

## Modelowanie układu magnetostrykcyjnego do pozyskiwania energii opartego na stopie Galfenolu

Marek Borowiec<sup>1</sup>, Jarosław Gawryluk<sup>1</sup>, Dominika Wiśnios<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Lubelska

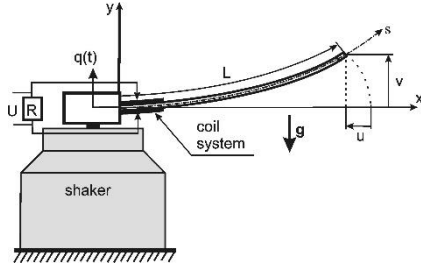
email: m.borowiec@pollub.pl, j.gawryluk@pollub.pl, dominika.wisnios@pollub.edu.pl

**STRESZCZENIE:** W artykule analizowano model wspornikowej belki magnetostrykcyjnej (MsM). Jako materiał (MsM) przyjęto Galfenol, stop zawierający gal i żelazo. Obciążony układ belki pod wpływem zewnętrznego wymuszenia wytwarza pole magnetyczne w wyniku powstających maksymalnych naprężeń na zewnętrznych włóknach belki. Stosując układ cewek zewnętrznych, istnieje możliwość pozyskiwania energii elektrycznej podczas drgań belki. Głównym celem analizy było zbadanie wpływu położenia osi neutralnej belki na wydajność w pozyskiwaniu energii. W przypadku, gdy oś neutralna pokrywa się z osią symetrii belki magnetostrykcyjnej, pola magnetyczne znoszą się wzajemnie, mimo występowania naprężeń. Efekt ten zanika, gdy oś neutralna zostaje przesunięta poza oś symetrii belki MsM. Oszacowano wpływ amplitudy drgań odpowiedzi belki na wyjściową energię elektryczną pozyskaną z układu, przy zwiększonej grubości efektywnej warstwy magnetostrykcyjnej (MsM). Analiza została przeprowadzona w pobliżu pierwszej częstotliwości rezonansowej, gdzie napięcie wyjściowe osiągnęło maksymalne wartości.

**SŁOWA KLUCZOWE:** materiał magnetostrykcyjny, pozyskiwanie energii, drgania mechaniczne

### 1. Wprowadzenie

Analiza systemu pozyskiwania energii obejmowała symulacje numeryczne. Moc wyjściowa została obliczona, gdy drgania belki obejmowały strefę pierwszego rezonansu pod wpływem pionowej siły wymuszającej harmonicznej (rys. 1).



Rys. 1. Model belki wspornikowej uwzględniający jej poziome i pionowe przemieszczenia oznaczone odpowiednio jako  $v$  i  $u$ .

Sprężony model elektromechaniczny składa się z belki MsM oraz układu cewki. Model numeryczny został wyprowadzony za pomocą metody Lagrange'a [1, 2, 3, 4] i jest przedstawiony w równaniach (1):

$$\begin{aligned} & \left[ \rho AN_1 + \frac{1}{12} \rho Ah^2 N_4 + \left( \rho AN_3 + \frac{1}{12} \rho Ah^2 N_9 \right) v^2 \right] \frac{d^2 v}{dt^2} \\ & + \left( \rho AN_3 + \frac{1}{12} \rho Ah^2 N_9 \right) \frac{dv^2}{dt} v + \beta \frac{dv}{dt} \\ & + EIN_6 + Gi = -\rho AN_2 \frac{d^2 q}{dt^2} \end{aligned} \quad (1)$$

$$L \frac{di}{dt} - G \frac{dv}{dt} + Ri = 0$$

W równaniach (1)  $A$  oznacza pole przekroju belki,  $\rho$  to gęstość materiału,  $h$  to grubość obu belek,  $\beta$  to współczynnik tłumienia,  $EI = E_M I_M + E_s I_s$  oznacza moduł Younga oraz momenty bezwładności obszaru dla belek MsM i podstruktury.  $L$  oznacza indukcyjność cewki i jest związane z cewką odbiorczą wokół belki MsM.  $R$  stanowi rezystancję obciążenia,  $q(t)$  to pionowe wymuszenie układu,  $N_i$  są to stałe występujące wynikające z całkowania, które zależą od przyjętej funkcji kształtu belki oraz  $G$  stanowi współczynnik sprzężenia (równanie 3).

$$G = \frac{E_M A_M h_M N d}{l} \int_0^l \psi''(s) ds \quad (2)$$

Parametry układu zastosowane w analizie są wymienione w tabeli 1.

Tabela 1. Stałe materiałowe

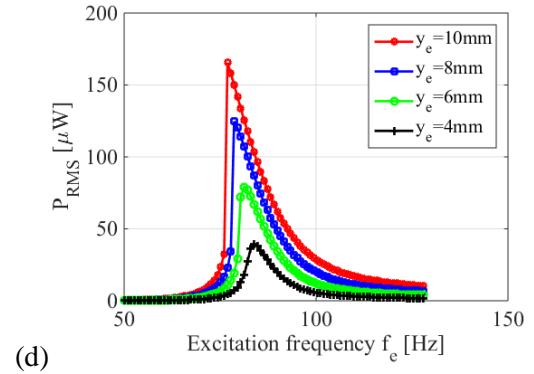
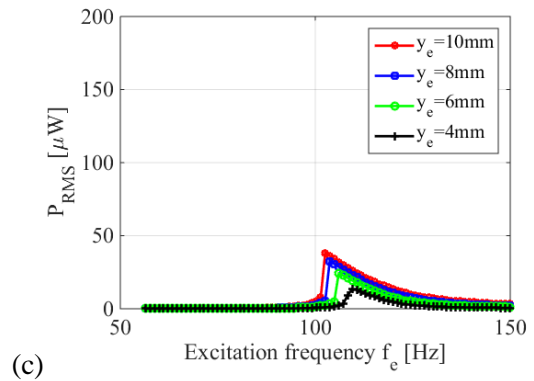
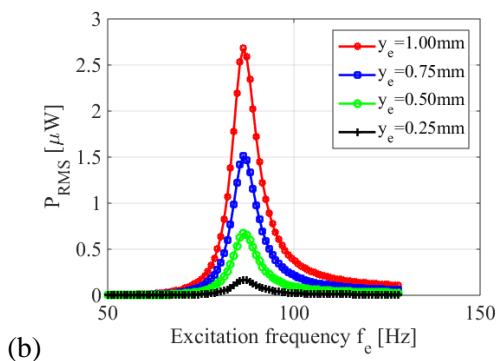
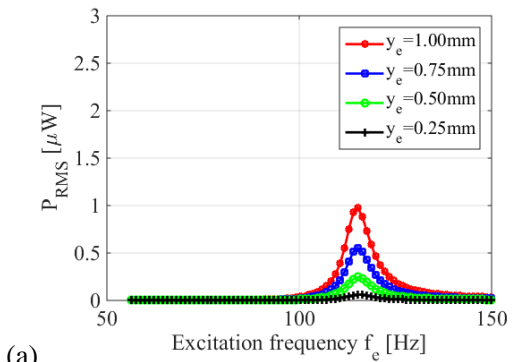
Symbol i wartość	Opis
$l=0.185 [m]$	Długość belki
$A=b \times h=72 [mm^2]$	Przekrój poprzeczny
$\rho=7864 [kg/m^3]$	Gęstość materiału
$E_M=40 [GPa]$	Moduł Younga MsM
$E_s=191 [GPa]$	Moduł Younga podkładu
$R=(5-2000) [\Omega]$	Rezystancja obc.
$L=352 [mH]$	Indukcyjność cewki
$N=3000$	Liczba zwoi cewki
$h_M=(1-5) [mm]$	Grubość MsM
$A_M=(12-60) [mm^2]$	Przekrój MsM
$d=1.5 \times 10^{-9} [m/A]$	Wsp. Magneto-mechan.
$G=(0.5-1.5) [N/A]$	Wsp. sprzężenia

## 2. Dyskusja wyników

Analiza wydajności pozyskiwania energii została przeprowadzona z uwzględnieniem różnych proporcji materiału MsM i podstruktury systemu. Na rysunkach 2a–d przedstawiono zachowanie systemu przy zmianach częstotliwości wymuszenia dla ośmiu różnych poziomów amplitudy wymuszenia. Pierwsze cztery amplitudy są stosunkowo małe (rys. 2a, b). W przypadku, gdy grubość warstwy MsM wynosi 1 mm, a podstruktury 5 mm (rys. 3a), próg mocy wyjściowej w zależności od amplitudy wymuszenia wynosi 6,33%, 25,32%, 56,77%, 100%. W przypadku odwrotnej proporcji grubości belek (rys. 2b) próg ten wynosi odpowiednio 6,26%, 25,06%, 56,35%, 100%.

W zakresie amplitudy wymuszenia dla belki wokół  $y_e = (0,25 - 1)$  mm, zachowanie mocy wyjściowej jest liniowe, mimo że równanie różniczkowe układu (1) zawiera nieliniowe składniki. Można to wyjaśnić sztywnością warstw belki. Jednak w przypadku, gdy amplituda wymuszenia wzrasta do  $y_e = 10$  mm, zachowanie systemu wykazuje asymetrię w odpowiedzi mocy na częstotliwość, jednocześnie zwiększając pozyskiwaną energię. Natomiast gdy wymuszenie rośnie dziesięciokrotnie, maksymalna moc wyjściowa wzrosła około czterdziestokrotnie z  $P = 0,98 \mu\text{W}$  do  $P = 38,33 \mu\text{W}$  w analizie pierwszej proporcji belek (rys. 2a i 2c) oraz odpowiednio około sześćdziesięciokrotnie z  $P = 2,68 \mu\text{W}$  do  $P = 165,43 \mu\text{W}$  w przypadku drugiej proporcji belek (rys. 3b i 3d). Ponadto, przy wyższych wartościach amplitudy wymuszenia  $y_e = (4 - 10)$  mm, system wykazuje, że punkt rezonansowy częstotliwości wymuszenia przesuwa się w lewo w obu przypadkach proporcji grubości belek.

Porównując poziomy uzyskanej mocy, wartości  $P_{\text{RMS}}$  są znacznie wyższe w drugim przypadku przedstawionym na rys. 2b i 2d. Taka odpowiedź systemu sugeruje, że zwiększenie grubości warstwy MsM w stosunku do podstruktury powoduje wzrost ilości energii pozyskiwanej przez system.



Rys. 2. Wartość skuteczna pozyskiwanej mocy przy optymalnych rezystancjach obciążenia  $R_{\text{opt}}$  w pobliżu strefy pierwszego rezonansu. Grubość warstwy MsM i podstruktury wynosi odpowiednio 1mm i 5mm (przypadek a, c) oraz odwrotnie, 5 mm i 1 mm (przypadek b, d).

## 3. Podsumowanie

- 1) Wpływ momentów zginających powoduje istotny wpływ na pojawiające się naprężenia w belce magnetostrykcyjnej.
- 2) Stosowanie zmiennych proporcji grubości belek magnetostrykcyjnej i podstruktury powoduje zauważalne przesunięcie osi neutralnej względem symetrii belki MsM co istotnie wpływa na efektywność pozyskiwania energii elektrycznej.
- 3) Ponadto, zaobserwowano niewielkie przesunięcie punktu rezonansowego przy odpowiednim zwiększeniu amplitudy wymuszenia.

Praca została wykonana w ramach grantu Nr M/KMS/FD-20/IM-5/011, finansowanego przez Politechnikę Lubelską.

## Literatura

- [1] M.I. Friswell, A.S. Faruque, O. Bilgen, S. Adhikari, A. Lees and G. Litak: "Non-linear piezoelectric vibration energy harvesting from a vertical cantilever beam with tip mass", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. vol. 23(13), pp. 1505-1512, 2012.
- [2] M. Borowiec, G. Litak, M.I. Friswell, A.S. Faruque, S. Adhikari, A. Lees and O. Bilgen: "Energy harvesting in piezoelectric systems driven by random excitation". *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. vol. 13 No. 7, pp. 1340006:1–1340006:11, 2013.
- [3] M. Borowiec: "Energy harvesting of cantilever beam system with linear and nonlinear piezoelectric model". *The European Physical Journal ST*. vol. 224, pp. 2771–2785, 2015.
- [4] M. Borowiec: "Energy Harvesting Optimizing with a Magnetostrictive Cantilever Beam System". *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. vol. 19, no. 5 pp. 1941002 (19 pages), 2019.
- [5] L. Wang and F.G. Yuan: "Vibration energy harvesting by magnetostrictive material", *Smart Mater. Struct.* 17 045009 (14pp), 2008.