

Roland Ryndzionek¹, Łukasz Sienkiewicz¹, Wojciech Szlabowicz², Marek Grzywacz³
Mieczysław Ronkowski¹

¹Politechnika Gdańska, Gdańsk, Dalkia Energy & Technical Services²,

³SINAPTEC Ultrasonic Technology

PRZEGLĄD WYBRANYCH TOPOLOGII AKTUATORÓW PIEZOELEKTRYCZNYCH

REVIEW OF CHOSEN TOPOLOGIES OF PIEZOELECTRIC ACTUATORS

Abstract: The aim of this paper is to present the theoretical background, gather essential knowledge to further research and to build measurement stand for acquiring characteristics of piezoelectric motors. The fundamentals of piezoelectric phenomenon have been presented. Chosen topologies of piezo-actuators working in special applications (especially robotics, automotive industry and aeronautics) have been described. Special emphasis was put on traveling wave ultrasonic motors, high torque piezo-motors and multiple degrees of freedom novel piezo-motors. The automatic method of obtaining characteristics of piezoelectric actuators was presented. The main attributes of piezo-drives have been discussed.

1. Wstęp

Artykuł jest wynikiem studiów literaturowych i ma charakter przeglądowy. Jego celem było zebranie informacji do budowy stanowiska pomiarowego silnika ultrasonicznego o ruchu złożonym oraz pogłębienie prac badawczych na polu tych silników.

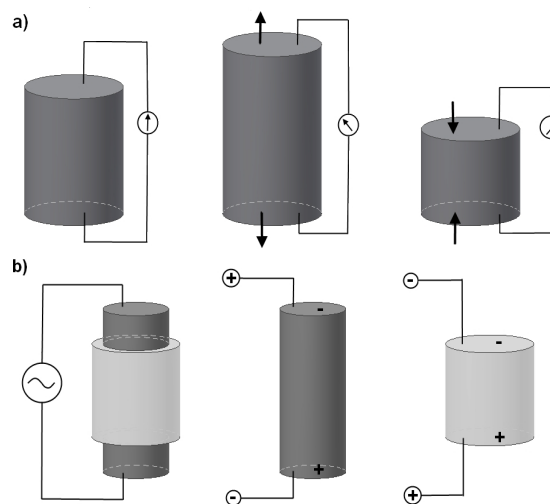
Teorię piezoelektryczności w 1880 roku przedstawili bracia Curie, a Gabriel Jonas Lippman opisując wzorami matematycznymi odwrotny efekt piezoelektryczny potwierdził badania przeprowadzone przez braci Curie. W 1917 roku Paweł Langevin zastosował materiały piezoelektryczne (kryształy kwarcu) do wykrywania łodzi podwodnych. Obecnie zjawisko piezoelektryczności wykorzystuje się praktycznie w każdej dziedzinie (czujniki, akтуatory, systemy asejsmiczne, zapalniki, mikrofony, napędy) [2][7].

Pierwotnie stosowane materiały, takie jak kwarc, turmalin, sól Rochelle, itp. wykazywały znikome właściwości piezoelektryczne. Potrzeba materiałów o doskonalszych parametrach doprowadziła do wynalezienia polikrystalicznych materiałów ceramicznych takich jak: tytanian baru, czy cyrkonian-tytanian ołowiu (ang. PZT). Obecnie ceramika PZT stanowi najczęściej stosowany materiał elektroaktywny silowników piezoelektrycznych w serwonapędach nowej generacji – tzw. napędach osobliwych [7].

2. Zjawisko piezoelektryczne

O prostym zjawisku piezoelektrycznym mówimy, gdy pod wpływem działania naprężeń mechanicznych na powierzchni kryształu indukują się ładunki elektryczne.

Odwrotne zjawisko piezoelektryczne występuje gdy pod wpływem pola elektrycznego w płytce piezoceramicznej powstają naprężenia i odkształcenia mechaniczne (Rys.1). Kierunek naprężeń mechanicznych zależy od kierunku pola elektrycznego. Odkształcenia mechaniczne są proporcjonalne do natężenia pola elektrycznego. Drgania mechaniczne płytki mają taką samą częstotliwość jak przyłożone napięcie zmienne [5],[7].



Rys. 1 Ilustracja: a) efektu piezoelektrycznego, b) odwrotnego efektu piezoelektrycznego.

Zjawisko piezoelektryczne, jako sprzężenie oddziaływań mechanicznych oraz elektrycznych można opisać równaniami konstytutywnymi:

$$T = c^E \cdot S - e \cdot E \quad (1)$$

$$D = e \cdot S + \varepsilon^S \cdot E \quad (2)$$

gdzie:

T – naprężenie [N/m^2],

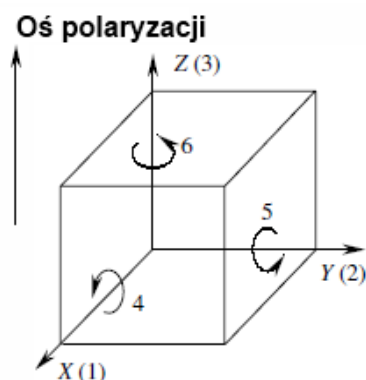
S – odkształcenie [m],

E – pole elektryczne [V/m],

D – indukcja elektryczna [C/m^2].

Odształcenie S wywołuje polaryzację eS materiału w wyniku efektu piezoelektrycznego. Zadane zewnętrzne pole elektryczne o natężeniu E oddziałuje na wewnętrzne dipole elektryczne, porządkując je zgodnie z liniami sił tego pola. Dzięki istnieniu odwrotnego efektu piezoelektrycznego pojawia się naprężenie w materiale, o wartości $-eE$ [7].

Z powodu anizotropowego charakteru ceramiki piezoelektrycznej właściwości PZT zależą od kierunków wielkości elektrycznych i mechanicznych (Rys. 2). Stałe opisujące odwrotne zjawisko piezoelektryczne posiadają dwa indeksy. Pierwszy odnosi się do przyczyny odkształceń – wielkości elektrycznej; drugi do skutku, czyli wielkości mechanicznej. Indeksy te pokazują również możliwe tryby pracy materiału piezoelektrycznego – odkształcenia podłużne, poprzeczne, wyginające i ścinające. Rodzaj odkształcenia zależy m.in. od kształtu, orientacji ciała względem osi kryształów piezoelektrycznych i lokalizacji elektrod [1].

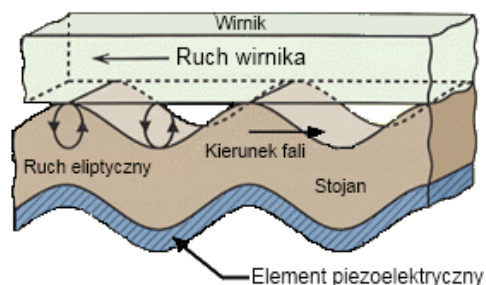


Rys. 2 Prostokątny układ współrzędnych opisujący tryby pracy materiału piezoelektrycznego (oś Z – oś polaryzacji. [1]).

3. Silnik pierścieniowy z falą biegnącą

Pierścieniowy silnik ultrasoniczny został zaprojektowany przez japońskiego badacza Toshiku Sashidę w 1982 roku. Zasada działania opisanego silnika opiera się na dwóch zjawiskach (Rys. 3). Pierwsze z nich to generacja mechanicznych drgań w materiale piezoceramicznym lub w przymocowanym do niego metalowym

pierścieniu. Amplituda oscylacji jest bardzo mała (ułamki μm). W celu zwiększenia wartości drgań wykorzystuje się rezonans ceramiki o częstotliwościach w paśmie ultrasonicznym.



Rys. 3 Zasada działania pierścieniowego silnika ultrasonicznego.

Drugie ze zjawisk polega na wytworzeniu fali biegnącej w pierścieniowym stojanie przez drgające elementy piezoceramiczne. Pierścień zawierający płytki piezoceramiczne podzielony jest na dwie części zasilane różnymi sygnałami elektrycznymi (w praktyce wykorzystuje się przekształtnik generujący dwufazowe napięcie o wysokiej częstotliwości).

Obie połowki składają się z kilku płytek piezoceramicznych o różnej polaryzacji. Segmenty te wytwarzają rozchodzące się w przeciwnych kierunkach fale, które po nałożeniu generują falę rozprzestrzeniającą się w jednym kierunku. Siła napędzająca (styczna do grzbietu fali) jest generowana jedynie w punktach styku wierzchołków fali z wirnikiem. W celu zmiany kierunku fali należy zmienić polaryzację napięcia zasilającego [11].

Stojan silnika ultrasonicznego (Rys. 4) składa się z elastycznego pierścienia, pierścienia płytek piezoceramicznych oraz substancji sklejącej obie części. Cechą charakterystyczną stojana jest powierzchnia w kształcie 'grzebienia'. Taka konstrukcja pozwala na wzmocnienie wibracji generowanych przez piezoceramikę (zęby grzebienia) oraz na oczyszczenie powierzchni styku stojana z wirnikiem z pyłu powstałego w wyniku tarcia (rowki). Substancja mocująca piezoceramikę do stojana powinna charakteryzować się wysoką wytrzymałością mechaniczną, odpornością na wysoką temperaturę oraz odpowiednim czasem wiązania. Ważnym aspektem pracy silnika ultrasonicznego jest efektywne przekazywanie energii drgań z stojana do wirnika.

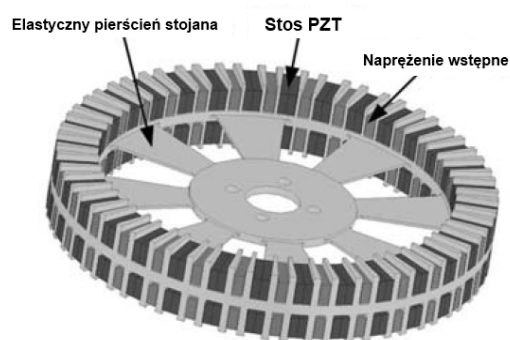
Aby zapewnić lepsze warunki transmisji energii w niektórych przypadkach stosuje się cienki pierścień między wirnikiem a stojanem. Podstawowe wymagania co do materiału pierście-

nia zakładają: jednolity rozkład nacisku na powierzchnię kontaktową oraz wysoki współczynnik tarcia [11].



Rys. 4 Elementy silnika pierścieniowego.

Podstawowe wady opisywanej konstrukcji to: niższy stopień sprzężenia elektromechanicznego wykorzystywanego poprzecznego trybu pracy (d_{31}) piezoceramiki w porównaniu z trybem podłużnym (d_{33}), wrażliwość ceramiki oraz stosunkowo niska wytrzymałość zmęczeniowa pierścienia pośredniczącego w przekazywaniu energii – zwłaszcza w warunkach niesprzyjających temperatur. Aby wyeliminować powyższe wady zaprojektowano szereg koncepcji wykorzystujących PZT pracujące w trybie podłużnym (d_{33}). Jednym z nich jest prototyp zawierający stosy piezoceramiki umieszczone w zębach pierścieniowego stojana, naprzemiennie z blokami regulującymi naprężenie wstępne PZT (Rys. 5). Takie rozwiązanie zapewnia ochronę warstwy pośredniczącej przed naprężeniami ścinającymi, zwiększa wytrzymałość zmęczeniową oraz pozwala uzyskać większą gęstość momentu [15].

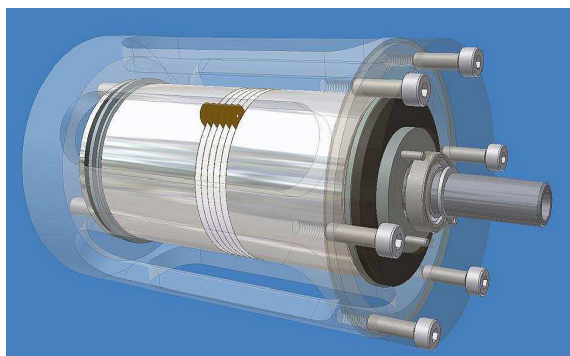


Rys. 5 Silnik pierścieniowy wykorzystujący stosy płytek piezoceramicznych [15].

4. Silniki o dużej wartości momentu

W ramach realizacji projektu nadzorowanego przez firmę AIRBUS France – „Przyszłościowe Sterowanie Lotem” prowadzone były prace badawcze nad silnikami piezoelektrycznymi dużej mocy, których efektem była praca doktorska [13]. Badania wykazały duże możliwości aktuatorów piezoelektrycznych w zastosowaniach specjalnych. Opracowano model aktuatora momentowego o modulowanym ruchu z podwójnym wirnikiem (Rys. 6). Przeprowadzono analizę ceramiki piezoelektrycznej użytej do budowy silnika, uwzględniając właściwości sprężyste materiałów, straty dielektryczne, współczynnik tarcia między stojanem a wirnikiem jak i wagę poszczególnych elementów. Opierając się na modelu obwodowym określono podstawowe parametry siłownika, takie jak: geometria i częstotliwość rezonansowa struktury. Obliczenia analityczne zweryfikowano symulacją połową w środowisku ANSYS. Szczególną uwagę zwrócono na poziom docisku ceramiki piezoelektrycznej pomiędzy dwoma stojanami. W celu uzyskania maksymalnej amplitudy przemieszczeń dobrano odpowiedni moment dokręcający śruby stojana. Przeprowadzono analizę powierzchni przekazującej siłę napędową ze względu na tarcie, a następnie powierzchnię wirnika przygotowano zgodnie z wynikami badań. Po zbudowaniu prototypu przeprowadzono pomiary mające na celu porównanie uzyskanych charakterystyk silnika z wynikami symulacji komputerowej. Oprócz koncepcji budowy silnika została przedstawiona koncepcja oraz budowa układu zasilania. Zważywszy na fakt, że w samolotach pasażerskich stosowana jest sieć trójfazowa o częstotliwości 400Hz i napięciu 200/115 V/V koniecznym było zaprojektowanie specjali-

stycznego przemiennika częstotliwości. Powyższy układ został zbudowany, a następnie przebadany w laboratorium. Umożliwił generowanie napięcia o wartości skutecznej 600V oraz częstotliwości około 20kHz. Ze względu na specyfikę przetwornika piezoelektrycznego konieczne było zaimplementowanie przemiennika o dwufazowym napięciu z przesunięciem między fazami o 90° .

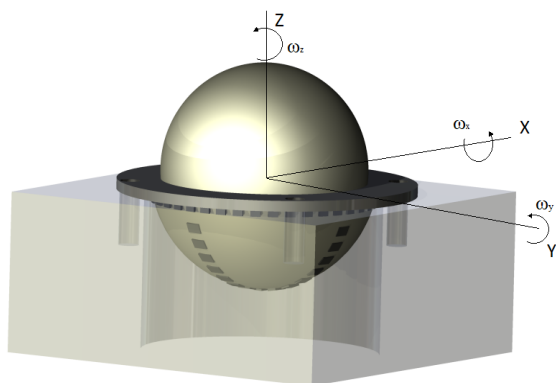


Rys. 6 Topologia silnika z podwójnym wirnikiem [13].

Projekt przewidywał zastosowanie silnika piezoelektrycznego w serwonapędzie położenia statecznika pionowego samolotu. Uzyskane parametry potwierdziły zalety takiego rozwiązania. Uzyskano wysoki współczynnik momentu do masy, na poziomie 8 Nm/kg [13].

5. Silniki o ruchu złożonym

Napędy osobliwe, czyli silniki o ruchu złożonym są coraz częściej stosowane w nowoczesnych konstrukcjach np. napędy robotów, obrabiarki CNC. Zastosowanie wyżej wymienionego napędu pozwala na realizację ruchu w kilku stopniach swobody. Największą zaletą płynącą z takiego rozwiązania jest eliminacja przekładni mechanicznych, szybkość działania układu oraz prostota struktury elektromechanicznej.



Rys. 7 Silnik sferyczny o 3 stopniach swobody.

Obecnie większość układów elektromechanicznych bazuje na generacji ruchu obrotowego. Zastosowanie ruchu złożonego pozwala na zmniejszenie lub całkowite wyeliminowanie z układu przekładni mechanicznych. Mniejsza ilość przekładni oznacza jednocześnie mniejszą liczbę klasycznych silników elektrycznych. Co w końcowym rozliczeniu przekłada się na zwiększenie niezawodności i precyzji układu oraz upraszcza algorytm sterowania.

Rozwiązaniem wykorzystującym kilka stopni swobody jest projekt prototypu maszyny piezoelektrycznej o kulistym stojanie (Rys. 7). Silnik ten charakteryzuje się dość prostą budową (Rys. 8)[14].

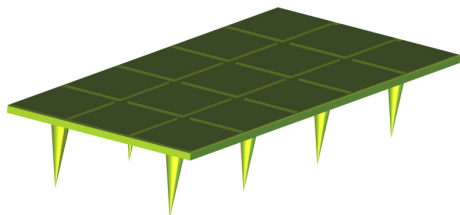


Rys. 8 Elementy silnika sferycznego o 3 stopniach swobody.

Stojan ma konstrukcję półkulistej powłoki przypominającą skorupę miski, natomiast wirnik piłkę. Lekko zaokrąglone elementy piezoceramiczne zamontowane są bezpośrednio na stojanie, każdy o takiej samej grubości i szerokości, oddalone od siebie o taką samą wartość. Pierścień pozwala na dokładne spasowanie stojana i wirnika oraz dodatkowo zapewnia odpowiednie naprężenia wstępne ceramiki[14].

Silnik sferyczny ma zbliżoną zasadę działania do silnika ultrasonicznego. Sygnały napięciowe pomiędzy sąsiednimi płytkami piezo (znajdujących się w jednej linii) przesunięte są względem siebie w fazie o 90° i generują fale biegnące

ca. Fale wywołują drgania stojana, który za pomocą siły tarcia wprawia wirnik w ruch.

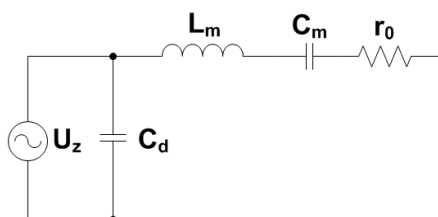


Rys. 9 Maszyna krocząca o wielu stopniach swobody [8].

W Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle w Tuluzie został zaprojektowany i zbudowany wirtualny model maszyny kroczącej o wielu stopniach swobody (Rys. 9).

6. Obwód zastępczy

W celach dokładniejszej analizy ilościowej piezoelektryczny silnik ultrasoniczny można zastąpić obwodem elektrycznym (Rys. 10).



Rys. 10 Uproszczony schemat zastępczy silnika ultrasonicznego (opis w tekście).

Poszczególne elementy schematu zastępczego mają następujące znaczenie:

C_d – pojemność blokująca; opisuje wartość pojemności płytki piezoceramicznej, jako kondensatora płaskiego z materiału o przenikalności dielektrycznej ϵ_{33} ;

L_m – zastępcza indukcyjność opisująca oddziaływanie mas elementów piezoceramicznych oraz pierścienia stojana;

C_m – zastępcza pojemność opisująca oddziaływanie sprężyste elementów piezoceramicznych i pierścienia stojana;

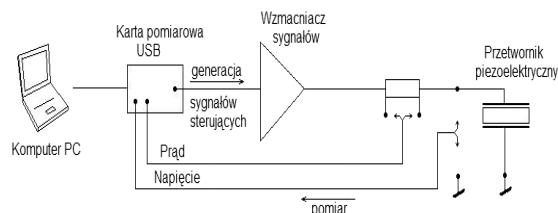
r_0 – rezystancja modelująca straty występujące w elementach piezoceramicznych oraz w pierścieniu stojana;

U_z – napięcie zasilające jedną z faz silnika.

7. Pomiary charakterystyk

Podstawowym problemem pomiarowym jest ocena nieliniowych charakterystyk przetworników piezoelektrycznych przy pracy w warunkach rzeczywistych. Kolejnym aspektem analizy jest wyznaczanie impedancji obciążenia. Jej

znajomość pozwala precyzyjnie sterować aktuatorem oraz utrzymać pracę przetwornika w zakresie częstotliwości ultrasonicznych, co wpływa na minimalizację strat dielektrycznych oraz mechanicznych [3].



Rys. 11 Poglądowy schemat układu do wyznaczania charakterystyk aktuatorów piezoelektrycznych [3].

W ramach pracy dyplomowej oraz stażu w firmie Sinaptec opracowano oraz zrealizowano stanowisko laboratoryjne do automatycznego wyznaczania charakterystyk aktuatorów piezoelektrycznych (Rys. 11). Sterowanie pomiarem odbywało się za pomocą oprogramowania zrealizowanego w środowisku LabView.

8. Podsumowanie

Maszyny piezoelektryczne obecnie coraz częściej znajdują zastosowanie, jako napędy specjalne w różnych gałęziach przemysłu (m.in. motoryzacja, robotyka, aeronautyka). Największą ich zaletą jest duża gęstość momentu/siły, precyzyjne sterowanie prędkością, możliwość ruchu w wielu stopniach swobody oraz prosta struktura elektromechaniczna [4].

Siłowniki piezoelektryczne mogą pracować w niesprzyjających warunkach środowiska, np. w niskich temperaturach, lub w bardzo silnym polu magnetycznym[6]. Ciągła styczność wirnika ze stojanem powoduje jednak szybsze zużycie elementów silnika – napędy piezoelektryczne aktualnie stosowane są do pracy przerywanej.

Istotną wadą jest konieczność posiadania generatora napięcia wysokiej częstotliwości do zasilania przetwornika piezoelektrycznego.

W Katedrze Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych Politechniki Gdańskiej realizowane są dwa projekty:

„Projektowanie, modelowanie i badania układów elektromechanicznych aktuatorów piezoelektrycznych o ruchu złożonym.”

„Koncepcja, modelowanie i badania układów zasilania oraz sterowania aktuatorów piezoelektrycznych o ruchu złożonym.”

9. Literatura

- [1] Bishop R. H.: *The Mechatronics Handbook*. The University of Texas, Austin, 2002.
- [2] Dąbrowski M.: *Evolution of the theory and application of ultrasonic motors*. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 208, 2001.
- [3] Grzywacz M.: *Koncepcja i realizacja stanowiska do automatycznego wyznaczania charakterystyk przetworników piezoelektrycznych (Conception d'un banc de caractérisation automatique pour transducers piezoelectriques)*, Praca dyplomowa magisterska (opiekunowie J.F. Rochoun, D. Samah i M. Ronkowski). INP-ENSEEIH-LEEI (Toulouse), SINAPTEC (Lille), PG-WEiA-Katedra EiME, 2010.
- [4] Hirata H., Ueha S.: *Design of a travelling wave type ultrasonic motor*. IEEE Trans. of Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol 42, s. 225-231, 1995.
- [5] Kołodko A.: *Analiza silnika elektrycznego z falą biegnącą*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 50, Studia i Materiały nr 22, 2000
- [6] Kosiński Z., Szemla A.: *Piezomechaniczny przetwornik energii z tarczowym rezonatorem i pasywnymi koncentratorami ruchu*. Projektowanie mechatroniczne, Zagadnienia wybrane, AGH Kraków, 2004
- [7] Krawczuk M., Palacz M., Żak A.: *Materiały o sterowanych właściwościach fizycznych i ich zastosowania*. Wyd. Politechniki Gdańskiej, s. 27-45, 2009.
- [8] Nogarede B., Harribey D.: *De la piezoelectricite aux actionneurs electromecaniques du futur*. Le groupe de Recherche en Electrodynamique, 2005.
- [9] Nogarede B., Henaux C., Rouchon J.F.: *Actionneurs electromecaniques pour la robotique et le positionnement*. Techniques l'Ingenieur, traite Genie électrique,
- [10] Nogarede B.: *Moteurs piezoelectriques*. Techniques l'Ingenieur, traite Genie électrique, 1996
- [11] Sashida T., Kenjo T.: *An introduction to ultrasonic motors*. Monographs in Electrical and Electronic Engineering 28, Oxford, Clarendon Press, 1993.
- [12] Szlabowicz W.: *Charakterystyki strat aktuatorów piezoelektrycznych (Caractérisation des pertes dans les actionneurs piézoélectriques)*, Praca dyplomowa magisterska (opiekunowie: J.F. Rochoun, N. Zouzou, M. Ronkowski). INP-ENSEEIH-LEEI (Toulouse), PG-WEiA-Katedra EiME, 2003.
- [13] Szlabowicz W.: *Contribution au dimensionnement et a la réalisation d'actionneur piézoélectrique a rotation de mode fort coupe pour applications aéronautiques*, Praca doktorska (promotr B. Nogarede, copromotr J.F. Rochoun, przewodniczący komisji przewodu dokt. M. Ronkowski). INP-ENSEEIH-LEEI (Toulouse), 2006.
- [14] Ting Y., Tsai Y., Hou B.: *Stator design of a new type of spherical piezoelectric motor*. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010.
- [15] Weishan C., Shengjun S., Yingxiang L., Pei L.: *A New Traveling Wave Ultrasonic Motor Using Thick Ring Stator with Nested PZT Excitation*. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control, vol. 57, no. 5, 2010.
- [16] www.leei.enseeiht.fr

Autorzy

dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski, prof. PG,
tel. +48 58 347 2087, e-mail: m.ronkowski@ely.pg.gda.pl
mgr inż. Roland Ryndzionek, doktorant, +48 58 347 29 61
roland.ryndzionek@gmail.com
mgr inż. Łukasz Sienkiewicz, doktorant,
tel. +48 58 347 29 61, lksienkiewicz@wp.pl
Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych,
Politechnika Gdańska,
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk,
dr inż. Wojciech Szlabowicz, w.szlabowicz@wp.pl
Dalkia Energy & Technical Services Sp z o.o.
(<http://www.dalkia.pl/dalkia-fm/>)
mgr inż. Marek Grzywacz, grzywaczmarek@wp.pl
SINAPTEC Ultrasonic Technology (www.sinaptec.fr)

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Ryszard Palka