

## Analiza pola magnetycznego w wibroizolatorze z cieczą magnetoreologiczną działającą w trybie ściskania

**Streszczenie.** Obiektem analizy był wibroizolator z cieczą magnetoreologiczną (MR) pracującą w trybie ściskania. Przedstawiono budowę i działanie wibroizolatora oraz wyniki obliczeń numerycznych pola magnetycznego w urządzeniu. Celem obliczeń było wyznaczenie rozkładu pola dla rozważanych wariantów konstrukcyjnych wibroizolatora, zależności składowej osiowej indukcji magnetycznej oraz indukcyjności cewki sterującej od wysokości szczeliny roboczej. Obliczenia przeprowadzono przy użyciu programu program Opera-2d.

**Abstract.** The present study investigates the behaviour of a magnetorheological (MR) vibroisolator operated in the squeeze mode. The structure design and operating principles of the vibroisolator are outlined and the results of numerical calculations of the magnetic field in the device are provided. The purpose of the numerical procedure was to find the magnetic field distribution for all considered design options of the device and to establish the dependence of the axial component of magnetic flux density and the inductance of the control coil on the slit height. The calculation procedure was supported by the program Opera-2d. **Analysis of magnetic field in a magnetorheological vibroisolator in the squeeze mode**

**Słowa kluczowe:** wibroizolator, ciecz MR, tryb ściskania, pole magnetyczne, indukcja magnetyczna

**Keywords:** vibroisolator, MR fluid, squeeze mode, magnetic field, magnetic flux density

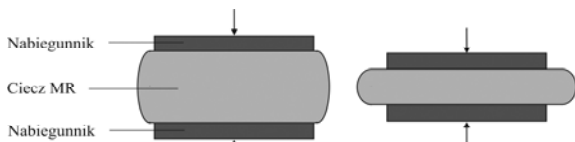
doi:10.12915/pe.2014.03.30

### Wstęp

Ciecze MR są materiałami, na których właściwości reologiczne można oddziaływać polem magnetycznym. Ciecze te mogą działać w trybie zaworowym, sprzęgłowym lub ściskania. Urządzenia wykorzystujące tryb zaworowy i sprzęgłowy są szeroko opisane w literaturze. Natomiast literatura dotycząca trybu ściskania jest stosunkowo skromna. Spośród najnowszych prac poświęconych temu trybowi, można wymienić rozprawy doktorskie [5, 7], artykuły [1, 2, 3, 9, 10, 13] i opisy patentowe [6, 11, 12].

Wyróżnia się dwa przypadki ściskania cieczy MR, ze stałą objętością i ze stałą powierzchnią kontaktu. Właściwości, które powinny wykazywać ciecze MR poddane ściskaniu są uzależnione od aplikacji. Na przykład w układach wibroizolacji istotną cechą jest zdolność do uzyskiwania znacznych sił przy wyporze cieczy MR ze strefy ściskania oraz szeroki zakres zmian właściwości reologicznych. Naprężenia uzyskiwane przy ściskaniu cieczy MR wynoszą ok. 100-150 kPa przy przemieszczeniach rzędu kilku milimetrów. Ta cecha może być wykorzystana do konstrukcji nowych urządzeń.

Niniejsza praca jest poświęcona analizie pola magnetycznego w wibroizolatorze z cieczą MR działającą w trybie ściskania ze stałą powierzchnią kontaktu (cieczy MR i nabiegunków), co zobrazowano na Rys. 1. Wibroizolator ten jest projektowany w ramach aktualnie realizowanego projektu badawczego.



Rys. 1. Ściskanie cieczy MR ze stałą powierzchnią kontaktu

Celem obliczeń wykonanych na potrzeby tej pracy było wyznaczenie rozkładu pola dla rozważanych wariantów konstrukcyjnych wibroizolatora, zależności składowej osiowej indukcji magnetycznej oraz indukcyjności cewki sterującej od wysokości szczeliny roboczej.

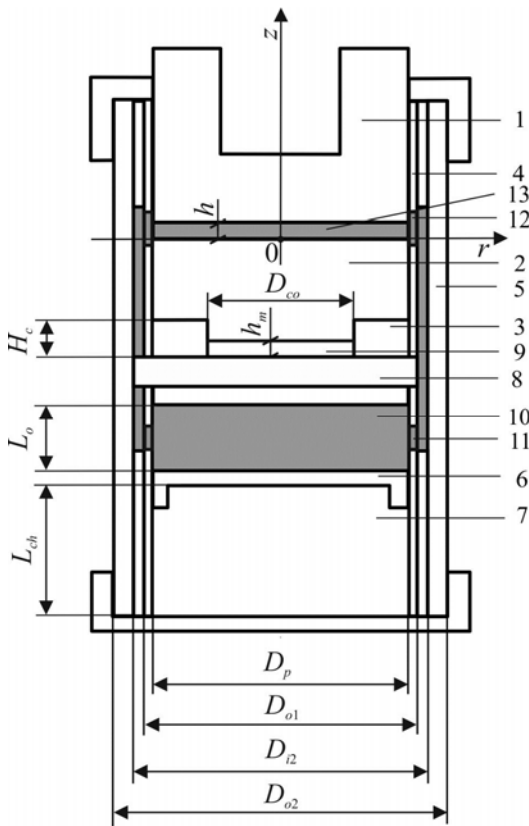
### Budowa i działanie wibroizolatora

Budowę wibroizolatora przedstawiono schematycznie na Rys. 2. Urządzenie posiada dwa współosiowe 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 ciecz MR (10) przepływającą do/z komory od gazu. W komorze kompensacyjnej, poniżej tłoka pływającego (6) jest sprężony gaz (np. azot), pod ciśnieniem co najmniej kilku atmosfer, rozdzielający ciecz MR od gazu. Cylinder wewnętrzny ma otwory (11) w dolnej części i otwory (12) w górnej części, umożliwiające przepływ cieczy MR z/do szczeliny roboczej (13). Szczelina ta jest umiejscowiona pomiędzy tłokiem (1) a rdzeniem (2). Wibroizolator ma jednoosiowy układ stacjonarnego rdzenia i ruchomego tłoka, które tworzą między sobą szczelinę roboczą o zmiennej wysokości, wypełnioną cieczą MR. Powierzchnia tłoka stanowi ruchomą podstawę, na której jest posadowiony zewnętrzny obiekt wibroizolowany. Rdzeń znajdujący się na podstawie (8) jest otoczony cewką sterującą (3). Strumień magnetyczny wytwarzany przez prąd płynący w cewce sterującej przepływa przez rdzeń i podstawę do cylindra zewnętrznego, tłoka oraz szczeliny roboczej. Cylinder wewnętrzny jest wykonany z materiału o względnej przenikalności bliskiej lub równej 1 (np. stali nierdzewnej lub aluminium).

Rdzeń wibroizolatora może opcjonalnie zawierać spolaryzowany osiowo magnes trwały (9). Przy braku zasilania zewnętrznego, indukcja magnetyczna w urządzeniu, jest wytwarzana przez magnes trwały. W zależności od kierunku przepływu prądu zasilającego cewkę sterującą, wektor indukcji magnetycznej ma zwrot zgodny lub przeciwny do zwrotu wektora indukcji wytwarzanego przez magnes trwały. Efektem tego jest zwiększenie lub zmniejszenie lepkości pozornej cieczy MR znajdującej się w szczeliny roboczej i przez to zwiększenie lub zmniejszenie oporów promieniowego przepływu cieczy MR.

Działanie urządzenia można zilustrować następująco. Zmniejszenie wysokości szczeliny roboczej, na skutek zmiany położenia tłoka (1), powoduje wypływ cieczy MR z tej szczeliny przez otwory (12) i poprzez otwory (11) do komory kompensacyjnej (7). Zmiana objętości cieczy MR w komorze kompensacyjnej skutkuje przemieszczeniem tłoka pływającego (6).

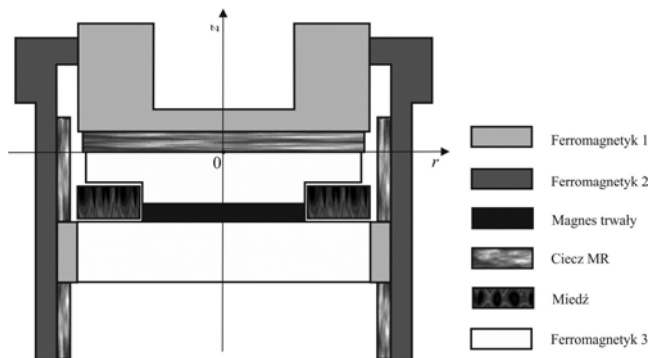


Rys. 2. Budowa wibroizolatora

Tabela 1. Wymiary elementów konstrukcyjnych wibroizolatora

Średnica tłoka $D_p$	39.0 mm
Średnica zewn. cylindra $D_{o1}$	41.5 mm
Średnica wewnętrzna cylindra $D_{i2}$	45.0 mm
Średnica zewnętrzna cylindra $D_{o2}$	51.0 mm
Zakres zmian wysokości szczeliny $\Delta h$	0.25-2.5 mm
Średnica rdzenia $D_{co}$	27.0 mm
Wysokość cewki $H_c$	5.5 mm
Szerokość cewki $W_c$	8.5 mm
Wysokość komory gaz $L_{ch}$	20.0 mm
Wysokość słupa cieczy nad tłokiem pływającym (6) $L_o$	10.0 mm
Wysokość magnesu $h_m$	2.50 mm
Średnica uzwojenia cewki $d_w$	0.51 mm
Liczba zwojów cewki $N$	100

W Tabeli 1 podano wymiary elementów konstrukcyjnych wibroizolatora. Na Rys. 3 wyszczególniono rodzaje materiałów, z których według projektu jest planowane wykonanie tychże elementów konstrukcyjnych.



Rys. 3. Materiały elementów konstrukcyjnych wibroizolatora

## Obliczenia

Dla ułatwienia analizy wyników, wariant konstrukcyjny wibroizolatora o wymiarach zamieszczonych w Tabeli 1, nazwano wariantem 1, a o średnicy zwiększonej w odniesieniu do niego o 10% i 20% odpowiednio wariantami 2 i 3. Obliczenia przeprowadzono przy użyciu programu Opera-2d w wersji 15R2 [8]. Do obliczeń przyjęto osiowo symetryczny model MES urządzenia oraz charakterystyki magnesowania  $B(H)$  ferromagnetyków, magnesu trwałego i cieczy MR jak na Rys. 4a-c. W modelu MES zastosowano zmodyfikowany wektor potencjału magnetycznego ( $rA_\varphi$ ) [4] oraz liniowe elementy skończone. Równanie pola opisujące ten problem we współrzędnych walcowych ma postać:

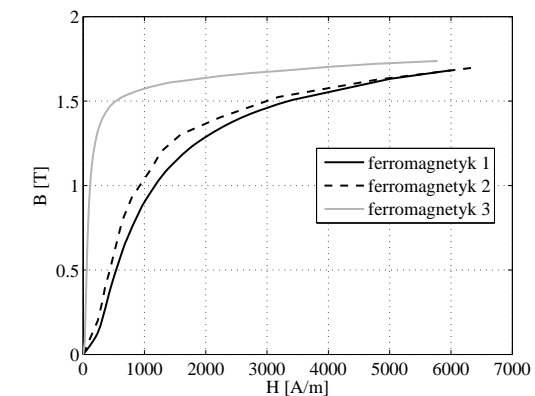
$$(1) \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial z} \right) = -J_\varphi$$

Liczby elementów skończonych wynosiła 4403, a liczba węzłów 2292.

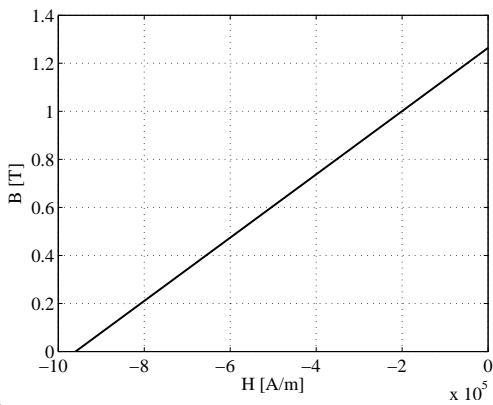
Na Rys. 5a-c zobrazowano rozkład pola magnetycznego dla wariantów 1-3. Z tych rysunków wynika, że dla 20% zakresu zmian średnicy wibroizolatora, który odpowiada tym wariantom, jakościowy obraz rozkładu izolinii pola nie ulega zauważalnym zmianom.

Na Rys. 6 i 7 przedstawiono zależność składowej osiowej indukcji magnetycznej  $B_z$  (na osi z) od wysokości szczeliny roboczej  $h$  odpowiednio dla wariantu 1 i 2, przy natężeniu prądu w cewce sterującej  $I=5$  A. Wykres narysowany linią ciągłą dotyczy przypadku, gdy składowa  $B_z$  indukcji magnetycznej, wynikająca z przepływu prądu w cewce sterującej, ma kierunek zgodny z indukcją magnesu trwałego, natomiast linią przerywaną, gdy ma kierunek przeciwny. Z porównania wykresów na Rys. 6 i 7 widać wyraźnie, że składowa osiowa indukcji magnetycznej  $B_z$  znacznie silniej zależy od zmian wysokości szczeliny aniżeli od zmian średnicy rozpatrywanego urządzenia.

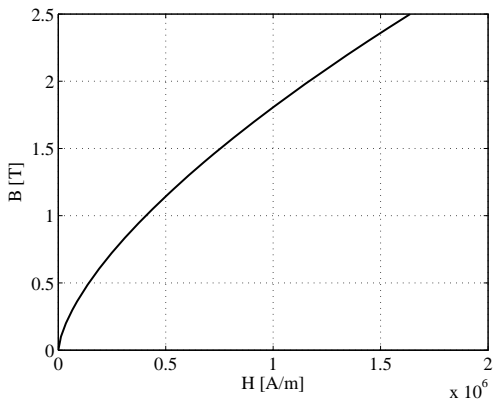
Na Rys. 8 porównano zależność składowej  $B_z$  od wysokości szczeliny roboczej  $h$  dla wariantów 1 i 2 a także dla dwóch wartości prądu w uzwojeniu sterującym 5 i 10 A. W przeciwieństwie do wykresów z Rys. 6 i 7, na tymże rysunku przedstawiono krzywe odpowiadające tylko zgodnemu współdziałaniu indukcji magnetycznej magnesu trwałego i indukcji zależnej od natężenia prądu w cewce sterującej. Z Rys. 8 wypływa istotny wniosek - 100% zmianie wartości prądu sterującego odpowiada około 10% zmianie wartości indukcji  $B_z$ .



a)

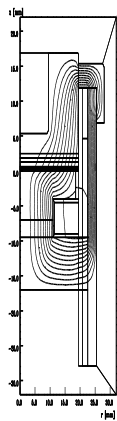


b)

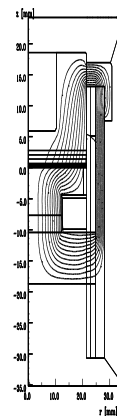


c)

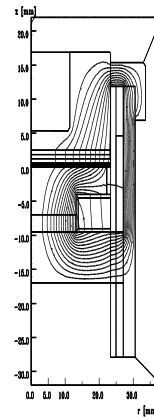
Rys. 4. Charakterystyki magnesowania: a) ferromagnetyków, b) magnesu trwałego, c) cieczy MR



a)

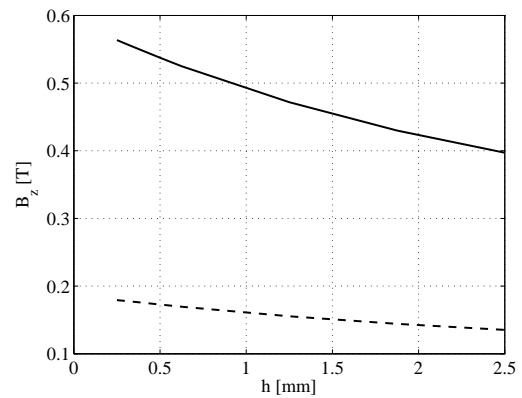


b)

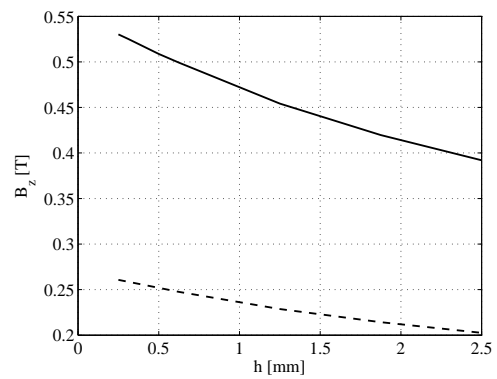


c)

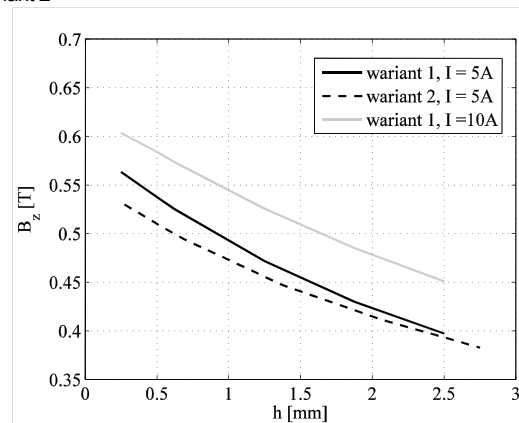
Rys. 5. Rozkład pola magnetycznego: a) wariant 1, b) wariant 2, c) wariant 3;  $I=5\text{ A}$



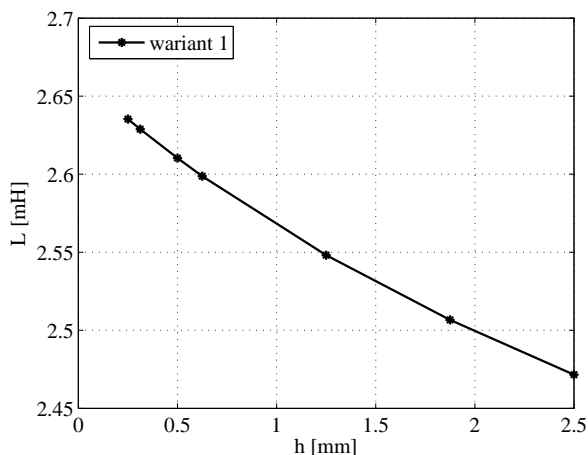
Rys. 6. Zależność składowej  $B_z$  od wysokości szczeliny roboczej  $h$ ; wariant 1



Rys. 7. Zależność składowej  $B_z$  od wysokości szczeliny roboczej  $h$ ; wariant 2



Rys. 8. Porównanie zależności składowej  $B_z$  od wysokość szczeliny roboczej  $h$  dla wariantów 1 i 2



Rys. 9. Zależność indukcyjności cewki sterującej L od wysokości szczeliny roboczej h

### Podsumowanie

Praca dotyczy obliczeń numerycznych pola magnetycznego w wibroizolatorze z cieczą MR działającą w trybie ściskania. Przedstawiono budowę i działanie urządzenia oraz wyniki obliczeń magnetostatycznych. Wyznaczono zależność składowej osiowej indukcji magnetycznej oraz indukcyjności cewki sterującej wibroizolatora od wysokości szczeliny roboczej.

Obliczenia przeprowadzono dla trzech wariantów konstrukcyjnych urządzenia, wariantu 1 (wymiary jak w Tabeli 1) oraz o wariantów 2 i 3 o średnicy zwiększonej odpowiednio o 10% i 20%. Dla wariantu 1 zbadano również wpływ dwukrotnej zmiany natężenia prądu w cewce sterującej (z 5 A na 10 A)

Wyniki obliczeń prowadzą do następujących wniosków:

- zmiana średnicy (w rozważanym zakresie) wpływa na wartość indukcji w szczelinie roboczej w stopniu o wiele mniejszym aniżeli zmiana wysokości tej szczeliny,
- zmienność indukcyjności cewki sterującej odpowiadająca pełnemu zakresowi zmiany wysokości szczeliny roboczej wynosi 6%, co w analizie układu sterującego urządzenia pozwala posługiwać się jej stałą, średnią wartością z wystarczającą dokładnością z technicznego punktu widzenia.

### 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] Farjoud A., Vahdati N., Fah Y., MR-fluid yield surface determination in disc-type MR rotary brakes. *Smart Materials and Structures*, 17(3):1–8, 2008.
- [3] Goldasz J., Sapiński B., Model of a squeeze mode magnetorheological mount. *Solid State Phenomena*, 177:116–124, 2011.
- [4] Griffiths D. J., *Podstawy elektrodynamiki*, PWN, Warszawa, 2001.
- [5] Horak W., Teoretyczna oraz doświadczalna analiza procesu ściskania cieczy magnetoreologicznej, Praca doktorska, AGH University of science and Technology, Kraków, 2013.
- [6] Kim J. H., Damping control device with magnetorheological fluid and engine mount having the same, United States Patent Application Publication US 2012/0132492A1, 2012.
- [7] Mazlan S. (2008), The behaviour of magnetorheological fluids in squeeze mode. PhD Thesis, Dublin City University, 2008.
- [8] Opera-2d version 15R2, User Guide, Cobham Technical Services, Vector Fields Software, 2011.
- [9] Sapiński B., Horak W., Szczęch M., Investigation of MR fluids in the oscillatory squeeze mode, *Acta Mechanica et Automatica*, Vol. 7, No. 2, 2013, 111–116.
- [10] Sapiński B., Szczęch M., CFD model of a magnetorheological fluid in squeeze mode, *Acta Mechanica et Automatica*, Vol. 7, No. 3, 2013.
- [11] Sapiński B., Wibroizolator z cieczą magnetoreologiczną, Wniosek o udzielenie patentu Nr P-404489 z dnia 28.06. 2013.
- [12] Sapiński B., Wibroizolator z cieczą magnetoreologiczną, *Biuletyn Urzędu Patentowego* Nr 17 (1034) 2013, 27.
- [13] 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. Andrzej Matras, AGH, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Przetwarzania Energii, E-mail: matras@agh.edu.pl, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków