

MODELOWANIE BELKI Z CIECZĄ MAGNETOREOLOGICZNĄ METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

JACEK SNAMINA, BOGDAN SAPIŃSKI, MATEUSZ ROMASZKO

*Katedra Automatykacji Procesów, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
e-mail: snamina@agh.edu.pl, deep@agh.edu.pl, matek@agh.edu.pl*

Streszczenie. Artykuł dotyczy modelowania belki trójwarstwowej metodą elementów skończonych (MES). Belka składa się z dwóch zewnętrznych warstw aluminiowych oraz warstwy wewnętrznej, którą stanowi ciecz MR uszczelniona gumą silikonową. Przedstawiono budowę, model MES oraz wyniki obliczeń belki w środowisku ANSYS. Określono wpływ parametrów przyjętego modelu struktury reologicznej cieczy MR, grubości warstwy cieczy MR oraz położenia strefy oddziaływania pola magnetycznego na częstotliwość i bezwymiarowy współczynnik tłumienia drgań belki.

1. WSTĘP

Zagadnienie sterowania drganiami struktur elastycznych z wykorzystaniem cieczy typu "smart" jest przedmiotem zainteresowań badaczy od początku lat 90. ubiegłego wieku. W literaturze większość raportów na ten temat dotyczy badań struktur belkowych i płytowych, w których pomiędzy sprężyste warstwy wprowadzono ciecz elektoreologiczną (ER). Mniej jest raportów o podobnych zastosowaniach cieczy MR (wyjątek stanowi belka wspornikowa [1, 2, 5, 7, 8, 9]).

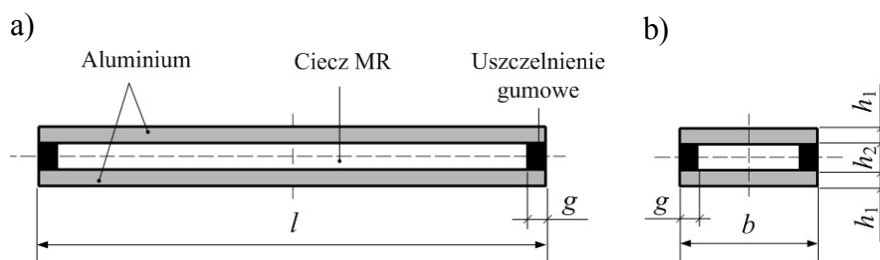
Struktury z cieciami ER/MR charakteryzują się tym, że na ich zachowanie można wpływać polem elektrycznym/magnetycznym, które aktywuje znajdującą się w nich ciecz. W wyniku oddziaływania pola zmieniają się charakterystyki sztywności i tłumienia tych struktur, co umożliwia redukcję drgań [6].

Obiektem badań, prowadzonych obecnie przez autorów pracy, jest trójwarstwowa belka wspornikowa, w której pomiędzy dwiema warstwami sprężystymi znajduje się warstwa cieczy MR. Celem tych badań jest redukcja drgań poprzecznych belki przez oddziaływanie polem magnetycznym.

W artykule przedstawiono model trójwarstwowej belki z cieczą MR. Elementy skończone realizujące własności reologiczne modelu Kelvina-Voigta oraz zmodyfikowanego modelu Bingham'a zostały wykorzystane do modelowania cieczy MR. Model zbudowano dla potrzeb testowania algorytmów sterowania drganiami belki.

2. BUDOWA BELKI

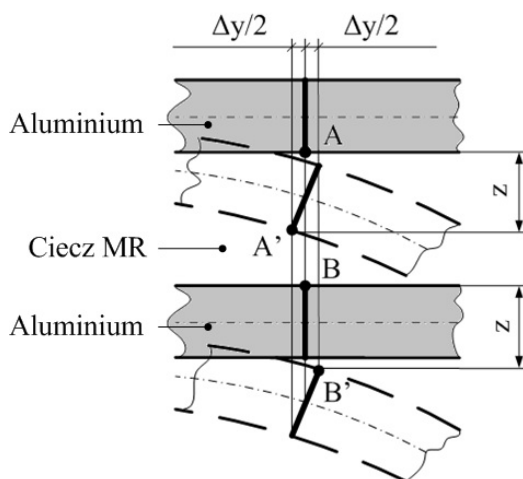
Budowę belki przedstawiono na rys. 1. Belkę tworzą dwie równoległe warstwy aluminiowe o długości $l=400$ mm, grubości $h_1=2$ mm i szerokości $b=30$ mm każda. Przestrzeń między obiema warstwami uszczelniono gumą silikonową o szerokości $g=1.5$ mm i wysokości $h_2=2$ mm. Wnętrze belki wypełniono cieczą MR typu 140CG firmy Lord Corporation [10]. Przyjęto, że wysokość warstwy cieczy MR jest równa wysokości uszczelnienia gumowego h_2 .



Rys. 1. Budowa belki: a) przekrój wzdłużny, b) przekrój poprzeczny

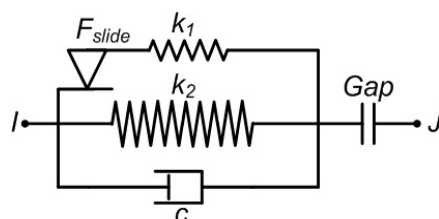
3. MODEL BELKI

Model belki opracowano w środowisku ANSYS. W pierwszym etapie zamodelowano równoległe warstwy aluminiowe wykorzystując elementy skończone typu `solid45` o wymiarach $1 \times 1.5 \times 2$ mm. Elementy skończone typu `solid185` o wymiarach $1 \times 1.5 \times 2$ mm posłużyły do zamodelowania uszczelnienia gumowego. Założono, że warstwa cieczy MR jest ścinana. W związku z tym, odpowiadające sobie przekroje poprzeczne warstw aluminiowych (rys. 2) powinny mieć takie same przemieszczenia poprzeczne z [4]. Zgodnie z hipotezą Bernoullego przekroje prostopadłe do osi pozostają płaskie i prostopadłe również po odkształceniu belki. Wskutek zginania przekroje doznają obrotu i odpowiadające sobie punkty A, B na powierzchniach ograniczających warstwę MR zajmują nowe położenie określone przez A', B'. Oprócz przemieszczenia poprzecznego z punkty ulegają przemieszczeniu wzdłużnemu $\Delta y/2$ o przeciwnych zwrotach.

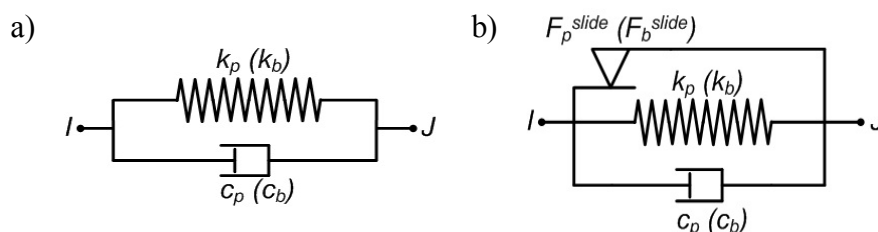


Rys. 2. Przesunięcie wybranego przekroju belki

Przy modelowaniu warstwy cieczy MR wprowadzono dyskretyzację i wykorzystano element skończony combin40 (rys. 3), który po odpowiednim doborze parametrów realizuje postać modelu Kelvina-Voigta (rys. 4a) lub zmodyfikowanego modelu Bingham'a (rys. 4b). Przyjęto następujące oznaczenia: k_p, k_b – współczynniki sztywności sprężyn w modelu cieczy MR odpowiednio przy braku pola magnetycznego oraz w obecności pola magnetycznego; c_p, c_b – współczynniki tłumienia w modelu cieczy MR przy braku pola magnetycznego oraz w obecności pola magnetycznym; F_p^{slide}, F_b^{slide} – siły tarcia w modelu cieczy MR przy braku pola magnetycznego oraz w polu magnetycznym. Ostatnim etapem budowy modelu belki było umieszczenie elementów węzłów combin40 pomiędzy odpowiednimi węzłami górnej i dolnej warstwy aluminiowej. Zbadano drgania belki uwzględniając dwa warianty zamocowania – jednostronne utwierdzenie (rys. 5a) i dwustronne utwierdzenie (rys. 5b).

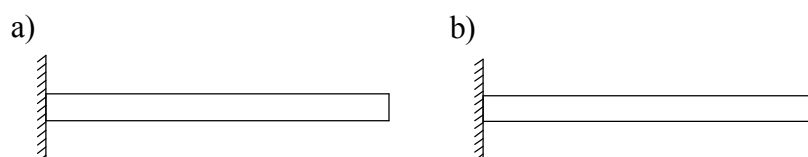


Rys. 3. Element skończony combin40



Rys. 4. Modele reologiczne cieczy MR:

a) model Kelvina-Voigta, b) zmodyfikowany model Bingham'a



Rys. 5. Warianty zamocowania belki:

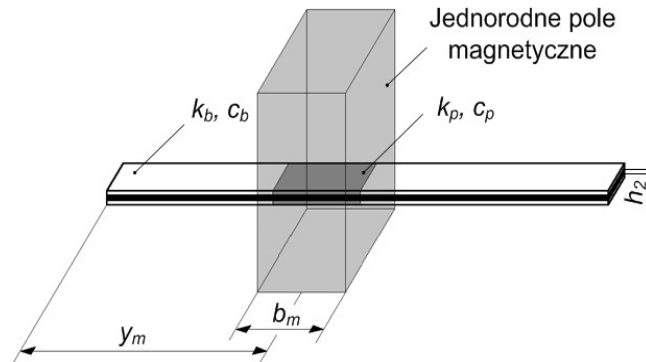
a) jednostronne utwierdzenie, b) dwustronne utwierdzenie

4. OBLICZENIA NUMERYCZNE

Obliczenia przeprowadzono dla przyjętych modeli belek w szczególności zbadano wpływ parametrów k_p i c_p modelu Kelvina-Voigta, wysokości h_2 warstwy cieczy MR i położenia strefy oddziaływania pola magnetycznego na częstotliwość drgań własnych f i bezwymiarowy współczynnik tłumienia ζ . W ostatnim etapie zbadano wpływ wyboru modelu cieczy MR na drgania belki.

Schemat miejscowego oddziaływania jednorodnego pola magnetycznego na belkę z cieczą MR pokazano na rys. 6. Położenie tej strefy wyznacza parametr y_m , który jest odległością mierzoną od utwierdzenia belki do środka strefy o szerokości $b_m=80$ mm. Własności cieczy

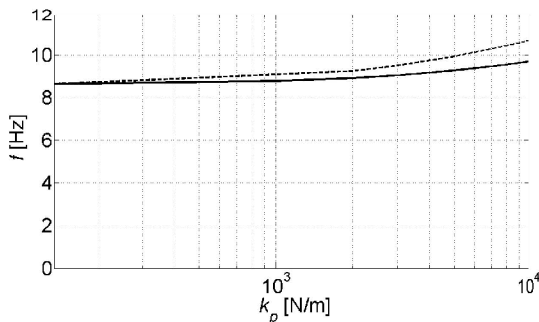
MR znajdujące się w polu magnetycznym określają parametry k_p i c_p . Parametry k_b i c_b określają własności cieczy bez pola magnetycznego. Obliczenia przeprowadzono, przyjmując: że $k_b=135$ N/m, $c_b=0.001$ N·s/m, $k_p=2162$ N/m i $c_p=21.1$ N·s/m [3].



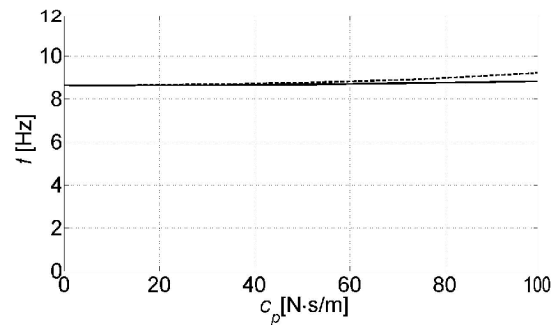
Rys. 6. Położenie strefy oddziaływania pola magnetycznego na belkę

4.1. Wpływ parametrów modelu Kelvina-Voigta na drgania belki

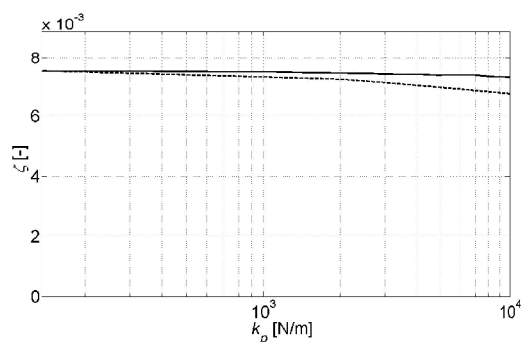
Wyniki badań numerycznych dotyczące wpływu parametrów k_p i c_p na częstotliwość drgań własnych i bezwymiarowy współczynnik tłumienia. Wyniki dla $y_m=80$ mm (linia ciągła) i $y_m=140$ mm (linia przerywana) przedstawiono na rys. 7–10. Zwiększenie sztywności k_p powoduje zwiększenie częstotliwości drgań własnych f (rys. 7) i zmniejszenie wartości bezwymiarowego współczynnika tłumienia ζ (rys. 9). Dla $y_m=140$ mm zakres zmian częstotliwości i bezwymiarowego współczynnika tłumienia jest większy niż dla $y_m=80$ mm. W przypadku zwiększenia tłumienia c_p zaobserwowano niewielkie zwiększenie częstotliwości (rys. 8) i znaczny wzrost bezwymiarowego współczynnika tłumienia (rys. 10). Analogicznie jak w poprzednim przypadku dla $y_m=140$ mm zakres zmian częstotliwości i bezwymiarowego współczynnika tłumienia jest większy niż dla $y_m=80$ mm.



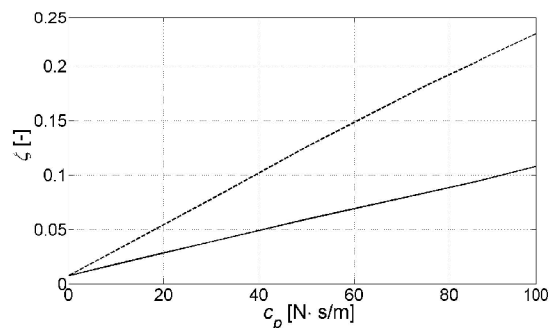
Rys. 7. Zależność częstotliwości od parametru k_p dla $c_p=0.001$ N·s/m



Rys. 8. Zależność częstotliwości od parametru c_p dla $k_p=135$ N/m



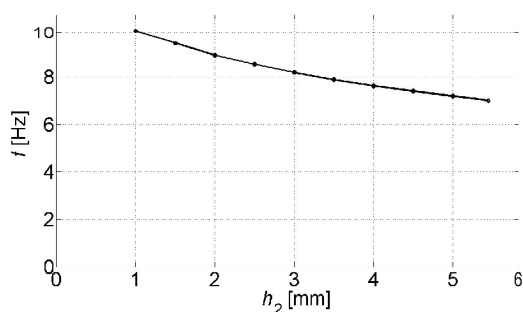
Rys. 9. Zależność bezwymiarowego współczynnika tłumienia od parametru k_p dla $c_p=0.001\text{N}\cdot\text{s/m}$



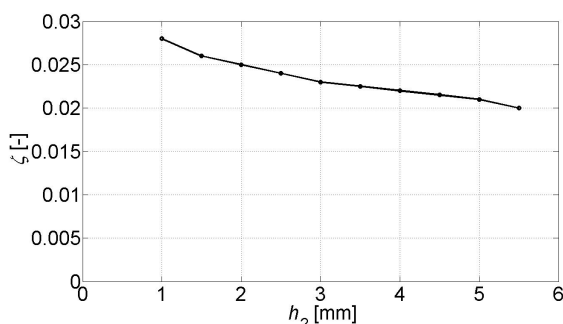
Rys. 10. Zależność bezwymiarowego współczynnika tłumienia od parametru c_p dla $k_p=135\text{N/m}$

4.2. Wpływ wysokości warstwy cieczy MR na drgania belki

W drugim etapie zbadano wpływ wysokości h_2 warstwy cieczy MR na częstotliwość drgań własnych i bezwymiarowy współczynnik tłumienia. Wysokość warstwy MR (wraz z wysokością uszczelnienia gumowego) zmieniano od 1 do 5.5 mm z krokiem 0.5 mm, zachowując bez zmian pozostałe wymiary geometryczne belki. Wyniki pokazano na rys. 11 i 12. Zwiększenie wysokości h_2 warstwy cieczy MR powoduje zmniejszenie wartości częstotliwości i bezwymiarowego współczynnika tłumienia. Spowodowane jest to między innymi zwiększoną masą cieczy MR, w wyniku zwiększania objętości warstwy MR.



Rys. 11. Zależność częstotliwości od wysokości warstwy cieczy MR



Rys. 12. Zależność bezwymiarowego współczynnika tłumienia od wysokości warstwy cieczy MR

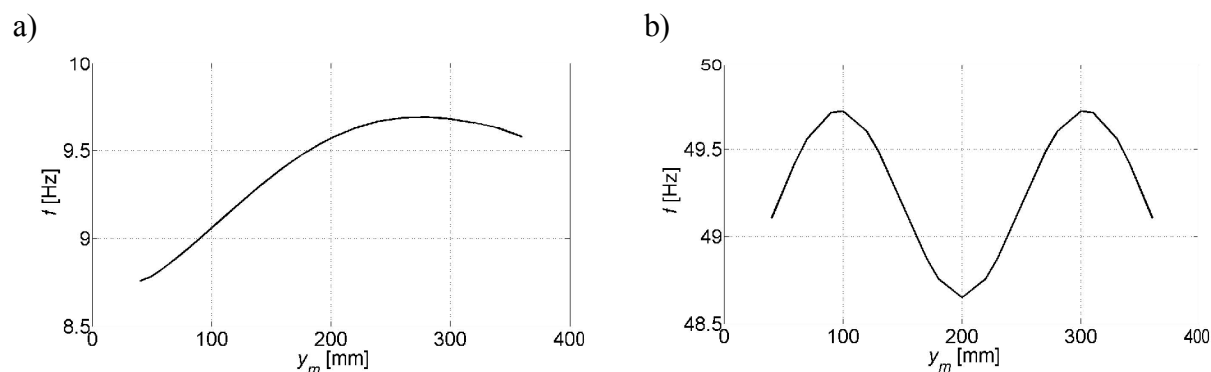
4.3. Wpływ położenia strefy oddziaływania pola magnetycznego na drgania belki

W trzecim etapie analizowano wpływ położenia strefy oddziaływania pola magnetycznego (rys. 6) na częstotliwość drgań własnych i bezwymiarowy współczynnik tłumienia. Analizowano model belki jednostronnie utwierdzonej (rys. 5a) z cieczą MR i model belki dwustronnie utwierdzonej (rys. 5b). W przypadku belki wspornikowej wartość y_m zmieniano od 40 mm (pole położone przy lewym utwierdzeniu), do 360 mm (pole oddziaływające na wolny koniec belki) z krokiem 10 mm. Dla belki dwustronnie utwierdzonej, ze względu na symetrię, y_m zmieniano od 40 mm do 200 mm również z krokiem 10 mm. Wyniki przedstawiono na rys. 13 i 14.

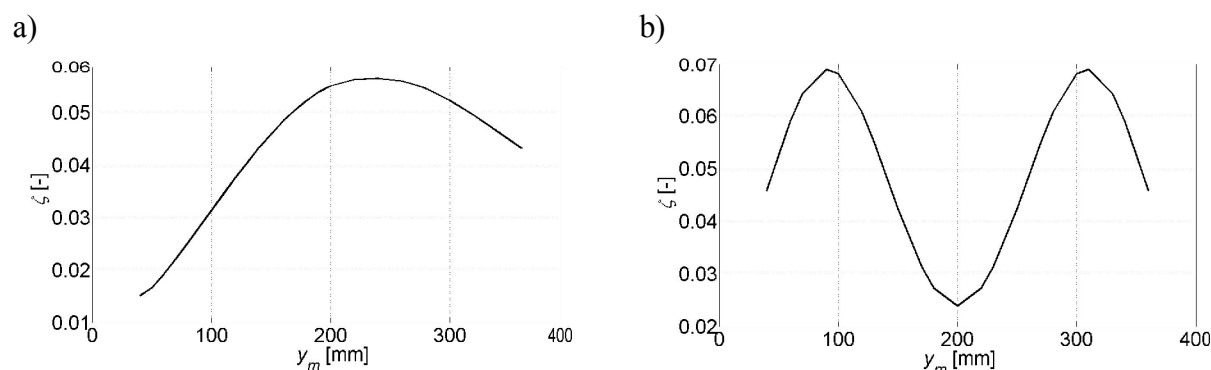
W przypadku belki wspornikowej (rys. 13a) położenie strefy oddziaływania pola magnetycznego w odległości $y_m=290$ mm od utwierdzenia prowadzi do uzyskania największej

częstotliwość drgań własnych f . Położenie strefy oddziaływania pola magnetycznego w połowie długości belki dwustronnie utwierdzonej (rys. 13b) prowadzi do uzyskania najmniejszej częstotliwości f . Największą częstotliwość osiągnięto w przypadku umieszczenia strefy w odległości $y_m=100$ mm i $y_m=300$ mm.

Podobny charakter mają zależności bezwymiarowego współczynnika tłumienia ζ od y_m (rys. 14a, b).



Rys. 13. Zależność częstotliwości od położenia strefy oddziaływania pola magnetycznego: a) utwierdzenie jednostronne, b) utwierdzenie dwustronnie



Rys. 14. Zależność bezwymiarowego współczynnika tłumienia od położenia strefy oddziaływania pola magnetycznego: a) utwierdzenie jednostronne, b) utwierdzenie dwustronnie

4.4. Wpływ wyboru modelu cieczy MR na drgania belki

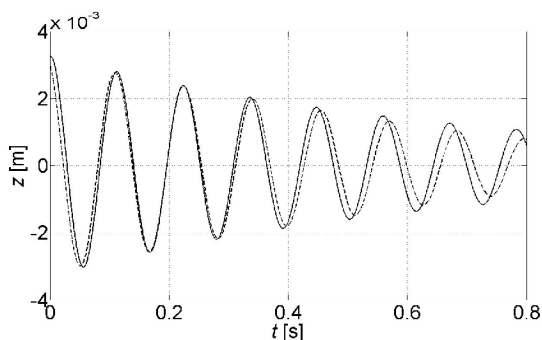
W czwartym etapie zbadano wpływ modelu cieczy na charakter i parametry drgań belki. Obliczenia przeprowadzono dla parametrów przedstawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry modelu

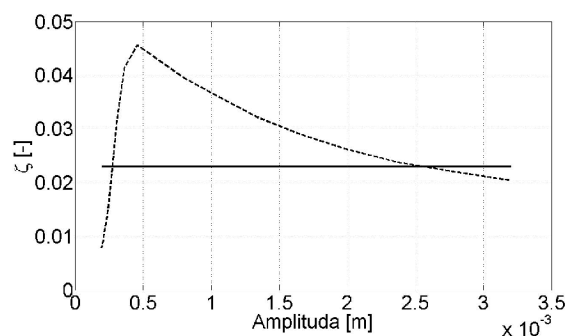
Model Kelvina-Voigta	Zmodyfikowany model Binghama
$k_b=135$ N/m, $c_b=0.001$ N·s/m, $k_p=2162$ N/m, $c_p=21.1$ N·s/m	$F_b^{slide} = 82 \cdot 10^{-8}$ N, $k_b=95.5$ N/m, $c_b=0.0005$ N·s/m, $F_p^{slide} = 0.006$ N, $k_p=650$ N/m, $c_p=1.0$ N·s/m

Wybrane wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 15 i 16. Linią ciągłą oznaczono wyniki obliczeń przy wykorzystaniu modelu Kelvina-Voigta, a linią przerywaną zmodyfikowanego modelu Bingham. Na rys. 15 pokazano zależność przemieszczenia końca belki od czasu dla pierwszej formy drgań własnych ($y_m=80$ mm). Zależność bezwymiarowego współczynnika tłumienia ζ od amplitudy pokazano na rys. 16.

W przypadku modelu Kelvina-Voigta wartość bezwymiarowego współczynnika tłumienia jest stała i równa 0.023. Zastosowanie zmodyfikowanego modelu Bingham powoduje, że bezwymiarowy współczynnik tłumienia jest funkcją amplitudy. Największa wartość współczynnika ($\zeta=0.046$) występuje dla amplitudy 0.5 mm.



Rys. 15. Zależność przemieszczenia końca belki od czasu



Rys. 16. Zależność bezwymiarowego współczynnika tłumienia od amplitudy

5. WNIOSKI

W obliczeniach zastosowano dwa modele cieczy MR: model Kelvina-Voigta oraz zmodyfikowany model Bingham. Celem obliczeń było określenie wpływu parametrów modelu układu, w szczególności parametrów modelu cieczy MR na drgania własne belki. Wyniki obliczeń wskazują na znaczny wpływ modelu cieczy MR na charakter i parametry drgań belki. Bezwymiarowy współczynnik tłumienia drgań wyznaczony na podstawie zmodyfikowanego modelu Bingham wykazuje wyraźną zależność od amplitudy. Tłumienie drgań jest silnie związane z położeniem strefy oddziaływania pola magnetycznego na belkę. Można wyznaczyć położenie strefy, dla której tłumienie jest maksymalne. Częstość drgań własnych i bezwymiarowy współczynnik tłumienia drgań ulegają zmianie w wyniku zmian parametrów c_p , c_b , k_p , k_b modelu cieczy. Funkcje opisujące te zmiany nie posiadają ekstremów wewnątrz rozważanych w pracy przedziałów zmienności parametrów.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr N501 223337.

LITERATURA

1. Harland N. R., Mace B. R., Jones R. W.: Adaptive-passive control of vibration transmission in beams using electro/magnetorheological fluid filled inserts. IEEE Transactions Control Systems Technology, Vol. 9, 209–220, 2001.
2. Lara-Prieto V., Parkin R., Jackson M., Sibers Schmidt V., Kęsy Z.: Vibration characteristics of MR cantilever sandwich beams experimental study. "Smart Materials and Structures" Vol. 19, 1–9, 2010.

3. Sapiński B., Snamina J., Romaszko M.: Identification of model parameters of a sandwich beam incorporating magnetorheological fluid. "Vibration in Physical Systems" Poznań-Będlewo, Vol. 24, 349-354, 2010.
4. Sapiński B., Snamina J.: Modeling of an adaptive beam with MR fluid." Solid State Phenomena" Vols. 147-149, 831-838, 2009.
5. Sun Q., Zhou J. X., Zhang L.: An adaptive beam model and dynamic characteristics of magnetorheological materials. "Journal of Sound and Vibration" Vol. 261, 465-81, 2003.
6. US Patent 5547049 Magnetorheological Fluid Composite Structure.
7. Yalcinıtas M., Dai H.: Vibration suppression capabilities of magneto-rheological materials based adaptive structures. "Smart Materials and Structures" Vol. 13, 1-11, 2004.
8. Yalcinıtas M., Dai H.: Magnetorheological and electrorheological materials in adaptive structures and their performance comparison. "Smart Materials and Structures" Vol. 8, 560-73, 1999.
9. Yeh, Z. F. Shih Y. S.: Dynamic characteristics and dynamic instability of magnetorheological based adaptive beams. "Journal of Composite Materials" Vol. 40, 1333-59, 2006.
10. <http://www.lord.com/>

MODELING OF A SANDWICH BEAM INCORPORATING MAGNETORHEOLOGICAL FLUID USING FE METHOD

Summary. A three-layered beam incorporating a magnetorheological (MR) fluid is modeled using the FEM approach in the ANSYS environment. The beam consists of two outer layers made of aluminium and a MR fluid layer placed in between. The MR fluid is sealed with silicone rubber. Structure of the beam, finite element model and the results are presented. The study takes into account the influence of applied MR model, the thickness of the MR fluid layer and the location of magnetic field along the beam's length on beam's vibrations.