

Możliwości zastosowania magnetoelektrycznego sensora prądu do zasilania urządzeń w systemach transportowych

JEL: L99 DOI: 10.24136/atest.2019.150

Data zgłoszenia: 05.04.2019 Data akceptacji: 26.06.2019

W artykule omówiony został przegląd literatury w zakresie magnetoelektrycznych sensorów prądu. Przedstawiono charakterystyki przetwarzania mierzonego stałego pola magnetycznego na wyjściowy sygnał napięciowy otrzymany z sensora.

Słowa kluczowe: sensor magnetoelektryczny, sensor prądu, energy harvesting, magnetostrykcja, taśma amorficzna, piezoelektryczność.

Wstęp

Zasada działania sensora magnetoelektrycznego polega na oddziaływaniu mechanicznym elementu magnetostrykcyjnego (wywołanego polem magnetycznym) na zespolony z nim piezoelektryk [1]. Oddziaływanie to w literaturze opisane jest jako efekt magnetoelektryczny (w skrócie ME). Efekt ten polega na zmianach polaryzacji dielektrycznej (P) piezoelektryka wywołanych odkształceniem magnetostrykcyjnym współpracującego z nim magnetyka, po przyłożeniu do niego pola magnetycznego (H) [2].

Interesującym zastosowaniem może być wykorzystanie czujnika magnetoelektrycznego do pozyskiwania energii elektrycznej z otoczenia (ang. energy harvesting - EH) oraz bezprzewodowego transferu energii. [3, 4].

1. Energy Harvesting

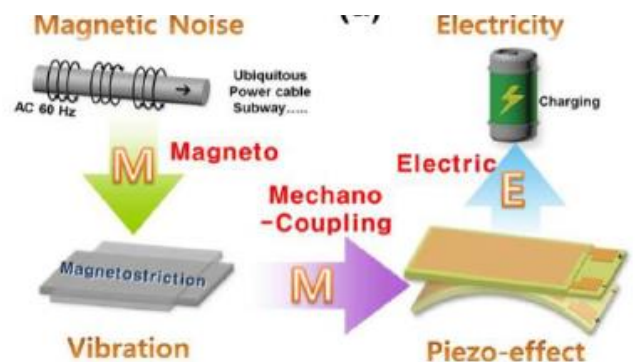
Energy Harvesting jest następstwem postępu w zakresie materiałów i technologii umożliwiających odzysk energii z tzw. tła, czyli ze źródeł znanych, ale dotychczas pomijanych. Powodem tego była mała sprawność przekształcania energii oraz wysoki koszt wytwarzania niezbędnych do tego celu urządzeń (tzw. harvesterów). Kluczowe znaczenie ma też malejące zużycie energii przez mikro-systemy, co powoduje, że źródła energii o mocy mili-, a nawet mikrowatów mają praktyczne znaczenie i umożliwiają wyeliminowanie tradycyjnych układów zasilania z zastosowaniem systemów kablowych czy baterii lub akumulatorów [3, 4].

Możliwość pozyskania energii przez EH staje się realnym sposobem zwiększenia energii dostępnej w pojazdach i transporcie szynowym. Przekształca się w tym celu energię ruchu (kinetyczną), ciepła, światła, pola elektromagnetycznego i innych źródeł. Energię tą można wykorzystać na wiele sposobów w zależności od uzyskanej mocy [3, 4]:

- rzędu miliwatów [mW] lub mniej – do zasilania bezprzewodowych czujników i elementów wykonawczych,
- rzędu watów [W] – do samowystarczalnego zasilania wybranych elementów oświetlenia wewnętrznego. W przypadku gromadzenia energii (np. w superkondensatorach) może też służyć do zasilania klimatyzacji i wybranych podzespołów,
- rzędu kilowatów [kW] – do ładowania akumulatorów trakcyjnych lub superkondensatorów (w przypadku pojazdów elektrycznych lub/i hybrydowych), dostarczających z kolei energię do elektrycznych silników trakcyjnych.

Od ponad dekady naukowcy badają [5] metody uzyskiwania energii elektrycznej z pól magnetycznych występujących w otocze-

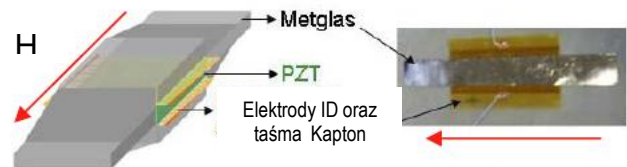
niu za pomocą mechanizmu magneto-mechano-elektrycznego (MME). Mechanizm działania można opisać w następujący sposób: Gdy kompozyt ME jest umieszczony w polu magnetycznym AC, warstwa magnetostrycyjna w kompozycie reaguje na drgania mechaniczne (sprężenie magneto-mechaniczne), tym samym oddziałuje na warstwę piezoelektryczną, co powoduje powstanie napięcia wyjściowego na elektrodach poprzez prosty efekt piezoelektryczny (sprzęgło mechano-elektryczne). Ze względu na istnienie fazy piezoelektrycznej w kompozycie ME, wszelkie drgania mechaniczne oddziałujące na kompozyt bezpośrednio powodują powstanie na wyjściu piezoelektryka napięcia. W związku z tym generator MME może być wykorzystywany do pozyskiwania energii zarówno z pola magnetycznego, jak i wibracji zewnętrznych w tym samym czasie [5]. Schematyczne rozwiązanie dla pól zmiennych występujących wokół kabli energetycznych w metrze zostało przedstawione na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat działania przetwornika umożliwiającego odzysk energii z otoczenia [5]

2. Sensory pola magnetycznego

Obecnie znanych jest wiele typów magnetoelektrycznych sensorów pola magnetycznego.



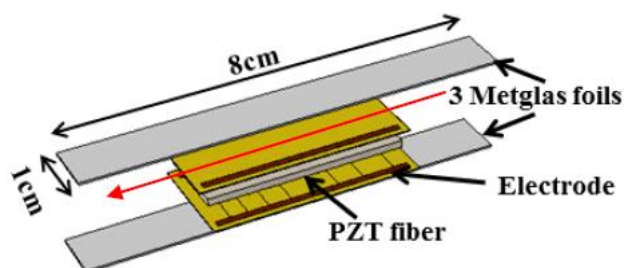
Rys. 2. Przykład laminowanego sensora pola magnetycznego [7]

Magnetoelektryczne sensory składają się z magnetostrykcyjnych i piezoelektrycznych warstw klejonych. Taśma Metglas z wysokim współczynnikiem piezomagnetycznym oraz PZT z wysokim współczynnikiem piezoelektrycznym, są wybierane w celu uzyskania najwyższej odpowiedzi ME. To z kolei zapewnia wysoką czułość na zmiany pola magnetycznego. Zastosowana taśma poliamidowa (Kapton) izoluje elektrody miedziane ID zarówno od górnej jak i dolnej warstwy pięciu włókien PZT grubości 200 μm (CTS Wireless, Albuquerque, NM) przy użyciu żywicy epoksydowej. To pozwoliło uzyskać przeciwsobną geometrię [6]. Taka konfiguracja składa się z podłużnie spolaryzowanej warstwy magnetycznej, a warstwy pie-

zoelektryczne symetrycznie spolaryzowane względem centralnego punktu węzłowego w odwrotnym kierunku wzdłuż osi. Taka konfiguracja zapewnia wysoki współczynnik ME pomiędzy warstwami magnetycznymi i elektrycznymi. Wymiar każdego włókna PZT wynosiła 0,2 cm × 4,0 cm, a odległość między elektrodami była 850 μm. Taśmy Metglas były grubości 25 μm (Metglas Inc, Conway, SC), a wartość magnetostrykcji nasycenia wynosiła około 27 μm/m. Taśmę cięto na szerokość około 1 cm, tak aby dopasować szerokość całkowitą pięciu włókien PZT. Taśma Metglas miała długość 8 cm, która została wybrana w celu uzyskania maksymalnej koncentracji strumienia magnetycznego w strukturze laminatu. Pocięte taśmy Metglas były następnie ułożone jedna na drugiej i połączone przy zastosowaniu żywicy epoksydowej. W celu minimalizacji grubości kleju były ściskane za pomocą prasy hydraulicznej. Sklejone taśmy Metglas składające się z dwóch, czterech lub sześciu warstw następnie zostały dołączone na górze i na dole elektrod ID, w celu uzyskania ME laminatu warstw konstrukcji. Rysunek 2 przedstawia schemat laminatu Metglas-PZT wraz z elektrodą ID i taśmą Kapton.

Odpowiedź ME struktury może być wyznaczana przez pomiar napięć indukowanych na elektrodach ID z włókien PZT i przetwarzanych przez wzmacniacz homodynowy (lock-in) jako funkcję stałego pola podmagesowującego strukturę H_{dc} i oddziaływania pola zmiennego wytworzonego w cewkach Helmholtza wytwarzających pole $H_{ac} = 1$ Oe o częstotliwości 1 kHz. Oba pola oddziaływały wzdłuż całej długości laminatu. Współczynnik napięcia ME α_{ME-V} mierzony jako funkcja H_{DC} dla dwóch, czterech i sześciu warstw taśmy Metglas w strukturze wykazuje podobny trend, który opisano w [6].

Innym z przykładów jest trójwarstwowy kompozyt Metglas/PZT/włókna Metglas w konfiguracji przeciwsobernej. Tworzywo Kapton zintegrowane z warstwami ID elektrod były doklejone po obu stronach pięciu połączonych pasków piezoelektrycznych, o wymiarach 4x0,2x0,2cm. Układ elektrod ID pozwala na symetryczne połączenie pasków wzdłuż ich osi. Trzy warstwy taśmy Metglas (Vitrovac 7600F, Vitrovac Inc Hanau, Niemcy) o wymiarach 8x1 cm i grubości 22 μm były sklejone ze sobą. Trójwarstwowe taśmy Metglas były przyklejone po obu stronach warstwy pasków piezoelektrycznych. Szczegóły wykonania laminatu podano w [8].

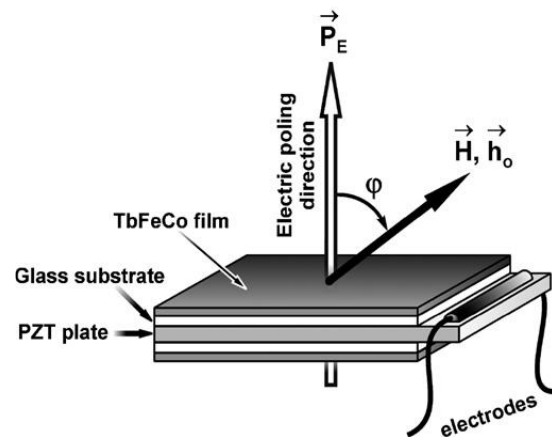


Rys. 3. Trójwarstwowy sensor magnetoelektryczny [7]

Uzyskano laminaty o wymiarach około 0,5×8,0×1 cm. Przesunięcie punktu pracy H_{dc} wprowadzono przez zastosowanie magnesów stałych umieszczonych na obu końcach laminatów ME.

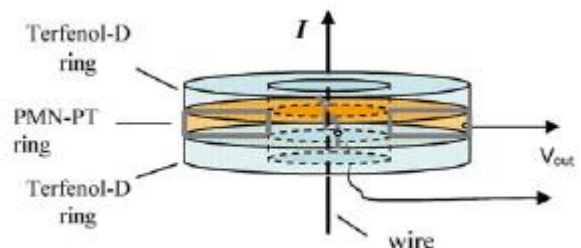
Znanym z literatury przykładem technicznej realizacji efektu magnetoelektrycznego, jest pasywny sensor pola magnetycznego zbudowany z kompozytu, złożonego z piezoelektryka PZT (ang. Lead (Plumbum) Zirconate Titanate) i magnetyka TbFeCo [2]. Odształcenie magnetostrykcyjne λ magnetyka, wywołane zewnętrznym stałym polem magnetycznym, powoduje polaryzację elementu piezoelektrycznego. W wyniku tej polaryzacji, na okładkach elementu PZT, powstaje napięcie wyjściowe proporcjonalne do działającego pola magnetycznego. Rozwiązanie to nie umożliwiło określenia zwrotu pola magnetycznego. Takie złącze charakteryzuje się otwar-

tym magnetowodem, w konsekwencji czego powstaje pole odmagnesowujące rdzeń czujnika. Powoduje to zmniejszenie sygnału wyjściowego sensora w stosunku do zamkniętego obwodu magnetycznego.



Rys. 4. Pasywny sensor pola magnetycznego [2]

Powstało również rozwiązanie sensora w postaci pierścieniowej. Służył on do detekcji pól wirowych oraz prądów stałych lub zmiennych płynących w przewodniku. Prąd I płynący w przewodniku wytwarza wzdłuż przewodnika natężenie pola wynoszące $H_{wir} = I / (2\pi r)$ przy czym r – promień wirowego pola magnetycznego. W tym przypadku była jednak mała powierzchnia piezoelektryka poddawana odkształceniom od magnetyka co wpływało na małą czułość przy detekcji innych pól niż wirowe.



Rys. 5. Pierścieniowy sensor służący do pomiaru prądów płynących przez przewodnik [8]

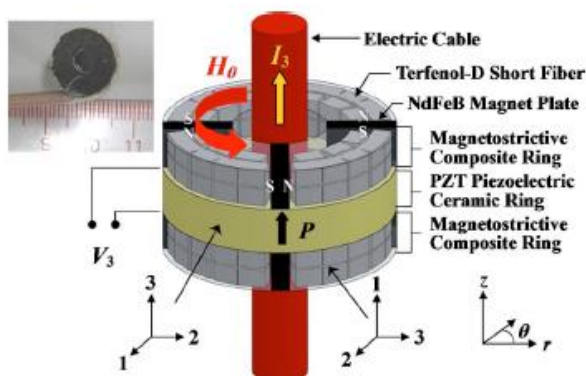
Aby układ mógł wykrywać pola magnetyczne zarówno wirowe jak i innego typu należy użyć pierścienia o wysokości porównywalnej ze średnicą. Wpływa to na zwiększenie czułości oraz stworzy nowe możliwości detekcji pól.

W dotychczas budowanych układach przez Shashank Priya, Rashed Islam, Shuxiang Dong i D. Viehland napięcie indukowane w złączu na wyjściu elektrod piezoelektryka, które było wzbudzone stałym polem magnetycznym, było liniowo zależne od mierzonego zmiennego pola magnetycznego [8].

3. Elektryczne czujniki prądu

Konwencjonalne sensory prądu wykorzystują pomiar pola magnetycznego wytwarzanego wokół przewodnika z mierzonym prądem. Zasada działania tych przetworników polega na bezpośrednim zastosowaniu efektu Halla. Hallotrony muszą być zasilane przez bardzo stabilne źródło prądu stałego i ich z natury słabe napięcia Halla (od 5 do 40 μV/Oe) ($1\text{Oe} = 10^3 / 4\pi \text{ A/m}$) wymagają wzmocnienia sygnału do poziomu użytecznego.

Natomiast przetworniki prądu zbudowane z kompozytów ME umożliwiają pomiar prądu przemiennego lub stałego płynącego w przewodzie poprzez pomiar wzbudzonego wokół tego przewodnika wirowego pola magnetycznego AC lub DC zgodnie z prawem Amper'a. Natężenie pola magnetycznego zależy od wartości prądu I w przewodzie oraz od odległości r od tego przewodu zgodnie z zależnością $H = I/2\pi r$. Dlatego też pierścieniowe laminaty ME stanowią zasadnicze konfiguracje elektrycznych czujników prądu. Przykładowo Leung i in. w [9] zaprezentowali pierścieniowy czujnik prądu elektrycznego pokazany na rysunku 6 reagujący na wirowe pole magnetyczne. Konstrukcja czujnika opierała się na kształcie pierścienia składający się ze spolaryzowanego osiowo pierścienia ceramicznego PZT umieszczonego pomiędzy dwoma obwodowo namagnesowanymi pierścieniami kompozytowymi złożonymi z połączonych żywicą epoksydową, terfenolem-D/magnesem NdFeB. Oceniono czułość czujnika prądu elektrycznego teoretycznie i eksperymentalnie. Wskazano, że napięcie wyjściowe jest liniowo zależne od mierzonego prądu elektrycznego. Czujnik wykazywał wysoką czułość poza rezonansem 12,6mV/A w zakresie częstotliwości od 1 Hz do 30 kHz i dużą czułość rezonansową 92,2 mV/A w rezonansie 67 kHz.

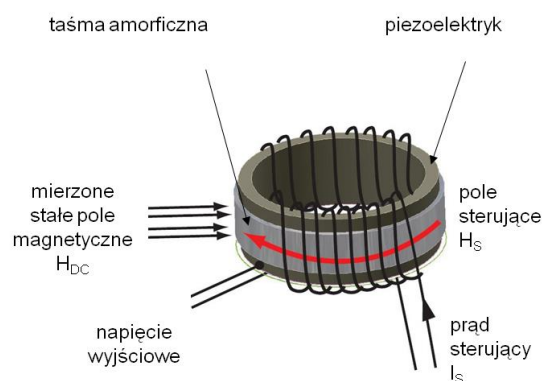


Rys.6. Pierścieniowy czujnik prądu [5].

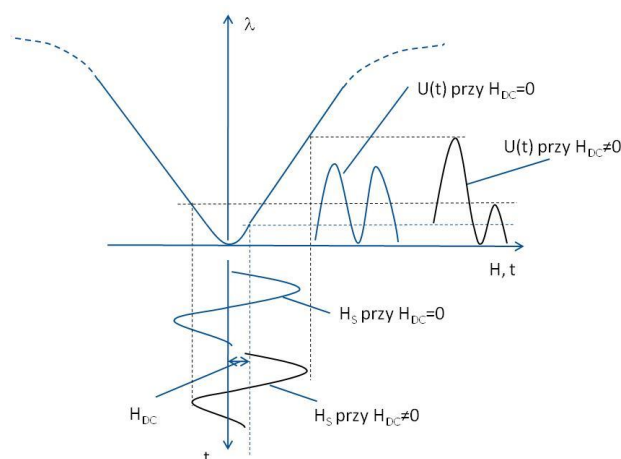
Podobnie liniowość i dużą czułość prądową 114,2 mV/A obserwowano w laminacie Metglas/PZT przy pomiarze zmiennego pola magnetycznego o częstotliwości 50 Hz [10]. Czujnik ten można zastosować do pomiaru prądu płynącego w kablu linii elektroenergetycznej. Poprzez połączenie pierścieni ME ze strukturą transformatora piezoelektrycznego, Zhang i in. [11] osiągnęli wysoką czułość rezonansową ~157 mV / A przy elektromechanicznej częstotliwości rezonansowej 62 kHz. Natomiast Yu i in. [12] przedstawili wdrożenie belkowego czujnika prądu przemiennego zbudowanego z dwóch warstw wzdłużnie namagnesowanego Terfenolu-D i jednej warstwy poprzecznie spolaryzowanej materiały PZT. Warstwy były sklezione epoksydowo, a przewód przewodzący prąd był nawinięty wzdłuż przetwornika i napięcie wyjściowe proporcjonalne do prądu odbierano na dwóch okładkach PZT.

Innym przykładem pierścieniowego sensora pola magnetycznego jest hybrydowe złącze magnetyk piezoelektryk, w którym zamknięty magnetowód umożliwia pomiar słabych, stałych pól magnetycznych, rzędu pojedynczych A/m. Zamkniętym magnetowód przyczynia się do zmniejszenia wpływu zakłóceń na sygnał użyteczny oraz umożliwia określenie zwrotu mierzonego stałego pola magnetycznego, nierealizowanego w sensorach o otwartym magnetowodzie. Schemat budowy hybrydowego złącza magnetyk piezoelektryk przedstawia rysunek 7. Na rysunku 8 przedstawiono schematycznie zasadę działania złącza jako sensora stałego pola magnetycznego [13]. Zmiany napięcia międzyszczytowego U_{pp} pierwszej harmonicznej na wyjściu sensora w funkcji stałego pola magnetycznego

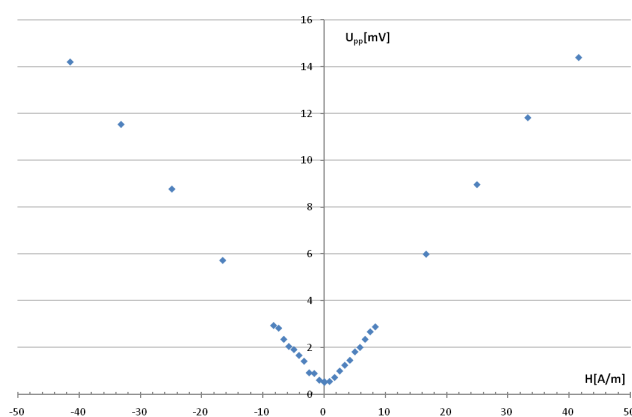
H_{DC} wytworzonego w uzwojeniu cewki sterującej przedstawia rysunek 9. Natomiast zmiany napięcia międzyszczytowego U_{pp} pierwszej harmonicznej na wyjściu sensora w funkcji stałego pola magnetycznego H_{DC} wytworzonego w cewkach Helmholtza przedstawiono na rysunku 10.



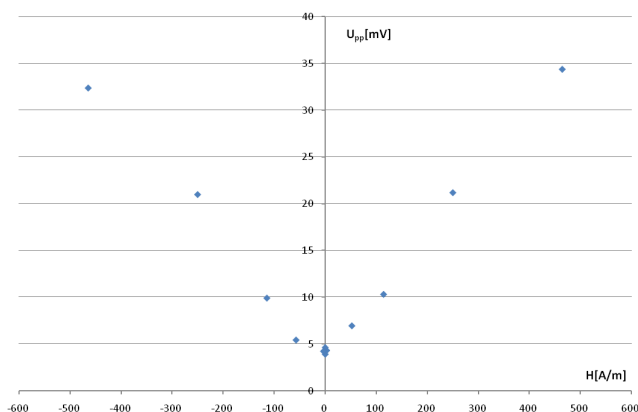
Rys. 7. Schemat opracowanego hybrydowego złącza magnetyk-piezoelektryk [13].



Rys. 8. Przebiegi ilustrujące zasadę działania złącza [13].



Rys. 9. Zmiany pierwszej harmonicznej na wyjściu sensora w funkcji stałego pola magnetycznego H_{DC} wytworzonego w uzwojeniu cewki sterującej [13].



Rys.10. Zmiany napięcia pierwszej harmonicznej na wyjściu sensora w funkcji stałego pola magnetycznego H_{dc} wytworzonego w cewkach Helmholtza [13].

Podsumowanie

Obecnie w kraju i zagranicą prowadzone są prace związane z zastosowaniem struktur magnetoelektrycznych do budowy sensorów prądu [5, 14] oraz w zastosowaniach do pozyskiwania energii z otoczenia [3]. Interdyscyplinarny charakter zagadnienia Energy Harvesting obejmujący: fizykę, inżynierię materiałową, mechanikę, elektronikę, działa stymulująco na rozwój nauki i gospodarki. Należy podkreślić, że mimo licznych prac podejmowanych głównie w ostatnim dziesięcioleciu w ośrodkach badawczych krajów najbardziej rozwiniętych, tematyka EH i wykorzystywanych w tym celu materiałów smart jest nadal bardzo aktualna naukowo i aplikacyjnie.

Bibliografia

1. Duc N. H., Huong Giang D. T. „Magnetic sensors based on piezoelectric-magnetostrictive composites”, *Journal of Alloys and Compounds*, nr 449, 2008, s. 214-218;
2. Dong S., Li J., Viehland D., „Longitudinal and Traverse Magnetolectric Voltage Coefficients of Magnetostrictive/Piezoelectric Laminate Composite: Theory”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, 50(10), 1253-1261, 2003;
3. Kaleta J., „Materiały magnetyczne SMART - Budowa, wytwarzanie, badanie właściwości, zastosowanie”, OW Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013;
4. red. Shashank Priya, · Daniel J. Inman, „Energy harvesting technologies”, Springer Science+Business Media, LLC 2009;
5. Palneedi H., Annapureddy V., Priya S., Ryu J., Review: Status and perspectives of multiferroic magnetolectric composite materials and applications, *Actuators* 2016, 5, 9; doi:10.3390/act5010009;

6. Das J., Gao J., Xing Z., Li. J. F., Viehland D., „Enhancement in the field sensitivity of magnetolectric laminate heterostrures”, *Appl. Phys. Lett.*, 95, 092501, 2009;
7. X. Zhuang, M. Lam Chok Sing, C. Cordier, S. Saez, and C. Dolabdjian, J. Das, J. Gao, J.F. Li and D. Viehland, „Analysis of noise in Magneto-Electric thin layer composites used as magnetic sensors”, *IEEE Sensors Journal*, Vol.11 , Issue: 10 , Oct. 2011,s. 2183 – 2188, DOI: 10.1109/JSEN.2011.2114648;
8. Priya S., Islam R., Dong S., Viehland D., „Recent advancements in magnetolectric particulate and laminate composites” *J Electroceram* 19 (2007), s.147–164;
9. Leung, C.M.; Or, S.W.; Zhang, S.; Ho, S.L. Ring-type electric current sensor based on ring-shaped magnetolectric laminate of epoxy-bonded Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.92} short-fiber/NdFeB magnet magnetostrictive composite and Pb(Zr, Ti)O₃ piezoelectric ceramic. *J. Appl. Phys.* 2010, 107, 09D918.
10. Lu, C.; Li, P.; Wen, Y.; Yang, A.; Yang, C.; Wang, D.; He, W.; Zhang, J. Magnetolectric composite Metglas/PZT-based current sensor. *IEEE Trans. Magn.* 2014, 50, 1–4;
11. Zhang, S.; Leung, C.M.; Kuang, W.; Or, S.W.; Ho, S.L. Concurrent operational modes and enhanced current sensitivity in heterostructure of magnetolectric ring and piezoelectric transformer. *J. Appl. Phys.* 2013, 113, 17C733.
12. Yu, X.; Lou, G.; Chen, H.; Wen, C.; Lu, S. A slice-type magnetolectric laminated current sensor. *IEEE Sens. J.* 2015, 15, 5839–5850.
13. Kuczyński K. „Możliwości zastosowania hybrydowego złącza magnetyk-piezoelektryk jako sensora pola magnetycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 4, 2010, s.69-71.
14. Bichurin M, Petrov R., Leontiev V., Semenov G., Sokolov O., „Magnetolectric Current Sensors”, *Sensors* 2017, 17, 1271; doi:10.3390/s17061271

Possibilities of the application magnetolectric current sensor for the power supply in transport systems

The paper presents the review of the magnetolectric current sensors. The possibility of output voltage measurement of the sensor in the function of DC magnetic field is also presented.

Keywords: magnetolectric sensor, energy harvesting, current sensor, magnetostriction, amorphous magnetic materials, piezoelectric materials.

Autorzy:

mgr inż. **Karol Kuczyński** – Uniwersytet Techniczno-Humanistyczny w Radomiu.