

Analiza siły wibroizolatora z cieczą magnetoreologiczną działającą w trybie ściskania

Streszczenie. W pracy przeprowadzono analizę siły wytwarzanej przez wibroizolator z cieczą magnetoreologiczną (MR) działającą w trybie ściskania w stanach quasi-statycznych. Opisano budowę wibroizolatora i model ściskania cienkiej warstwy cieczy MR. Wyznaczono charakterystyki wibroizolatora. Te charakterystyki obrazują przebiegi czasowe siły wibroizolatora i jej składowych oraz zależności siły od przemieszczenia i prędkości tłoka przy stałych wartościach natężenia prądu w cewce sterującej oraz sinusoidalnych przemieszczeniach tłoka.

Abstract. The study summarises the quasi-static analysis of the damping force generated by a vibration isolator with magnetorheological (MR) fluid in the squeeze mode. The isolator's structure is described and the model of a simple squeeze-film device is outlined. Force characteristics of the isolator were obtained, plotting, the time patterns of the force and its components determined under sine piston displacements and constant levels of input current in the control coil, as well as force-displacement and force-velocity loops. **Analysis of the force generated in a magnetorheological vibration isolator in the squeeze mode**

Słowa kluczowe: wibroizolator, ciecz MR, tryb ściskania, siła.

Keywords: vibroisolator, MR fluid, squeeze mode, force.

doi:10.12915/pe.2014.12.20

Wstęp

Obiektem rozważań jest wibroizolator z cieczą MR działającą w trybie ściskania [1, 2, 4, 5, 6, 10]. Urządzenie to, opracowywane przez autorów w ramach realizowanego projektu, ma pełnić rolę semiaktywnego elementu wykonawczego w zawieszeniu silnika samochodu [8].

Szczelina robocza w projektowanym wibroizolatorze ma zmienną wysokość, co odróżnia go od urządzeń z cieczą MR działających w trybie zaworowym i sprzęgłowym.

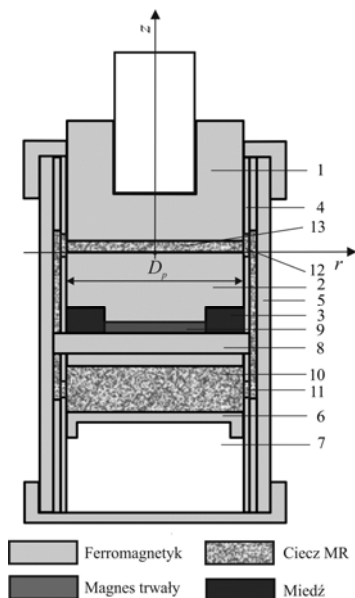
W pracy przeprowadzono analizę siły wibroizolatora w stanach quasi-statycznych. Celem analizy było wyznaczenie charakterystyk urządzenia. Charakterystyki te przedstawiają przebiegi czasowe siły i jej składowych przy sinusoidalnych przemieszczeniach tłoka i stałych wartościach natężenia prądu w cewce sterującej oraz zależności siły od przemieszczenia i prędkości tłoka.

cylindry, wewnętrzny (4) i zewnętrzny (5). Komora kompensacyjna (7), umieszczona współosiowo z rdzeniem (2), jest wypełniona sprężonym gazem. Tłok pływający (6) znajdujący się w komorze kompensacyjnej, rozdziela od gazu ciecz MR (10), przepływającą do/z komory. Szczelinę roboczą, o zmiennej wysokości, tworzą między sobą układ stacjonarnego rdzenia i ruchomego tłoka. Powierzchnia tłoka stanowi ruchomą podstawę, na której jest posadowiony zewnętrzny obiekt wibroizolowany, przemieszczający się wzdłuż osi z.

Rdzeń wibroizolatora znajdujący się na ruchomej podstawie (8) jest otoczony cewką sterującą (3). Strumień magnetyczny wytwarzany przez prąd w uzwojeniu cewki sterującej przepływa przez rdzeń, podstawę, cylinder zewnętrzny, tłok oraz szczelinę roboczą. Rdzeń wibroizolatora, może opcjonalnie zawierać spolaryzowany osiowo magnes trwały (9), który jest źródłem pola magnetycznego, niezależnego od zasilania zewnętrznego. Inne szczegóły dotyczące budowy i działania urządzenia podano w [7].

Model ściskania cieczy MR

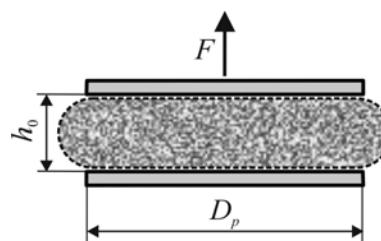
Podstawą do wyznaczenia charakterystyk wibroizolatora była analiza ściskania cienkiej warstwy cieczy MR [3]. Ta analiza odnosi się do fizycznej reprezentacji z Rys. 2. Ciecz znajduje się w szczelinie, utworzonej przez dwa równoległe nabiegunniki o średnicy D_p . Ścisnięcie cieczy powoduje jej wypływ w kierunku promieniowym. Minimalna grubość warstwy cieczy (minimalna odległość między nabiegunnikami) wynosi h_0 . Zmiana wysokości szczeliny następuje przez ruch (przemieszczenie) x nabiegunnika górnego (tłoka wibroizolatora).



Rys. 1. Schemat wibroizolatora

Budowa wibroizolatora

Schemat wibroizolatora pokazano na Rys. 1. Wyróżniono na nim główne elementy konstrukcyjne urządzenia i rodzaje zastosowanych materiałów konstrukcyjnych. Wibroizolator posiada dwa współosiowe



Rys. 2. Model ściskania cieczy MR

Zakłada się, że na ciecz MR działa wymuszenie, które jest kombinacją zewnętrznego wymuszenia kinematycznego

(przesunięcie nabiegownika) x oraz wymuszenia elektrycznego (natężenie prądu I płynącego w cewce sterującej). Biorąc pod uwagę budowę urządzenia (Rys. 1) i model (Rys. 2), siłę wibroizolatora można zapisać wzorem [9]:

$$(1) F = F_{\mu} + F_{\rho} + F_{\tau_0} + F_P$$

o następujących składowych:

$$(2) F_{\mu} = -\frac{3\pi\mu D_p^4}{32x^3}\dot{x}; \text{ siła lepkości cieczy,}$$

$$(3) F_{\rho} = -\frac{\pi\rho D_p^4}{32x}\ddot{x}\text{sign}(\dot{x}); \text{ siła bezwładności cieczy}$$

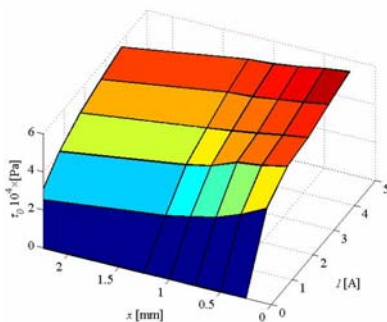
$$(4) F_{\tau_0} = -\frac{\pi D_p^3 \tau_0}{32x}\text{sign}(\dot{x}); \text{ siła od naprężeń granicznych cieczy,}$$

$$(5) F_P = \frac{\pi D_p^2}{4} P_0 \left(\frac{4V_0}{4V_0 + \pi D_p^2 x} \right)^n; \text{ siła od ciśnienia gazu.}$$

Parametry we wzorach (2)–(5) oznaczają: μ – lepkość cieczy, ρ – gęstość cieczy, τ_0 – naprężenie graniczne cieczy, D_p – średnicę nabiegownika, P_0 – ciśnienie początkowe gazu (przy $h_0 = \text{minh}$), V_0 – objętość początkową gazu, n – stałą przemiany adiabatycznej. Natomiast wielkości \dot{x} , \ddot{x} są odpowiednio prędkością i przyspieszeniem nabiegownika (tłoka).

Obliczenia

W wibroizolatorze będzie zastosowana ciecz MR o zawartości 26 % cząstek ferromagnetycznych, której lepkość wynosi $\mu=0.05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, a gęstość $\rho=2450 \text{ kg/m}^3$. Na podstawie charakterystyk reologicznych tej cieczy wyznaczono zależność naprężeń granicznych cieczy od natężenia prądu w cewce sterującej i przemieszczenia nabiegownika (tłoka) $\tau_0=f(x, I)$. Zależność tę przedstawiono na Rys. 3. Wartości pozostałych parametrów wynoszą: średnica nabiegownika $D_p=39 \text{ mm}$, ciśnienie początkowe gazu (przy h_0) $P_0=0.5 \text{ MPa}$, objętość początkowa gazu $V_0=23892 \text{ mm}^3$, stała przemiany adiabatycznej $n=1.4$.



Rys. 3. Zależność naprężenia granicznego τ_0 od przemieszczenia tłoka x i natężenia prądu I

Do obliczeń założono następującą postać przemieszczenia:

$$(6) x(t) = h_0 + A(1 - \sin 2\pi ft)$$

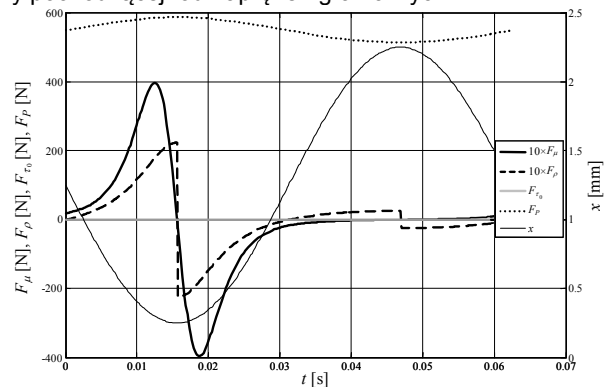
gdzie: $h_0=0.25 \text{ mm}$, amplituda $A=1 \text{ mm}$, a częstotliwość f zmienia się w przedziale (8, 64) Hz, z krokiem 8 Hz.

Obliczenia przeprowadzono przy użyciu pakietu MATLAB/Simulink. Wybrane wyniki przedstawiono na Rys. 4–9. Na Rys. 4–6 zamieszczono przebiegi czasowe składowych siły wibroizolatora F_{μ} , F_{ρ} , F_{τ_0} , F_P przy natężeniu prądu w cewce sterującej $I=0 \text{ A}$ oraz $I=3 \text{ A}$ i przemieszczeniu x o częstotliwości $f: 16, 32, 48 \text{ Hz}$. Na Rys. 7a–c pokazano

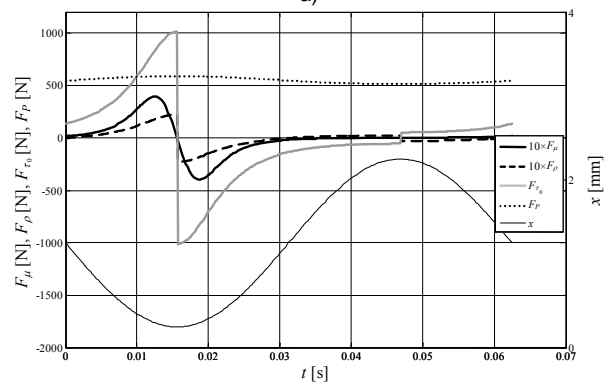
przebiegi czasowe siły wytwarzanej przez urządzenie przy przemieszczeniu x o częstotliwości $f: 16, 32, 48 \text{ Hz}$ i natężeniu prądu w cewce sterującej $I: 0, 3, 5, 6 \text{ A}$. Z kolei na Rys. 8 i 9 przedstawiono zależności siły wibroizolatora od przemieszczenia tłoka x i prędkości tłoka \dot{x} , przy natężeniu prądu $I: 0, 1, 3, 6 \text{ A}$; oraz przemieszczeniu x o częstotliwości $f: 16, 32, 48 \text{ Hz}$.

Z zamieszczonych na tych rysunkach wykresów widać, że:

- dominującą składową w sile wibroizolatora jest siła od naprężeń granicznych cieczy MR, które zależą od natężenia prądu w cewce sterującej,
- siła wibroizolatora wzrasta znacząco ze wzrostem tego prądu, natomiast jej wzrost ze wzrostem prędkości tłoka jest nieznaczny,
- udział składowej siły pochodzącej od ciśnienia gazu jest znaczący i zależy od aplikacji wibroizolatora,
- wartości składowych związane z siłą lepkości i siłą bezwładności cieczy MR są o rząd wielkości mniejsze od siły pochodzącej od naprężeń granicznych.

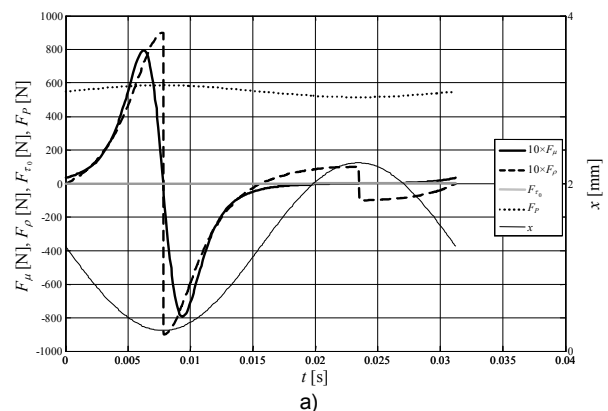


a)

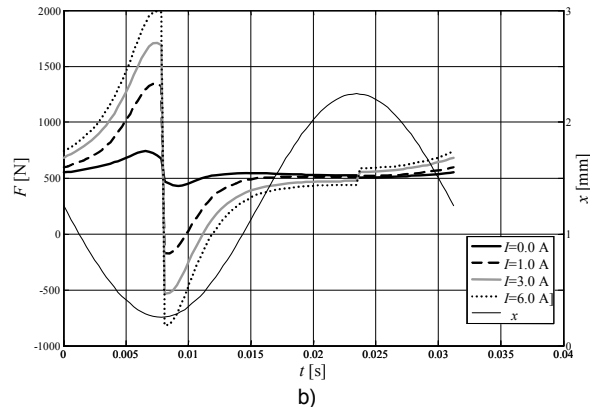
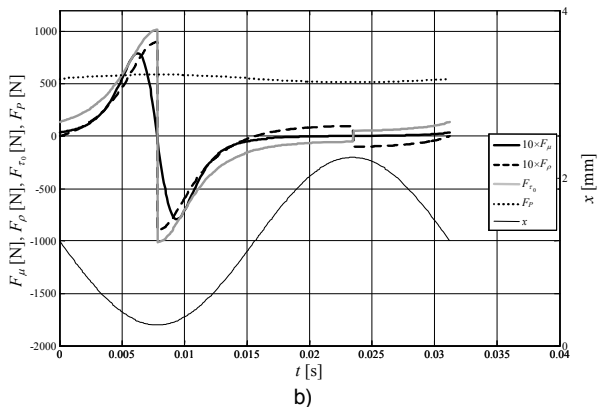


b)

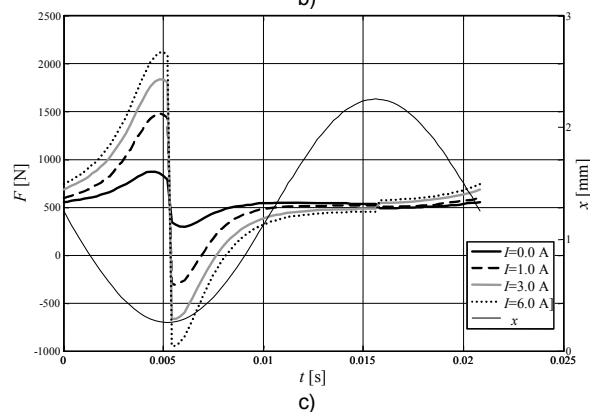
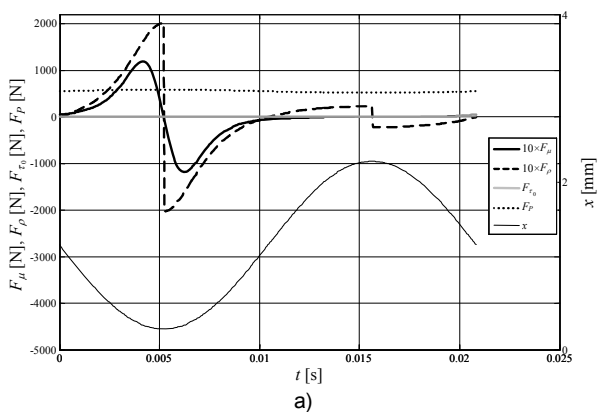
Rys. 4. Przebiegi czasowe składowych siły F ; przemieszczenie x , $A=1 \text{ mm}$, $f=16 \text{ Hz}$: a) $I=0 \text{ A}$, b) $I=3 \text{ A}$



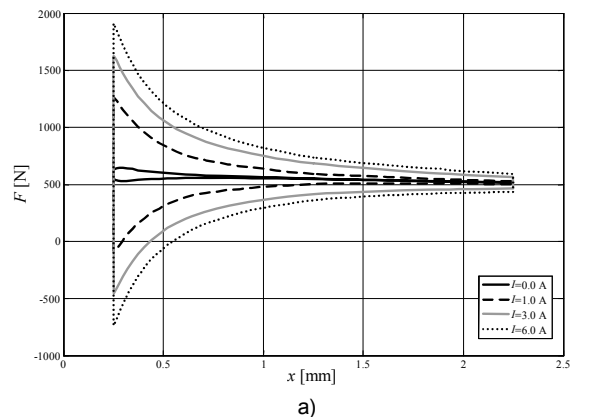
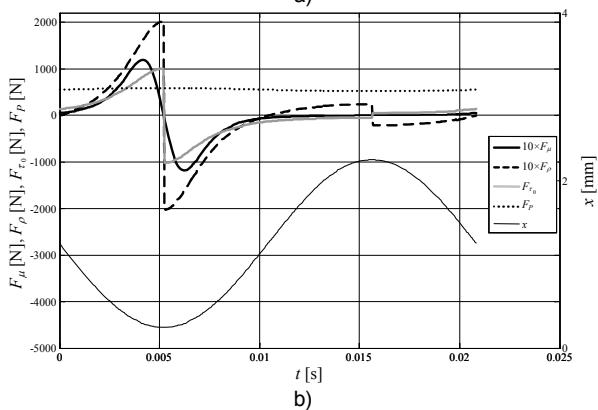
a)



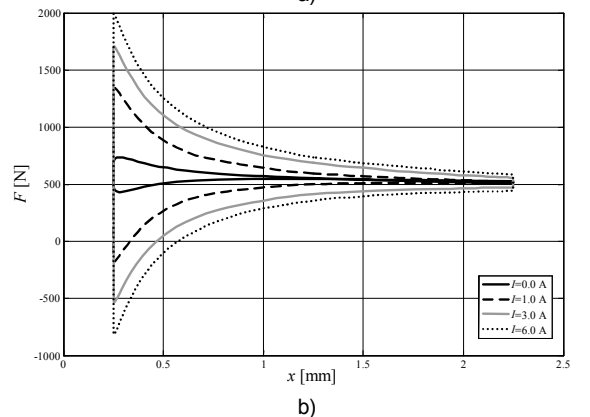
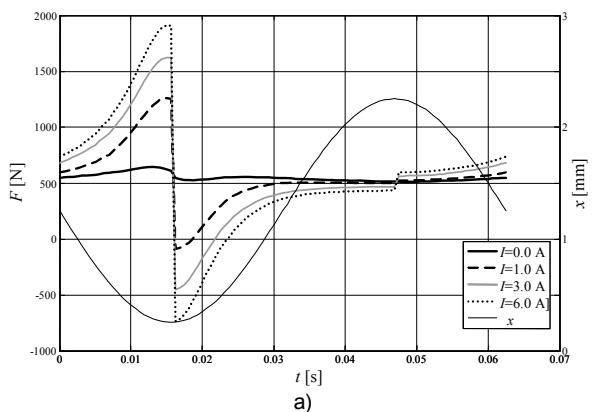
Rys. 5. Przebiegi czasowe składowych siły F ; przemieszczenie x , $A=1$ mm, $f=32$ Hz: a) $I=0$ A, b) $I=3$ A

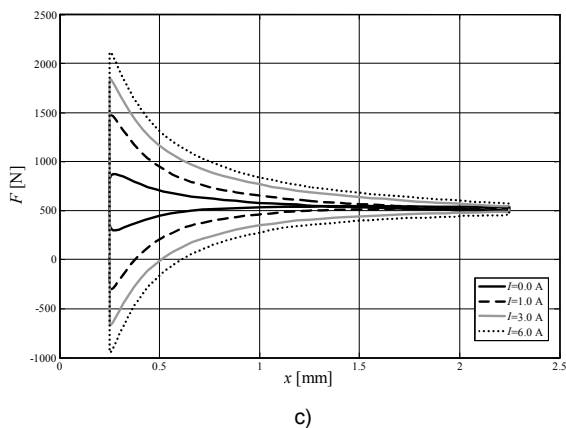


Rys. 7. Przebiegi czasowe siły F ; natężenie prądu I : 0, 1, 3, 6 A, przemieszczenie x , $A=1$ mm: a) $f=16$ Hz, b) $f=32$ Hz, c) $f=48$ Hz



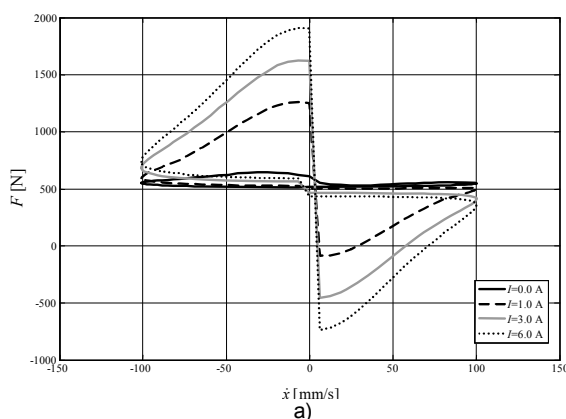
Rys. 6. Przebiegi czasowe składowych siły F ; przemieszczenie x , $A=1$ mm, $f=48$ Hz: a) $I=0$ A, b) $I=3$ A



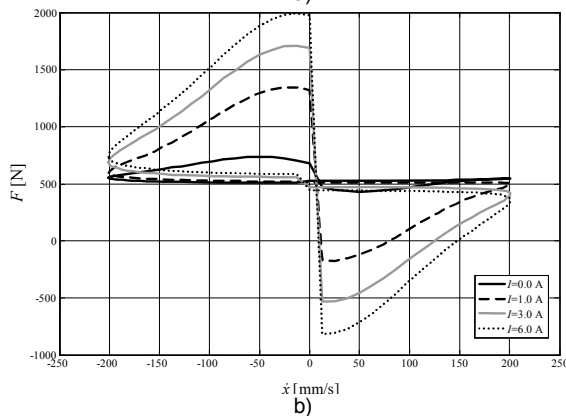


c)

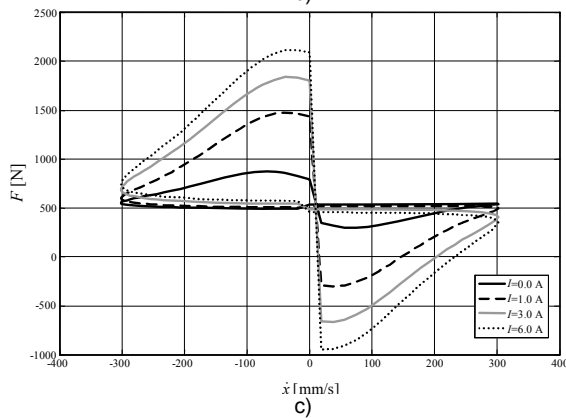
Rys. 8. Zależność siły F od przemieszczenia x ; natężenie prądu I : 0, 1, 3, 6 A, $A=1$ mm: a) $f=16$ Hz, b) $f=32$ Hz, c) $f=48$ Hz



a)



b)



c)

Rys. 9. Zależność siły F od prędkości \dot{x} ; natężenie prądu I : 0, 1, 3, 6 A, $A=1$ mm: a) $f=16$ Hz, b) $f=32$ Hz, c) $f=48$ Hz

Podsumowanie

W pracy przeprowadzono analizę siły wibroizolatora z cieczą MR działającą w trybie ściskania w stanach quasi-statycznych. Charakterystyki te pokazują przebiegi czasowe siły wytwarzanej przez urządzenie i jej składowych oraz zależności siły od przemieszczenia i prędkości przy sinusoidalnych przemieszczeniach tłoka.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że o sile wibroizolatora decyduje głównie siła od naprężeń granicznych cieczy, zwiększająca się ze wzrostem natężenia prądu. Udział składowych siły pochodzących od siły lepkości i bezwładności cieczy jest od niej o rząd wielkości mniejszy. Natomiast udział siły od ciśnienia gazu jest znaczny i wynika z aplikacji urządzenia.

Należy podkreślić, że do wyznaczenia charakterystyk wibroizolatora posłużono się modelem ściskania cienkiej warstwy cieczy MR (Rys. 2), który nie uwzględnia wszystkich zjawisk występujących w urządzeniu.

Przedstawione w pracy charakterystyki zostaną wykorzystane do symulacji zawieszenia silnika samochodu z wibroizolatorem MR.

LITERATURA

- [1] Farjoud A., Craft M., Burke W., Ahmadian M., Experimental investigation of MR squeeze mounts. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22:1645–1652, 2011.
- [2] Goldasz J., Sapiński B., Model of a squeeze mode magnetorheological mount. *Solid State Phenomena*, 177:116–124, 2011.
- [3] Jolly M., R., Carlson J. D., Controllable Squeeze-film Damping using MR fluid, *Proc. of Actuator*, Bremen, Germany, 333–336, 1996.
- [4] Kim K.-J., Lee Ch.-W., Koo J.-H. (2008), Design and modeling of semi-active squeeze film dampers using magnetorheological fluids, *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, doi: 10.1088/0964–1726/17/3/035006.
- [5] Kim J. H., Damping control device with magnetorheological fluid and engine mount having the same, United States Patent Application Publication US 2012/0132492A1, 2012.
- [6] Sapiński B., Wibroizolator z cieczą magnetoreologiczną, *Biuletyn Urzędu Patentowego* Nr 17 (1034) 2013, 27.
- [7] Sapiński B., Matras A., Analiza pola magnetycznego w wibroizolatorze z cieczą magnetoreologiczną działającą w trybie ściskania, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 90. Nr 3/2014, 139–142.
- [8] Snamina J., Sapiński B., Analysis of an automotive vehicle engine mount based on squeeze-mode MR damper, *Czasopismo Techniczne Politechniki Krakowskiej*, 2014 (w druku).
- [9] Stanway R., Sims N. D., Johnson A. R., Modelling and control of a magnetorheological vibroisolator, *Proc. of SPIE*, Vol. 3989, 184–193, 2000.
- [10] Zhang X. J., Farjud A., Ahmadian M., Guo K. H., Craft M., Dynamic Testing and Modelling of an MR Squeeze Mount, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 22, 1717–1728, 2011.

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. Stanisław Krupa, E-mail: krupa@agh.edu.pl, Instytut Politechniczny, Zakład Elektrotechniki PWSZ w Tamowie, ul. Mickiewicza 8.

Pracę zrealizowano w ramach projektu PBS 1/A6/3/2012.