

doi:10.15199/48.2018.01.36

Analiza numeryczna harvestera z przetwarzaniem magnetycznym dla liniowego tłumika magneto-reologicznego

Streszczenie. W pracy przeprowadzono analizę harvestera działającego w oparciu o zjawisko Faradaya, który będzie wykorzystany do zasilania liniowego tłumika magneto-reologicznego (MR). Opisano budowę harvestera, podając jego parametry geometryczne i magnetyczne. Przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych harvestera dla dwóch wariantów połączeń uzwojenia cewki. Wyznaczono rozkład indukcji magnetycznej i siłę zaczepową w harvesterze oraz przeanalizowano jego działanie w stanie jałowym i w stanie obciążenia cewką sterującą tłumika MR. Zwrócono uwagę na możliwość pracy harvestera jako czujnika prędkości.

Abstract. This study investigates the performance of an energy harvester, utilizing the Faraday's law, used to supply a linear magnetorheological (MR) damper. The structural design of the harvester is outlined and its geometrical and magnetic parameters are summarised. The numerical calculation data were obtained for two variants of coil winding connections. Distribution of magnetic flux density and the cogging force are obtained both under the idle run and under the load applied to the control coil of the MR damper. It is demonstrated that the harvester can be operated as a velocity sensor. **Numerical analysis of harvester with linear magnetorheological damping**

Słowa kluczowe: harvester, tłumik MR, drgania, siła elektromotoryczna, czujnik prędkości.

Keywords: harvester, MR damper, vibrations, electromotive force, velocity sensor.

Wstęp

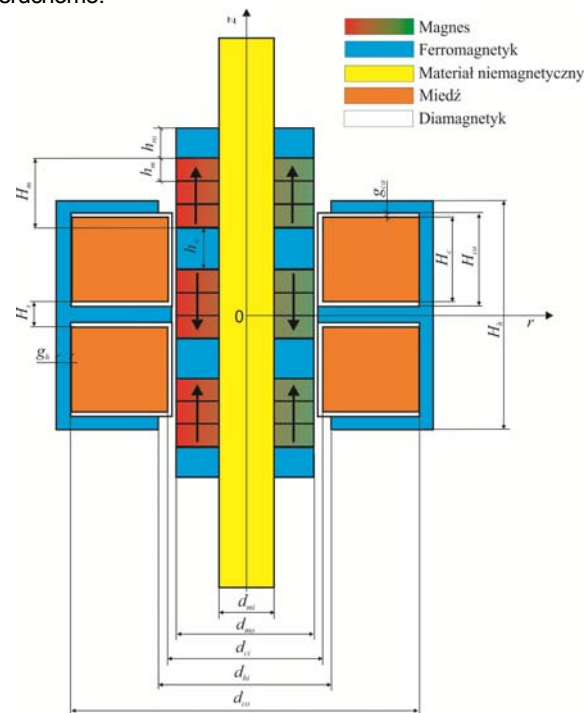
Wytwarzanie energii elektrycznej wynikające z względnego ruchu magnesu stałego i uzwojenia cewki jest od dawna wykorzystywane do konstrukcji generatorów. W ostatnich latach wykorzystanie tego efektu nabiera szczególnego znaczenia w związku z szybkim rozwojem metod umożliwiających pozyskanie energii elektrycznej z otaczających nas źródeł, takich jak: energia mechaniczna, cieplna, słoneczna, czy elektromagnetyczna. Towarzyszy temu opracowywanie nowych konstrukcji tzw. harvesterów, umożliwiających konwersję energii pochodzących z owych źródeł. Harvestery działające w oparciu o efekt Faradaya można podzielić na trzy główne grupy: rezonansowe, przesuwne z ruchomą cewką lub magnesem oraz z ruchomym (poddanym zgniotowi) rdzeniem ze stali austenitycznej [3]. Rozwój harvesterów z ruchomym obwodem magnetycznym do odzyskiwania energii mechanicznej jest podyktowany konkretnymi potrzebami aplikacyjnymi.

W tej pracy obiektem rozważań jest harvester z przetwarzaniem magnetycznym, w którym układ magnesów stałych porusza się względem cewki. Rozważane są dwa warianty połączenia cewek oznaczone jako W1 i W2. Analizowany harvester ma służyć do odzyskiwania energii elektrycznej z drgań mechanicznych, która ma być wykorzystana do zasilania liniowego tłumika MR. Celem analizy jest wyznaczenie rozkładu indukcji magnetycznej i siły zaczepowej oraz siły elektromotorycznej w harvesterze, a także napięcia i natężenia prądu przy obciążeniu cewką sterującą tłumika MR i wskazanie wariantu, który gwarantuje uzyskanie wystarczająco dużej siły elektromotorycznej przy dopuszczalnej sile zaczepowej. Jak wiadomo, napięcie wytwarzane w cewce harvestera wskutek poruszania się układu magnesów stałych jest proporcjonalne do prędkości, co pozwala na wykorzystanie go jako czujnika.

Niniejszy artykuł jest kontynuacją wcześniejszych prac autorów nad opracowaniem prototypowych konstrukcji tłumików MR z funkcją odzysku energii oraz ich zastosowaniem w semiaktywnych układach redukcji drgań, które opisano m. in. w pracach [4, 5, 6] oraz [7, 8]. Należy podkreślić, że ta problematyka jest obecnie przedmiotem intensywnych badań wielu ośrodków naukowo-badawczych o czym świadczy rosnąca liczba raportów, publikacji oraz patentów np. [1, 2, 9, 10, 11].

Budowa harvestera

Budowę harvestera pokazano na Rys. 1. Harvester jest symetryczny i składa się z cylindrycznej cewki z uzwojeniem o dwóch sekcjach i trzech układów magnesów stałych o kształcie pierścieniowym. W każdym układzie występują cztery magnesy mogące się poruszać wzdłuż osi z, wewnątrz cewki pozostającej nieruchomo.



Rys. 1. Budowa harvestera

Magnesy, osadzone na wale z materiału nieferromagnetycznego, mają namagnesowanie osiowe (wskazane strzałkami). Pomiedzy układami magnesów znajdują się przekładki ferromagnetyczne o kształcie pierścieniowym, których średnice są równe średnicom magnesów. Sekcje uzwojenia cewki, nawinięte na karkasie folią miedzianą z jednostronną izolacją mają tę samą wysokość i tę samą liczbę zwojów (273). Dla obu sekcji środek ich wysokości pokrywa się ze środkiem odległości między układami magnesów. Sekcje są

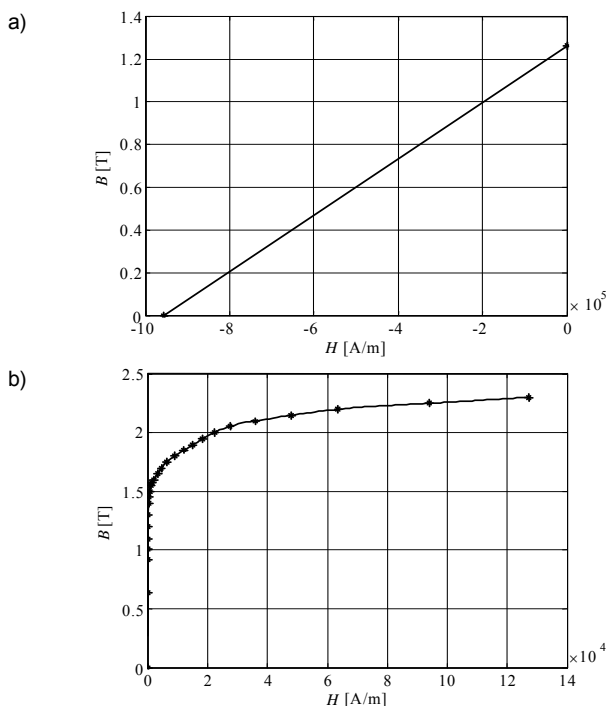
połączone tak, że indukowane w nich siły elektromotoryczne sumują się (wariant W1) lub odejmują się (wariant W2). Cewka znajduje się w obudowie z materiału ferromagnetycznego.

Obliczenia

Z uwagi na symetrię osiową harvestera, obliczenia polowe przeprowadzono w walcowym układzie współrzędnych w płaszczyźnie (r, z) . Wymiary elementów konstrukcyjnych urządzenia przyjęto jak w Tabeli 1, a charakterystyki magnesowania magnesów stałych i materiału ferromagnetycznego jak na Rys. 2 a, b. Założono, że prądy wirowe w magnetowodzie harvestera są pomijalnie; co w praktyce oznacza, że zakres częstotliwości drgań powinien być ograniczony od góry do kilku herców. Do obliczeń posłużono się programem Opera-2d w wersji 14R1 [12].

Tabela 1. Wymiary elementów konstrukcyjnych harvestera

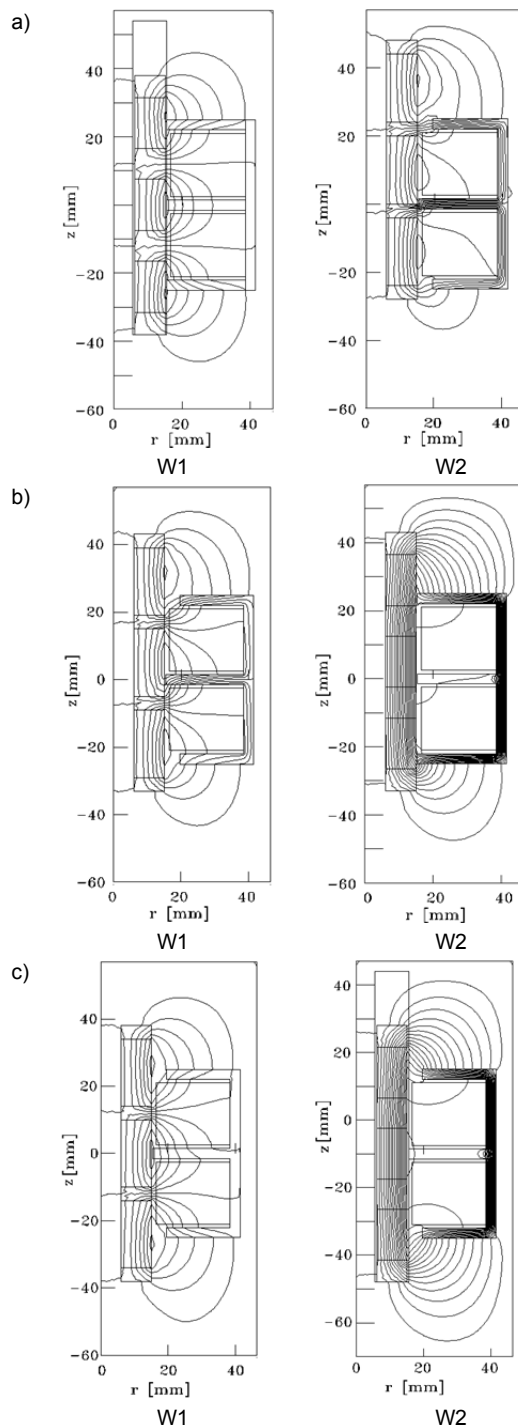
Magnes	Wysokość h_m	5 mm
	Średnica wewnętrzna d_{mw}	12 mm
	Średnica zewnętrzna d_{mz}	30 mm
Obudowa	Wysokość H_o	50 mm
	Grubość ścianki g_o	3 mm
Karkas	Wysokość H_k	20.5 mm
	Grubość ścianki g_k	1 mm
Cewka	Wysokość H_c	18.5 mm
	Średnica wewnętrzna d_{cw}	31 mm
	Średnica zewnętrzna d_{cz}	77 mm
	Odległość między sekcjami cewki H_s	5 mm



Rys. 2. Charakterystyka magnesowania: a) magnesów, b) obudowy

Na Rys. 3 przedstawiono wyznaczone rozkłady indukcji magnetycznej B dla wariantu W1 i W2 przy założonym przemieszczeniu z : -10, -5, 0 mm. Z rysunku wynika, że bardziej równomiernym rozkładem pola magnetycznego charakteryzuje się wariant W1. Jak wiadomo, w każdym układzie magnetowodu zawierającym magnesy stałe i elementy ferromagnetyczne powstaje siła zaczepowa. Mając na uwadze przeznaczenie harvestera, jego konstrukcja powinna charakteryzować się możliwością indukowania dużej siły elektromotorycznej e przy możliwie małej sile zaczepowej F_z . W związku z tym, naturalnym kryterium, którym należy się kierować przy wyborze konstrukcji harvestera jest maksimum

ilorazu e/F_z . Wyznaczoną zależność siły zaczepowej od położenia dla obu wariantów pokazano na Rys. 4.

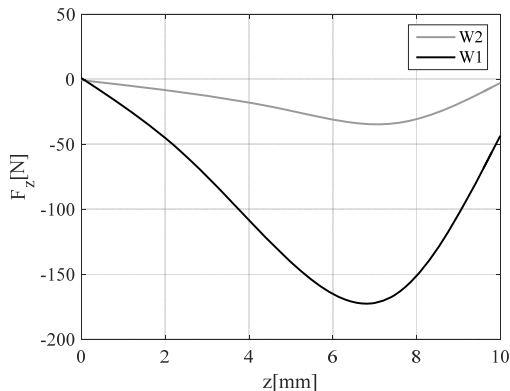


Rys. 3. Rozkład linii indukcji magnetycznej w wariantach W1 i W2: a) $z=-10$ mm, b) $z=-5$ mm, c) $z=0$ mm

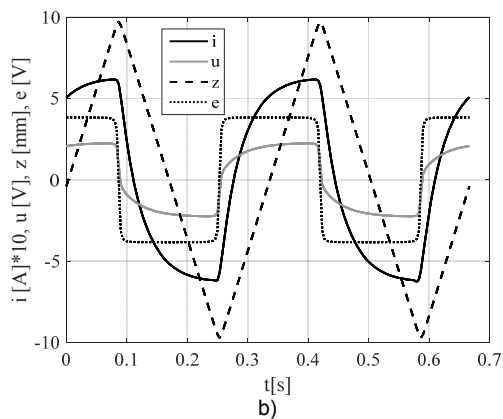
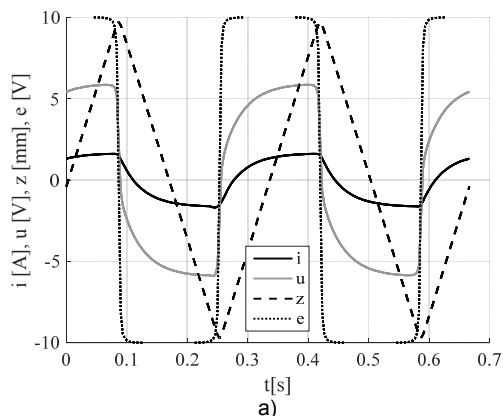
Jeśli założyć, że dopuszczalna średnia wartość siły zaczepowej nie może przekraczać $|100|$ N, to wariant W1 jest korzystniejszy.

Analizę harvestera w stanie jałowym i obciążenia cewką sterującą tłumika MR przeprowadzono wykorzystując pakiet MATLAB. Do obliczeń przyjęto następujące wartości parametrów: oporność i indukcyjność cewki harvestera odpowiednio 2.4 Ω i indukcyjność 0.14 H oraz oporność i indukcyjność cewki sterującej tłumika MR odpowiednio 3.6 Ω i 0.07 H. Wymuszeniem w jednooczkowym obwodzie jest napięcie indukowane w cewce harvestera. Wybrane wyniki

obliczeń przedstawiono na Rys. 5-8. Rys. 5 i 6 obrazują przebiegi napięcia i prądu w cewce sterującej tłumika MR przy trójkątnym i sinusoidalnym przemieszczeniu układu magnesów o amplitudzie $A=10$ mm i częstotliwości $f=3$ Hz dla wariantu W1 i W2. Porównując przebiegi wielkości można stwierdzić, że dla przyjętych założeń wariant W1 jest korzystniejszy.



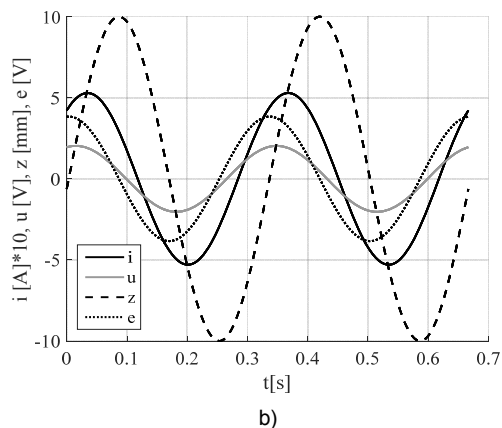
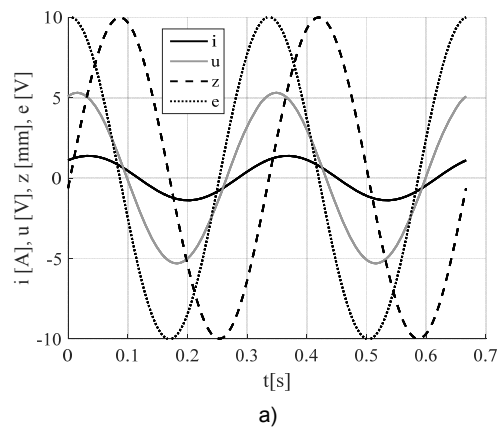
Rys. 4. Zależność siły zaczepowej od przemieszczenia



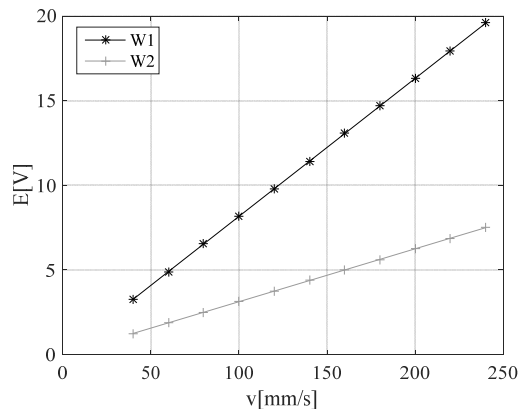
Rys. 5. Przebiegi czasowe siły elektromotorycznej, napięcia i prądu: a) wariant W1, b) wariant W2; przemieszczenie trójkątne ($A=10$ mm, $f=3$ Hz)

Pokazana na Rys. 7 dla tych dla wariantów zależność wartości skutecznej siły elektromotorycznej E od prędkości v również wskazuje na wariant W1.

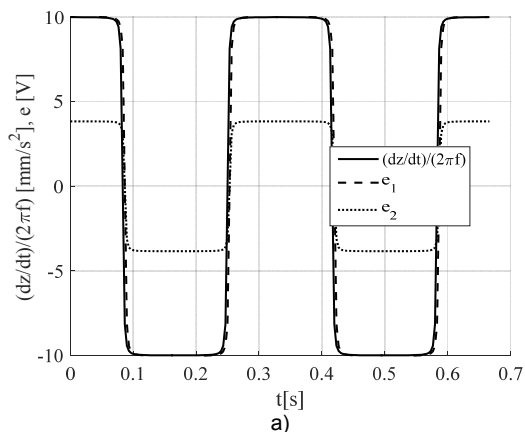
Na Rys. 8 zamieszczono przebiegi czasowe siły elektromotorycznej e_1 (wariant W1), e_2 (wariant W2) i obliczoną wielkość $v/(2\pi f)$ (proporcjonalną do prędkości) przy sinusoidalnym przemieszczeniu układu magnesów o amplitudzie $A=10$ mm i częstotliwości $f=3$ Hz. Ta wielkość pokazuje możliwość odtwarzania sygnału prędkości z sygnału siły elektromotorycznej.

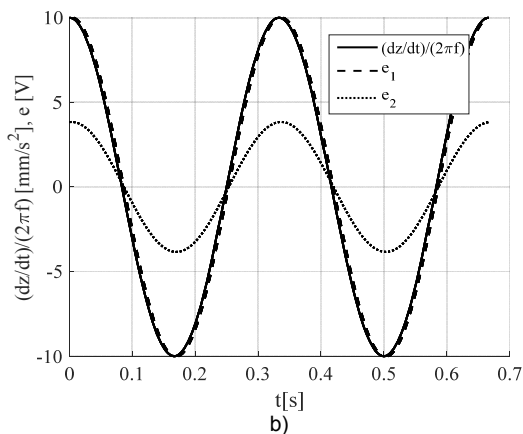


Rys. 6. Przebiegi czasowe siły elektromotorycznej, napięcia i prądu: a) wariant W1, b) wariant W2; przemieszczenie sinusoidalne ($A=10$ mm, $f=3$ Hz)



Rys. 7. Zależność siły elektromotorycznej od prędkości





Rys. 8. Przebiegi czasowe prędkości i siły elektromotorycznej; a) przemieszczenie trójkątne, b) przemieszczenie sinusoidalne; $A=10$ mm, $f=3$ Hz

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki obliczeń połowych i obwodowych harwestera. Analizowano dwa warianty urządzenia W1 i W2, które różnią się połączeniem cewek.

Uzyskane wyniki wskazują na wariant W1 harwestera. Z punktu widzenia aplikacji harwestera (semiaktywny układ redukcji drgań z funkcją odzysku energii), ten wariant wykazuje zadowalający poziom siły elektromotorycznej oraz akceptowalny poziom siły zaczepowej. Alternatywnym rozwiązaniem mogłaby być zmiana struktury magnetowodu np. przez użycie pakietu blachowanego klasycznego lub amorficznego albo też spieku magnetodielektrycznego.

Proporcjonalna zależność siły elektromotorycznej od prędkości stwarza możliwość wykorzystania analizowanego harwestera jako czujnika prędkości w semiaktywnym układzie redukcji z funkcją odzysku energii.

Wyniki obliczeń harwestera będą zweryfikowane w jego badaniach laboratoryjnych.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr 15.11.130.184.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Bogdan Sapiński, AGH, Katedra Automatykacji Procesów, E-mail: deep@agh.edu.pl, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; dr inż. Andrzej Matras, AGH, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Przetwarzania Energii, E-mail: matras@agh.edu.pl, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

LITERATURA

- [1] Chen C., Liao W. H.: A self-sensing magnetorheological damper with power generation. *Smart Materials and Structures*, **21**, 025014, 2012.
- [2] Jung H. J., Jang D. D., Koo J. H., Cho S. W.: Experimental Evaluation of a 'Self-Sensing Capability of an Electromagnetic Induction System Designed for MR Dampers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. Vol. 21, 837-836, 2010.
- [3] Kaleta J.: Materiały Magnetyczne SMART: budowa, wytwarzanie, badanie właściwości, zastosowanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2013.
- [4] Sapiński B.: Vibration power generator for a linear MR damper. *Smart Materials and Structures*, **19**, 105062, 2010.
- [5] Sapiński B.: Experimental study of a self-powered and sensing MR damper-based vibration control system. *Smart Materials and Structures*, **20**, 105007, 2011.
- [6] Sapiński B., Krupa S., Matras A. Siła zaczepowa w elektromechanicznym przetworniku drgań. *Przegląd Elektrotechniczny*, R88, NR 12a, 84-87, 2012
- [7] Sapiński B., Rosół M., Węgrzynowski M.: Investigation of an energy harvesting MR damper in a vibration control system, *Smart Materials and Structures*, **25**, 125017, 2016.
- [8] Sapiński B., Rosół M., Węgrzynowski M.: Evaluation of an energy harvesting MR damper-based vibration reduction system. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **54**, 2, 333-344, 2016.
- [9] Wang D. H., Bai X. X., Liao W. H.: An integrated relative displacement self-sensing magnetorheological damper: prototyping and testing. *Smart Materials and Structures*, **19**, 105008, 2010
- [10] Wang D. H., Bai X. X.: A magnetorheological damper with an integrated self-powered displacement sensor. *Smart Materials and Structures*, **22**, 075001, 2013.
- [11] Zhu S. Y., Shen W. A., Xu Y. L., Lee W. C.: Linear electromagnetic devices for vibration damping and energy harvesting: Modeling and testing, *Engineering Structures*, **34**, 198-212, 2012
- [12] Opera-2d version 14R1, User Guide, Cobham Technical Services, Vector Fields Software, 2011.