

Liniowy aktuator magnetoelektryczny

Streszczenie. W artykule przedstawiono realizację aktuatora w oparciu o kompozyty magnetoelektryczne. Element roboczy aktuatora wykonano w postaci kompozytu ceramicznego wykonanego w technologii Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC) umieszczonego pomiędzy cewkami Helmholtza. W celu zwiększenia efektu magnetoelektrycznego kompozyt poddano procesowi polaryzacji elektrycznej w podwyższonej temperaturze. Spowodowało to prawie dwukrotny wzrost współczynnika magnetoelektrycznego. Wykazano, że w zakresie natężeń stałych pól magnetycznych do 2 kOe, wydłużenie elementu wykonawczego jest liniowe. Pole magnetyczne w tym przypadku można wykorzystać do sterowania wydłużeniem elementu wykonawczego aktuatora. Ponadto napięcie generowane na elektrodach elementu wykonawczego jest wprost proporcjonalne do wydłużenia w zakresie pól magnetycznych do 2 kOe.

Abstract. This paper presents the realization of linear actuator based on the magnetoelectric. The actuator was made as a multilayer ceramic composite using the LTCC technology and was placed between the Helmholtz coils. In order to increase magnetoelectric effect, the composite was electrically polarized at elevated temperature. Magnetoelectric coefficient of the polarized composite is two times higher than for composite without polarizing. It has been shown, that in the range of constant magnetic fields up to 2 kOe, the elongation of the actuator is linear. The magnetic field in this case can be used to control the elongation of the actuator. In addition, the voltage generated between the electrodes of the actuator is directly proportional to the magnetic field in range up to 2 kOe. (**Linear magnetoelectric actuator**).

Słowa kluczowe: technologia LTCC, kompozyt, magnetostrykcja, efekt magnetoelektryczny, aktuator.

Keywords: LTCC technology, composite, magnetostriction, magnetoelectric effect, actuator.

Wprowadzenie

Rynek mikrosensorów i mikroaktuatorów szacowany jest obecnie na poziomie kilkudziesięciu miliardów USD i prognozowany jest jego stabilny wzrost w nadchodzącej dekadzie. Sensory i aktulatory wskazują silny wzrost zastosowań w przemyśle motoryzacyjnym, medycznym, militarnym, telekomunikacyjnym i wytwórczym. Coraz więcej powszechnych produktów zawiera miniaturowe sensory i aktulatory oraz całe mikrosystemy składające się z elementów pomiarowych, wykonawczych, sterujących i komunikacyjnych. Główne grupy produktów na rynku komercyjnym w tym segmencie to: głowice drukarek atramentowych, czujniki ciśnienia, systemy bezpieczeństwa aktywnego w samochodach, wielopunktowe wtryski paliwa, mikrofony, akcelerometry, mikrobolometry, żyroskopy, mikrodozometry płynów, mikronarzędzia, systemy diagnostyczne dla monitorowania stanu zdrowia pacjenta. W przemyśle lotniczym i kosmicznym stosowanych jest wiele mikrosystemów opartych na mikrosensorych i mikroaktuatorach do pomiarów i sterowania podzespołami samolotów i rakiet [1-3].

Aktulatory są ważnymi składnikami układów mikroelektromechanicznych typu MEMS. Są to urządzenia wykonawcze, których zadaniem jest zamiana wielkości nastawiających o małej mocy, przy wykorzystaniu dodatkowej energii, w określone wielkości fizyczne (przemieszczenie, siła, naprężenie) w celu oddziaływania na dany proces. Ogólnie mówiąc, pojęcie aktuator określa wszystkie rodzaje urządzeń służących do wytwarzania sił i realizacji ruchów.

Możliwość konwencjonalnych, mechaniczno-elektrycznych aktuatorów ograniczone są w dużym stopniu przez precyzję wykonania ich części. Dlatego coraz częściej stosuje się aktulatory, w których w miejsce dotychczas stosowanej kombinacji precyzyjnej mechaniki i prostego przetwarzania sygnału pojawiają się „inteligentne” materiały sterowane polami zewnętrznymi. Wspólną cechą takich rozwiązań jest wykorzystanie zjawisk fizycznych (piezoelektryczność, magnetostrykcja, magnetoelastyczność, efekt magnetoelektryczny), które występują w nowoczesnych materiałach poddanych oddziaływaniu czynników zewnętrznych. Znane są aktulatory piezoelektryczne mające zdolność przetwarzania zarówno wielkości mechanicznych w elektryczne jak i elektrycznych w mechaniczne.

Podobną grupą materiałów „inteligentnych”, cieszących się obecnie dużym zainteresowaniem naukowców, są materiały będące połączeniem materiałów magnetostrykcyjnych i piezoelektrycznych. Kompozyty te tworzą nową klasę materiałów funkcjonalnych nazwaną magnetoelektrykami. Poszukiwanie i charakterystyka nowych materiałów o ciekawych właściwościach magnetoelektrycznych w dynamicznie rozwijającej się dziedzinie, jaką są materiały funkcjonalne jest perspektywicznym i ważnym zadaniem. Materiały magnetoelektryczne przyciągają wiele uwagi nie tylko z punktu widzenia nauki o materiałach, ale także z powodu możliwości ich praktycznych zastosowań w czujnikach, aktuatorach, przetwornikach, spintronice, do przechowywania informacji i projektowania nowych typów urządzeń elektronicznych [4-17]. Ze względu na fakt, że jednofazowe materiały magnetoelektryczne wykazują zazwyczaj słaby efekt magnetoelektryczny, dlatego obecnie w głównej mierze stosuje się materiały kompozytowe.

Najnowsze badania wykazują, że właściwości magnetoelektryczne kompozytów silnie zależą od zawartości poszczególnych składników, wielkości ziaren, grubości warstw oraz parametrów procesów spiekania i polaryzacji elektrycznej. Można zatem oczekiwać, że optymalizacja składów oraz procesu syntezy i polaryzacji elektrycznej pozwoli uzyskać materiały o dużej magnetostrykcji i wysokim współczynnikiem magnetoelektrycznym. Przyczyni się to do ich rozpowszechnienia i poszukiwania nowych zastosowań np. w medycynie - małoinwazyjne rozruszniki serca, w technice - do produkcji przetworników, głośników, siłowników, wzbudników, sensorów, jako nośniki informacji o bardzo gęstym upakowaniu, jako czytniki informacji, itp. W USA opatentowano narzędzia chirurgiczne zawierające elementy magnetoelektryczne, które mogą być wykorzystywane do małoinwazyjnych zabiegów chirurgicznych [18]. Zgodnie z tym opisem patentowym element magnetoelektryczny umożliwi sterowanie narzędziem poprzez pole magnetyczne. Pole magnetyczne powoduje odkształcenie warstwy magnetostrykcyjnej i zmianę położenia narzędzia. Do kontroli położenia narzędzia wykorzystywane jest napięcie generowane w warstwie piezoelektrycznej. Jedną

z możliwości aplikacji materiałów magnetoelektrycznych są czujniki pól magnetycznych [19].

Magnetoelektryczne aktulatory ceramiczne charakteryzują się prostą budową, dużą niezawodnością i wykazują stosunkowo duże zmiany sygnału wyjściowego, co upraszcza układ aplikacyjny. W materiałach magnetoelektrycznych, naprężenia w podsystemie magnetostrykcyjnym wywołane obecnością zewnętrznego pola magnetycznego, przenoszą się na podsystem piezoelektryczny, co skutkuje indukowaniem się napięcia elektrycznego (efekt magnetoelektryczny). Z mikroskopowego punktu widzenia, naprężenia powstałe w wyniku zmiany rozmiaru domen magnetycznych, powodują wzrost polaryzacji domen elektrycznych w materiale piezoelektrycznym w kierunku rozciągania i spadek polaryzacji domen w kierunku ściskania.

W przedstawionym artykule omówiono konstrukcję magnetoelektrycznego, liniowego aktatora bazującego na spolaryzowanym kompozycie magnetoelektrycznym składającym się z warstw ferrytu rozdzielonych warstwami ferroelektryka. Stosunek wagowy ferrytu do ferroelektryka wynosił w przybliżeniu 1:1.

Synteza materiałów oraz metodyka badań

Element wykonawczy aktatora składał się z naprzemiennie ułożonych warstw ferrytu $\text{NiZnCuFe}_2\text{O}_4$ i ferroelektryka BaTiO_3 . Szczegółowy opis syntezy składników do wykonania kompozytu i kompozytu warstwowego opisano w literaturze [19]. Wytworzony kompozyt nie posiadał delaminacji i pęknięć na granicach warstw oraz obcych faz na ich granicach. Otrzymany kompozyt poddany został polaryzacji elektrycznej. Optymalnej polaryzacji elektrycznej dokonano przez przyłożenie silnego zewnętrznego pola elektrycznego o natężeniu 3 kV/cm w temperaturze $130\text{ }^\circ\text{C}$ w celu uporządkowania dipoli elektrycznych w warstwach ferroelektrycznych wzdłuż określonego kierunku. Następnie schłodzono kompozyt w obecności pola elektrycznego do temperatury pokojowej co niejako „zamrażało” dipole elektryczne wzdłuż kierunku pola elektrycznego. Proces polaryzacji elektrycznej spowodował efektywniejsze oddziaływanie pomiędzy podukładem magnetycznym i ferroelektrycznym. Proces polaryzacji w polach elektrycznych o natężeniu powyżej 3 kV/cm powodował uszkodzenie kompozytu.

Tak wykonany element wykonawczy aktatora, poddano badaniom magnetostrykcji i efektu magnetoelektrycznego, a także wyznaczono zależność napięcia elektrycznego generowanego przez badany element w funkcji natężenia stałego pola magnetycznego i wydłużenia aktatora.

Do badań magnetostrykcji kompozytów (wydłużenia względnego) zastosowano metodę tensometryczną [20]. Ponieważ mierzone odkształcenia są bardzo małe, więc i zmiana oporu tensometru będzie bardzo mała, z tego też względu do pomiaru stosuje się najczęściej układ mostka Wheatstone’a. W celu uniknięcia błędów pomiarowych związanych z ewentualnym oddziaływaniem pól magnetycznych na tensometry, wszystkie oporniki mostka były zastąpione tensometrami.

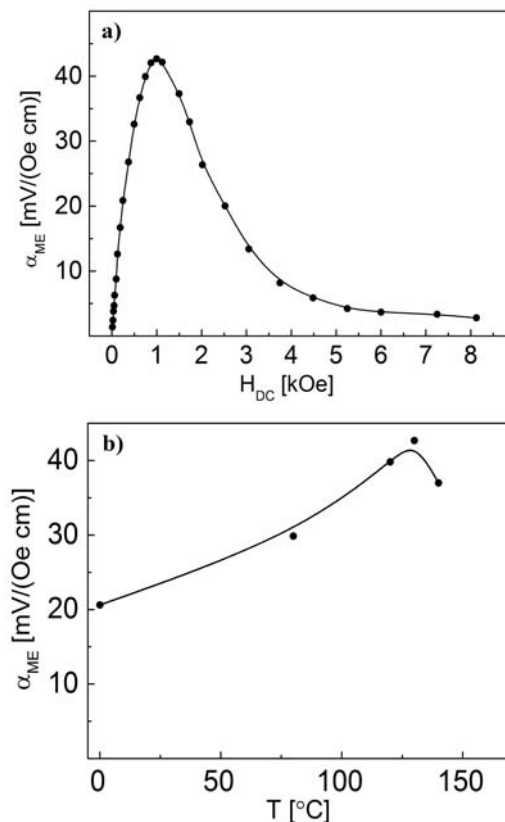
Pomiar efektu magnetoelektrycznego sprowadza się do pomiaru ładunku indukowanego na powierzchni badanego materiału po umieszczeniu próbki w superpozycji stałego (H_{DC}) i zmiennego (H_{AC}) pola magnetycznego. W praktyce mierzy się sygnał napięciowy na elektrodach próbki. Niemniej jednak bezpośredni pomiar napięcia może prowadzić do błędów, wynikłych z występowania zjawiska Faradaya i szumów zakłócających sygnał wyjściowy. Z tego powodu, do pomiaru efektu magnetoelektrycznego zastosowano dynamiczną metodę pomiaru współczynnika

magnetoelektrycznego α_{ME} [21]. Zastosowanie w układzie pomiarowym wzmacniacza fazoczułego, pozwala wyodrębnić z mierzonego sygnału jedynie tę składową, która charakteryzuje się częstotliwością sygnału referencyjnego podawanego z wzmacniacza fazoczułego. Pomiaru natężenia stałego pola magnetycznego (H_{DC}) dokonuje się za pomocą hallotronu umieszczonego w pobliżu próbki, natomiast amplituda zmiennego pola magnetycznego (H_{AC}) jest wyznaczana na podstawie pomiaru prądu zasilającego cewki i parametrów tych cewek (wymiaru, ilość zwojów).

Wyniki badań

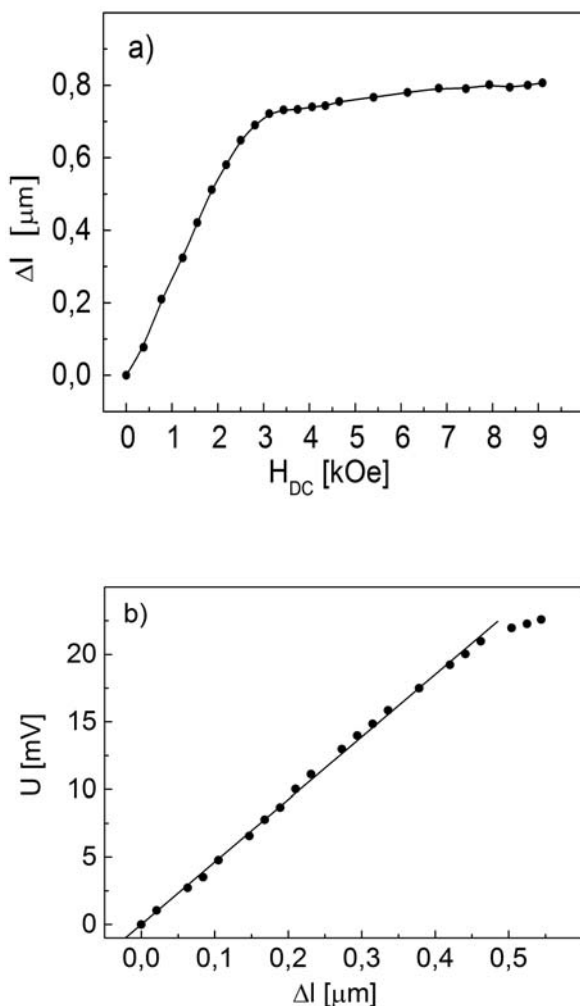
Współczynnik magnetoelektryczny α_{ME} określono w temperaturze pokojowej ($23\text{ }^\circ\text{C}$). Badany kompozyt umieszczony został w zewnętrznym polu magnetycznym H_{DC} wytworzonym przez elektromagnes oraz w sinusoidalnym zmiennym polu magnetycznym H_{AC} wytworzonym przez cewki Helmholtza.

Rysunek 1a przedstawia zależności współczynnika magnetoelektrycznego α_{ME} od natężenia stałego pola magnetycznego H_{DC} przy częstotliwości zmiennego pola magnetycznego 1 kHz i amplitudzie 10 Oe dla kompozytu warstwowego. Współczynnik magnetoelektryczny najpierw rośnie, osiąga maksimum dla $H_{\text{DC}}=1,0\text{ kOe}$, a następnie maleje ze wzrostem natężenia stałego pola magnetycznego. Spadek współczynnika magnetoelektrycznego w zależności od natężenia stałego pola magnetycznego (dla $H_{\text{DC}}>1,0\text{ kOe}$) jest spowodowany procesem nasycenia magnetostrykcji materiału w wyniku zwiększania natężenia pola magnetycznego.



Rys.1. Zależność współczynnika magnetoelektrycznego α_{ME} od natężenia stałego pola magnetycznego H_{DC} dla kompozytu warstwowego po procesie polaryzacji elektrycznej w temperaturze $130\text{ }^\circ\text{C}$ (a) oraz zależność maksymalnej wartości współczynnika α_{ME} od temperatury procesu polaryzacji elektrycznej (b)

Na rysunku 1b przedstawiono zależność maksymalnej wartości współczynnika α_{ME} od temperatury procesu polaryzacji elektrycznej. Proces polaryzacji elektrycznej przeprowadzony w podwyższonych temperaturach zwiększa wartość współczynnika magnetoelektrycznego w stosunku do próbki niespolaryzowanej. Przykładowo polaryzacja próbki w temperaturze 130 °C zwiększa wartość współczynnika magnetoelektrycznego w stosunku do próbki niespolaryzowanej o ok. 107%. Proces polaryzacji elektrycznej porządkuje dipole elektryczne w składniku ferroelektrycznym kompozytu wzdłuż określonego kierunku. Schładzanie kompozytu w obecności pola elektrycznego powoduje „zamrażanie” dipoli elektrycznych wzdłuż kierunku przyłożonego pola elektrycznego. Podczas procesu polaryzacji istnieje jednak możliwość uszkodzenia kompozytu w wyniku przyłożenia zbyt dużego pola elektrycznego, co prowadzi do przebicia elektrycznego kompozytu.



Rys.2. Zależność wydłużenia elementu wykonawczego aktuatora od natężenia stałego pola magnetycznego H_{DC} (a) oraz zależność napięcia generowanego na elektrodach elementu wykonawczego aktuatora od jego wydłużenia (b)

Element wykonawczy aktuatora w postaci spolaryzowanego elektrycznie kompozytu o wymiarach 2mmx10mmx 1mm umieszczono pomiędzy niewielkimi cewkami Helmholtza, które generowały sinusoidalnie zmienne pole magnetyczne o amplitudzie 40e. Docelowo cewki te planuje się nanieść metodą sitodruku na ostatnie

warstwy kompozytu, aby były one zintegrowane z elementem wykonawczym. Rysunek 2a przedstawia zależność wydłużenia elementu wykonawczego aktuatora od natężenia stałego pola magnetycznego H_{DC} . W zakresie pól magnetycznych do 2,0 kOe obserwuje się praktycznie liniową zależność pomiędzy wydłużeniem elementu wykonawczego a natężeniem zewnętrznego (sterującego) pola magnetycznego. Powyżej 2,0 kOe następuje „nasylenie” wydłużenia elementu wykonawczego. Na rysunku 2b przedstawiono zależność napięcia generowanego na elektrodach elementu wykonawczego aktuatora od jego wydłużenia. Stwierdzono, że zależność ta jest liniowa względem wydłużenia elementu wykonawczego do 0,5 μm . Zależność tą można wykorzystać do określenia wydłużenia elementu wykonawczego bez konieczności zastosowania skomplikowanego układu do pomiaru mikrowydłużeń.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono konstrukcję aktuatora wykonaną w oparciu o kompozyty magnetoelektryczne. Jako element wykonawczy aktuatora zastosowano kompozyt ceramiczny, składający się z magnetostrykcyjnego ferrytu $\text{NiZnCuFe}_2\text{O}_4$ i ferroelektryka BaTiO_3 . Właściwości magnetoelektryczne kompozytu poprawiono poprzez proces polaryzacji elektrycznej w podwyższonej temperaturze powoduje. Wykazano, że w zakresie natężeń stałych pól magnetycznych do 2 kOe wydłużenie elementu wykonawczego jest liniowe. Pole magnetyczne w tym przypadku steruje wydłużeniem elementu wykonawczego aktuatora. Ponadto, napięcie generowane na elektrodach elementu wykonawczego jest wprost proporcjonalne do wydłużenia w zakresie pól magnetycznych do 2 kOe. Cecha ta umożliwia łatwą kalibrację aktuatora. Proponowane rozwiązanie jest pozbawione jakichkolwiek mechanizmów ruchomych co dodatkowo zwiększa niezawodność aktuatora.

Podziękowania: praca naukowa finansowana przez narodowe centrum nauki na podstawie decyzji dec-2013/11/d/st5/02990.

Autorzy: dr inż. Piotr Guzdek, Instytut Technologii Elektronowej, Oddział w Krakowie, ul. Zabłocie 39, 30-701 Kraków; dr inż. Wojciech Grzesiak, Instytut Technologii Elektronowej, Oddział w Krakowie, ul. Zabłocie 39, 30-701 Kraków; mgr inż. Krzysztof Witek, Instytut Technologii Elektronowej, Oddział w Krakowie, ul. Zabłocie 39, 30-701 Kraków; mgr inż. Krzysztof Zaraska, Instytut Technologii Elektronowej, Oddział w Krakowie, ul. Zabłocie 39, 30-701 Kraków; dr inż. Barbara Winiarska, Akademia Górniczo-hutnicza w Krakowie, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.

LITERATURA

- [1] Palneedi H., Annapureddy V., Priya S., Ryu J., Status and Perspectives of Multiferroic Magnetolectric Composite Materials and Applications, *Actuators*, 5(1) (2016), 9, 1-31
- [2] Smalec Z., *Wstęp do mechatroniki*, Politechnika Wrocławska, ISBN 978-83-7493-591-3, Wrocław (2010)
- [3] Ortega N., Kumar A., Scott J.F., Katiyar R.S., Multifunctional magnetolectric materials for device applications, *J. Phys. Condens. Matter.*, vol.27, art. 504002, (2015), 1-24
- [4] Grössinger R., Duong G.V., Sato-Turtelli R., The physics of magnetolectric composites, *J. Magn. Magn. Mat.*, vol. 320, (2008), 1972-1977
- [5] Fetisov Y.K., Kamentsev K.E., Ostashchenko A.Y., Magnetolectric effect in multilayer ferrite - piezoelectric structures, *J. Magn. Magn. Mat.*, vol. 272-276, (2004), 2064-2066
- [6] Kanamadi C.M., Kim J.S., Yang H.K., Moon B.K., Choi B.C., Jeong J.H., Magnetolectric effect and complex impedance

- analysis of $(x)\text{CoFe}_2\text{O}_4 + (1-x)\text{Ba}_0.8\text{Sr}_0.2\text{TiO}_3$ multiferroics, *J. Alloys Compd.*, vol. 481, (2009), 781-785
- [7] Li Y.J., Chen X.M., Lin Y.Q., Tang Y.H., Magnetolectric effect of $\text{Ni}_0.8\text{Zn}_0.2\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{Sr}_0.5\text{Ba}_0.5\text{Nb}_2\text{O}_6$ composites, *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 26, (2006), 2839-2844
- [8] Guzdek P., Grzesiak W., Wzorek M., Efekt magnetoelektryczny w kompozycie warstwowym $\text{Ni}_0.3\text{Zn}_0.62\text{Cu}_0.08\text{Fe}_2\text{O}_4 - \text{PbFe}_0.5\text{Ta}_0.5\text{O}_3$, *Przegląd Elektrotechniczny*, R91 (2015), nr 9, 50-53
- [9] Guzdek P., The magnetostrictive and magnetolectric characterization of $\text{Ni}_0.3\text{Zn}_0.62\text{Cu}_0.08\text{Fe}_2\text{O}_4 - \text{Pb}(\text{FeNb})_0.5\text{O}_3$ laminated composite, *J. Magn. Magn. Mat.*, vol. 349 (2014), 219-223
- [10] Solopan S.A., V'yunow O.I., Belous A.G., Tovstolytkin A.I., Kovalenko L.L., Magnetolectric effect in composite structures based on ferroelectric/ferromagnetic perovskites, *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 30 (2010), 259-263
- [11] Kowal K., Jartych E., Guzdek P., Stoch P., Lisińska-Czekaj A., Czekaj D., X-ray diffraction, Mössbauer spectroscopy and magnetolectric effect studies of $(\text{BiFeO}_3)_x \square (\text{BaTiO}_3)_{1-x}$ solid solutions, *Nukleonika*, vol. 58 (2013), 57-61
- [12] Guzdek P., Wzorek M., Magnetolectric properties in bulk and layered composites, *Microelectronic International*, vol. 32 (2015), no. 3, 110-114
- [13] Niemiec P., Bochenek D., Chrobak A., Guzdek P., Błachowski A., Ferroelectric-Ferromagnetic Ceramic Composites Based on PZT with Added Ferrite, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol.12 (2015), E82-E89
- [14] Duong G.V., Grössinger R., Schoenhardt M., Bueno-Basques D., The lock-in technique for studying magnetolectric effect, *J. Magn. Magn. Mat.*, vol. 316 (2007), 390-393
- [15] Guzdek P., Magnetoelektryczny kompozyt ceramiczny, *patent nr P. 397945 z dn. 18.03.2016 r. przyznany przez Urząd Patentowy RP*
- [16] Chougule S.S., Chougule B.K., Response of dielectric behaviour on ferroelectric rich $(y)\text{Ni}_0.8\text{Zn}_0.2\text{Fe}_2\text{O}_4 + (1-y)$ PZT ME composites, *Mater. Chem. Phys.*, vol. 108 (2008), 408-412
- [17] Kulkarni S.R., Kanamadi C.M., Chougule B.K., Dielectric and magnetolectric properties of $(x)\text{Ni}_0.8\text{Co}_0.1\text{Cu}_0.1\text{Fe}_2\text{O}_4/(1-x)\text{PbZr}_0.8\text{Ti}_0.2\text{O}_3$ composites, *Mater. Res. Bull.*, vol. 40 (2005), 2064-2072
- [18] Vishnu-Baba Sundaresan, Atulasimha J., Clarke J., Magnetolectric Surgical Tools for Minimally Invasive Surgery, *patent nr US 20110077663 A1z dn. 31.03.2011r.*
- [19] Guzdek P., Wzorek M., Grzesiak W., Zachariasz P., Kołasczyński G., Smółka W., Czujnik magnetoelektryczny do pomiaru natężenia pola magnetycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 93 (2017), nr. 8, 9-12
- [20] Guzdek P., Grzesiak W., Zachariasz P., Kołasczyński G., Właściwości magnetostrykcyjne kompozytów multiferroicznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 92 (2016), nr. 9, 29-32
- [21] Fiebig M., Revival of the magnetolectric effect, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 38 (2005), R123-R152