

Roland Ryndzionek Michał Michna  
Mieczysław Ronkowski  
Politechnika Gdańska

Jean-Francois Rouchon  
INPT-ENSEEIH-T-LAPLACE

## WYBRANE WYNIKI BADAŃ PROTOTYPU WIELOKOMÓRKOWEGO SILNIKA PIEZOELEKTRYCZNY

### CHOSEN ANALYSIS RESULTS OF THE PROTOTYPE MULTICELL PIEZOELECTRIC MOTOR

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań prototypu nowego wielokomórkowego silnika piezoelektrycznego (WSP). Badany silnik jest przeznaczony do zastosowania w układzie sterowania położeniem fotela w pojazdach samochodowych. Koncepcja struktury elektromechanicznej rozważanego WSP bazuje na trzech rezonansowych aktuatorach piezoelektrycznych o modulowanym ruchu obrotowym. Struktura elektromechaniczna każdego z trzech aktuatorów stanowi niezależną "pojedynczą komórkę" (pojedynczy moduł). Przyjęta struktura WSP zapewnia odpowiednie wartości zarówno momentu obrotowego, jak i prędkości obrotowej, wymaganych w układzie sterowania położeniem fotela. Ponadto, zastosowanie WSP umożliwia zbudowanie zintegrowanej struktury, zwiększonej wydajności oraz bezgłośniejszej pracy w układzie przeniesienia napędu, także obniżenia kosztów produkcji całego układu, a w ogólności obniżenia poziomu zanieczyszczenia środowiska naturalnego. Przedstawione wyniki badań, przeprowadzone metodą analityczną i doświadczalną, obejmują charakterystyki mechaniczne prototypu WSP.

**Abstract:** In this paper chosen analysis results of the prototype multicell piezoelectric motor (MPM) have been presented. The prototype MPM is dedicated for control the car seat position. A concept of the electromechanical structure of the considered prototype is based on the three rotating-mode actuators. The electromechanical structure of each actuator has been considered as an independent one – referred to as a "single cell" (single module). The assumed MPM structure generates adequate values of the rotating torque and speed that is required in the control of the car seat position system. Moreover, the application of the MPM enables to built an integrated structure, increased efficiency and low noise performance in the power train system, also a low cost manufacturing of the whole system, and in general a lower pollution of the environment. The research results, carried out using analytical and experimental methods, covered the mechanical characteristics of the prototype MPM.

**Słowa kluczowe:** *zjawisko piezoelektryczne, silnik/aktuator piezoelektryczny, silnik z falą biegnącą, aktuator o modulowanym ruchu obrotowym, częstotliwość rezonansowa.*

**Keywords:** *piezoelectric phenomena, piezoelectric motor/actuator, traveling wave motor, rotating-mode actuator, resonance frequency.*

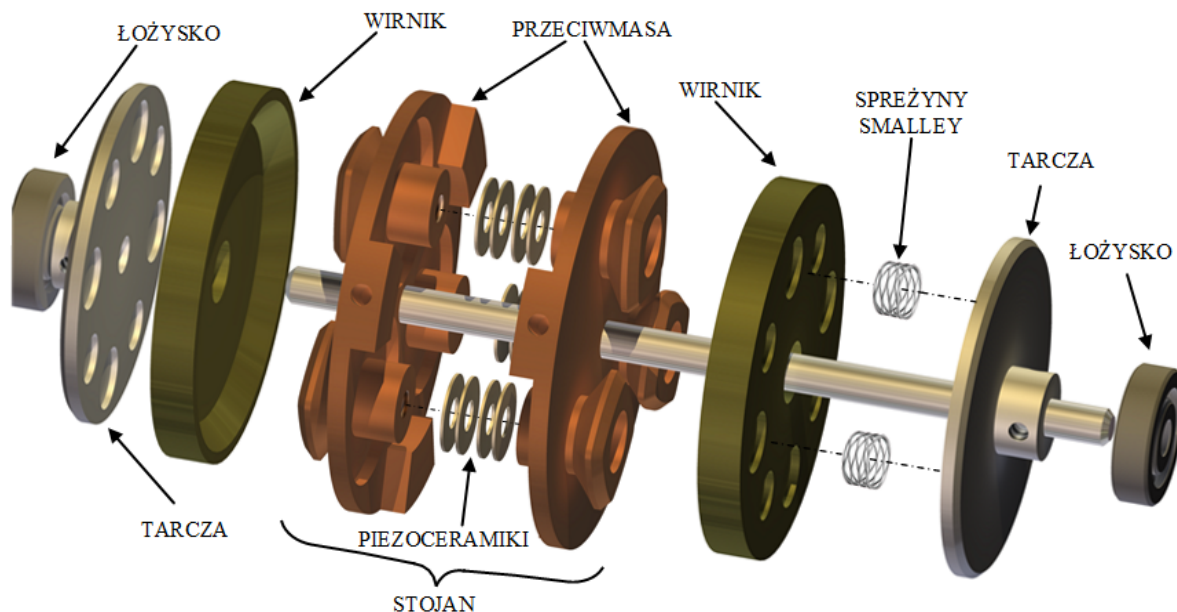
#### 1. Wstęp

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań prototypu nowego wielokomórkowego silnika piezoelektrycznego (WSP) (ang. multicell piezoelectric motor (MPM)). Prace badawcze realizowano w Katedrze Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych Politechniki Gdańskiej w ramach współpracy naukowej z uczelnią INP-ENSEEIH-T, w szczególności z Laboratorium LAPLACE w Tuluzie [9]. Projekt był częściowo finansowany w ramach programu „Advanced PhD” [11]. Szczegóły koncepcji i procesu modelowania WSP przedstawiono w publikacjach [1, 2].

Przyjęta struktura WSP zapewnia odpowiednie wartości zarówno momentu obrotowego jak i

prędkości obrotowej, wymaganych w układzie sterowania położeniem fotela w pojazdach samochodowych. Ponadto, zastosowanie WSP w układzie przeniesienia napędu umożliwia: zbudowanie zintegrowanej struktury całego układu, uzyskanie zwiększonej wydajności oraz bezgłośniejszej pracy, obniżenie kosztów produkcji, a w ogólności obniżenie zanieczyszczenia naturalnego środowiska.

Przedstawione w artykule wybrane wyniki badań obejmują charakterystyki mechaniczne prototypu WSP. Badania zrealizowano metodą analityczną i doświadczalną. Celem ich przedstawienia jest weryfikacja zastosowanej metody analitycznej do wyznaczania charakterystyk mechanicznych prototypu WSP.



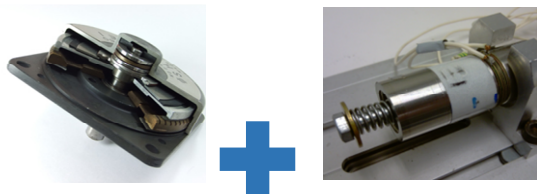
Rys. 1 Model wirtualny prototypu wielokomórkowego silnika piezoelektrycznego

## 2. Prototyp WSP

Koncepcja badanego prototyp WSP (rys. 1) charakteryzuje się połączeniem zalet zarówno ultrasonicznego silnika piezoelektrycznego z falą biegnącą [6, 8], jak i silnika piezoelektrycznego o modulowanym ruchu obrotowym (rys. 2) [3-5]. Kombinacja struktur tych dwóch silników pozwoliła uzyskać:

- wymagane wartości zarówno momentu obrotowego, jak i prędkości obrotowej w układzie sterowania położeniem fotela w pojazdach samochodowych;
- zintegrowany układ przeniesienia napędu (uproszczona konstrukcja mechaniczna i bezgłośna praca).

Z zasady działania WSP wynika, że pracuje on przy częstotliwościach rezonansowych powyżej 20 kHz - zapewnia to spełnienie warunku bezgłośnej pracy (niesłyszalnej dla człowieka) w układzie sterowania położeniem fotela w pojazdach samochodowych.



Rys. 2 Ultrasoniczny silnik piezoelektryczny z falą biegnącą [8], silnik piezoelektryczny o modulowanym ruchu obrotowym [5]

Należy podkreślić, że WSP może być bezpośrednio sprzęgnięty z wałkiem napędowym w układzie sterowania położeniem fotela w pojazdach samochodowych. Zatem umożliwia to zmniejszenie liczby przekładni mechanicznych jakie stosuje się w klasycznych rozwiązaniach takiego napędu. Zastosowanie silnika WSP pozwala również na uzyskanie momentu blokującego bez konieczności zasilania układu. Koszt wykonania WSP zależy od zastosowanych materiałów i technologii wykonania elementów silnika (druk 3D, obrabiarka CNC) [10].

Pierwszy etap badań obejmował dobór wymiarów głównych WSP i wyznaczenie wartości jego podstawowych parametrów z zastosowaniem metod analitycznych. W ramach drugiego etapu badań opracowano wirtualny prototyp WSP w programie polowym Autodesk Multiphysics, celem wyznaczenia częstotliwości rezonansowych oraz naprężeń mechanicznych. Na tym etapie badań został dobrany odpowiedni kształt przeciwmasy (stojana WSP) w celu maksymalizacji powierzchni kontaktu między wirnikiem a stojanem. W wyniku symulacji metodą polową (Autodesk Multiphysics) wyznaczono wartości częstotliwości rezonansowych struktury na poziomie 25,6 kHz. Dodatkowo przeprowadzono w programie Autodesk Multiphysics badania naprężeń, zadając

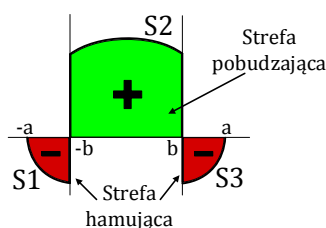
siłę nacisku wirnika na powierzchnię stojana równą 120 N. Największe naprężenia o wartościach ok. 9 N/mm<sup>2</sup> wystąpiły w punktach styku trzech aktuatorów z wirnikiem WSP. W kolejnym etapie badań opracowano dokumentację techniczną i wykonano prototyp WSP. Elementy przeciwmasy prototypu, z uwagi na ich skomplikowany kształt, wykonano z aluminium z zastosowaniem technologii druku 3D [10]. Pozostałe elementy prototypu wykonano na frezarce sterowanej numerycznej (CNC).

Wymienione wyżej etapy badań i realizację prototypu WSP szczegółowo opisano w pracach [1-2].

W następnych punktach artykułu opisano zastosowaną metodę analityczną do wyznaczania charakterystyk mechanicznych zbudowanego prototypu WSP i jej weryfikację doświadczalną.

### 3. Badania analityczne

Model analityczny WSP opracowano na bazie modelu przetwornika Langevina oraz zmodyfikowanego modelu silnika piezoelektrycznego o modulowanym ruchu obrotowym (SPMRO) [5]. W równaniach modelu WSP uwzględniono zmianę struktury SPMRO i następnie, celem wykonania obliczeń, model implementowano w środowisku programu Matlab [7]. Głównym celem obliczeń było wyznaczenie charakterystyki mechanicznej WSP a następnie jej porównanie z wynikami badań doświadczalnych prototypu WSP.



Rys. 3 Strefa kontaktu pomiędzy stojanem a wirnikiem WSP

Prędkość obrotowa wirnika silnika jest wypadkową prędkości wszystkich punktów w strefie kontaktu pomiędzy stojanem a wirnikiem (rys. 3). Obszar pomiędzy punktami  $\langle -b, b \rangle$  jest częścią strefy kontaktu (S2), która pobudza ruch wirnika (strefa napędowa). Obszary S1 i S3 odpowiednio pomiędzy punktami  $\langle -a, -b \rangle$  oraz  $\langle b, a \rangle$  hamują ruch wirnika (strefa blokująca). Punkt pracy silnika znajduje się na charakterystyce mechanicznej (rys. 4). Punkt „d” odpowiada prędkości biegu jałowego

(S1+S2+S3=0). Pomiędzy punktami „c” i „d” wraz ze wzrostem obciążenia powiększa się strefa napędowa S2 - moment rośnie. W punkcie „c” silnik osiąga moment maksymalny, gdyż strefa napędowa obejmuje całą strefę kontaktu (S1=S3=0). W dalszej części charakterystyki moment pozostaje stały – strefa napędowa nie może być większa niż strefa kontaktu. W przypadku, gdy strefa napędowa jest mniejsza niż blokująca ( $b < a$ ), wartość momentu silnika może być obliczona wg wzoru:

$$T = 2 \mu r \cdot \left( \int_0^b p(x) \omega dx - \int_b^a p(x) \omega dx \right) \quad (1)$$

Przy czym maksymalną wartość momentu silnika wyznacza się z zależności [7]:

$$T_{max} = \frac{\pi}{2} \mu \cdot A \cdot \omega \cdot r \cdot P_0 \quad (2)$$

gdzie:  $p(x)$  – rozkład siły nacisku opisany jest zależnością:

$$p = P_0 \left( 1 - \left( \frac{x}{A} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

przy czym:

$\mu$  – współczynnik tarcia,

$x$  – położenie na obwodzie zewnętrznym stojana,

$A$  – całkowita powierzchnia styku między stojanem a wirnikiem,

$r$  – promień powierzchni styku stojana z wirnikiem,

$P_0$  – maksymalna siła w miejscu kontaktu.

Równanie (2) można przekształcić do prostszej postaci:

$$T_{max} = \mu \cdot r \cdot F_n \quad (4)$$

gdzie:  $F_n$  – siła nacisku na wirnik.

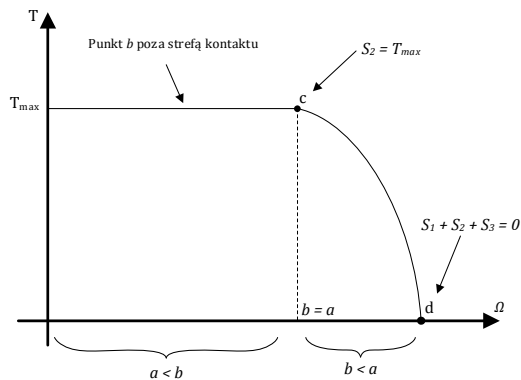
W WSP zastosowano dwa wirniki, zatem wzór na maksymalny moment obrotowy przyjmuje postać:

$$T_{max} = 2 \cdot \mu \cdot r \cdot F_n \quad (5)$$

Maksymalna prędkość w punkcie „a”, „b” została wyznaczona wg wzoru:

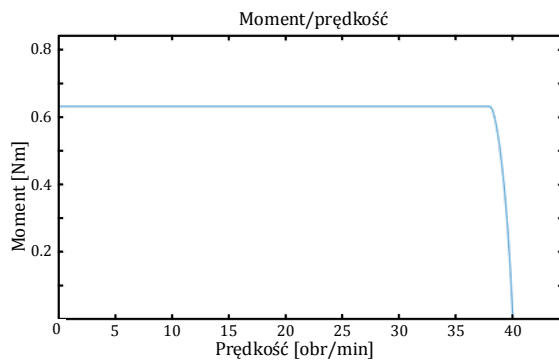
$$\Omega = \frac{U_0 \cdot \cos\left(\frac{A}{r}\right) \cdot \omega}{r} \quad (6)$$

gdzie:  $U_0$  – amplituda drgań stojana.

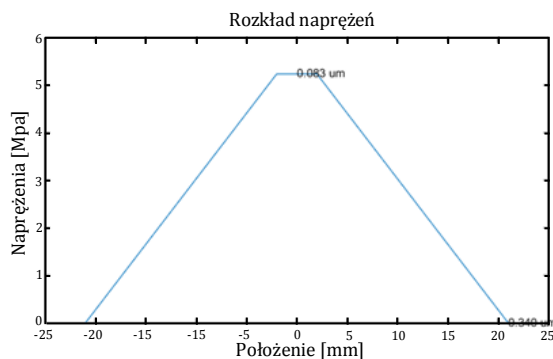


Rys. 4 Charakterystyka mechaniczna WSP: zależność momentu obrotowego od prędkości obrotowej

Na podstawie zależności (1)-(5) wyznaczono charakterystykę mechaniczną prototypu WSP (rys. 5). Dla badanego prototypu WSP najważniejszymi parametrami charakterystyki mechanicznej są: moment blokujący równy 0,6 Nm i prędkość biegu jałowego równa 40 obr/min.

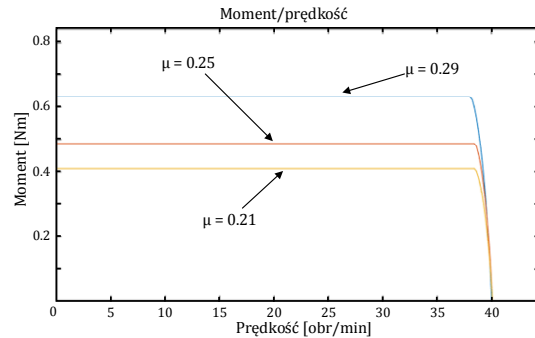


Rys. 5 Charakterystyka mechaniczna prototypu WSP: zależność momentu obrotowego od prędkości obrotowej

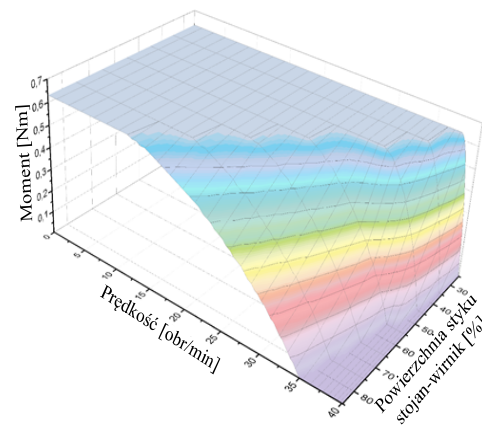


Rys. 6 Rozkład naprężeń w pojedynczym aktuatorze rezonansowym prototypu WSP

Dodatkowo dla prototypu WSP przeprowadzono analizę wpływu zmiany współczynnika tarcia oraz powierzchni styku na prędkość obrotową i moment blokujący (rys. 7).



Rys. 7 Charakterystyka mechaniczna prototypu WSP: wyznaczona dla różnych wartości współczynnika tarcia (kolory: niebieski  $\mu=0,29$ ; czerwony  $\mu=0,25$ ; żółty  $\mu=0,21$ )



Rys. 8 Charakterystyka mechaniczna prototypu WSP: wyznaczona dla różnych wartości powierzchni styku stojan-wirnik

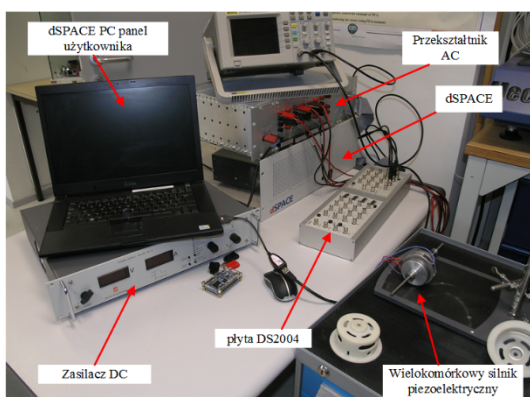
Wzrost wartości współczynnika tarcia powoduje zwiększenie maksymalnego momentu obrotowego (rys. 7) WSP. Zmianę wartości współczynnika tarcia uzyskuje się przez wykonanie wirnika innego materiału (stal, aluminium, brąz) lub zastosowania nakładki polimerowej na wirnik. Zmniejszenie wartości współczynnika tarcia można uzyskać przez odpowiednie smarowanie powierzchni styku.

Zmiana powierzchni styku pozwala odpowiednio ukształtować charakterystykę mechaniczną WSP (rys. 8). Zwiększając powierzchnię styku zwiększa się zakres prędkości obrotowych. Niestety zwiększają się również opory tarcia, co powoduje zmniejszenie prędkości maksymalnej. Odpowiedni dobór powierzchni styku zależy od kształtu struktury aktuatora i oczekiwanych wartości momentu. Przy czym, analizę należy przeprowadzić na etapie projektowania WSP.



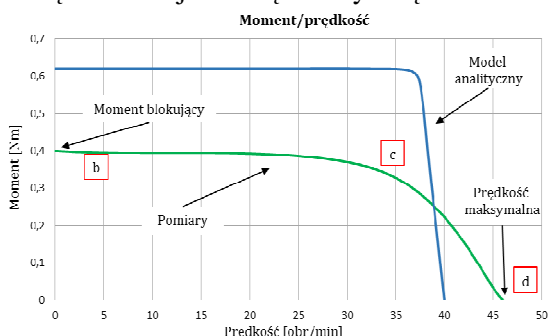
#### 4. Badania doświadczalne prototypu WSP

Do wykonania pomiarów charakterystyki mechanicznej prototypu WSP użyto stanowiska laboratoryjnego wyposażonego w system dSPACE (rys. 9), umożliwiający przeprowadzenie symulacji w trybie *Hardware-In-the-Loop*.



Rys. 9 Stanowisko dSPACE w laboratorium LAPLACE w Tuluzie zastosowane do badania prototypu WSP

Panel użytkownika systemu dSPACE daje możliwość sterowania napięciem wyjściowym układu zasilania WSP w zakresie od 0 do 1000V oraz częstotliwości rzędu 50kHz. Podczas pomiarów parametrów mechanicznych prototypu amplituda napięcia zasilającego wynosiła 400V i częstotliwość w okolicach 22 kHz. Wyniki pomiarów charakterystyki mechanicznej prototypu WSP przedstawiono na rys. 10. Dla porównania, na tym samym rysunku wykreślono charakterystykę mechaniczną badanego silnika wyznaczoną omawianą wcześniej metodą analityczną.



Rys. 10 Charakterystyki mechaniczne prototypu WSP- moment/prędkość: metoda analityczna (kolor niebieski) i metoda doświadczalna (kolor zielony)

W wyniku optymalizacji struktury mechanicznej prototypu WSP i doboru odpowiedniej siły

dociskającej otrzymano następujące wyniki pomiarów: wartość prędkości maksymalnej w zakresie od 46 do 48 obr/min; wartość momentu blokującego 0,4 Nm.

#### 5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań prototypu nowego wielokomórkowego silnika piezoelektrycznego (WSP). Badany silnik jest przeznaczony do zastosowania w układzie sterowania położeniem fotela w pojazdach samochodowych. Koncepcja struktury elektromechanicznej rozważanego WSP bazuje na trzech rezonansowych aktuatorach piezoelektrycznych o modulowanym ruchu obrotowym. Struktura elektromechaniczna każdego z trzech aktuatorów stanowi niezależną "pojedynczą komórkę" (pojedynczy moduł). Przyjęta struktura WSP zapewnia odpowiednie wartości zarówno momentu obrotowego, jak i prędkości obrotowej, wymaganych w układzie sterowania położeniem fotela. Ponadto, zastosowanie WSP umożliwia zbudowanie zintegrowanej struktury, zwiększonej wydajności oraz bezgłośniejszej pracy w układzie przeniesienia napędu, także obniżenia kosztów produkcji całego układu, a w ogólności obniżenia poziomu zanieczyszczenia środowiska naturalnego.

Przedstawione w artykule wybrane wyniki badań obejmują charakterystyki mechaniczne prototypu WSP. Badania zrealizowano metodą analityczną i doświadczalną. Celem ich przedstawienia jest weryfikacja zastosowanej metody analitycznej do wyznaczania charakterystyk mechanicznych prototypu WSP.

Na podstawie uproszczonego modelu analitycznego WSP wyznaczono wartości: momentu blokującego 0,6 Nm oraz prędkość biegu jałowego 40 obr/min. Natomiast w wyniku badań doświadczalnych prototypu WSP zmierzone wartości wynoszą odpowiednio: prędkość obrotowa – 46-48 obr/min; moment blokujący – 0,4 Nm.

Różnice wynikają głównie z uproszczeń przyjętych przy formułowaniu modelu analitycznego rozważanego WSP. W modelu analitycznym nie uwzględniono, m.in., zmiany wartości parametrów (częstotliwości rezonansowej, współczynnika tarcia) związanych z nagrzewaniem się przeciwmasy, zmiennego współczynnika tarcia. Ponadto założono idealny kontakt między stojanem a wirnikiem WSP.

Obecnie prowadzone są równoległe badania, których celem jest: opracowanie modelu analitycznego WSP przy pominięciu w/w uproszczeń; optymalizacja struktury elektromechanicznej WSP; opracowania metody produkcji WSP przy obniżonych kosztach.

## 6. Literatura

[1] Ryndzionek R., Rouchon J-F., Ronkowski M. „Koncepcja, realizacja i analiza nowego typu silnika piezoelektrycznego o strukturze wielokomórkowej”, *Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe*, no. 100/4/2013, ISSN: 0239-3646, 2013, p. 77-82.

[2] Ryndzionek R., Rouchon J-F., Ronkowski M., Michna M., Sienkiewicz Ł. „Design, modelling and analysis of a new type of piezoelectric motor. Multicell piezoelectric motor”, *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*, Vienna, Nov. 2013, p. 3910-3915.

[3] Petit L., Briot R., Lebrun L., Gonnard P., „A Piezomotor Using Longitudinal Actuators”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. Vol. 45 No. 2, pp. 277-284, marzec 1998.

[4] Petit L., Gonnard P., „Industrial design of a centimetric “TWILA” ultrasonic motor”, *Sensors and Actuators*, no. 120, pp. 211–224, 2005.

[5] Szlabowicz W., Rouchon J-F., Nogarede B., „Design and realization of a rotating-mode piezoelectric motor for aeronautic applications”, in *10th International Conference on New Actuators*, Bremen, Germany, 2006.

[6] Hao M., Chen W., „Analysis and Design of a Ring-type Traveling Wave Ultrasonic Motor”, in *International Conference on Mechatronics and Automation*, Proceedings of the 2006 IEEE, Luoyang, China, June 2006, p. 1806.

[7] Budinger M., Rouchon J-F., Nogarede B., „Analytical Modeling for the Design of a Piezoelectric Rotating-Mode Motor”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 9, no. 1, march 2004.

[8] Shinsei Motors: [www.shinsei-motor.com/English/techno/ultrasonic\\_motor.html](http://www.shinsei-motor.com/English/techno/ultrasonic_motor.html), 2014.

[9] Laboratory on Plasma and Conversion of Energy LAPLACE: [www.laplace.univ-tlse.fr](http://www.laplace.univ-tlse.fr), 2015.

[10] INITIAL - Development and Production Centre: [www.initial.fr](http://www.initial.fr), 2015.

[11] "The Center for Advanced Studies - the development of interdisciplinary doctoral studies at the Gdansk University of Technology in the key areas of the Europe 2020 Strategy". The project is co-financed by the European Union within the European Social Fund – Human Capital Operational Programme (HCOP): [www.AdvancedPhd.pg.gda.pl](http://www.AdvancedPhd.pg.gda.pl).

## Autorzy

Roland Ryndzionek  
e-mail: [roland.ryndzionek@pg.gda.pl](mailto:roland.ryndzionek@pg.gda.pl)

Politechnika Gdańska  
Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
Michna Michał  
e-mail: [michal.michna@pg.gda.pl](mailto:michal.michna@pg.gda.pl)

Politechnika Gdańska  
Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
Mieczysław Ronkowski  
e-mail: [mieczyslaw.ronkowski@pg.gda.pl](mailto:mieczyslaw.ronkowski@pg.gda.pl)

Politechnika Gdańska  
Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
Jean-Francois Rouchon  
e-mail: [rouchon@laplace.univ-tlse.fr](mailto:rouchon@laplace.univ-tlse.fr)  
INP-ENSEEIH, Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie LAPLACE, Toulouse, France