

Analiza polowa tłumika MR działającego w trybie ściskania z magnesami trwałymi i magnetyczną komorą kompensacyjną

Streszczenie. W pracy przeprowadzono obliczenia polowe nowej konstrukcji tłumika z cieczą MR działającą w trybie ściskania. Wyznaczono rozkład indukcji magnetycznej w tłumiku, zależność składowej osiowej indukcji od promienia szczeliny roboczej oraz zależność średniej wartości modułu indukcji i siły oddziaływania magnetycznego w komorze kompensacyjnej od wysokości szczeliny roboczej.

Abstract. Calculations were performed to find the field parameters of a new-design MR damper operated in the squeeze mode: distribution of magnetic field density in the damper, the relationship between the axial component of induction and the gap radius and the relationship between the average value of induction modulus, and the magnetic interaction force inside the compensation unit and the gap height. **Analysis of the MR damper with permanent magnet and magnetic compensation in the squeeze mode**

Słowa kluczowe: tłumik MR, magnes trwały, szczelina robocza, komora kompensacyjna, cewka sterująca, indukcja magnetyczna.

Keywords: MR damper, permanent magnet, working gap, compensating chamber, control coil, magnetic flux density.

Wstęp

W okresie ostatnich kilku lat obserwuje się zwiększenie zainteresowania badaczy trybem ściskania cieczy MR. Świadczy o tym rosnąca liczba publikacji np. [1, 2, 8] i patentów np. [3, 4, 5, 6]. Naprężenia, które można uzyskać w tym trybie wynoszą ok. 150 kPa przy przemieszczeniach kilku mm. Ta cecha może być wykorzystana do budowy nowych tłumików, które różnią się od znanych i skomercjalizowanych tłumików MR działających w trybie zaworowym lub sprzęgłowym.

W niniejszej pracy jest analizowane pole magnetyczne w nowo opracowanym tłumiku z cieczą MR działającą w trybie ściskania. Przedstawione rozwiązanie konstrukcyjne tłumika jest przedmiotem wniosku o udzielenie patentu [3]. W porównaniu z wcześniej zaproponowanymi przez autorów rozwiązaniami konstrukcyjnymi tłumika [1, 2], w tej konstrukcji wprowadzono magnesy trwałe i magnetyczną komorę kompensacyjną. Magnes trwały o kształcie pierścieniowym i namagnesowaniu promieniowym formuje wstępne pole magnetyczne w szczeliny roboczej tłumika. Natomiast układ magnesów trwałych o kształcie walcowym i namagnesowaniu osiowym, które są spolaryzowane przeciwnie, znajduje się w zabudowanej w tłoku komorze kompensacyjnej tłumika.

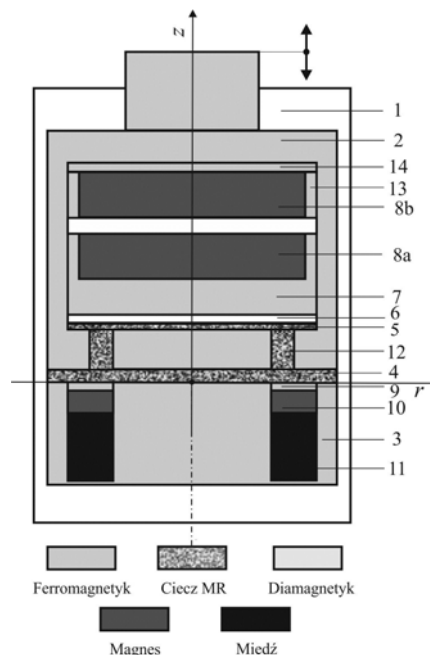
Celem obliczeń wykonanych na potrzeby tej pracy jest wyznaczenie indukcji magnetycznej w tłumiku, składowej osiowej indukcji w funkcji promienia szczeliny roboczej oraz średniej wartości modułu indukcji i siły oddziaływania magnetycznego w komorze kompensacyjnej w funkcji wysokości szczeliny roboczej.

Budowa i działanie tłumika

Budowę tłumika przedstawiono schematycznie na Rys. 1. Zaznaczono na nim główne elementy konstrukcyjne tłumika (symbole 1–14) oraz podano rodzaje materiałów zastosowanych do jego budowy (legenda). Tłumik posiada trzy współosiowe cylindry, dwa wewnętrzne wykonane z materiału ferromagnetycznego, tłok (2) oraz układ rdzenia (3) i cylinder zewnętrzny (1), wykonany z materiału diamagnetycznego. W komorze kompensacyjnej, umieszczonej współosiowo w tłoku (2), znajduje się układ dwóch magnesów trwałych (8a, b) o kształcie walcowym i osiowej polaryzacji namagnesowania wzajemnie przeciwnej. Prowadnica (7) magnesu (8a), wykonana z materiału ferromagnetycznego, jest zespolona z tłokiem pływającym (6). Tłok (6) rozdziela ciecz MR (5) od układu magnesów (8a, b).

Magnes (8b) jest osadzony w pierścieniu ferromagnetycznym (13). Wprowadzenie podkładek (14), wykonanych z materiału ferromagnetycznego, pozwala na

ustalenie wstępnej odległości między magnesami trwałymi (8a, b). Górna powierzchnia tłoka (2) stanowi podstawę, do której jest mocowany zewnętrzny obiekt, przemieszczający się wzdłuż osi z. Symetryczny układ kanałów (12), znajdujących się w tłoku (2), łączy szczelinę roboczą (4) z komorą kompensacyjną. Szczelinę roboczą (4) o zmiennej wysokości i wypełnioną cieczą MR, tworzą układ rdzenia (3) i tłoka (2). Współosiowo z rdzeniem (3) jest umieszczony magnes trwały (10) o kształcie pierścieniowym i namagnesowaniu promieniowym oraz cewka sterująca o kształcie toroidalnym (11), nawinięta drutem miedzianym. Magnes trwały (10) i cewkę oddziela od szczeliny roboczej (4), związany trwale z rdzeniem (3), pierścień diamagnetyczny (9).



Rys. 1. Schemat tłumika

Zmiana wysokości szczeliny roboczej (4) następuje wskutek ruchu obiektu zewnętrznego. Podczas zmniejszania wysokości szczeliny roboczej, ciecz MR jest ściskana, a jej nadmiar wypływa kanałami (12) do komory kompensacyjnej. Tłok pływający (6) wraz z układem magnesów trwałych (8a, b) przeciwdziała nadmiernemu napływowi cieczy MR (5) do komory kompensacyjnej. Magnes (10) wraz z pierścieniem diamagnetycznym (9) trwale połączonym z rdzeniem (3)

zapewnia uzyskania odpowiedniego rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie roboczej (4). Pierścień (9) chroni również otoczenie cewki i magnesu (10) przed penetracją cieczą MR.

Główne elementy konstrukcyjne tłumika mają następujące wymiary:

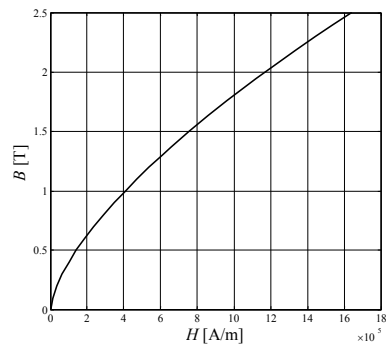
- cylinder (1); średnica zewnętrzna 70 mm, średnica wewnętrzna 64 mm, wysokość 100 mm, grubość dna górnego i dolnego 6 mm,
- tłok (2); średnica zewnętrzna 64 mm, wysokość 61 mm (komora kompensacyjna: średnica 55 mm, wysokość 45 mm),
- rdzeń 3; średnica zewnętrzna 64 mm, wysokość 24 mm (kanał toroidalny na cewkę, magnes i pierścień: średnica zewnętrzna 55 mm, średnica wewnętrzna 35 mm, wysokość 23 mm),
- szczelina robocza (4); średnica zewnętrzna 64 mm, zmienność wysokości w przedziale (0.25, 2.25) mm,
- tłok (6) w komorze kompensacyjnej; średnica 55 mm, wysokość 2 mm,
- prowadnica (7); średnica zewnętrzna 55 mm, wysokość 18 mm (wydrążenie: średnica 50 mm, wysokość 10 mm),
- magnesy trwałe (8a, b); średnica 50 mm, wysokość 10 mm),
- pierścień (9); średnica zewnętrzna 55 mm, średnica wewnętrzna 35 mm, wysokość 3 mm,
- magnes trwały (10); średnica zewnętrzna 55 mm, średnica wewnętrzna 35 mm, wysokość 5 mm,
- cewka (11); średnica zewnętrzna 55 mm, średnica wewnętrzna 35 mm, wysokość 15 mm, liczba zwoi 200),
- kanały; średnica 5 mm, liczba 6,
- pierścień (13); średnica zewnętrzna 55 mm, średnica wewnętrzna 50 mm, wysokość 10 mm,
- podkładki (14); średnica zewnętrzna 55 mm, wysokość 1 mm, liczba 5.

Obliczenia

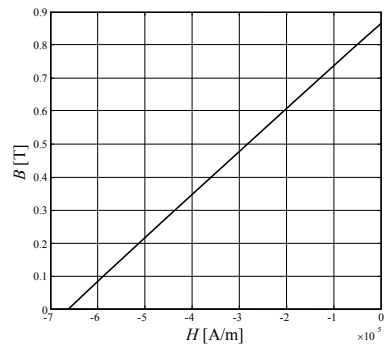
Do obliczeń założono osiowo-symetryczny model MES tłumika i charakterystyki magnesowania $B(H)$ ferromagnetyka, magnesów trwałych oraz cieczy MR z Rys. 2 a-c. Obliczenia przeprowadzono przy użyciu programu FlexPDE w wersji 5.022 [7]. Dla rozpatrywanych przypadków (odnoszących się do przewidywanych aplikacji) przyjęto następujące oznaczenia: magnes trwały; M, cewka, w której płynie prąd I ; $C_I = \dots$, magnes trwały oraz cewka, w której płynie prąd I : $M_C_I = \dots$

W pierwszym etapie wyznaczono rozkład indukcji magnetycznej w tłumiku (Rys. 3a-d) oraz zależność składowej osiowej indukcji i jej modułu od promienia w szczelinie roboczej (Rys. 4, 5). Rozkład pola magnetycznego z Rys. 3a-d odnosi się do arbitralnie przyjętej wysokości szczeliny roboczej $h=1.45$ mm. Rozkład ten wskazuje, że magnesy trwałe (8a, b) nie zakłócają pola w szczelinie roboczej (4) w żadnym z rozpatrywanych przypadków. Podobnie, pole magnetyczne magnesu trwałego (10) i cewki sterującej (11) z prądem I , nie wpływa na siłę oddziaływania F magnesów w komorze kompensacyjnej. Przy braku prądu ($I=0$ A) w cewce sterującej, magnes trwały (10) zapewnia w szczelinie roboczej składową indukcji B_z o wartości pozwalającej na działanie tłumika w tym stanie.

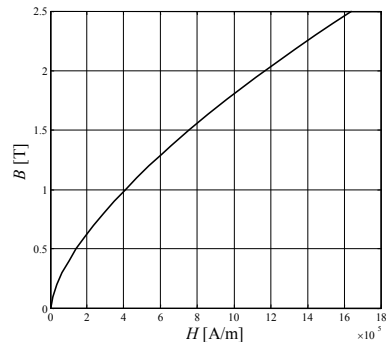
Na Rys. 4 pokazano zależność składowej indukcji magnetycznej $B_z(r)$ w połowie wybranej wysokości szczeliny roboczej. Z kolei na Rys. 5. przedstawiono zależność wartości średniej modułu składowej osiowej indukcji magnetycznej $|B_{zsr}(h)|$ od wysokości szczeliny. Ta zależność jest punktem wyjścia do obliczenia siły tłumika.



a)

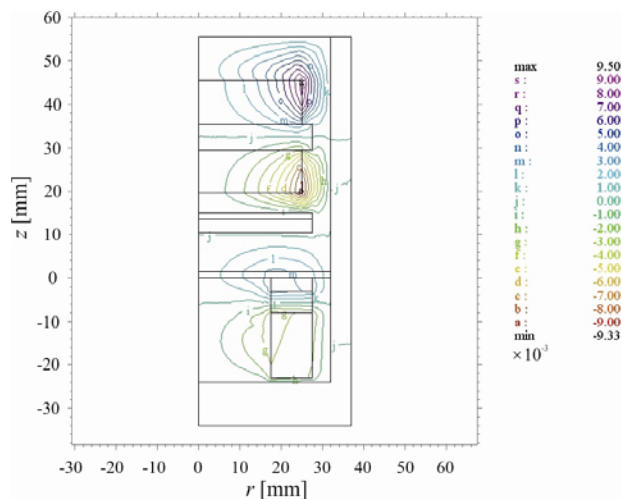


b)

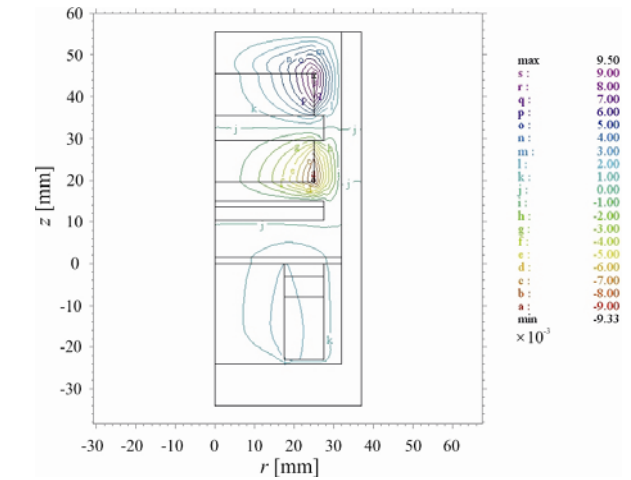


c)

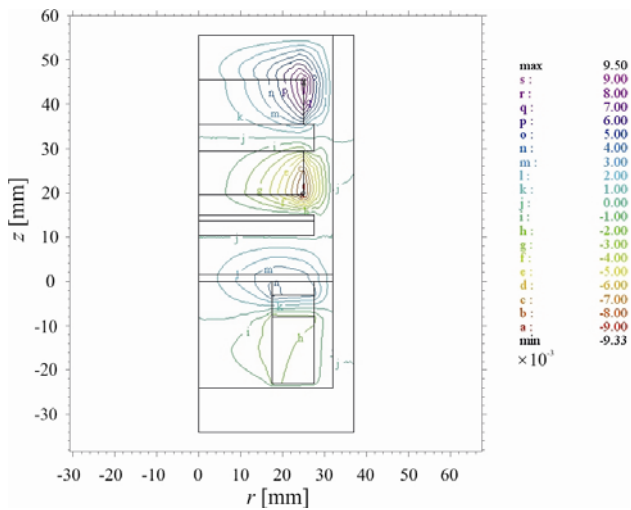
Rys. 2. Charakterystyki magnesowania: a) ferromagnetyka, b) magnesu trwałego, c) cieczy MR



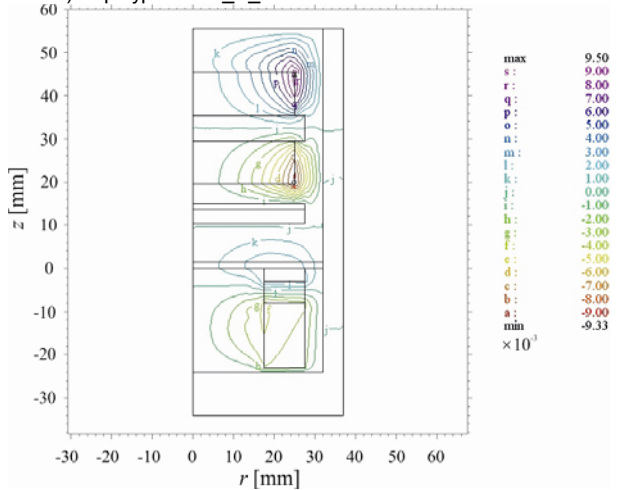
a) przypadek: M



b) przypadek: C_I=2 A



c) przypadek: M_C_I=2 A



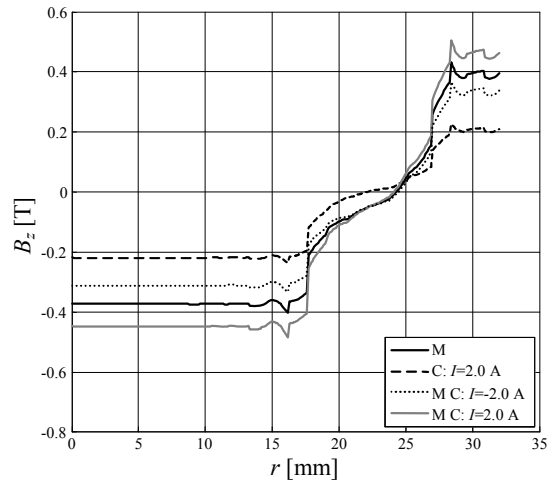
d) przypadek: M_C_I=2 A

Rys. 3. Rozkład indukcji magnetycznej w tłumiku

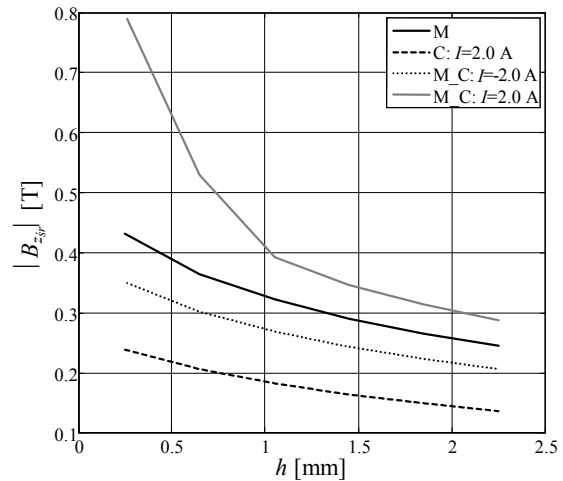
W drugim etapie wyznaczono zależność modułu składowej osiowej indukcji magnetycznej $|B_z|$ od promienia szczeliny roboczej (Rys. 6) i wartości średniej modułu tejże składowej $|B_{zsr}|$ od wysokości szczeliny roboczej (Rys. 7) przy różnym natężeniu prądu w cewce sterującej.

Zależność siły oddziaływania magnetycznego w komorze kompensacyjnej od wysokości szczeliny roboczej pokazano na Rys. 8. Zamieszczone wykresy obrazują możliwości

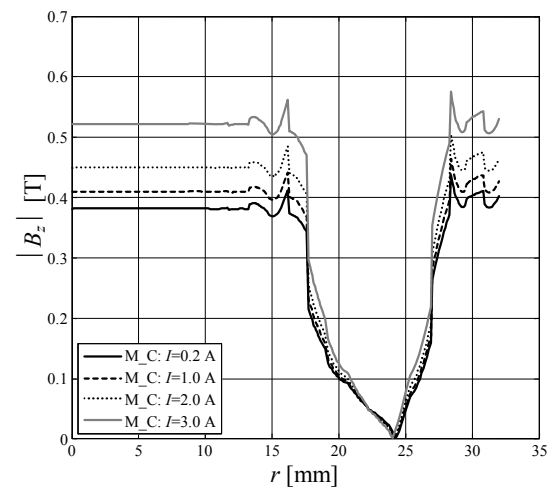
uzyskania wymaganej wartości siły przez zmianę początkowej odległości między magnesami trwałymi. Tej zmiany można dokonać przez wykorzystanie odpowiedniej liczby podkładek ferromagnetycznych (14).



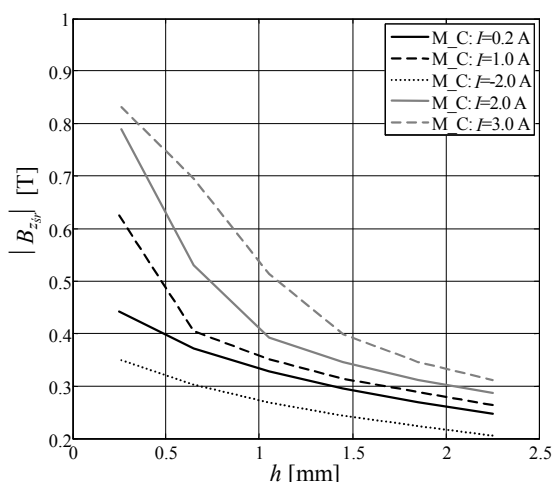
Rys. 4. Zależność składowej osiowej indukcji magnetycznej od promienia szczeliny roboczej



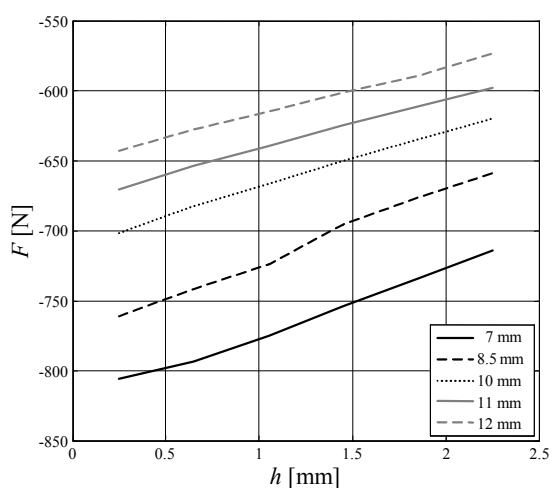
Rys. 5. Zależność wartości średniej modułu składowej osiowej indukcji magnetycznej od wysokości szczeliny roboczej



Rys. 6. Zależność modułu składowej osiowej indukcji magnetycznej od promienia szczeliny roboczej



Rys. 7. Zależność wartości średniej modułu składowej osiowej indukcji magnetycznej od wysokości szczeliny roboczej przy różnym natężeniu prądu w cewce sterującej



Rys. 8. Zależność siły oddziaływania magnetycznego w komorze kompensacyjnej od wysokości szczeliny roboczej

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki analizy polowej nowo opracowanej konstrukcji tłumika z cieczą MR działającą w trybie ściskania. W obliczeniach wyznaczono: rozkład indukcji magnetycznej w tłumiku i jej moduł w funkcji promienia szczeliny roboczej oraz średnią wartość modułu tej składowej w funkcji wysokości szczeliny roboczej. Dodatkowo określono zależność siły oddziaływania magnetycznego w komorze kompensacyjnej od wysokości szczeliny roboczej. Zaproponowane rozwiązanie konstrukcyjne tłumika niesie następujące korzyści:

- prostą konstrukcję tłumika,
- pole magnetyczne magnesu trwałego (10) w szczeliny roboczej zapewnia dostateczną wartość indukcji magnetycznej dla działania tłumika w przypadku braku prądu w cewce sterującej ($I=0$ A),
- pole magnetyczne magnesów trwałych i cewki z prądem zamyka się w elementach ferromagnetycznych tłumika.

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

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] Kim J. H., Damping control device with magnetorheological fluid and engine mount having the same, United States Patent Application Publication US 2012/0132492A1, 2012.
- [4] Sapiński B., Wibroizolator z cieczą magnetoreologiczną. Wniosek o udzielenie patentu P.404489, 2013.
- [5] Sapiński B., Krupa S., Wibroizolator z cieczą magnetoreologiczną pracującą w trybie ściskania. Wniosek o udzielenie patentu P.406179, 2013.
- [6] Sapiński B., Krupa S., Wibroizolator magnetoreologiczny działający w trybie ściskania z komorą kompensacyjną w tłoku. Wniosek o udzielenie patentu P410523, 2014.
- [7] 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.
- [8] FlexPDE version 5.022, PDE Solutions Inc.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Bogdan Sapiński, AGH, Katedra Automatyk 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.