i optymalizację algorytmów sterowania [3]. Otrzymany kompleks pozwoli ulepszyć manewrowość poruszających się obiektów.

1. Dostępne metody oddziaływania na oś przyczepy

Podczas wstecznego ruchu pojazdu, naczepa znajduje się z przodu (pierwszy człon zestawu pojazdu), a samochód (ciągnik) z tyłu (drugi człon zestawu pojazdu). Przy toczeniu kół pojazdu (bez boksowania przy ruszaniu i hamowaniu) pojazd drogowy ma charakter układu nieholonomicznego, w którym każde koło ma typ połączenia nieholonomiczny. W dalszej analizie przyjęto pojęcia pozwalające opisać konfigurację takiego systemu: dla pojazdów członowych (pojazdy sprzęgu siodłowego) z nieobrotowymi kołami ciągnika - $k_1<(q\epsilon k_2)<j$; dla pojazdów z przemieszczonym sprzęgiem siodłowym - $k_1<k_2<q<j$; dla pojazdów z jednoosiową przyczepą- $k_1<q<k_2<j$ [4]. Wraz ze zmianą konfiguracji zmienia się charakter ruchu pojazdu, co należy rozważyć podczas sterowania jego ruchem.

Aby rozwiązać problemy manewrowości przyczep lub naczep w zespołach stosowane są systemy kontroli zapewniające poprawę wskaźników manewrowości [7].

Biorąc pod uwagę obecne tempo rozwoju elektroniki i technologii mikroprocesorowej, obiecującym jest opracowanie systemu automatycznego sterowania. Najczęściej stosowane są systemy automatycznego sterowania w celu bezpośredniego działania [5]. Przy tym obrót koła kierownicy (osi) naczepy (przyczepy) odbywa się kosztem „twardego" kinematycznego łącza z elementami sterującymi (kierowanych kół, ramy ciągnika lub naczepy) w czasie toczenia pojazdu. Siły, niezbędne do wzajemnego skrętu wszystkich członów pojazdu i do zapewnienia skrętu napędzanych osi (kół) naczepy (przyczepy), tworzą się w reakcji sił bocznych koła samochodu - ciągnika i są przesyłane przez systemy mechaniczne (cięgna lub dźwignie) lub systemy hydrauliczne (hydrostatyczne) do skręcanych kół (osi) naczepy (przyczepy) - rys. 1 [6].

Процес проектування систем управління об'єктами тісно взаємопов'язаний з двома іншими етапами розробки систем, а саме: проектуванням апаратної частини і тестуванням програмної частини. Розробка алгоритмів для створення автоматизованої системи керування рухомим об'єктом потребує інформації про динаміку руху та її залежності від зовнішніх факторів. Використання реальних об'єктів для проведення експериментальних досліджень є досить затратним та небезпечним. Одним з методів вирішення цієї проблеми є моделювання. Розробка імітаційної моделі руху об'єкта вирішує проблему дослідження управління цим об'єктом. Застосування програмних пакетів для віртуального моделювання дозволяє отримати інформацію про об'єкт та його поведінку в різних умовах та під впливом тих чи інших зовнішніх факторів. Використання такої моделі реалізує можливість дослідження факторів впливу на стабільність руху даного об'єкта без проведення затратних та небезпечних натурних експериментів.

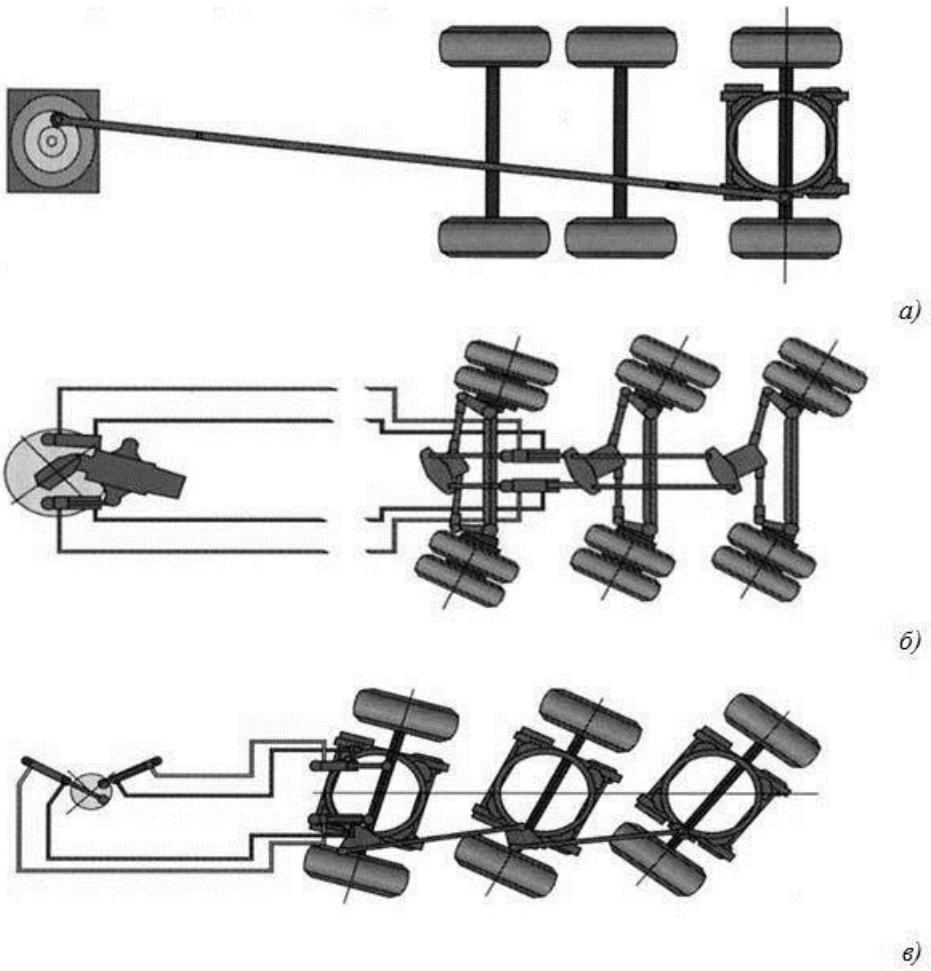
На сьогодні питання руху автопоїзда заднім ходом вивчені ще недостатньо. Тому метою роботи є дослідження руху автопоїзда заднім ходом, вибір сумісних і гнучких засобів комп'ютерного проектування та моделювання, розробка апаратного комплексу, який дозволяє перевірити та оптимізувати алгоритми управління [3]. Отриманий комплекс дозволить покращити маневреність рухомих об'єктів.

1. Наявні методи впливу на осі причепа

При русі автопоїзда заднім ходом причіпна ланка (напівпричіп) знаходиться попереду (є першою ланкою), а автомобіль (тягач) позаду (є другою ланкою). При чистому коченні коліс (без ковзання і буксування) автопоїзд є неголономною системою, у котрої кожне колесо являє собою неголономний зв'язок колісного типу. У подальшій роботі прийняті позначення дозволяють відобразити конфігурацію такої системи: для сідельного автопоїзда зі сідельно-зчіпним пристроєм над неповоротними колесами тягача - $k_1<(q\epsilon k_2)<j$; для автопоїзда зі зміщеним сідельно-зчіпним пристроєм - $k_1<k_2<q<j$; для автопоїзда з одноосьовим причепом - $k_1<q<k_2<j$ [4]. Зі зміною конфігурації змінюється характер руху автопоїзда, що необхідно враховувати при керуванні його рухом.

Для подолання проблем маневреності в причіпних ланках автопоїздів (причепах або напівпричепах) застосовують системи керування, які забезпечують покращення показників маневреності [7].

Враховуючи сучасні темпи розвитку електроніки та мікропроцесорної техніки, перспективною є розробка автоматизованої системи регулювання. Найбільше поширення отримали системи автоматичного управління безпосередньої дії [5]. При цьому поворот керованих коліс (осей) напівпричепа (причепа) здійснюється за рахунок їх "жорсткого" кінематичного зв'язку із задаючими органами (керованими колесами, рамою тягача або напівпричепа) при взаємному повороті ланок транспортного засобу. Зусилля, необхідне для взаємного повороту ланок автопоїзда і забезпечення повороту керованих осей (коліс) напівпричепа (причепа), створюється за рахунок реакцій бічних сил на колесах автомобіля-тягача і передається механічними (тросовими або важільними) або гідравлічними (гідростатичними) системами до керованих коліс (осей) напівпричепа (причепа) - рис. 1 [6].



Rys. 1. Schemat bezpośredniej kontroli nad kołami (osiami) w naczepie firmy Krone: a) napęd mechaniczny na tylną osi naczepy, b) napęd hydrostatyczny na koła wszystkich osi naczepy, c) napęd hydrostatyczny na osie naczepy
Рис. 1. Схема прямого приводу керування колесами (осями) напівпричепа компанії Krone: а) механічний привід на задню вісь напівпричепа, б) гідростатичний привід на колеса усіх осей напівпричепа, в)гідростатичний привід на осі напівпричепа

2. Modelowanie ruchu pojazdu drogowego

Przy integracji elementów komputerowych w system sterowania i bezpieczeństwa pojazdów przeprowadzenie prawdziwego eksperymentu jest zwykle niepraktyczne. Przydatne jest wykorzystanie modeli do rozwijania, testowania i badania różnych typów układów napędowych, czynnych i biernych układów bezpieczeństwa, nowych obiektów, które mogą poruszać się, latać, pływać, i tak dalej. Po opracowaniu ważne jest sprawdzenie adekwatności modelu. W przypadku pomyślnego przejścia szeregu testów, model uznaje się jako odpowiedni; wyniki przeprowadzonych badań mogą być stosowane do rzeczywistego obiektu badań. Zastosowanie modelowania jest również przydatne w odniesieniu do samochodów osobowych. Lepsze i dokładniejsze wyniki można osiągnąć przez połączenie kilku typów modelowania, takich jak tworzenie fizycznego modelu, którego ruch opisuje się matematycznie. W tym przypadku takie wartości, które mogą być pominięte przy układaniu równań (na przykład kąty poślizgu, twardość, tarcie) będą znajdować się w modelu jako części składowej fizycznej.

2.1. Fizyczny model pojazdu

Taki model postanowiono użyć do badań sterowności i manewrowości pojazdu dwuczłonowego [3]. Jako prototyp został wybrany ciągnik siodłowy Kamaz z układem kół 6x4, o ograniczonej masie 9,3 tony i mocy 400 KM oraz trzyosiowa naczepa siodłowa Cargobull. Model wykonano w skali 1:20,

2. Моделювання руху автопоїзда

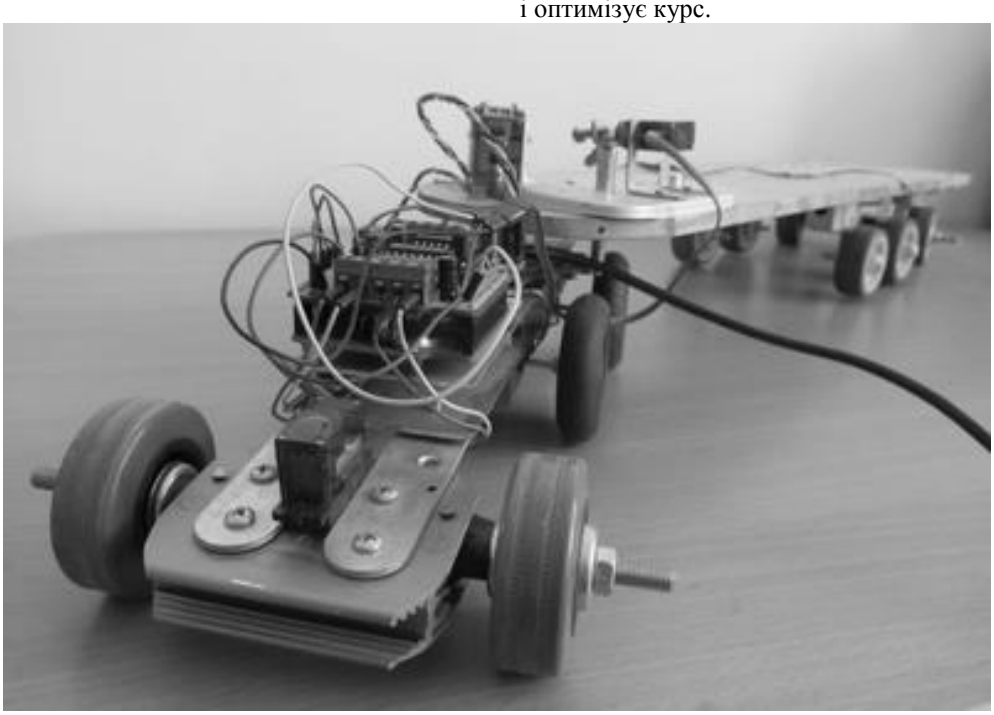
При інтегруванні комп'ютерних елементів у системи керування та безпеки транспортних засобів постановка реального експерименту зазвичай непрактична. Корисно використовувати масштабовані копії для розробки, перевірки і дослідження роботи різних типів приводів, систем активної і пасивної безпеки, нових об'єктів, здатних їздити, плавати чи літати, тощо. Після розробки важливо провести перевірку моделі на адекватність. У випадку успішного проходження ряду тестів модель вважається адекватною і результати досліджень, проведених з її допомогою можна застосовувати до реального об'єкта дослідження. Як для легкового транспорту, так і для перевірки поведінки багатоланкових автопоїздів також корисно застосовувати моделювання. Кращих і точніших результатів можна досягнути поєднанням кількох типів моделювання, наприклад, створивши фізичну модель, рух якої описується математично. У цьому випадку деякі величини, якими можна знехтувати при складанні систем рівнянь (наприклад, кути відведення, жорсткість, тертя) все одно будуть присутні в моделі як частина її фізичної складової.

2.1. Фізична модель автопоїзда

Саме таку модель було вирішено розробити для дослідження керованості і маневреності дволанкових автопоїздів [3]. Прототипом було обрано сідельний тягач Камаз з колісною формулою 6x4, спорядженою масою 9,3 т і потужністю 400 к.с. і тривісний сідельний напівпричіп Cargo-

wymiary i właściwości wyliczone w oparciu o teorie podobieństwa i twierdzeniem π. Aby uruchomić model, moment obrotowy jest zadawany z silnika elektrycznego na oś za pomocą reduktorów mechanicznych. Sterowanie ciągnikiem odbywa się za pomocą serwomechanizmuTowerProSG90 i trapezu kierownicy, przyczepionej do przedniej osi kół. Kontroler AVR ATmega328P (ulokowany na pokładzie modelu) reguluje prędkość oraz kierunek ruchu. Algorytm, który określa trajektorię ruchu, bierze pod uwagę dane (takie jak wyznaczony kąt, odległość do innych obiektów) uzyskane z czujników umieszczonych na modelu (rysunek 2) oraz optymalizuje kurs.

bull. Модель виконана в масштабі 1:20, фізичні розміри і властивості розраховано за законами подібності і π-теоремами. Для приведення моделі в рух крутний момент передається від електромоторів на осі через редуктори. Керування тягачем здійснюється за допомогою сервопривода TowerPro SG90 і рульової трапеції, закріпленої на поворотних кулаках коліс передніх півосей. Напрям руху, швидкість задаються контролером AVR ATmega328P, який розміщений на борту моделі. Керівний алгоритм для задання траєкторії руху враховує дані (такі як кут складання, відстань до інших об'єктів), отримані з датчиків, розміщених на моделі (рис. 2.) і оптимізує курс.



Rys. 2. Model pojazdu *dwuczłonowego*
Рис. 2. Модель дволанкового автопоїзда

2.2. Oprogramowanie modelu

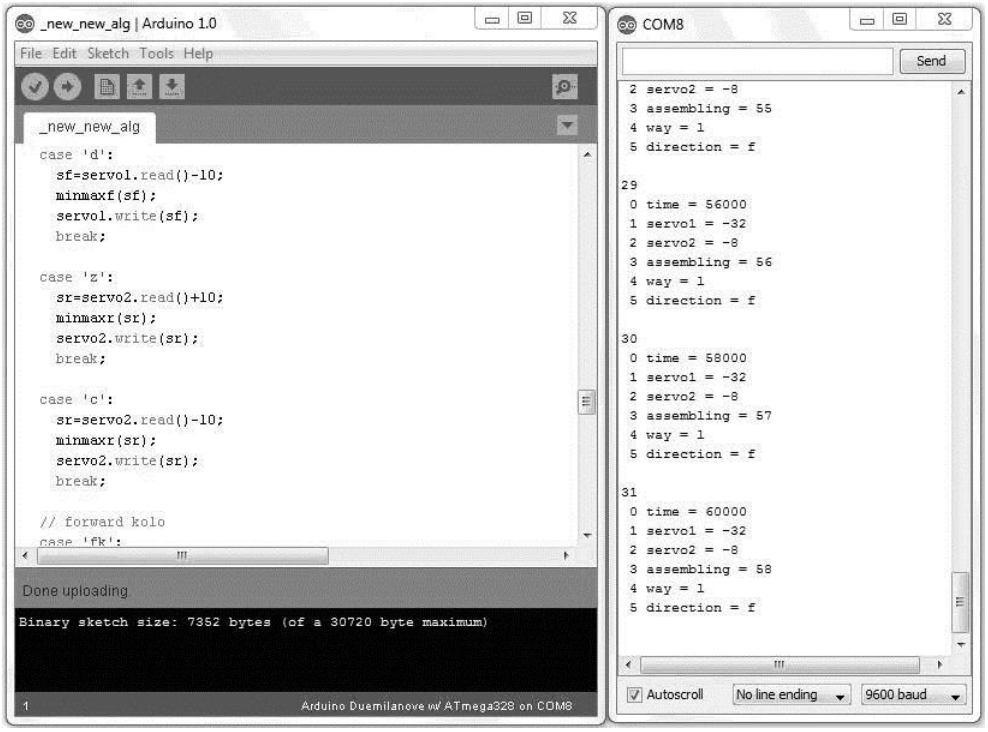
Elektroniczne urządzenie komputerowe wykonuje czynności w zależności od wcześniej zapisanych w nim instrukcji. Dla każdego rodzaju sytuacji drogowych takie instrukcje mogą się różnić, a ich liczba sięga tysięcy linii kodu oprogramowania. W przypadku awarii lub niewłaściwego przetwarzania danych jakiejś funkcji otrzymamy niepożądany skutek pracy systemu jako całości, nawet jeśli pomyślnie będą pracować wszystkie elementy sterujące. Opisanie właściwego efektywnego kodu jest nie mniej ważnym zagadnieniem niż wybór komponentów systemu.

Model poruszającego się obiektu jest kontrolowany przez platformę Arduino, ponieważ środowiskiem rozwoju modelu jest wieloplatformowy dodatek Java, oparty na języku Processing. Składnia tego środowiska jest podobna do C++, ale korzysta z pewnych dodatkowych bibliotek. Programy przeznaczone do pracy z platformą Arduino nazywane są szkicami. Po udanej kompilacji szkic jest przesyłany do procesora przez wirtualny port COM. Monitor wbudowany w środowisko modelu pozwala na przesyłanie informacji zwrotnych w platformie podczas trwania programu. Możliwe jest przekazywanie poleceń do procesora, a także odczytywanie i wyświetlanie danych. Jednak, seryjny monitor nie posiada interfejsu graficznego i mechanizmu ochrony wyświetlanych danych. Dlatego, w celu ułatwienia i zwiększenia funkcjonalności modelu, opracowana została aplikacja dla systemu Windows w języku programowania Delphi. Dodatkowo sterowanie modelem odbywa się przez panel sterowania. Wystarczy przycisnąć odpowiedni przycisk zamiast wpisywać polecenie na klawiaturze, co jest wygodne i oszczędza czas użytkownika.

2.2. Програмне забезпечення моделі

Електронний обчислювальний пристрій виконує наперед вказані дії залежно від записаних у нього інструкцій. Для кожної дорожньої ситуації набір подібних інструкцій може відрізнятись, а їхня кількість сягає тисяч рядків програмного коду. У випадку збою або некоректної обробки даних певною функцією можна отримати небажаний результат роботи системи в цілому, навіть при успішному спрацюванні всіх фізичних виконавчих органів. Написання якісного програмного коду є не менш важливим завданням, ніж вибір компонентів системи.

Розроблена модель рухомого об'єкта керується за допомогою плати Arduino, тому середовищем розробки є багатоплатформовий Java-додаток, заснований на мові Processing. Синтаксис даного середовища подібний до C++, але використовує деякі додаткові бібліотеки. Програми, створені для роботи з платою Arduino, називаються скетчами. Після успішної компіляції скетч передається у процесор засобами віртуального COM-порту. Вбудований у середовище розробки монітор дозволяє реалізувати зворотній зв'язок із платою у процесі виконання програми. Можлива передача команд процесору, а також зчитування і відображення даних. Разом з тим, серійний монітор не має графічної оболонки чи механізму збереження відображуваних даних. Тому, для полегшення роботи з моделлю і нарощування її функціональності розроблено Windows-сумісний додаток, написаний мовою Delphi. У додатоку керування моделлю здійснюється через панель управління. Достатньо натискати на відповідні кнопки замість введення команди із клавіатури, що зручно і економить час користувача.



Rys. 3. Środowisko programistyczne: szkice Arduino (po lewej stronie) i monitor seryjny (po prawej stronie)
Рис. 3. Середовище розробки скетчів Arduino (зліва) і серійний монітор (справа)

Ponieważ port COM działa w środowisku Win32, podłączenie odbywa się za pomocą określonych funkcji WinAPI podobnie jak przy pracy z normalnymi plikami. Wszelkie prace z portem zaczynają się od jego otwarcia, więc po uruchomieniu aplikacji należy wskazać numer wirtualnego port COM, do którego jest podłączona platforma, a następnie otworzyć go. Wymiana danych z portem jest asynchroniczna, czyli operacje odczytu i zapisu w porcie są wykonywane równolegle z różnych źródeł. Minimalna jednostka informacji przekazywanej w tym trybie - to jeden bajt, to znaczy jeden znak. Przekazywanie każdego bajtu rozpoczyna się od bitu startu, co sygnalizuje odbiornikowi o początku przekazywania danych, po czym przychodzą bity danych i być może nawet bity parzystości. Bit stopu dokonuje zakończenie transferu danych, zapewniając pauzę między transferami. Bit startu następnego bajtu jest wysłany w dowolnym czasie po bicie stopu, czyli między transferami może być przerwa o dowolnej długości. Bit startu, który zawsze ma ściśle określoną wartość (logiczne 0), zapewnia prosty mechanizm synchronizacji sygnału nadajnika z odbiornikiem, które działają z jednakową szybkością transferu. Tryb ten, w przeciwieństwie do synchronicznego, w większym stopniu odpowiada idei wielozadaniowości systemu Windows.

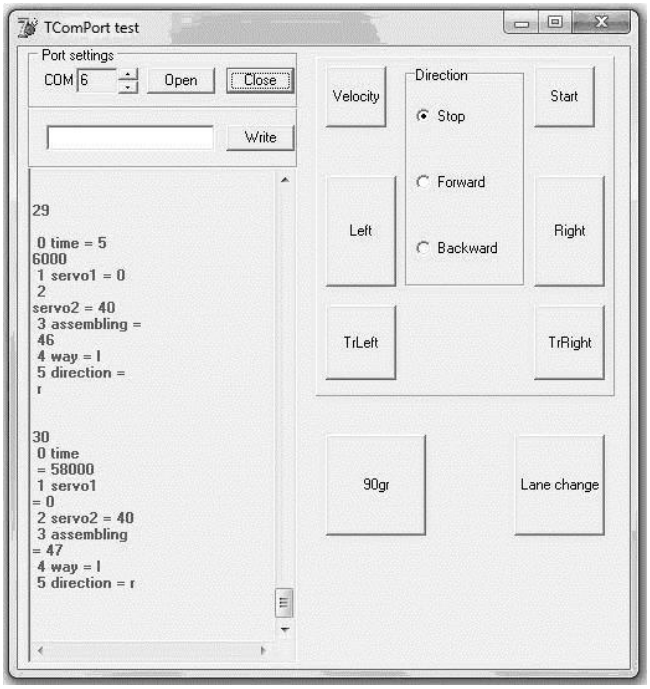
Po wybraniu numeru wirtualnego port COM i kliknięciu na przycisk Open, (jeśli do danego portu jest rzeczywiście podłączone urządzenie) natychmiast rozpocznie się wymiana danych z procesorem. Polecenia na platformę Arduino można przekazywać za pomocą ciągu linii tekstu lub naciśnięciu odpowiednich przycisków na panelu sterowania.

Do aplikacji przewidziano dwa wstępnie zdefiniowane manewry obrotu o 90° i zmiany pasa ruchu - przyciski 90gr oraz Lane Change [3]. Sterownik automatycznie ustawia żądane wartości kąta obrotu oraz zmienia je tak, żeby trajektoria charakterystycznych punktów wszystkich części obiektu była identyczna. Dane, otrzymane z procesora, pojawiają się w okienku po lewej stronie poniżej linii poleceń i są automatycznie zapisywane w pliku tekstowym w celu umożliwienia dalszej pracy z nimi.

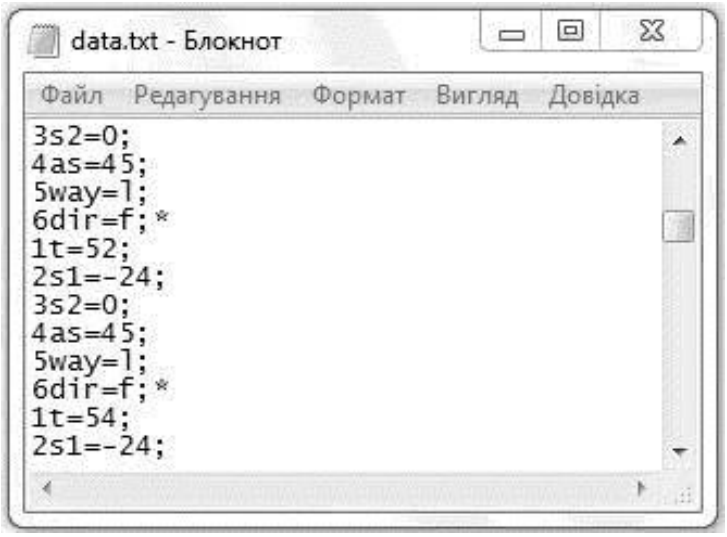
Оскільки COM-порт працює в середовищі Win32, то і підключення відбувається з використанням специфічних функцій WinAPI подібно до роботи зі звичайними файлами. Будь-яка робота з портом починається з його відкриття, тому після запуску додатка в першу чергу потрібно вказати номер віртуального COM-порта, до якого підключена плата, і відкрити його. Обмін даними з портом відбувається у асинхронному режимі, тобто операції зчитування і запису в порт виконуються паралельно з різних потоків. Мінімальна одиниця інформації, що передається у цьому режимі, – один байт, тобто один символ. Передача кожного байта починається із старт-біта, що сигналізує приймачу про початок посилки, за яким ідуть біти даних і, можливо, біт паритету (парності). Завершує посилку стоп-біт, що гарантує паузу між посилками. Старт-біт наступного байта посилається у будь-який момент після стоп-біта, тобто між передачами можливі паузи довільної тривалості. Старт-біт, що має завжди строго певне значення (логічний 0), забезпечує простий механізм синхронізації приймача по сигналу від передавача, тобто приймач і передавач працюють на одній швидкості обміну. Даний режим, на відміну від синхронного, більше імпонує ідеї багатозадачності Windows.

Після вибору номера віртуального COM-порта і натиснення на кнопку Open, якщо до вказаного порта дійсно підключено обладнання, відразу ж почнеться обмін даними із процесором. Команди на плату Arduino можна передавати як за допомогою текстового рядка, так і натискаючи на потрібні кнопки панелі управління.

У додатку передбачено два наперед прописані маневри повороту на 90° і зміни смуги руху – кнопки 90gr та Lane change відповідно [3]. Контролер автоматично встановить потрібні значення кутів повороту і буде їх змінювати так, щоб траєкторії характерних точок всіх ланок об'єкта збігались. Дані, отримані від процесора відображаються у вікні зліва, під рядком вводу команд і автоматично записуються у текстовий файл для можливості подальшої роботи з ними.



Rys. 4. Aplikacja Windows do pracy z modelem
Рис. 4. Windows-додаток для роботи з моделл



Rys. 5. Dane zapisywane przez aplikacje
Рис. 5. Дані, записані додатком

2.3. Testowanie modelu

Aby wyniki badań, uzyskane za pomocą opracowanego modelu, zastosować do pełnowymiarowego modelu obiektu, model musi być poddany dodatkowym badaniom w celu wykazania jego adekwatności. W przypadku modelu pojazdu drogowego należy dokonać manewrów obrotu o 90°, koła i zmiany pasa ruchu wg. ISO. Jako charakterystyczne punkty wybrano punkty leżące po środku pomiędzy tylnymi osiami ciągnika i dwoma osiami przedniej naczepy. Jeśli trajektorie ruchu tych punktów są zbieżne z odchyleniami uzyskanymi w badaniach analitycznych, model może być uznany za odpowiedni [9].

Śledzenie trajektorii ruchu charakterystycznych punktów odbywa się za pomocą LEDowych markerów, czerwonego koloru dla osi ciągnika i zielonego - dla osi naczepy. Nad stanowiskiem badawczym zainstalowano kamerę internetową do robienia zdjęć w określonych odstępach czasu. Otrzymane zdjęcia są przetwarzane w oprogramowaniu, z obrazów usuwa się wszystko oprócz markerów. Następnie, uzyskane punkty są grupowane według typu i po połączeniu ich otrzymujemy trajektorię ruchu dostępnego modelu dla każdego testowanego ruchu.

2.3. Перевірка моделі

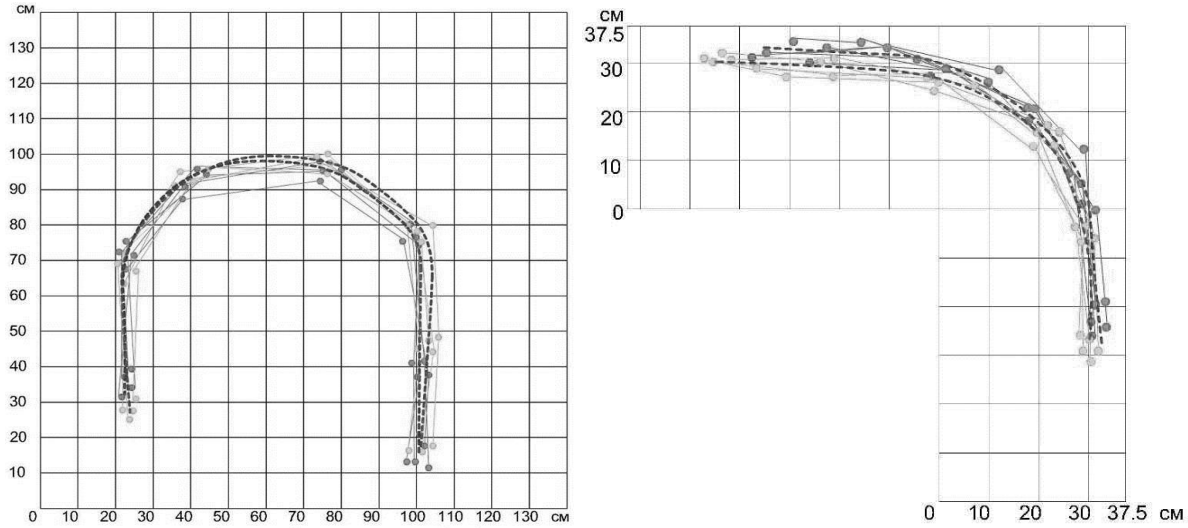
Для того, щоб результати досліджень, отриманих за допомогою розробленої моделі, можна було застосувати до повномасштабного об’єкта, модель необхідно піддати певним випробуванням для перевірки її на адекватність. У випадку із масштабованою моделлю автопоїзда потрібно виконати маневри повороту на 90°, кола і перестановки ISO. Характерними точками було обрано точки посередині між задніми осями тягача і двома передніми осями напівпричепа. Якщо траєкторії руху цих точок співпадатимуть з відхиленнями, що отримані в аналітичних дослідженнях, модель можна вважати адекватною [9].

Щоб відслідкувати траєкторію руху характерних точок на них встановлено світлодіодні маркери, червоного кольору для осі тягача і зеленого для осі напівпричепа. Над тестовим стендом розміщено веб-камеру, яка робить знімки через задані проміжки часу. Отримані фотографії оброблюються програмно, із зображення відсіюється все, крім маркерів. Потім отримані точки групуються за заїздами і з’єднавши їх можна отримати траєкторію руху характерних точок моделі

Dla każdego przypadku ruchu przeprowadzono od 10 do 12 zdjęć. Uśrednioną trajektorię ruchu środka sterowanych osi wyznaczono jako średnia między najbardziej odległymi miejscami. Uśrednione trajektorie ruchu markerów mają niewielkie odchylenia, ale zachowanie modelu można uznać za adekwatne (przykłady otrzymanych wyników są podane na rysunku 6). Różnica pomiędzy obliczanymi i eksperymentalnymi wartościami odchylenia trajektorii naczepy i trajektorii ciągnika nie przewyższa 7% podczas ruchu do przodu.

для кожного тестового заїзду.

Для кожного заїзду було зроблено від 10 до 12 знімків. Усереднена траєкторія руху середини керованих осей визначалась як середина між найвіддаленішими точками. Усереднені траєкторії руху маркерів мають незначні відхилення, проте поведінку моделі можна вважати адекватною (приклади результатів наведено на рис.6). Розбіжності між розрахунковими і експериментальними значеннями зміщення траєкторії напівпричепа щодо траєкторії тягача не перевищують 7% при русі вперед.



Rys. 6. Wyniki badania modelu w trakcie skrętu (a) i obrotu o 90° (b)
Рис. 6. Результати заїздів моделі при розвороті (а) та повороті на 90° (б)

2.4. Sterowanie kątem składania modelu

Podczas ruchu wstecznego zespołu pojazdów obserwuje się tendencję do jego składania się, co utrudnia manewrowanie, szczególnie ze wzrostem prędkości. Głównym problemem przy ruchu wstecznym pojazdu jest trudność kontrolowania kąta składania się bez wykorzystania specjalnych systemów wspomagających. Aby rozwiązać ten problem, w modelu został ustawiony automatyczny mechanizm blokujący kąt zespołu (rysunek 7), który jest włączany przez regulator w zależności od wyników obliczeń układu sterowania. Różnice między obliczonymi i eksperymentalnymi wartościami przesunięcia trajektorii toru naczepy względem trajektorii ruchu ciągnika podczas cofania we wszystkich przypadkach nie przekracza 9,3%, więc można przyjąć, że zachowanie symulacyjnego modelu pojazdu drogowego odpowiada oryginałowi i nadaje się do stosowania w konstrukcji naczepy pojazdu siodłowego.

2.4. Управління кутом складання моделі

Під час руху заднім ходом прослідковується тенденція автопоїзда до складання, що ускладнює маневреність, особливо зі зростанням швидкості. Основною проблемою руху автопоїзда заднім ходом є те, що контролювати кут складання неможливо без використання спеціальних асистивних систем. Для вирішення даної проблеми в моделі було створено механізм автоматичного блокування кута складання (рис.7), що включається контролером залежно від розрахунків закону управління. Розбіжності між розрахунковими і експериментальними значеннями зміщення траєкторії напівпричепа щодо траєкторії тягача при русі заднім ходом у всіх випадках не перевищують 9,3%, тому можна вважати, що поведінка масштабованої моделі автопоїзда відповідає оригіналу і придатна для реалізації в конструкції напівпричепа сідельного автопоїзда.

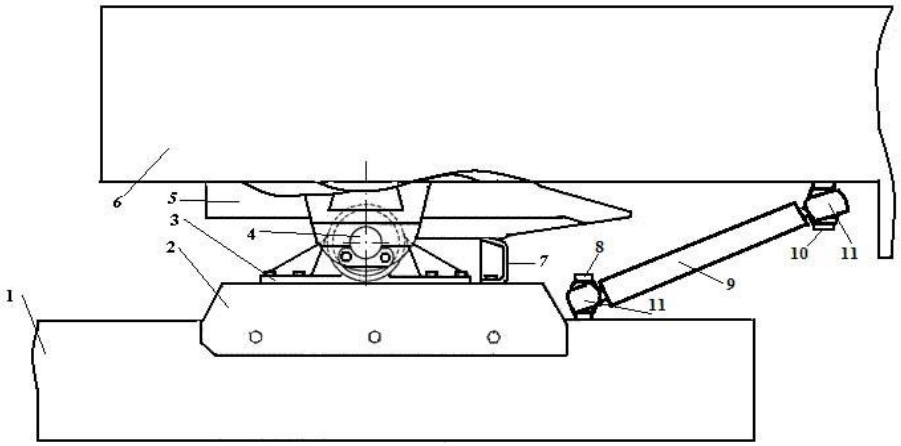
Rys. 7. Mechanizm mechanicznej blokady kąta składania w modelu pojazdu: a) pozycja odblokowana; b) pozycja zablokowana
Рис. 7. Механізм автоматичного блокування кута складання моделі автопоїзда: а) кут складання розблокований; б) кут складання заблокований

3. Blokada kąta składania

Zgodnie z wynikami badań uzyskanymi przy pomocy modelu fizycznego pojazdu zaproponowano mechanizm blokady zadanego kierunku pojazdu podczas ruchu wstecznego [8]. Mechanizm ten przedstawiony jest na rysunku 8.

3. Блокування кута складання

Відповідно до результатів досліджень, отриманих за допомогою фізичної моделі автопоїзда було запропоновано механізм забезпечення заданого напряму руху автопоїзда заднім ходом [8], зображений на рис. 8.



Rys. 8. Mechanizm blokady kąta składania ruchu wstecznego pojazdu: 1 – belka ramy samochodu - ciągnika; 2 – rama mocowania urządzenia siodłowego; 3 – uchwyt mocowania osi siodłowego urządzenia do ramy; 4 – oś; 5 – płyta oporowa ciągnika; 6 – naczepa; 7– oporowa poprzeczna belka pojazdu siodłowego; 8 – śruba mocowania cylindra do podłużnej belki ramy ciągnika; 9 – hydrocylinder; 10 – śruba mocowania pręta cylindra do podłużnej belki ramy naczepy 6; 11 – przegub kulowy)
Рис. 8. Механізм забезпечення заданого напряму руху автопоїзда заднім ходом (1 – лонжерон рами автомобіля-тягача; 2 – рама кріплення сідельного пристрою; 3 – кронштейн кріплення осі сідельного пристрою до рами; 4 – вісь; 5 – опорна плита автомобіля-тягача; 6 – напівпричіп; 7 – опорний поперечний лонжерон сідельного пристрою; 8 – шворінь кріплення гідроциліндра до повздовжнього лонжерона рами автомобілятягача; 9 – гідроциліндр; 10 – шворінь кріплення штока гідроциліндра до повздовжнього лонжерона рами напівпричепа 6; 11 – кульовий шарнір)

Mechanizm ten składa się z dwóch cylindrów hydraulicznych z pompą elektryczną, przymocowanych z jednego końca do podłużnych belek nośnych ciągnika, a z drugiego końca uchwytami do systemu nośnego naczepy. W zależności od kierunku obrotu koła kierownicy oraz bieżącego kierunku mechanizm zapewnia zmianę kierunku przepływu płynu roboczego z miejsca w przestrzeni nadtłokowej do przestrzeni tłokowej podczas ruchu wstecznego i zapewnia dostarczanie płynu roboczego od jednej zamkniętej przestrzeni cylindra do drugiej oraz zwiększa odległość między punktami mocowania cylindra do ciągnika i mocowania uchwytu do naczepy, który znajduje się z tej strony pojazdu, gdzie odbywa się odchylenie ruchu naczepy. W tym samym czasie, podczas przemieszczania się płynu roboczego z jednej zamkniętej przestrzeni cylindra do drugiej, zmniejsza się odległość pomiędzy punktami zamocowania drugiego cylindra do ciągnika oraz mocowania uchwytu do naczepy, który znajduje się z drugiej strony pojazdu, zwiększając sztywność konstrukcji w płaszczyźnie poziomej, a przywraca się w ten sposób zadany kierunek ruchu.

Pompa mechanizmu blokowania zadanego ruch pojazdu wstecz może pracować tylko wtedy, gdy jest włączony bieg wsteczny. Transfer płynu roboczego do jednej czy drugiej zamkniętej przestrzeni cylindra dokonywany jest przez elektrozawory, które uruchomione zostają poprzez przełącznik prądu w obu kierunkach podczas obrotu koła kierownicy. Pod względem konstrukcyjnym mechanizm jest prosty i możliwe jest zastosowanie go w konstrukcji pojazdów przy niewielkich kosztach.

Механізм містить два гідроциліндри з електронасосом, які одним кінцем закріплені до повздовжніх лонжеронів несучої системи автомобіля-тягача, а другим кінцем штоками до несучої системи напівпричепа. Що залежно від повороту рульового колеса та від напряму поданого струму дає можливість змінювати напрям перекачування робочої рідини з підпоршневого простору у надпоршневий простір під час руху заднім ходом і забезпечує подачу робочої рідини з одного закритого простору циліндра в інший та збільшує відстань між точками кріплення циліндра до автомобіля-тягача та штока до напівпричепа, який знаходиться з тієї сторони автопоїзда, у яку відхиляється напівпричіп від заданого напряму руху. В той же час при перекачуванні робочої рідини з одного закритого простору до іншого другого циліндра зменшується відстань між точками кріплення другого циліндра до автомобіля-тягача та штока до напівпричепа, який знаходиться з другої сторони автопоїзда, збільшується жорсткість конструкції у горизонтальній площині і відновлюється таким чином заданий напрям руху

Насос механізму забезпечення заданого руху автопоїзда заднім ходом може працювати тільки при включенні передачі заднього ходу. Подача робочої рідини в той чи інший закритий простір циліндрів здійснюється електроклапанами, які приводяться в дію включенням перемикача струму в ту чи іншу сторону під час повороту рульового колеса. За конструкцією механізм простий і має можливості з мінімальними затратами застосовуватись в конструкціях автопоїздів.

4. Wnioski

Opracowany model ciągnika siodłowego pozwala szybko i bezpiecznie sprawdzić algorytmy sterowania, dokonywać manewrów podczas badania stabilności pojazdu oraz eliminuje możliwość wystąpienia wysokich kosztów w przypadku awarii pracy algorytmu. Model ten wyposażony jest niezbędny sprzęt obliczeniowy.

Opracowane oprogramowanie składa się z dwóch części: systemu sterowania pracą silników elektrycznych i napędów serwomechanizmu o niższym poziomie oraz systemu sterowania wyższego szczebla. Umożliwia ono ustawienie przewidywalnie określonych manewrów, zapisywanie wyników pracy modelu w

4. Висновки

Розроблена модель сідельного тягача дозволяє швидко і безпечно перевіряти алгоритми керування, виконувати маневри для перевірки стійкості, а також виключає можливість серйозних витрат у випадку провалу роботи алгоритму. Модель обладнана необхідною контрольно-вимірювальною апаратурою.

Розроблене програмне забезпечення містить дві складові: систему управління низького рівня для роботи із електромоторами і сервоприводами та систему управління вищого рівня для здійснення загального керування, задання наперед прописаних маневрів, протоколювання результатів

czasie rzeczywistym i zapewnienia bezpieczeństwa wynikom doświadczalnym. Oprogramowanie modelu pozwala na realizacje algorytmu sterowania tylną osią naczepy, na podstawie założonego pokrywania się trajektorii punktów charakterystycznych dla ciągnika i naczepy.

Udowodniono, że zaprojektowana teoria kontroli tylnej osi naczepy oraz model matematyczny pojazdu odzwierciedlają rzeczywisty ruch pojazdów drogowych.

Podziękowania

Praca powstała w ramach projektu PL-NTU Transgraniczna wymiana doświadczeń PBU.03.01.00-06-386/11-00 współfinansowanego w ramach Programu Współpracy Transgranicznej Polska-Białoruś-Ukraina 2007-2013 finansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Instrumentu Sąsiedztwa i Partnerstwa.

Niniejsza publikacja została stworzona przy pomocy Unii Europejskiej. Wyłączną odpowiedzialność za zawartość niniejszej publikacji ponosi Pavlo Gumenyuk oraz w żaden sposób nie może być ona postrzegana jako odzwierciedlenie poglądów Unii Europejskiej.

роботи моделі у режимі реального часу та забезпечення збереження результатів експериментів. Програмне забезпечення моделі дозволяє реалізувати алгоритм управління задньою віссю напівпричепа, в основу якого закладено співпадіння траєкторій характерних точок автомобіля-тягача і напівпричепа.

Доведено, що розроблений закон управління задньою віссю напівпричепа і математична модель автопоїзда адеквано відтворюють реальний рух автопоїзда.

Завдяки

Робота створена в рамках проекту ПЛ-НТУ Транскордонний обмін досвідом PBU.03.01.00-06-386/11-00, співфінансованого в рамках Програми Транскордонного Співробітництва Польща-Білорусь-Україна 2007-2013, що фінансується Європейським Союзом в рамках Європейського Інструменту Сусідства та Партнерства.

Ця публікація була створена за допомогою Європейського Союзу. Відповідальність за зміст цієї публікації лежить на Павлові Олександровичу Гуменюку, і жодним чином не може розглядатися як відображення поглядів Європейського Союзу.

Literatura || Література

[1] Englezi O.A.: Vybir ta obgruntuvania typu pryvodu kerovania napivprychepu trylankovogo sidelno-prychinogo avtopojizda Visnyk Nacionalnogo transportnogo universytetu, NTU. Вип. 15, 2007, 149-154.
[2] Ermiloc S.S., Kolpakov A.P.: Rezultaty isledovanij avtopojezda s upraviaemymi kolesami polupricepa. Avtomobilnaja promyshlenost, No 9, 1964, 28-32.
[3] Gumenyuk P.O.: Rozrobka mashtobovanoji modeli sidelnogo tiagacha. Materialy XV Mizhnarodnoji naukowo-tehnichnoji konferencji Avtomobilnyj transportu: problemy i perspektyvy, Sevastopol, 10-17 veresnia 2012.
[4] Kurochkin A.S.: Isledovanie maniovrenosti i ustojchivosti avtomobilnogo pojezda s dlinnobaznym mnogoosnym polupricepom. Dis. kand. tehn. nauk. Kiev, 1978.
[5] Lobas L.G.: Mehanika negolonomnyh system s kacheniem. In-t mehaniki, Naukova dumka, Kiev, 2000.
[6] Sahno V.P.: Do wyboru zakonu upravlinnia zadnioju kerovanoju vissiu napivprychepa avtopojizda-kontejnorovoza. Avtoshliahovyk Ukrainy. Visnyk. Okremyj vypusk, No 13, 2003, 72-75.
[7] Sahno V.P.: Kursova stijkist dvuhlankovogo avtopojizda pry rusi zadnim hodom. Avtoshliahovyk Ukrainy. Okremyj vypusk. Visnyk Pivnichnogo naukovogo centru TAU. Vyp. 3, 2000.
[8] Sahno V.P.: Mehanizm zabezpechenia zadanogo napriamku ruchu avtopojizda zadnim hodom. Patent na korysnu model No 83368. Zarejestrovano v Derzhavnomu rejestri patentiv Ukrainy na korysni modeli 10.09.2013.
[9] Vasilev B.G.: Sintez zakonov upravlenija dla sovmeshchenija trajektorij dvizhenija tochek neholonomnoj sistemy tel. Informacionnyje sistemy.Vyp. 2. Harkov: NANU, PANI, HVU, 1994, 69-77.
[10] Vysockij M.C., Zhukov A.V., Martynenko G.V. i drug.: Dinamika dlinnobaznyh avtopoezdov. Minsk, Nauka i tehnika, 1987.
[11] Zakin J.X. Manevronost avtomobilia i avtopojezda. M. Transport, 1986.

Mgr inż. Pavlo Gumenyuk
e-mail: nacacom@gmail.com

Ukończył Łucki Narodowy Uniwersytet Techniczny. Magistrant, specjalność "Automatyka i Zintegrowane technologie Komputerowe", specjalista w specjalności "Samochody i Przemysł Samochodowy".
Kończy pracę nad rozprawą doktorską. Pracuje jako asystent w Katedrze Automatycznego Sterowania Procesami Technologicznymi (Łucki Narodowy Uniwersytet Techniczny).
Posiada doświadczenie w pracy w zakresie zintegrowanych technologii informatycznych.

Магістр інж. Павло Олександрович Гуменюк
e-mail: nacacom@gmail.com

Закінчив Луцький національний технічний університет, магістр зі спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціаліст зі спеціальності «Автомобілі та автомобільне господарство». Завершує роботу над дисертацією на ступінь PhD, працює на посаді асистента кафедри Автоматизованого управління технологічними процесами Луцького національного технічного університету. Має досвід роботи в галузі комп'ютерно-інтегрованих технологій.

otrzymano/отримано/received: 04.03.2015 *przyjęto do druku/прийнято до друку/accepted: 29.05.2015*

EKSPERTYZA

„Mapa rozwoju dyscypliny Elektrotechnika”

Komitet Elektrotechniki PAN

Streszczenie

Redakcja:
prof. dr hab. inż. Tadeusz Citko, Politechnika Białostocka
Wiceprzewodniczący Komitetu Elektrotechniki PAN

prof. dr hab. inż. Andrzej Demenko, Politechnika Poznańska
Przewodniczący Komitetu Elektrotechniki PAN

Redakcja techniczna:
dr inż. Mariusz Barański, Politechnika Poznańska

Warszawa 2014

Wstęp

Streszczenie dotyczy ekspertyzy „Mapa rozwoju dyscypliny Elektrotechnika", opracowanej w ramach działalności statutowej, z inicjatywy Przewodniczącego Komitetu Elektrotechniki PAN. Przedstawia ono reasumpcję pełnego wydania, które powstało w ramach dyskusji w poszczególnych Sekcjach Komitetu Elektrotechniki, wykonaną przez Przewodniczących Sekcji. „Mapa rozwoju dyscypliny Elektrotechnika" prezentuje stan i potrzeby rozwoju badań naukowych oraz postępu technicznego, a także problemy dotyczące procesu kształcenia wysokokwalifikowanych kadr w Polsce na tle tendencji obserwowanych w świecie. Jest to materiał wyjściowy do rozwinięcia i wykorzystania przez Instytucje i Organizacje zaangażowane w proces społeczno-gospodarczego rozwoju kraju. Stąd adresatami opracowania są: Polska Akademia Nauk (prezydium, Wydział IV PAN, wybrane komitety naukowe i problemowe), minister właściwy ds. gospodarki, minister właściwy ds. nauki i szkolnictwa wyższego, prezes Urzędu Regulacji Energetyki, Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Narodowe Centrum Nauki, wydziały elektryczne uczelni technicznych, instytuty przemysłowe i branżowe, zarządy największych spółek elektroenergetycznych i producenci urządzeń elektroenergetycznych.

Systemy Elektroenergetyczne

Sekcja Systemów Elektroenergetycznych, Przewodniczący prof. dr hab. Zbigniew Szczerba

System elektroenergetyczny rozumiany jako zbiór wzajemnie powiązanych elementów, służących do wytwarzania, przesyłu i rozdziału energii elektrycznej oraz do sterowania tym zbiorem, w celu zapewnienia bezpieczeństwa i jakości dostawy energii odbiorcom, jest systemem najsilniej warunkującym funkcjonowanie nowoczesnego społeczeństwa.

Struktura paliwowa krajowej elektroenergetyki (tzw. „energymix") wymaga odejścia od monostruktury węglowej na rzecz innych nośników energii, tj. gazu, energii odnawialnej i w przyszłości energii jądrowej. Wynika to zarówno z potrzeby spełnienia wymagań pakietu klimatyczno-energetycznego Unii Europejskiej, określanego skrótem 3x20% do 2020 roku, jak i związanego z tym bezpieczeństwa energetycznego kraju. Zasoby rodzimych paliw, czyli węgla kamiennego i brunatnego, decydują o tym, że Polska jest dziś w gronie najbardziej bezpiecznych energetycznie krajów UE. Poziom zależności Polski od importu energii jest dzisiaj 2-krotnie niższy od średniej unijnej. Energia jądrowa zapewne nieuchronnie stanie się nowym składnikiem krajowego bilansu energetycznego i stanowić będzie w przyszłości jeden ze stabilizatorów bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej dla gospodarki. Dla umożliwienia korzystania z węgla celowe jest opracowanie procesów wychwytu CO_2 ze spalin. Pojawiające się koncepcje „prosumenckie" są interesujące, jednak mogą stanowić jedynie niewielką część bilansu zapotrzebowania na energię elektryczną i mogą stanowić dodatek do sprawdzonych struktur nowoczesnych systemów elektroenergetycznych.

Krajowa sieć przesyłowa jest częścią paneuropejskiej sieci przesyłowej i dlatego jej zadaniem jest nie tylko zapewnienie dostaw energii odbiorcom krajowym, ale także współpraca z paneuropejskim systemem elektroenergetycznym. Oprócz znanych od dawna korzyści, wynikających z tej współpracy, dodatkowym uzasadnieniem jest ciągły przyrost w Europie generacji z odnawialnych źródeł energii: farm wiatrowych na lądzie i morzu, elektrowni słonecznych oraz rozproszonej generacji wodnej, wiatrowej, słonecznej, biogazowej. Konieczna jest budowa nowych linii 400 kV, które pozwolą stopniowo rozcinać zamknięte obwody sieci 110 kV i zoptymalizują funkcjonowanie dystrybucji energii w Polsce. Realne możliwości budowy nowych linii przesyłowych zawarte są w planach rozwoju sieci przesyłowej, opracowanych i realizowanych przez Operatora Sieci. W wyniku tych planów następuje rozbudowa sieci na Wybrzeżu oraz wzmocnienie powiązań elektrycznych w korytarzach północ-południe i północ-centrum. W okresie lata przy wysokich temperaturach konieczne jest monitorowanie dopuszczalnej obciążalności linii przesyłowych. Niezbędne są działania modernizacyjne, polegające na wymianie przewodów roboczych na przystosowane do pracy

przy wyższej temperaturze (zwiększanie dopuszczalnej obciążalności przewodów) przy jednoczesnym podwyższeniu słupów. W budowie linii 110 kV napowietrznych częściej będą wykorzystywane konstrukcje rurowe, izolatory kompozytowe oraz przewody wysokotemperaturowe (o niskim zwisie).

W zakresie bezpieczeństwa elektroenergetycznego, korzystanie z paliw kopalnych prowadzi do konfliktów z tendencją do ochrony środowiska (emisja CO_2), a struktura geologiczna krajowych kopalni węgla kamiennego prowadzi do braku konkurencyjności na rynku i związanych z tym niepokojów społecznych. Podobne problemy społeczne wystąpią z wprowadzeniem energii jądrowej. Wymienione problemy społeczne wynikają z niskiej świadomości społeczeństwa, wyolbrzymiającego wady budowy nowych elektrowni, a nierozumiejącego podstawowych praw ekonomii. Administracyjne działanie na rynku przez Urząd Regulacji Energetyki powoduje zawsze niebezpieczne skutki. Ustalanie zbyt niskich cen energii prowadzi do nieopłacalności inwestycji w elektrownie i sieci, co w przyszłości doprowadzi do deficytu mocy w systemie elektroenergetycznym i powrotu do „planowych wyłączeń". Bezpieczeństwo elektroenergetyczne może być zagrożone w horyzontach wieloletnich z powodu niedostatecznych inwestycji w elektrownie i sieci.

W zakresie automatyki i sterowania, w przypadku sieci przesyłowej elementem nowym będą systemy oparte o pomiar fazorów napięć i prądów w węzłach i elementach systemu elektroenergetycznego, tzw. WAMS (Wide Area Measurement Systems). Rozwój systemów teleinformatycznych będzie prowadził do rozwoju automatyki zabezpieczeniowej o charakterze ogólnosystemowym. Wraz z rozwojem hierarchicznych struktur EAZ spodziewać się należy rozwoju automatyki o charakterze adaptacyjnym, stosowane będą również inne rodzaje regulatorów jak np. regulatory predykcyjne (Model Predictive Control), regulatory odporne (krzepkie) (Robust Control), regulatory rozmyte (Fuzzy Control), regulatory neuronowe (Artificial Neural Network Control) oraz regulatory adaptacyjne (Adaptive Control). Podsumowując powyższe można stwierdzić, że należy się spodziewać swego rodzaju „globalizacji" pewnych procesów regulacyjnych lub wybranych funkcji regulacyjnych.

Rozwój automatyki regulacyjnej systemowej będzie zmierzał w kierunku integracji z systemami WAMS. Integracja tej automatyki z systemami WAMS i dalej z automatyką regulacyjną lokalną, będzie oznaczała możliwość skoordynowania działania znaczącej liczby układów regulacji na wszystkich jej poziomach. W przypadku automatyki regulacyjnej systemowej, zmiany będą dotyczyły sposobów przesyłu informacji, czasu jej przesyłu oraz ilości przesyłanej i przetwarzanej informacji. Nowe źródła energii, o stosunkowo małych mocach jednostkowych, są często przyłączane do sieci rozdzielczych, a ze względu na swoje właściwości, wymuszają zmianę sposobu funkcjonowania tych sieci, i wymuszają ich zmiany strukturalne. Zmiany te prowadzą w kierunku tzw. sieci inteligentnych (ang. smart grids).

Definicja określa sieci inteligentne jako „sieci dystrybucyjne i powiązane z nimi technologie informatyczno-telekomunikacyjne, integrujące w sposób inteligentny działania uczestników procesów wytwarzania, przesyłu, dystrybucji i użytkowania energii elektrycznej w celu poprawy niezawodności dostaw i efektywności sterowania przez operatora oraz aktywnego angażowania odbiorców w podnoszenie efektywności energetycznej". Porównując powyższe z funkcjonalnością współczesnych sieci przesyłowych praktycznie nie widać różnicy. Różnica funkcjonalna związana jest jedynie z możliwością oddziaływania na odbiorców energii (ewentualnie prosumentów). Oznacza to, co jest w pełni zrozumiałe, że sieci inteligentne stanowią naturalny element rozwoju sieci elektroenergetycznych, polegający na przeniesieniu rozwiązań stosowanych w sieciach przesyłowych do sieci rozdzielczych.

Identyfikacja zadań nauki krajowej w zakresie rozwoju KSE (Krajowy System Elektroenergetyczny), wymaga pewnego zawężenia tematyki systemowej do potrzeb krajowych, chociaż takie podejście może być realizowane jedynie w ograniczonym stopniu. Wynika to zarówno z rosnącej stopniowo skali powiązań KSE z systemami państw europejskich (nie tylko unijnych), z rozwoju systemów elektroenergetycznych AC i DC na świecie, a także coraz silniejszych powiązań polskich instytucji naukowych z podmiotami zagranicznymi. Niezbędny jest stały udział naukowców

w planowaniu rozwoju systemu elektroenergetycznego w warunkach rynkowych, w aspekcie problemów z budową nowych źródeł energii elektrycznej oraz w prognozowaniu rozwoju energetyki prosumenckiej w skali lokalnej i w skali krajowej w celu określenia realnych możliwości udziału tej energetyki w pokryciu zapotrzebowania na moc w KSE, w przyjętym horyzoncie czasowym. Często, prace naukowe realizowane w ramach projektów krajowych lub zagranicznych nie są związane z tymi potrzebami, a raczej wynikają z zainteresowań naukowych osób realizujących projekty. Wyniki tych prac są rzadko wprowadzane do praktyki i często służą do powiększenia jedynie dorobku naukowego pracowników, realizujących projekty (tzw. zbieranie punktów). Stopniową poprawę w tym zakresie można by uzyskać, zmieniając model karier naukowych w instytucjach rozwijających nauki techniczne w Polsce. Przebieg kariery „od dyplomu studiów do emerytury" w jednej uczelni ogranicza możliwości zdobycia doświadczeń praktycznych i kontaktów w przemyśle. Można by w tym zakresie wykorzystać doświadczenia niemieckie, gdzie po uzyskaniu doktoratu pracownik musi opuścić uczelnię i dopiero po zdobyciu doświadczenia praktycznego może ubiegać się o etat na uczelni.

Wielkie Moce i Wysokie Napięcia

Sekcja Wielkich Napięć i Wysokich Mocy, Przewodniczący prof. dr hab. Romuald Włodek

Wstęp

Wkład specjalności „wysokie napięcia" do rozwoju elektrotechniki mieści się w zakresie realizacji funkcji, spełnianych przez aparaty i urządzenia w elektroenergetyce. Główne zadania w tym zakresie określone są następująco:

1) modernizacja i rozwój aparatów i urządzeń spełniających wymagania, wynikające z postępu w elektroenergetyce,
2) podwyższanie niezawodności eksploatacyjnej aparatów i urządzeń.

Zadania te, pod względem planowania i lokalizacji, dzielą się na aplikacyjne i teoretyczne.

Problemy o znaczeniu aplikacyjnym

Poszczególne rodzaje aparatów i urządzeń elektroenergetycznych wymagają formułowania specjalistycznych zadań. Wspólnymi dla wszystkich rodzajów urządzeń są następujące problemy:

- rozwój metod projektowania układów izolacyjnych wysokich napięć spełniających wymagania niezawodności w określonych warunkach narażeń eksploatacyjnych,
- rozwój metod badań laboratoryjnych pod względem: a) wyposażenia technicznego, b) procedur weryfikacji i walidacji wyników,
- zastosowanie osiągnięć inżynierii materiałów elektrotechnicznych do konstrukcji układów izolacyjnych,
- rozwój metod badań diagnostycznych jako źródeł informacji do określania niezawodności obiektów elektroenergetycznych oraz jako źródeł danych do określania strategii zarządzania obiektami.

Problemy teoretyczne

Określone działy badań podstawowych dostarczają informacji inspirujących rozwój aparatów i urządzeń elektroenergetycznych.

Najważniejsze problemy badawcze o charakterze teoretycznym:

- działanie energetyczne silnych pól elektrycznych na strukturę fizykochemiczną na poziomie nadmolekularnym i molekularnym materiałów izolacyjnych stałych oraz na możliwości i skutki emisji polowej do materiałów izolacyjnych ciekłych i gazowych,
- działanie pól elektromagnetycznych w urządzeniach elektroenergetycznych ze względu na skutki eksploatacyjne i efekty środowiskowe,

- narażenia przepięciowe jako efekty eksploatacji urządzeń energoelektronicznych,
- narażenia od wyładowań atmosferycznych: mechanizm wyładowania piorunowego, napięcia i prądy indukowane w obiektach – zastosowania do oceny zagrożeń wrażliwych urządzeń elektronicznych.

Podstawy teoretyczne

Wymienione główne problemy teoretyczne korzystają z następujących dziedzin nauki:

- elektrotechnika, teoria pola elektromagnetycznego i jej poszczególne działy,
- fizyka i chemia ciała stałego, w szczególności fizykochemia polimerów syntetycznych,
- fizyka i chemia gazów syntetycznych,
- teoria i przetwarzanie sygnałów jedno- i wielowymiarowych w zastosowaniu do interpretacji wyników pomiarów w diagnostyce.

Charakterystyka metodyczna

Przedstawione problemy specjalności „wysokie napięcia" charakteryzują się wzajemnym przenikaniem i inspiracją celów aplikacyjnych i zadań teoretycznych.

Materiały i Technologie Elektrotechniczne

Sekcja Materiałów i Technologii Elektrotechnicznych, Przewodniczący prof. dr hab. Ryszard Kacprzyk

Tendencje światowe. Kierunki rozwoju w Polsce

Rozwój w zakresie materiałów dla szeroko pojętej elektrotechniki obserwuje się we wszystkich grupach materiałów. W obszarze materiałów przewodzących, jako tendencje światowe należy uznać m.in. wzrost zainteresowania zastosowaniem grafenów, rozwój w zakresie ceramicznych i polimerowych materiałów jonoprzewodzących (ogniwa paliwowe, czujniki i pompy gazów, elektrolizery), materiałów nadprzewodzących o możliwie wysokiej temperaturze krytycznej, jak również materiałów przewodzących do zastosowań klasycznych (stykowe, eliminujące metale szlachetne, ołów, etc.).

W zakresie materiałów nieprzewodzących badania koncentrują m.in. się nad wykorzystaniem polimerów do izolacji kabli najwyższych napięć prądu przemiennego jak i do pracy długotrwałej w silnych polach stałych; nad dielektrycznymi kompozytami i nanokompozytami polimerowymi o znacznie zwiększonym przewodnictwie cieplnym, na pokrycia superhydrofobowe, itp. Wzrasta zainteresowanie zastosowaniem biodegradalnych cieczy izolacyjnych oraz gazów dla zastąpienia SF6. W zakresie migrogeneracji energii (harvesters) nastąpił znaczny wzrost zainteresowania materiałami piezo-aktywnymi.

W zakresie materiałów magnetycznych badania ukierunkowane są na blachy superorientowane; blachy nisko stratne z wysoką indukcją nasycenia; materiały magnetyczne miękkie do pracy przy wysokich częstotliwościach; materiały magnetycznie twarde (ferryty oraz na bazie pierwiastków ziem rzadkich); materiały proszkowe i nanomateriały, jak również materiały o specjalnych właściwościach (gigantyczna magnetostrykcja, magnetoopór).

Perspektywiczne kierunki rozwoju w obszarze badań materiałów dla elektrotechniki w Polsce wiążą się m.in. ze specyfiką produkcji i badań dotychczasowych. W zakresie materiałów nieprzewodzących należy utrzymać dalszy rozwój izolacji papier-olej (diagnostyka izolacji, rozpoznanie zjawisk, nowe materiały i dodatki); rozwój polimerowej izolacji kompozytowej jak i nanokompozytów o specjalnych właściwościach (cieplne). W zakresie materiałów magnetycznych celowym wydaje się ukierunkowanie badań na nanomateriały magnetyczne oraz materiały o specjalnych właściwościach. Badania w zakresie materiałów przewodzących powinny obejmować materiały stykowe (wykorzystujące krajowe surowce) jak również półprzewodzące i specjalne kompozyty i nanokompozyty polimerowe (materiały ekranujące, pozystorowe, inteligentne).

W zakresie technologii tendencje światowe wskazują na wzrost zainteresowania technologiami kompozytów i nanokompozytów (materiałów dielektrycznych; półprzewodzących, nieliniowych, aktywnych); proszkowymi technologiami materiałów magnetycznych; technologiami nadprzewodników wysokotemperaturowych; technologiami materiałów dla ogniw PV, paliwowych, chemicznych oraz superkondensatorów, jak również technologiami samych elementów. Obserwuje się również wzrost zainteresowania technologiami wykorzystującymi technikę wysokich napięć i silnych pól elektrycznych. Należą do nich energooszczędne technologie elektrostatyczne, technologie plazmowe (wykorzystujące zarówno plazmę gorącą jak i niskotemperaturową) czy elektroerozyjna obróbka materiałów (wiercenie skał). Nadal obserwowany jest rozwój w zakresie technologii maszyn i urządzeń elektrycznych oraz ich elementów i podzespołów.

Biorąc pod uwagę tendencje światowe jak i dotychczasowe osiągnięcia, rozwój technologii w kraju powinien się koncentrować m.in. na technologiach izolatorów ceramicznych i kompozytowych (eksport), technologii polimerowych kompozytów półprzewodzących o różnych zastosowaniach (np. inteligentne grzejniki), technologii ogniw paliwowych i superkondensatorów. Istotnym wydaje się być również rozwój technologii plazmowych i energooszczędnych technologii elektrostatycznych.

Istotnym elementem rozdziału „Materiały i Technologie Elektrotechniczne" są badania nieniszczące. Metody elektromagnetyczne, takie jak: spadku potencjału (tomografia impedancyjna), magnetycznego strumienia rozproszonego (proszkowa), szumów Barkhausena i prądów wirowych, stanowią obecnie istotną grupę metod używanych w badaniach nieniszczących. Stosuje się jednak więcej metod elektromagnetycznych, na przykład, zaliczaną do optycznych, metodę radiologiczną oraz wprowadzaną metodę terahercową. Badania nieniszczące są istotnym składnikiem nowoczesnych technologii i odegrają ważną rolę w budowie i eksploatacji polskiej elektrowni jądrowej.

Maszyny Elektryczne i Transformatory

Sekcja Maszyn Elektrycznych i Transformatorów, Przewodniczący prof. dr hab. Kazimierz Zakrzewski

Maszyny elektryczne (turbogeneratory i hydrogeneratory) i transformatory blokowe stanowią główne elementy systemu elektroenergetycznego w zadaniach wytwarzanie i przesyłu energii elektrycznej. Transformatory rozdzielcze odgrywają rolę pośredniczącą w systemach przesyłowych i dystrybucyjnych. Silniki elektryczne zużywają około 50% produkowanej energii i są powszechnie stosowane w napędach: maszyn roboczych, pojazdów trakcyjnych i urządzeń gospodarczych. Nic nie wskazuje na to, aby dotychczasowa rola maszyn elektrycznych i transformatorów mogła ulec zmniejszeniu. Polska jest znaczącym producentem maszyn elektrycznych i transformatorów. Fabryki maszyn elektrycznych i transformatorów pomyślnie przeszły transformację gospodarczą i jako jedne z pierwszych zostały sprywatyzowane.

Aktualne zagadnienia badawcze w tematyce maszyn elektrycznych powinny koncentrować się na energooszczędności, a więc na budowie maszyn o zmniejszonych stratach mocy, pracujących niezawodnie i niewymagających częstych przeglądów i remontu. Sprawności maszyn elektrycznych można zwiększyć o kilka procent poprzez stosowanie magnesów trwałych. Ponadto, magnesy trwałe pozwalają zmniejszyć masę maszyny o kilkadziesiąt procent w stosunku do obecnie powszechnie stosowanych maszyn indukcyjnych. Interesującym zagadnieniem jest tematyka obwodów magnetycznych proszkowych o znacznie zmniejszonych stratach związanych z przemagnesowaniem. Istotne są problemy badawcze obejmujące problematykę konstrukcyjną i technologiczną także innych przetworników elektromechanicznych: wysokoobrotowych, zasilanych ze źródeł solarnych, o ruchu liniowym, piezoelektrycznych.

Aktualne zagadnienia badawcze transformatorów powinny obejmować zagadnienia projektowania, technologii, badań w wytwórni i w eksploatacji. Transformatory w czasie pracy są narażone na działanie: sił i naprężeń mechanicznych, pola elektrycznego i magnetycznego oraz cieplne. Zjawiska

elektromagnetyczne w stanach zwarciowych są przyczyną generacji dużych sił, a w stanach normalnej eksploatacji determinują straty mocy podstawowe i dodatkowe, które są źródłem ciepła. Nagrzewanie i chłodzenie transformatorów, w różnych warunkach klimatycznych, decyduje o dopuszczalnej obciążalności. Wytrzymałość dielektryczna izolacji i wyładowania niezupełne są determinowane przez rozkłady pola elektrycznego. Pożądane jest doskonalenie metod w zakresie obliczeń elektromagnetycznych, cieplnych i wytrzymałościowych struktur transformatorowych oraz opracowanie nowych technologii wytwarzania izolacji elektrycznej twardej i miękkiej. Szczególną rolę odgrywa diagnostyka stosowana w zakresie zarządzania eksploatacją transformatorów i powinna być nakierowana na monitoring transformatorów w eksploatacji. Ten kierunek badań jest obecnie rozwijany w sensie metodologicznym i narzędziowym. Należy podkreślić, że w Polsce zagadnienia monitoringu transformatorów, badań okresowych czystości i wytrzymałości oleju, łącznie z analizą chromatograficzną oraz diagnostyka przepustów wysokiego napięcia, są przedmiotem szczególnej troski. W zakresie pomiarów i diagnostyki maszyn elektrycznych i transformatorów celowym byłoby zorganizowanie krajowego centrum diagnostycznego.

Trakcja Elektryczna i Napęd Elektryczny Pojazdów

Sekcja Trakcji Elektrycznej, Przewodniczący dr hab. Adam Szeląg, prof. PW

Trakcja elektryczna jest odmiennym, ale też bardziej ekologicznym i konkurencyjnym systemem transportowym w porównaniu z systemem drogowym. Należy zatem podjąć działania mające na celu powstrzymanie dalszego spadku przewozów kolejowych z wykorzystaniem trakcji elektrycznej. Istotne jest (poza zwiększeniem nakładów na trakcje elektryczną także różnymi innymi metodami, w tym administracyjnymi i fiskalnymi) dążenie do zwiększania wykorzystania istniejącej sieci transportu elektrycznego dla przewozów tak pasażerskich jak i towarowych. Strategiczna rola trakcji elektrycznej w Polsce wynika z możliwości zapewnienia przez transport zelektryfikowany funkcjonowania gospodarki nawet w warunkach braku dostaw paliw płynnych (energia elektryczna wytwarzana jest głównie z wydobywanego w Polsce węgla); dużej sieci zelektryfikowanych linii kolejowych (12000 km), pokrywających praktycznie, choć nierównomiernie cały kraj; zastosowania transportu elektrycznego w większości głównych miast w Polsce (poza Radomiem, Zieloną Górą, Rzeszowem, Białymstokiem i Kielcami); dość dobrze rozwiniętego (mimo likwidacji fabryk w latach 90-tych XX w.) polskiego przemysłu elektromaszynowego, co pozwala na produkcję prawie całego osprzętu potrzebnego do budowy układów zasilania i taboru dla kolei o prędkościach do 200 km/h, nie tylko na potrzeby krajowe, ale także zdolnego do konkurencji z wyrobami zachodnio-europejskimi; zastosowania w transporcie elektrycznym najnowszych technologii i rozwiązań będących wyzwaniem do rozwoju nauki i innowacji, ekologicznych aspektów transportu, co pozwala na wykorzystanie środków UE w rozwoju trakcji elektrycznej w następnej perspektywie budżetowej, tj. praktycznie przez najbliższe 10 lat.

Preferowane kierunki prac i badań w Polsce dotyczyć powinny: zmniejszenia zużycia energii; zmian w konstrukcji i wyposażeniu taboru; zmniejszenia strat przetwarzania i przesyłu energii w układzie zasilania i taborze; efektywnego wykorzystania energii hamowania odzyskowego (magazyny energii) - działania techniczne i zmiany legislacyjne, w tym opracowania systemu rozliczeń za energię hamowania oddawaną do sieci trakcyjnej i wprowadzeniu preferencji dla operatorów systemów transportu elektrycznego wdrażających rozwiązania energooszczędne (np. możliwości wprowadzenia certyfikatów za zmniejszenie zużycia energii); poprawy niezawodności funkcjonowania transportu elektrycznego; efektywnych i bezpiecznych źródeł energii dla pojazdów autonomicznych; pilotażowych odcinków wprowadzenia w Polsce nowego systemu zasilania kolei 25 kV, 50 Hz – przygotowania do budowy kolei dużych prędkości.

Energoelektronika i Napęd Elektryczny

Sekcja Energoelektroniki i Napędu Elektrycznego, Przewodniczący prof. dr hab. Stanisław Piróg

Automatyka napędu elektrycznego i energoelektronika rozwijała się w Polsce bardzo dynamicznie w latach 70. i 80. minionego stulecia. Prace ośrodków badawczych i przemysłu odpowiadały na ówczesne potrzeby gospodarki.

Obecnie przemysł wytwarzający i instalujący przekształtniki energoelektroniczne w większości reprezentowany jest przez wielkie koncerny międzynarodowe.

Powstało kilka nowych niszowych firm krajowych nastawionych głównie na obsługę jednostkowych, trudnych lub rzadko występujących, zamówień nieopłacalnych dla wielkich wytwórców.

Zmiany sposobu finansowania nauki (bardzo niski poziom płac, szczególnie młodych pracowników, w odniesieniu do płac pracowników niskowykwalifikowanych w gospodarce), brak zainteresowania przemysłu opracowaniami krajowymi, a przede wszystkim sposób oceny pracowników naukowo badawczych „za publikacyjny urobek punktowy" nie zachęca do prowadzenia trudnych, i w realny sposób weryfikowanych, badań.

Energoelektronika i automatyka napędu elektrycznego obsługuje praktycznie wszystkie obszary produkcji, dystrybucji i użytkowanie energii elektrycznej.

Aktualne obszary rozwijanych aplikacji to:

- Przekształcanie energii pozyskiwanej z odnawialnych źródeł.
- Lokalna dystrybucja energii pozyskiwanej ze źródeł odnawialnych sieciami prądu stałego.
- Napędy elektronarzędzi i urządzeń gospodarstwa domowego z zastosowaniem trójfazowych silników indukcyjnych, reluktancyjnych lub maszyn o magnesach trwałych.
- Serwosilniki i nastawniki dla automatyki.
- Bezczujnikowe układy napędowe (estymacja położenia, prędkości i momentu).
- Obsługa energooszczędnych źródeł światła (lampy LED, świetlówki kompaktowe).
- Urządzenia grzewcze dla przemysłu i dla medycyny.
- Kompensacja mocy biernej i aktywna filtracja harmonicznych prądu (indywidualna i centralna).
- Napędy trakcyjne i napędy pojazdów indywidualnych (samochód elektryczny).
- Energooszczędne napędy urządzeń technologicznych dużych mocy (górnictwo, hutnictwo, przemysł przetwórczy) z zastosowaniem maszyn indukcyjnych i maszyn o magnesach trwałych.
- Zastosowanie nowych przyrządów półprzewodnikowych umożliwiających stosowanie wyższych częstotliwości impulsowania (SiC, GaN), a tym samym zmniejszenie gabarytów urządzeń.
- Systemy magazynowania energii.
- Systemy bezstykowego przesyłu energii na małe odległości.
- Transformatory „inteligentne".

Wymienione obszary mieszczą się w polityce UE zmierzającej do:

- Zwiększenia udziału energii odnawialnej w gospodarce.
- Tworzenia systemów prosumenckich.
- Oszczędnego gospodarowania energią i surowcami.
- Poprawy komfortu życia.
- Ograniczenia emisji gazów cieplarnianych i zanieczyszczenia środowiska.

Preferowane kierunki prac i badań w Polsce dotyczyć powinny:

- Zmniejszenia zużycia energii elektrycznej.
- Efektywnego pozyskiwania i przekształcania energii ze źródeł odnawialnych.
- Poprawy jakości energii elektrycznej.
- Nowych konstrukcji silników.

- Nowych topologii wysokosprawnych przekształtników.
- Systemów smart grid i systemów prosumenckich.
- Zwiększenia czasu niezawodnej pracy urządzeń energoelektronicznych.
- Zwiększenia niezawodności układów o specjalnych wymaganiach (Fault tolerant control).

Elektrotermia i Technika Świetlna

Sekcja Elektrotermii i Techniki Świetlnej, Przewodniczący prof. dr hab. Mieczysław Hering

Preferowane kierunki badań w obszarze Elektrotermii

Zadania badawcze zostały zdefiniowane w powiązaniu z określonymi jako najbardziej konkurencyjne o kluczowym znaczeniu dla rozwoju przemysłu krajowego w Strategii Innowacyjności i Efektywności Gospodarki przygotowanej przez Ministerstwo Gospodarki powinny być ukierunkowane:

1) W obszarze urządzeń elektrotermicznych o wysokiej sprawności na:
- wprowadzanie stalowniczych urządzeń łukowych na prąd stały, modernizację urządzeń stalowniczych prądu przemiennego oraz systemów COS;
- zwiększenie zdolności produkcyjnych istniejących pieców żelazostopowych, związanych z emisją SO_2, CO_2 w celu doprowadzenia technologii do kategorii BAT;
- rozszerzenie zastosowania w odlewniach pieców indukcyjnych średniej częstotliwości;
- intensyfikację wprowadzania pieców indukcyjnych do odlewania precyzyjnego metodą odśrodkową w próżni oraz odlewanie żeliwa, metali nieżelaznych i kompozytów ze wspomaganiem elektromagnetycznym;
- upowszechnienie procesów mieszania elektromagnetycznego w procesach topienia, odlewania ciągłego, tikstropowego oraz wytwarzanie stopów metodą lewitacji i semilewitacji elektromagnetycznej, rozwoju pomp, rynien i dozowników elektromagnetycznych;
- wykorzystanie technik topienia plazmowego i plazmowo-indukcyjnego;
- technologie indukcyjnego nagrzewania objętościowego w procesach obróbki plastycznej.

2) W obszarze kogeneracji i racjonalizacji gospodarowania energią na:
- wytwarzanie z gazów poprocesowych energii elektrycznej oraz ciepłej wody użytkowej;
- odzysk ciepła z wentylacji pieców indukcyjnych, z wody chłodzącej;
- badania nad nowymi rozwiązaniami układów ogrzewania elektrycznego w systemach zasilania lokalnego oraz w domach pasywnych;
- skojarzone układy ogrzewania pompy ciepła – ogrzewacze bezpośrednie.

3) W obszarze technologii mikroelektronicznych i nanotechnologii na:
- wykorzystanie metod nanotermicznych w terapiach medycznych, w tym stosowanie metod hipertermii, wykorzystanie urządzeń elektrotermicznych w procesach diagnostyki;
- problematykę zasilania systemów wielowzbudnikowych i wieloczęstotliwościowych do nagrzewania indukcyjnego w procesach wytwarzania monokryształów;
- opracowanie urządzeń do obróbki jarzeniowej warstw wierzchnich części maszyn o złożonej geometrii w warunkach próżni dynamicznej;
- komputerowe wspomaganie projektowania procesów indukcyjnego hartowania powierzchniowego części maszyn, w tym szczególnie dla potrzeb przemysłu samochodowego i lotniczego.

4) W obszarze ochrony środowiska na:
- neutralizację skażonej ziemi metodą witryfikacji in situ oraz rezystancyjno-elektrodową;
- witryfikację popiołów i żużli pochodzących ze spalania odpadów komunalnych;
- destrukcję oraz redukcję techniką łukową toksycznych substancji organicznych;
- obróbkę w piecach łukowych pyłów zawierających duże ilości cynku;

- obróbkę odpadów będących źródłem dużych ilości dioxyn i furanów;
- wstępną mikrofalową obróbkę nieczystości szpitalnych, pochodzących z przychodni, laboratoriów przed ich transportem do spalarni typu przemysłowego;
- zastosowanie technik plazmowych w krakingu termicznym łańcuchów molekuł szkodliwych substancji organicznych, w witryfikacji substancji toksycznych i radioaktywnych.

Perspektywiczne zadania badawcze z techniki świetlnej w Polsce

1) Aplikacje LED-ów i OLED-ów w oświetleniu, iluminacji, sygnalizacji, aparaturze kontrolno-pomiarowej i medycznej.
2) Nowe materiały i konstrukcje w technologii źródeł światła i opraw oświetleniowych.
3) Modelowanie i badania źródeł światła, opraw oświetleniowych i systemów sterowania oświetleniem.
4) Kształtowanie bryły fotometrycznej opraw oświetleniowych i projektowanie ich układów regulacji pod kątem oświetlenia i sterowania oświetleniem w obiektach.
5) Konstrukcje i zastosowanie elementów optoelektronicznych w technice świetlnej.
6) Konstrukcje systemów pozyskiwania energii promieniowania słonecznego do wytwarzania energii cieplnej i elektrycznej, wykorzystywanej w oświetleniu.
7) Projektowanie i badania hybrydowych systemów oświetleniowych.
8) Zagadnienia cieplne w tym ich modelowanie w sprzęcie oświetleniowym.
9) Kształtowanie wizerunku miasta w następstwie iluminacji obiektów – rozwój teorii master planu oświetlenia miast.
10) Oświetleniowe aspekty bezpieczeństwa ruchu drogowego.
11) Badanie i ocena zagrożeń powodowanych przez światło przeszkadzające w oświetleniu zewnętrznym.
12) Wykorzystanie światła dziennego w oświetleniu.
13) Badanie parametrów oświetleniowych pod kątem jakości otoczenia świetlnego.
14) Badanie promieniowania optycznego (światła) i jego wpływu na wydolność wzrokową, odczucia, emocje, nastrój, zachowanie oraz zagrożenie dla ludzi.
15) Badanie wpływu światła na rozwój dzieci, utrzymanie aktywności i motywacji do pracy u pracowników zmian nocnych, występowanie okulistycznych chorób wieku starszego i funkcjonowanie siatkówki oka.
16) Wykorzystanie nowoczesnych technik obrazowania i elementów wirtualnej rzeczywistości w analizie wpływu scen świetlnych i projekcji audiowizualnych na organizm ludzki.
17) Modelowanie i badania źródeł światła, opraw oświetleniowych i systemów sterowania oświetleniem pod kątem ich wpływu na jakość energii elektrycznej.
18) Badanie efektywności energetycznej i ekonomicznej rozwiązań oświetleniowych.
19) Badania eksploatacyjne oświetlenia.
20) Estetyka oświetlenia, symulacje komputerowe oświetlenia, mapping, animacje i wizualizacje świetlne.
21) Metody pomiarów i konstrukcje przyrządów do pomiarów promieniowania VIS, UV i IR.
22) Nowe metody sprawdzania przyrządów pomiarowych stosowanych do obiektywnej oceny cech fizycznych korelujących z postrzeganiem wzrokowym.
23) Fotometria cyfrowa – nowe wyzwania i możliwości, aplikacje matryc detektorów w aparaturze kontrolno-pomiarowej z zakresu techniki świetlnej.
24) Pomiary barwy i kształtowanie rozkładu widmowego promieniowania źródeł światła w następstwie mieszania barw.
25) Światłowodowe i optyczne czujniki wielkości elektrycznych i nieelektrycznych.

Kształcenie wykwalifikowanych kadr na kierunku Elektrotechnika

Sekcja Teorii Elektrotechniki, Przewodniczący prof. dr inż. Stanisław Bolkowski

Teza podstawowa

Poziom absolwentów kształconych na kierunku elektrotechnika na studiach dwustopniowych w ostatnich latach obniżył się. Dotyczy to zarówno pierwszego jak i drugiego stopnia.

Wpłynęły na to następujące czynniki:

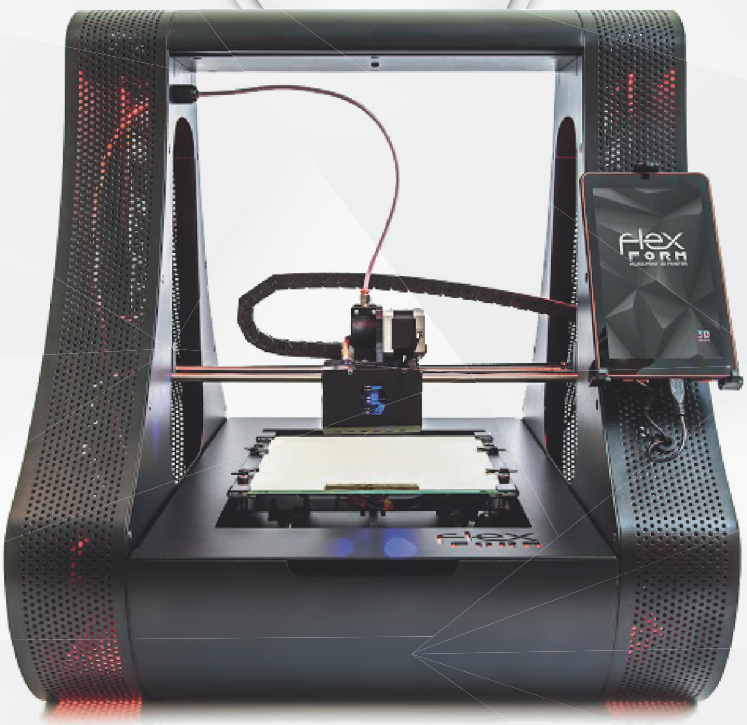
1) **Nowa matura** i z tym związany brak egzaminu wstępnego na studia.
2) Wprowadzenie **studiów dwustopniowych**.
3) Malejąca z roku na rok **dotacja budżetowa** dla uczelni.
4) Przy prowadzonych ocenach pracowników naukowo-dydaktycznych, zwłaszcza przy awansach, w małym stopniu **branie pod uwagę działalności dydaktycznej**.
5) Zbyt mało **praktyk przeddyplomowych i dyplomowych** w czasie studiów.
6) **Niskie płace**, a co za tym idzie, podejmowanie przez nauczycieli akademickich dodatkowego zatrudnienia.
7) Niezbyt prawidłowo stosowany przy rejestracji **system ECTS**.

Propozycje zmian

W trosce o usprawnienie procesu dydaktycznego, o podniesienie poziomu absolwentów kształconych na kierunku Elektrotechnika, należy podjąć następujące działania:

1) Należy dokonać gruntownej oceny programów na obu stopniach kształcenia z punktu widzenia ich dostosowania do wymogów współczesnego rynku pracy, eliminowania powtórzeń treści w poszczególnych przedmiotach, właściwej korelacji przedmiotów.
   W tym celu należy powoływać komisje programowe złożone z profesorów oraz przedstawicieli przemysłu i elektroenergetyki.
2) Należy bezwzględnie rozwiązać problemy występujące na styku pierwszego i drugiego stopnia.
   Jednym z wariantów byłoby:
   - odstąpienie od egzaminu dla studentów, którzy będą kontynuowali studia na drugim stopniu;
   - przedłużenie np. o 1 miesiąc studiów na pierwszym stopniu, w celu umożliwienia studentom wykonanie w miarę solidnej pracy dyplomowej i zdanie egzaminu.
3) Należy przywrócić jednolite studia magisterskie 5-letnie.
4) Elementem procesu kształcenia powinny być praktyki wakacyjne oraz praktyki dyplomowe w firmach specjalistycznych o znaczącej pozycji na rynku pracy.
5) Na pierwszym stopniu studiów nie należy likwidować laboratoriów jako sposobu oszczędzania. Raczej należałoby zwiększyć liczbę godzin tygodniowo.
6) Należy przywrócić egzaminy wstępne o innej formule niż dawniej.
7) Ważnym instrumentem w procesie rejestracji studentów powinien odgrywać prawidłowo stosowany system ECTS.
8) W szerszym zakresie należy prowadzić studia podyplomowe i nadać im odpowiednią rangę.

3D PROTO
3D PRINTERS



ODKRYJ TRZECI WYMIAR DRUKU

FLEXFORM to nowoczesna drukarka 3D absolutnie dla każdego. To pewne, bezawaryjne urządzenie stworzone z myślą o komforcie obsługi przez użytkownika.

Zastosowane funkcjonalności oraz intuicyjne sterowanie przez 7 calowy tablet, umożliwiają rozpoczęcie drukowania w kilka sekund - w myśl teorii PLUG&PRINT (podłącz i drukuj).

ROZPAKUJ » WŁĄCZ » WYBIERZ MODEL » WYŚLIJ » DRUKUJ

3DPROTO Sp.z o.o. **Biuro Zarządu:** ul. Chopina 7/50, 00-559 Warszawa, biuro@3dproto.pl, www.3dproto.pl

ZAINWESTUJMY 2

W INNOWACJE – INKUBATOR TECHNOLOGICZNY

www.zainwestujmy.pl

Zainwestujmy w Innowacje

Inkubator Technologiczny 2

Do współpracy zapraszamy Pomysłodawców, którzy chcą osiągnąć sukces w biznesie. Nasza oferta kierowana jest do osób fizycznych - przedsiębiorców, naukowców, pracowników naukowych i wynalazców.

Szukasz dotacji by móc zrealizować swój pomysł?
Wejdź na **www.zainwestujmy.pl** i dowiedz się więcej!

INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

CITT LPNT

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO

Fundusze Europejskie - dla rozwoju innowacyjnej gospodarki. Inwestujemy w Waszą przyszłość!