

*Roland Ryndzionek, **Jean-Francois Rouchon, *Mieczysław Ronkowski

*Politechnika Gdańska, Gdańsk, Polska, **INP-LAPLACE, Toulouse, France

KONCEPCJA, REALIZACJA I ANALIZA NOWEGO TYPU SILNIKA PIEZOELEKTRYCZNEGO O STRUKTURZE WIELOKOMÓRKOWEJ

DESIGN, MODELING AND ANALYSIS THE NEW TYPE OF PIEZOELECTRIC MOTOR USING MULTICELL STRUCTURE

Streszczenie: Dotychczasowe wyniki badań w obszarze aktuatorów piezoelektrycznych, wskazują ich potencjalnie duże możliwości w przyszłych zastosowaniach specjalnych. W artykule przedstawiono proces projektowania nowego typu silnika piezoelektrycznego. Opisane zostały wybrane topologie maszyn piezoelektrycznych. Przedstawiono wady i zalety silnika ultrasonicznego z falą biegnącą oraz silnika o ruchu obrotowym. W ramach realizacji projektu została dokonana synteza wyżej wymienionych silników. W kolejnych rozdziałach zaprezentowano etapy modelowania i realizacji prototypu wielokomórkowego silnika piezoelektrycznego. Przedstawione i skomentowane zostały wyniki pomiarów częstotliwości rezonansowych oraz drgań prezentowanej maszyny. Wyniki badań są kontynuacją prac nad aktuatorami piezoelektrycznymi prowadzonymi na Wydz. Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej.

Abstract: This paper describes a new type of piezoelectric motor. The results, obtained in the field of piezoelectric motors, have pointed out that these motors have potentially high possibilities in the future special applications. The research work presents the design, simulations and characteristics of the piezoelectric motor with three rotation-mode actuators. The motor is characterized by a high power, high speed and torque. The purpose of those efforts was to develop a new actuator dedicated for the embedded applications. In the paper, the main topologies of piezoelectric motors have been discussed, the motor's main characteristics was described and conclusions have been presented.

Słowa kluczowe: *piezoelektryczność, przetwornik piezoelektryczny, silnik z falą biegnącą, częstotliwości rezonansowe, symulacja*

Keywords: *piezoelectricity, piezo-electric actuator, traveling wave motor, resonant frequency, simulation.*

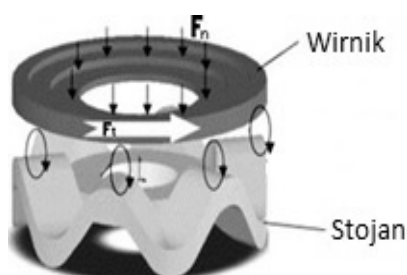
1. Wstęp

Obiecującą alternatywą dla klasycznych systemów mechatronicznych jest stosowanie przetworników wykorzystujących materiały elektro-aktywne bądź materiały z pamięcią kształtu. Niesie to za sobą szereg usprawnień, takich jak poprawienie wydajności, sprawności czy niezawodności systemu [2][3]. Dodatkowo pozwala to osiągnąć jeszcze lepsze właściwości i większą odporność na zużycie zachowując taką samą strukturę mechaniczną [10]. Podjęta została próba usprawnienia systemu sterowania fotelem w samochodzie osobowym. Zamiast dwóch silników elektrycznych przewiduje się zastosowanie silnika piezoelektrycznego.

Niniejsza praca jest kontynuacją dotychczasowych badań nad przetwornikami piezoelektrycznymi. Projekt budowy wielokomórkowego silnika piezoelektrycznego był realizowany w ramach stażu naukowego w laboratorium LAPLACE w Tuluzie. Celem badań było zaprojektowanie i zbudowanie nowego typu silnika piezoelektrycznego przystosowanego do pracy w niesprzyjających warunkach. Celem artykułu jest przedstawienie syntezy silnika ultrasonicznego z silnikiem o ruchu obrotowym. Zostały opisane poszczególne etapy prac nad wielokomórkowym silnikiem piezoelektrycznym.

2. Struktury maszyny piezo

Silnik ultrasoniczny (USM) jest przetwornikiem, który wykorzystuje zjawisko generacji drgań mechanicznych w paśmie ultrasonicznym (powyżej 20 kHz). Zaletami takich maszyn są wysoki moment obrotowy, wysoka rozdzielczość pracy, szybka odpowiedź, kompaktowa i prosta budowa oraz brak generacji pola magnetycznego. Zasadą działania jest generacja mechanicznych drgań w materiale piezoceramicznym lub w przymocowanym do niego metalowym pierścieniu (stojan - przeciwmasa). Amplituda oscylacji jest bardzo mała (ułamki μm) [7]. W celu zwiększenia wartości drgań wykorzystuje się rezonans ceramiki o częstotliwościach w paśmie ultrasonicznym. Następnie zostaje wytworzona fala biegnąca w pierścieniowym stojanie przez drgające elementy piezoceramiczne. Siła napędzająca (styczna do grzbietu fali) jest generowana jedynie w punktach styku wierzchołków fali z wirnikiem [10].



Rys. 1 Zasada działania pierścieniowego silnika ultrasonicznego [14]

Odształcenia między stojaniem i wirnikiem można zapisać za pomocą równania:

$$u = A \cdot \cos(k\theta + \omega t) \quad (1)$$

Gdzie:

ω : częstotliwość wibracji

θ : przesunięcie fazowe

A : amplituda wibracji

k : numer fali

Fala biegnąca jest wynikiem nałożenia się dwóch fal przemieszczających się w przeciwnych kierunkach na powierzchni stojana, co można zapisać równaniem [12]:

$$u = u_1 + u_2 =$$

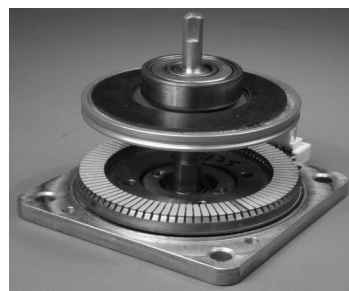
$$A \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(k\theta) + A \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(k\theta) \quad (2)$$

Przedstawiony silnik jest syntezą dwóch maszyn piezoelektrycznych. Łączy on zalety silnika ultrasonicznego z falą biegnącą (stosowana jest również nazwa SHINSEI) oraz silnika piezoelektrycznego o ruchu obrotowym.

2.1 Silnik z falą biegnącą (TWM)

Zasadą działania TWM jest generacja fali biegnącej na stojanie przez płytkę piezoceramiczną PZT. Płytkę piezoceramiczną PZT podzielona jest na dwie części zasilane różnymi sygnałami elektrycznymi. Każda z tych połówek składa się z kilku segmentów piezoelektrycznych o różnej polaryzacji. Napięcia przemiennie o częstotliwości rezonansowej, doprowadzone do elementów piezoelektrycznych przymocowanych na spodzie stojana, powodują drgania piezoceramiki zależne od polaryzacji. Powstają fale biegnące, które są połączeniem dwóch przesuniętych względem siebie fal stojących. W rezultacie punkt na powierzchni stojana porusza się ruchem eliptycznym. Wirnik napędzany jest poprzez siłę tarcia (w momencie styku fali z powierzchnią wirnika) [1],[8],[11].

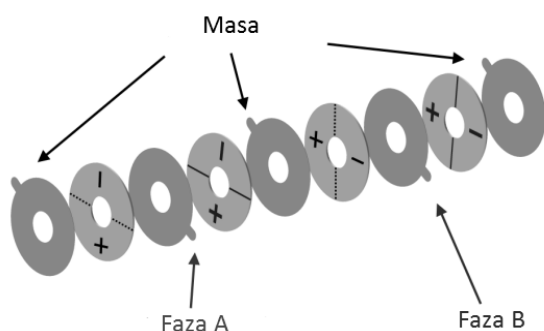
Materiały wykorzystane do budowy stojana to brąz berylowy (BeCu), a wirnika to duraluminium [5]. TWM charakteryzują się cichą pracą (częstotliwość powyżej 20 kHz), wysokim stosunkiem momentu do masy własnej ($> 10 \text{ Nm/kg}$), płynną regulacją prędkości, dokładnością oraz kompaktowymi wymiarami. Wadą jest konieczność stosowania odpowiednich połączeń między stojaniem a płytką PZT. Wymagany jest mocny docisk w możliwie jak największej powierzchni [12].



Rys. 2 Silnik z falą biegnącą [8]

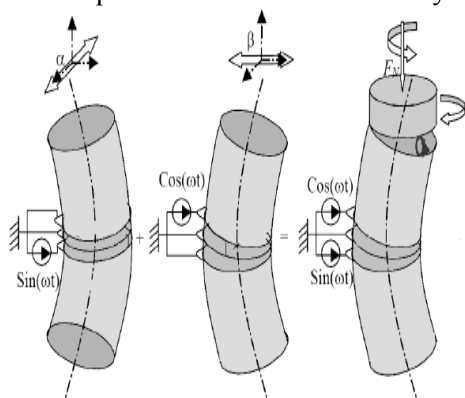
2.2 Silnik o ruchu obrotowym

Inną konstrukcją wykorzystującą zjawisko rezonansu jest silnik o ruchu obrotowym. Składa się on z tych samych elementów co przetwornik Langevin'a, czyli: przeciwmas (stojan), płytek piezoceramicznych oraz śruby [3]. Elementem dodatkowym jest wirnik. Zasadą działania jest generacja drgań poprzez pierścieniowe piezoelektryczne elementy usytuowane między przeciwmasami (stojanem). Z reguły są to cztery płytki piezoelektryczne, zasilane dwoma sygnałami napięciowymi przesuniętymi względem siebie o 90° [4]. Dodatkowo, aby powstała fala biegnąca ceramiki muszą być odpowiednio zorientowane (Rys. 3).



Rys. 3 Sposób poprawnego ułożenia płytek piezoceramicznych między przeciwmasami w silniku o ruchu obrotowym

Zasada działania silnika o ruchu obrotowym została przedstawiona na rysunku



4.

Rys. 4 Zasada działania silnika o ruchu obrotowym

3. Koncepcja prototypu silnika

W TWM kontakt między stojanem a wirnikiem występuje w wielu punktach co czyni konstrukcję bardziej stabilną. W silniku o ruchu

obrotowym taki kontakt występuje jedynie w jednym punkcie. Spowodowane jest to wytwarzaniem pojedynczej fali biegnącej. Zaletą silnika o ruchu obrotowym jest symetryczna budowa pozwalająca na użycie dwóch wirników. Dzięki temu jest możliwość uzyskania większego momentu obrotowego. Połączenie tych dwóch koncepcji pozwala na uzyskanie większej powierzchni tarcia, a tym samym zapewnienie lepszych warunków pracy silnika. Reasumując, otrzymujemy:

- zwiększoną siłę działającą na wirnik, większą prędkość obrotową oraz moment obrotowy;
- wyższe częstotliwości rezonansowe na poszczególnych komórkach – cicha praca pomimo zwiększenia wymiarów;
- symetryczna budowa pozwalająca na użycie dwóch wirników;
- moment blokujący bez dodatkowego zużycia energii elektrycznej;
- budowę pozwalającą na użycie silnika w niesprzyjających warunkach.

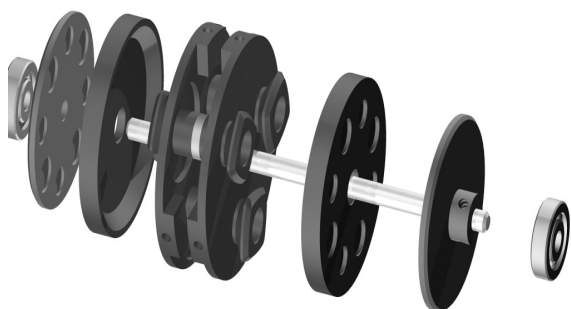
Wadą takiego rozwiązania są zwiększone wymiary w porównaniu z TWM, dlatego podczas projektowania należało zachować odpowiednie proporcje między wymiarami maszyny, a docelowymi częstotliwościami rezonansowymi.

Przed rozpoczęciem projektowania przyjęto kilka wstępnych założeń takich jak:

- częstotliwość rezonansowa poszczególnych komórek powinna być wyższa niż 20 kHz;
- średnica oraz długość maszyny możliwie jak najmniejsze;
- zastosowanie trzech aktuatorów rezonansowych w jednej strukturze;
- możliwie prosta budowa.

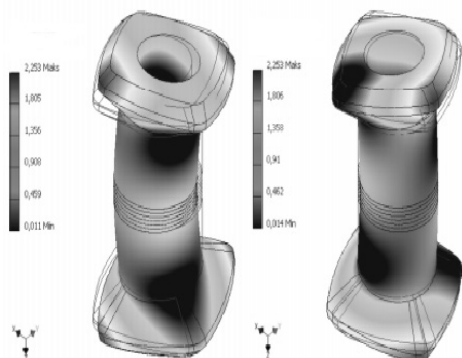
4. Modelowanie i analiza prototypu

Model wirtualny (Rys. 5) został zaprojektowany w programie Autodesk Inventor, a następnie przy pomocy metody elementów skończonych w środowisku Autodesk Multiphysics zbadano częstotliwości rezonansowe [15].



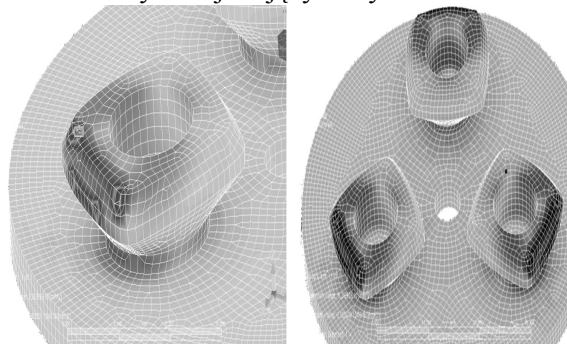
Rys. 5 Wirtualny model prototypu

Otrzymane wyniki na poziomie 25,6 kHz są dobrym punktem wyjścia do kolejnych badań. Należy jednak pamiętać, że w modelu rzeczywistym częstotliwości będą niższe. Spowodowane jest to właściwościami użytych materiałów oraz siły docisku między przeciwmasami a płytkami piezoelektrycznymi.



Rys. 6 Deformacje aktuatora przy częstotliwości 25,6 kHz

Dodatkowo, została zrealizowana analiza naprężeń mechanicznych. Zasymulowano sytuację nacisku wirnika z siłą 120 N na powierzchnię stojana. Największe naprężenia powstały w punktach styku aktuatorów z wirnikiem. Maksymalne wartości naprężeń oscylowały na poziomie 9 N/mm², co jest również satysfakcjonującym wynikiem.



Rys. 7 Symulacja naprężeń mechanicznych przeciwmasy

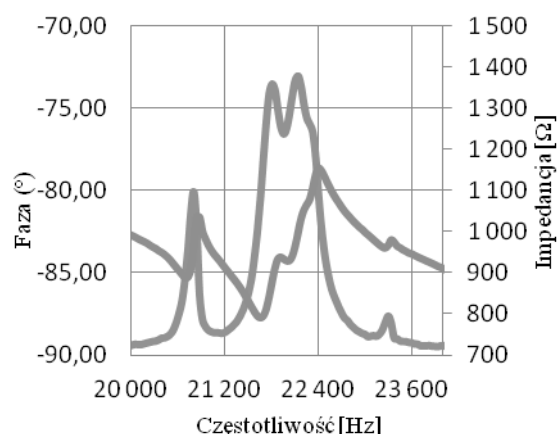
Po zakończeniu analizy i weryfikacji wyników symulacji, został zbudowany model rzeczywisty. Do wykonania przeciwmasy, z uwagi na jej skomplikowany kształt, wykorzystano drukarkę 3D zamiast klasycznej maszyny CNC. Materiał z jakiego została wykonana to aluminium. Do budowy wirnika użyto stali, natomiast obudowa z materiału nylatron GS 66.

Podczas czynności montażowych prototypu, należało szczególną uwagę poświęcić poprawnemu zorientowaniu piezoceramik. Ważne jest aby w każdym aktuatorze zachować takie samo położenie.

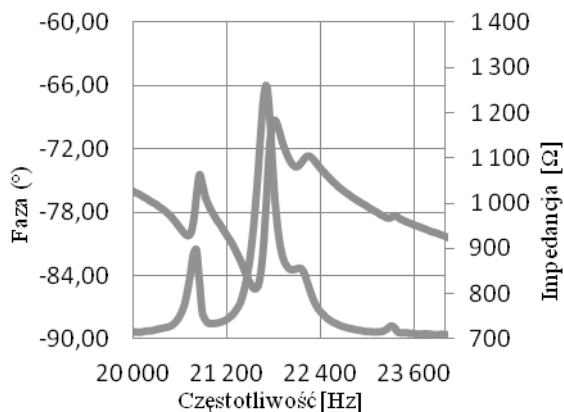
5. Pomiar charakterystyk prototypu

Ostatnim etapem badań nad prototypem silnika były pomiary częstotliwości rezonansowych oraz drgań.

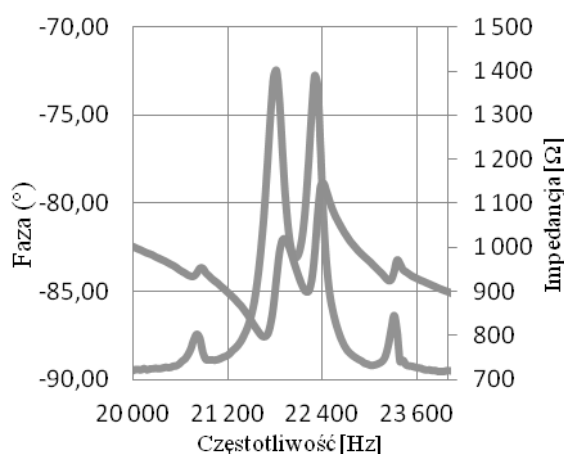
Do pomiaru wykorzystany został analizator impedancji Agilent Technologies 4294A Precision Impedance Analyzer. Mierząc minimalną wartość impedancji, otrzymane zostały częstotliwości rezonansowe. Pomiary zostały wykonane dla dwóch faz każdego aktuatora. Celem było otrzymanie jak najbardziej zbliżonych do siebie wartości zarówno na każdej fazie jak i na każdym aktuatorze. Ostatecznie, otrzymane częstotliwości rezonansowe oscylowały w okolicy 21,6 kHz. Wyniki pomiarów zostały przedstawione poniżej.



Rys. 8 Wyniki pomiarów częstotliwości rezonansowych pierwszego aktuatora



Rys. 9 Wyniki pomiarów częstotliwości rezonansowych drugiego aktuatora



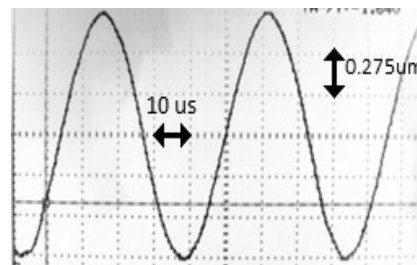
Rys. 10 Wyniki pomiarów częstotliwości rezonansowych trzeciego aktuatora

Jak wynika z pomiarów, częstotliwości rezonansowe nie są identyczne. Różnica jednak jest niewielka i wynosi około 600 Hz i jest jak najbardziej akceptowalna. Problem ten wynika z niedokładności w ułożeniu piezoceramik oraz ze zbyt małej siły docisku na trzecim aktuatorze.

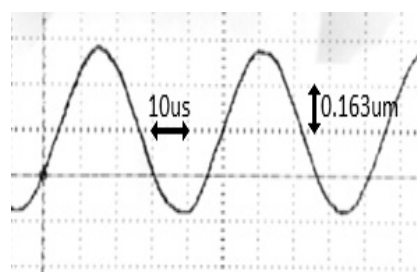
Oprócz częstotliwości rezonansowych za pomocą wibrometru laserowego zostały pomierzone drgania i odkształcenia zachodzące w przeciwnym kierunku. Pomiarów dokonano w dwóch punktach - pierwszy w miejscu bezpośredniego styku stojana z wirnikiem, drugi na powierzchni wokół aktuatora.

Wyniki pomiarów zostały zaprezentowane na rysunkach 8 i 9. W pierwszym punkcie pomiarowym amplituda drgań wyniosła 1,1 μm natomiast w drugim punkcie pomiarowym 0,65 μm . Kształt otrzymanych przebiegów czasowych jest sinusoidalny. Wyniki

są zadowalające, zważywszy na fakt że napięcie zasilające miało wartość 100 V. Docelowo silnik ma być zasilany ze specjalistycznego zasilacza o napięciu wyjściowym 400V więc spodziewane wartości odkształceń będą odpowiednio większe.



Rys. 11 Pomiar odkształceń w pierwszym punkcie pomiarowym



Rys. 12 Pomiar odkształceń w drugim punkcie pomiarowym

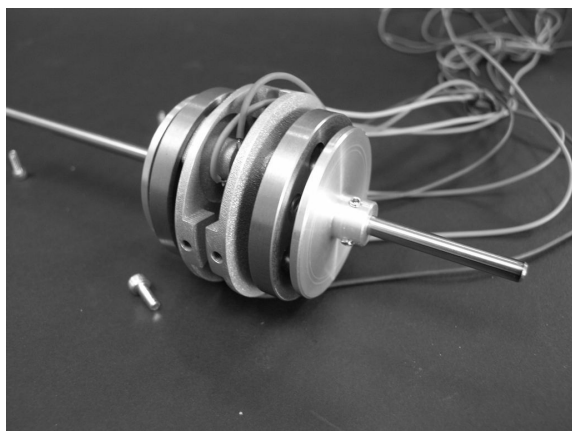
6. Wnioski

W artykule został opisany proces projektowania oraz realizacji prototypu wielokomórkowego silnika piezoelektrycznego. Ideą projektu było połączenie zalet silnika z falą biegnącą i silnika o ruchu obrotowym. Głównym założeniem było otrzymanie częstotliwości rezonansowych wyższych niż 20 kHz, przy zachowaniu kompaktowych wymiarów.

Tak jak się spodziewano otrzymane wyniki pomiarów częstotliwości rezonansowych (21,6 kHz) są niższe niż wyniki z symulacji (25 kHz). Mimo to spełniają postawione wcześniej założenia. Użycie aluminium do budowy przeciw masy pozwoliło na otrzymanie częstotliwości rezonansowych w paśmie ultrasonicznym.

Zaprezentowane zostały pomiary drgań aktuatora zasilanego sygnałami napięciowymi na poziomie 100 V.

Powyższe wyniki są satysfakcjonujące. Planowany jest dalszy rozwój wielokomórkowego silnika piezoelektrycznego.



Rys. 13 Prototyp wielokomórkowego silnika piezoelektrycznego

7. Literatura

- [1] Bishop R. H., *The Mechatronics Handbook*, The University of Texas, Austin, 2002.
- [2] Garbuio L., Rouchon J-F., *Electroactive lubrication: application to the friction reduction in a thermal engine*, JFT05, Tarbes, 2005.
- [3] Szlabowicz W., Rouchon J-F., Nogarede B., *Design and realization of a rotating-mode piezoelectric motor for aeronautic applications*, 10th International Conference on New Actuators, 14-16 June, Bremen, Germany, 2006.
- [4] Adriaens H.J.M.T.A., De Koning W. L., Banning R., *Modeling piezoelectric actuators*, IEEE/ASME Transactions on mechatronics, vol. 5, no 4, pp. 331–341, 2000.
- [5] H. Hirata, S. Ueha, *Design of a Traveling Wave Type Ultrasonic Motor*, IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 42, No. 2, 1995.
- [6] Guyomar D., Aurelle D., Eyraud L., *Simulations of transducer behavior as a function of the frequency and the mechanical, dielectric and piezoelectric losses*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 1, pp 365-372, 1996.
- [7] Y. Ting, Y. Tsai, B-K. Hou, S-C Lin, C-C Lu, *Stator Design of a New Type of Spherical Piezoelectric Motor*, IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 57, No. 10, 2010.
- [8] Sashida T., Kenjo T., *An introduction to ultrasonic motors*, Oxford, Clarendon Press, 1993.
- [9] Y. Bar-Cohen, X. Bao, W. Gradia, *Rotary Ultrasonic Motors Actuated By Traveling Flexural Waves*, Proceeding of SPIE's 6th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 1-5 March, 1999
- [10] T. Mashimo, S. Toyama, H. Ishida, *Design and Implementations of Spherical Ultrasonic Motor*, IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 56, No. 11, 2009
- [11] N. Tekesue, T. Ohara, R. Ishibashi, S. Toyama, M. Hoshina, Y. Hirai, N. Fukaya, J. Arata, H. Fujimoto, *Position Control Methods of Spherical Ultrasonic Motor*, The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2010
- [12] M. Hao, W. Chen, *Analysis and Design of a Ring-type Traveling Ultrasonic Motor*, Proceeding of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Luoyang, China
- [13] J. Yong, J-F. Rouchon, *Resonant piezoelectric force sensor using two bending differential modes*, Industrial Electronics (ISIE), IEEE International Symposium, 2011, s. 1307-1312
- [14] Koa H-P, Kimb S, Kima J-S, Kima H-J, Yoona S-J, "Wear and dynamic properties of piezoelectric ultrasonic motor with frictional materials coated stator.", Materials Chemistry and Physics, Volume 90, Issues 2–3, 15 April 2005, Pages 391–395
- [15] www.autodesk.com

Autorzy

mgr inż. Roland Ryndzionek, doktorant,
tel. +48 58 347 26 48, e-mail: ryndzionek@ely.pg.gda.pl
Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych,
Politechnika Gdańska

dr hab. inż. Jean-Francois Rouchon, prof. INP,
rouchon@laplace.univ-tlse.fr, INP-LAPLACE,
Toulouse, France

dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski, prof. PG,
tel. +48 58 347 2087, e-mail: m.ronkowski@ely.pg.gda.pl
Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych,
Politechnika Gdańska

Recenzent

prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka