

Symulacja obwodu sterującego tłumika z cieczą MR działającą w trybie ściskania

Streszczenie. W pracy opisano wyniki symulacji numerycznych obwodu sterującego tłumika z cieczą MR działającą w trybie ściskania. Określono wpływ wysokości szczeliny roboczej i prądu na strumień magnetyczny skojarzony z obwodem sterującym. Zakładając harmoniczny ruch tłoka, obliczono prąd w obwodzie sterującym przy zasilaniu napięciem stałym i danych wysokościach szczeliny roboczej. Wyznaczono przykładowe charakterystyki tłumika, przedstawiające zależność wytwarzanej siły od wysokości szczeliny roboczej dla przyjętych wartości prądu.

Abstract. The paper summarises the results of numerical simulations of a control circuit for an MR damper operated in squeeze mode. The influence of the control gap height and current level on magnetic flux linkage was established. Assuming the piston motion to be harmonic, the current in the control circuit was computed under the constant-voltage supply conditions and for the specified gap heights. Damper force vs gap height plots obtained for the specified current levels are provided as an example of damper characteristics. **Numerical simulations of a control circuit for an MR damper operated in squeeze mode**

Słowa kluczowe: tłumik MR, obwód sterujący, szczelina robocza, strumień magnetyczny, siła

Keywords: MR damper, control circuit, control gap, magnetic flux, force

Wstęp

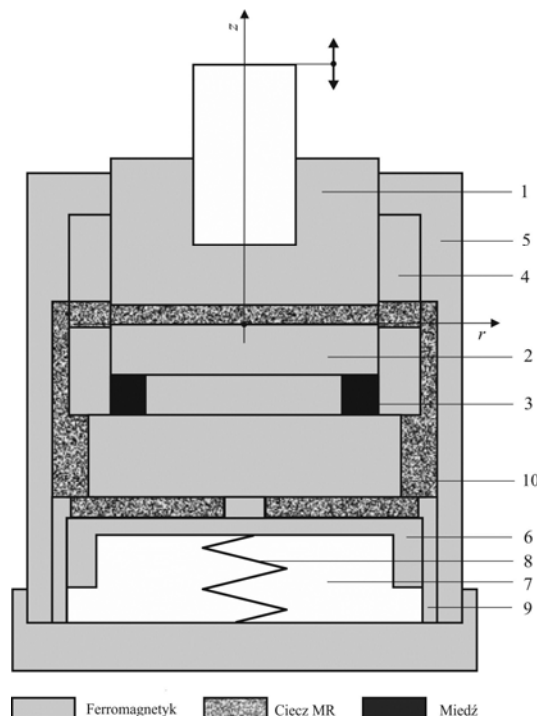
Obiektem symulacji jest obwód sterujący (cewka sterująca) prototypowego tłumika z cieczą MR, która działa w trybie ściskania [6]. Prąd płynący w obwodzie sterującym wzbudza pole magnetyczne w szczelinie roboczej tłumika, w której znajduje się ciecz MR, co powoduje zmianę jej lepkości pozornej. Cechą charakterystyczną tłumika z cieczą MR działającą w trybie ściskania jest zmienna wysokość szczeliny roboczej. Stanowi to pewną trudność w analizie działania tego tłumika w porównaniu do tłumików MR wykorzystujących tryb zaworowy lub sprzęgłowy gdyż w tym przypadku strumień magnetyczny skojarzony z obwodem sterującym zależy zarówno od prądu płynącego w obwodzie jak i od wysokości szczeliny roboczej [1, 2, 3 10].

Celem symulacji jest zbadanie wpływu wysokości szczeliny roboczej i prądu na strumień skojarzony z obwodem sterującym oraz wyznaczenie: prądu w obwodzie przy zasilaniu napięciem stałym dla danych wysokości szczeliny i zależności siły tłumika od wysokości szczeliny dla danych wartości prądu przy założeniu monoharmonicznego ruchu tłoka.

Opis tłumika

Budowę tłumika pokazano schematycznie na Rys. 1. Na schemacie zaznaczono główne elementy konstrukcyjne tłumika (1–10) i rodzaje materiałów zastosowanych do jego budowy (legenda). Tłumik ma dwa współosiowe cylindry, wewnętrzny diamagnetyczny (4) i zewnętrzny ferromagnetyczny (5). W komorze kompensacyjnej (7), umieszczonej współosiowo z ferromagnetycznym rdzeniem (2), znajduje się układ sprężyn (8). Ferromagnetyczny tłok pływający (6) w cylindrze (9), znajdujący się w komorze kompensacyjnej (7), rozdziela ciecz MR (10) przepływającą do/z komory od układu sprężyn (8). Szczelinę roboczą tworzą układ rdzenia (2) i tłoka (1), które pozostają w ruchu względnym. Powierzchnia tłoka stanowi podstawę, do której jest mocowany zewnętrzny obiekt, przemieszczający się wzdłuż osi z. Rdzeń tłumika (2) jest otoczony cewką sterującą (3). Strumień magnetyczny, wytwarzany przez prąd w cewce, przenika przez rdzeń (2), szczelinę roboczą z cieczą MR, tłok (1) i cylinder (5).

Wskutek ruchu obiektu zmienia się wysokość szczeliny roboczej. Powoduje to przepływ cieczy MR przez otwory znajdujące się w cylindrze (4) do komory kompensacyjnej (7).

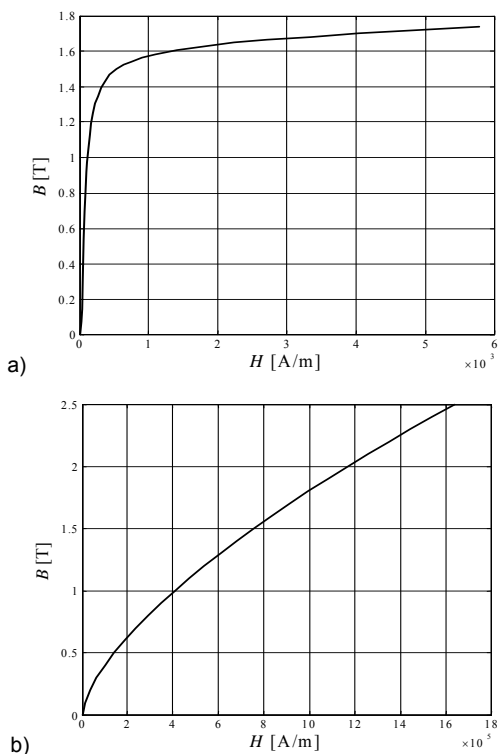


Rys. 1. Schemat tłumika

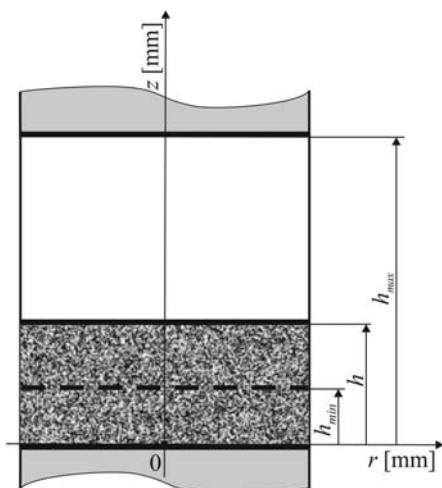
Zmiana objętości cieczy MR w komorze kompensacyjnej (7) powoduje przemieszczenie pływającego tłoka (6). Siła tłumika zależy głównie od indukcji pola magnetycznego wzbudzanego przez prąd płynący w cewce sterującej.

Symulacja

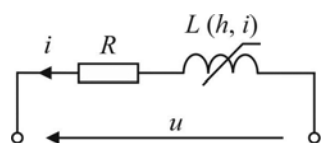
Wymiary elementów konstrukcyjnych (1–10) podano w pracy [7]. Charakterystyki magnesowania ferromagnetyka (stal niskowęglowa 11SMn30, PN-EN 10087:2000) i cieczy MR typu Basonetic 4035 [4] wykorzystanych do budowy tłumika pokazano na Rys. 2. Oporność cewki sterującej, nawiniętej drutem miedzianym o średnicy 0.45 mm i mającej 150 zwoi, wynosi $R=2.8 \Omega$. Współczynnik sztywności układu sprężyn znajdujących się w komorze kompensacyjnej wynosi 68.2 N/mm. Minimalna wysokość szczeliny roboczej $h_{min}=0.5$ mm, a maksymalna $h_{max}=6.26$ mm (Rys. 3).



Rys. 2. Charakterystyki magnesowania: a) ferromagnetyka, b) cieczy MR



Rys. 3. Obszar szczeliny roboczej



Rys. 4. Schemat zastępczy obwodu sterującego

Symulacje przeprowadzono zakładając że:

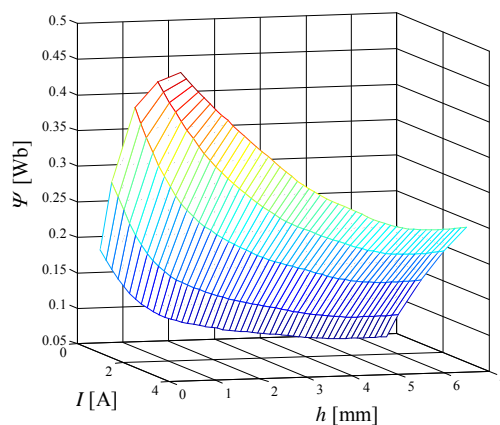
- schemat zastępczy obwodu sterującego stanowi dwójnik $RL(h, i)$ pokazany na Rys. 4,
- oporność R cewki sterującej jest stała,
- strumień skojarzony z obwodem sterującym Ψ zależy od wysokości szczeliny roboczej h oraz prądu i
- obwód sterujący jest zasilany napięciem skokowym $U \cdot 1(t)$,
- monoharmoniczny ruch tłoka względem środka aktualnej wysokości szczeliny roboczej o amplitudzie 1.44 mm oraz częstotliwości f ,

• przebiegi czasowe prądu i .
W obwodzie sterującym, którego schemat zastępczy zamieszczono na Rys. 4, obowiązują równania:

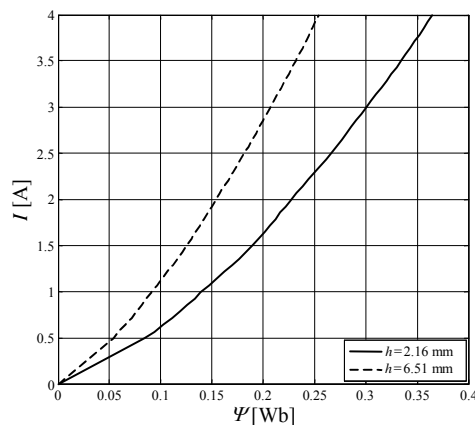
$$(1) \quad \dot{\Psi} + Ri = u$$

$$(2) \quad i = i(\Psi)$$

Korzystając z wyznaczonej przy użyciu programu Opera-2d [5], zależności $\Psi(i, h)$ (Rys. 5), można dla danej wysokości szczeliny roboczej h , określić funkcję $i(\Psi)$. Przykładowe funkcje $i(\Psi)$ dla dwóch wartości h pokazano na Rys. 6. Przyjmując funkcję $i(\Psi)$, wyznaczono prąd w obwodzie sterującym. Obliczone przebiegi czasowe prądu w tym obwodzie w stanie nieustalonym dla napięć U : 1.4 V i 5.6 V oraz częstotliwości f : 4 Hz i 32 Hz przy wysokości szczeliny roboczej $h=2.16$ mm przedstawiono na Rys. 7. Z kolei na Rys. 8 zamieszczono przebiegi prądu w stanie ustalonym w czasie względnym ($t-f$) dla tych samych wartości U, f, h . Z porównania przebiegów prądów z Rys. 8 widać, że na wartość prądu wpływa zarówno stałe napięcie zasilające (odpowiada za składową stałą), jak i amplituda oraz częstotliwość ruchu tłoka (generujący składową zmienną). Można zauważyć, że wpływ napięcia na składową stałą prądu jest wprost proporcjonalny, a amplituda składowej zmiennej prądu jest silnie tłumiona przy wyższych częstotliwościach.

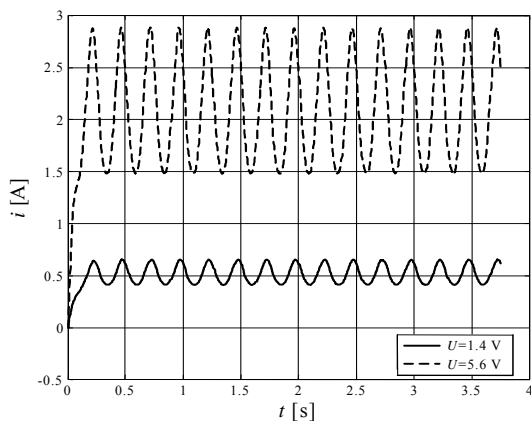


Rys. 5. Zależność strumienia skojarzonego z obwodem sterującym od wysokości szczeliny roboczej i prądu

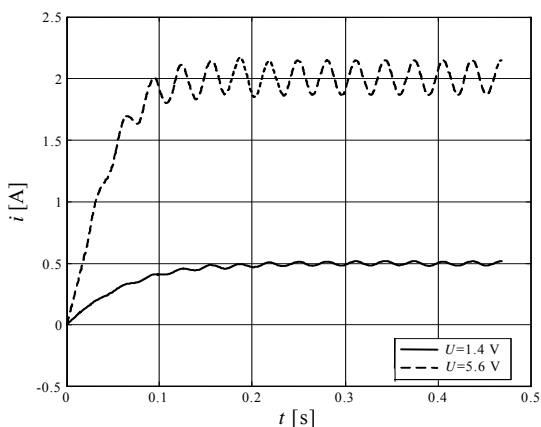


Rys. 6. Zależność prądu od strumienia skojarzonego z obwodem sterującym dla ustalonych wysokości szczeliny roboczej

Na Rys. 9 i 10 zamieszczono przykładowe charakterystyki tłumika. Do wyznaczenia tych charakterystyk posłużono się zależnościami określającymi składowe siły tłumika, które zamieszczono w pracy [9]. Wykresy z Rys. 9 pokazują przebiegi czasowe siły, natomiast wykresy z Rys. 10, zależności siły od przemieszczenia tłoka dla wybranych wartości prądu w obwodzie sterującym i częstotliwości ruchu tłoka.

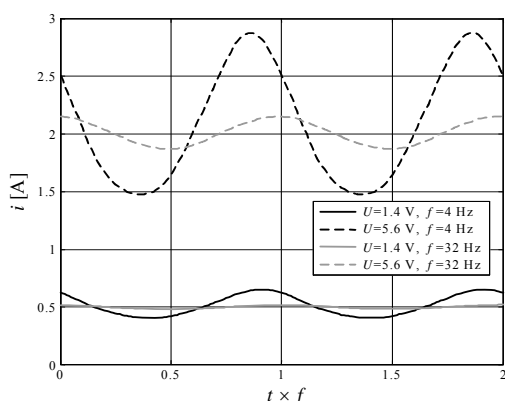


a)

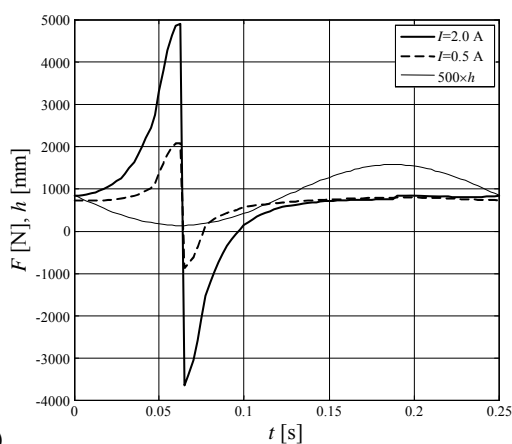


b)

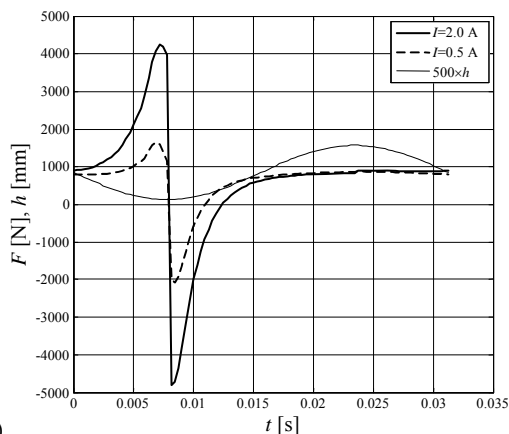
Rys. 7. Przebiegi czasowe prądu w stanie nieustalonym: a) 4 Hz, b) 32 Hz



Rys. 8. Przebiegi czasowe prądu w stanie ustalonym dla różnych wartości napięć i częstotliwości

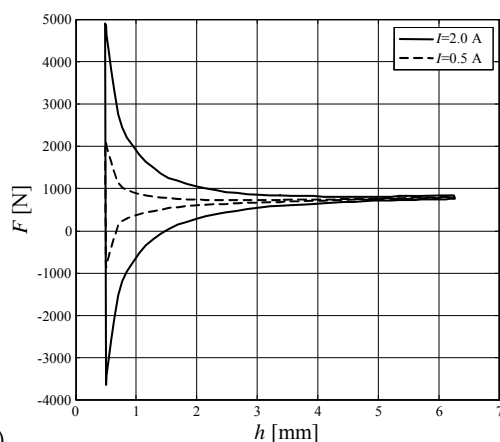


a)

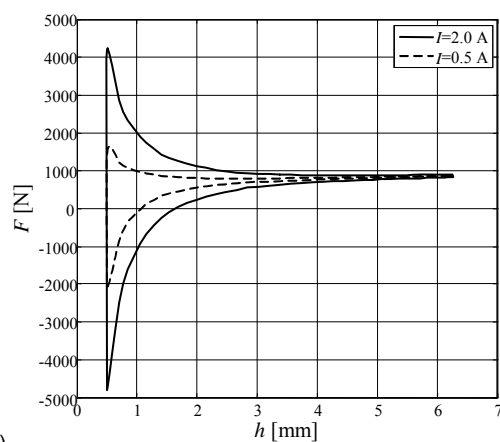


b)

Rys. 9. Przebieg czasowy siły tłumika: a) 4 Hz, b) 32 Hz



a)



b)

Rys. 10. Zależność siły tłumika od przemieszczenia tłoka: a) 4 Hz, b) 32 Hz

Analizując te wykresy widać, że siła tłumika zależy znacząco od prądu w obwodzie sterującym. Wpływ na to ma przede wszystkim siła wynikająca z naprężeń granicznych cieczy MR znajdującej się w szczelinie roboczej. Uwagę zwracają różnice w wartościach siły tłumika przy różnej częstotliwości ruchu tłoka. Można zauważyć, że dla danego prądu siła ta osiąga większe wartości przy mniejszej częstotliwości. Jest to związane ze zmieniającym się z częstotliwością wpływem składowych siły tłumika [8].

Podsumowanie

W pracy wyznaczono:

- zależność strumienia skojarzonego od prądu w obwodzie sterującym i wysokości szczeliny roboczej,
- przebiegi prądu w obwodzie sterującym w stanie ustalonym i

nieustalonym przy zasilaniu napięciem stałym i założonych wysokościach szczeliny roboczej,

- zależność siły tłumika od wysokości szczeliny roboczej dla przyjętych wartości prądu oraz monoharmonicznego ruchu tłoka.

Wyniki symulacji prowadzą do następujących wniosków:

- strumień skojarzony z obwodem sterującym jest funkcją nieliniową prądu i parametryczną wysokości szczeliny roboczej,
- prąd w obwodzie sterującym jest funkcją okresową,
- składowa stała prądu w stanie ustalonym jest wyznaczona przez napięcie stałe i oporność cewki sterującej,
- okres składowej zmiennej prądu odpowiada okresowi ruchu tłoka.

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

Obliczenia pola magnetycznego przy użyciu programu Opera, wykonano na komputerze IBM BladeCenter HS21 w ramach grantu obliczeniowego MNiSW/IBM_BC_HS21/AGH/080/2007.

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] Góldasz J., Sapiński B., Model of a squeeze mode magnetorheological mount. *Solid State Phenomena*, 177:116–124, 2011.

[3] Gong X., Ruan X., Shouhu X., Yan, Q., Deng H., *Magnetorheological Damper Working in Squeeze Mode*, Hindawi Publishing Corporation, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 2014, Article ID 410158, (10 pages).

[4] <http://www.basonetic.com>

[5] *Opera-2d version 15R2, User Guide*, Cobham Technical Services, Vector Fields Software, 2011.

[6] Sapiński B., Krupa S., *Wibroizolator z cieczą magnetoreologiczną pracującą w trybie ściskania. Wniosek o udzielenie patentu P.406179*, 2013.

[7] Sapiński B., *Symulacja zjawisk elektromagnetycznych w tłumiku z cieczą MR działającą w trybie ściskania, Modelowanie Inżynierskie*, 2015 (w druku).

[8] Sapiński B., *Analiza teoretyczna charakterystyk tłumika MR z cieczą MR działającą w trybie ściskania, Acta Mechanica et Automatica*, 2015 (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, Instytut Politechniczny, Zakład Elektrotechniki PWSZ w Tarnowie, ul. Mickiewicza 8; dr inż. Andrzej Matras, AGH, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, E-mail: matras@agh.edu.pl, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków*