

Straty wiroprowadowe i siła zaczepowa w wibroizolatorze z cieczą MR działającą w trybie ściskania

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych rozkładu gęstości mocy strat wiroprowadowych i siły zaczepowej prototypowego wibroizolatora z cieczą magnetoreologiczną (MR) pracującą w trybie ściskania. Obliczenia przeprowadzono przy użyciu programu Opera-2d.

Abstract. The paper presents results of numerical calculations of eddy current losses and cogging force in the MR vibration-isolator prototype. The calculations were conducted by the program Opera 2-d. **Eddy current losses and cogging force and in an MR vibration-isolator in squeeze mode**

Słowa kluczowe: wibroizolator MR, straty wiroprowadowe, siła zaczepowa, obliczenia numeryczne.

Keywords: MR vibration-isolator, eddy current losses, cogging force, numerical calculations

doi:10.12915/pe.2014.11.52

Wstęp

Obiektem analizy jest prototypowy wibroizolator z cieczą MR działającą w trybie ściskania, mający pełnić rolę elementu wykonawczego w semiaktywnym układzie redukcji drgań zawieszenia silnika samochodu [2, 3, 4, 7, 12, 13].

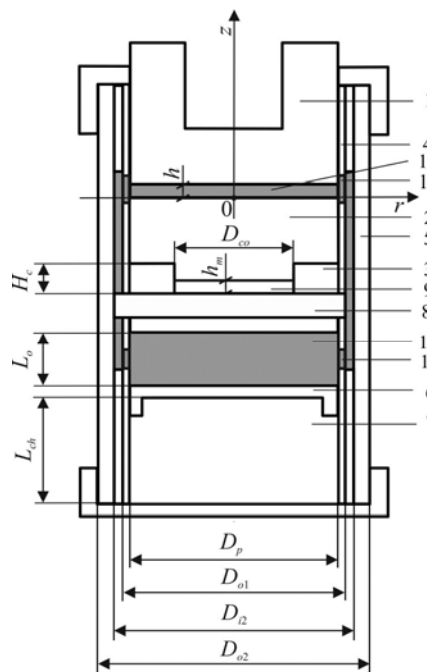
Wcześniejsze prace autorów opublikowane w czasopiśmie i poświęcone temu urządzeniu dotyczyły analizy pola magnetycznego w wibroizolatorze oraz wytwarzanej przez niego siły w stanach quasi-stacjonarnych [10, 11]. Celem obliczeń w niniejszej pracy są straty wiroprowadowe powstające w wibroizolatorze pod wpływem oddziaływania zmiennego pola magnetycznego oraz siła zaczepowa. Do obliczeń założono, że zmienność wysokości szczeliny wibroizolatora jest opisana monoharmoniczną funkcją okresową.

Opis wibroizolatora

Schemat wibroizolatora MR przedstawiono na Rys. 1. 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, rozdziela od gazu ciecz MR przepływającą do/z komory. W komorze kompensacyjnej, poniżej tłoka pływającego (6) jest sprężony gaz (np. azot), pod ciśnieniem kilku atmosfer, który rozdziela ciecz MR (10) od gazu. Cylinder wewnętrzny ma otwory (11) w dolnej części i (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 połączoną z obiektem wibroizolowanym. Znajdujący się na podstawie rdzeń 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. stal nierdzewna austenityczna).

Rdzeń może opcjonalnie zawierać spolaryzowany osiowo magnes trwały (9). Gdy nie ma zasilania zewnętrznego, indukcja magnetyczna w wibroizolatorze, jest wytwarzana przez magnes trwały. W zależności od kierunku przepływu prądu w cewce sterującej, wektor indukcji magnetycznej ma zwrot zgodny lub przeciwny do zwrotu wektora indukcji wytwarzanego przez magnes trwały. Wynikiem oddziaływania pola magnetycznego jest

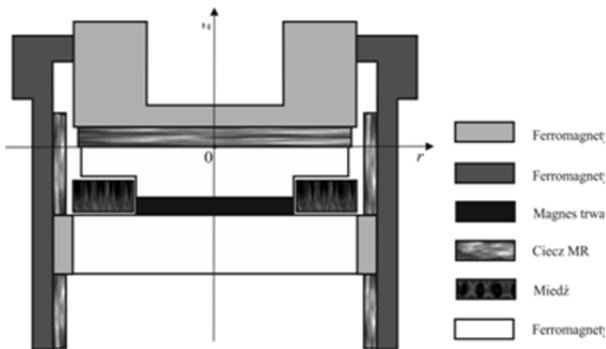
zmiana lepkości pozornej cieczy MR i przez to zmiana oporów promieniowego przepływu cieczy MR. Zmniejszenie wysokości szczeliny roboczej, na skutek zmiany położenia tłoka (1), powoduje wypływ cieczy MR ze szczeliny przez otwory (12) i przez otwory (11) do komory (7). Zmiana objętości cieczy MR w komorze kompensacyjnej skutkuje przemieszczeniem tłoka pływającego (6).



Rys. 1. Schemat 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 Δh	0.25–2.5 mm
Średnica rdzenia D_{c0}	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_c	10.0 mm
Wysokość magnesu h_m	2.50 mm
Średnica uzwojenia cewki d_w	0.51 mm
Liczba zwojów cewki N	100



Rys. 2. Materiały elementów konstrukcyjnych wibroizolatora

Wymiary elementów konstrukcyjnych wibroizolatora podano w Tabeli 1, natomiast materiały użyte, z których wykonano te elementy wyszczególniono na Rys. 2.

Straty wiroprowodowe

Straty występujące w litych, ferromagnetycznych elementach wibroizolatora, przy oddziaływaniu zmiennego pola magnetycznego można podzielić na straty wiroprowodowe i histerezowe [6]. Straty histerezowe są proporcjonalne do powierzchni statycznej symetrycznej pętli histerezy i do częstotliwości przemagnesowania. Straty wiroprowodowe są proporcjonalne do przewodności elektrycznej i kwadratu częstotliwości przemagnesowania. Straty te, oblicza się na podstawie czasowego przebiegu oraz przestrzennego rozkładu wektora gęstości prądu lub na podstawie wektora strumienia gęstości mocy (wektora Poyntinga) przez powierzchnię rozważanego przewodnika.

Pulsacja indukcji magnetycznej w wibroizolatorze jest spowodowana zmianą wysokości szczeliny roboczej (wypełnionej cieczą MR), która wynika z wymuszenia kinematycznego. Celem obliczeń w rozpatrywanym urządzeniu są wyłącznie straty wiroprowodowe. Poprawne, w sensie numerycznym, obliczenie tych strat przy użyciu programu Opera-2d w wersji 15R2 [8], nie jest możliwe, gdyż modelowanie pola elektromagnetycznego w układach elektromechanicznych wymaga przyjęcia stałej wysokości szczeliny wypełnionej ośrodkiem o stałej przenikalności magnetycznej. Z tego względu zaproponowano model matematyczny, który pozwala wyznaczyć prądy wirowe, a w konsekwencji związane z nimi straty, w sposób przybliżony. Składową zmienną indukcji magnetycznej można wygenerować zastępczą, wymuszoną składową zmienną gęstości prądu w cewce sterującej. Odpowiedzią na to, są prądy wirowe w litych elementach wibroizolatora. Wartość tej zastępczej, wymuszonej składowej zmiennej gęstości prądu oszacowano na podstawie zmiany indukcji magnetycznej, odpowiadającej zmianie wysokości szczeliny roboczej.

W obliczeniach założono, że zmienność wysokości szczeliny roboczej jest opisana monoharmoniczną funkcją okresową, co skutkuje to okresową zmiennością indukcji magnetycznej.

W elementach wibroizolatora przewodzących prąd elektryczny, obowiązują równania Maxwella [5]:

$$(1) \quad \text{rot } \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$(2) \quad \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j}$$

gdzie: \mathbf{B} - okresowo zmienny w czasie wektor indukcji magnetycznej $B(r, z, t) = B_0 + \sum_{k=1}^{\infty} B_{mk} \sin k\omega t$, \mathbf{H} - natężenie pola magnetycznego, \mathbf{E} - natężenie pola elektrycznego, \mathbf{j} - gęstość prądu.

Gęstość prądu \mathbf{j} jest reprezentowana przez pole magnesu trwałego, prąd w cewce j_c , prądy wirowe j_w i wynika z ruchu tłoka $x(t) = h_0 + A(1 - \sin 2\pi ft)$.

Natężenie pola przepływowego prądów wirowych, indukowane w elementach obwodu magnetycznego wibroizolatora wyraża wzór:

$$(3) \quad \mathbf{j}_w = \gamma \mathbf{E}$$

Wprowadzając potencjał wektorowy $\mathbf{B} = \text{rot}(r\mathbf{A}_\varphi)$ i uwzględniając osiowo-walcową symetrię urządzenia, otrzymuje się składnik laplasjanu wektorowego pola \mathbf{A} :

$$(4) \quad \nabla^2(r\mathbf{A}_\varphi) = -\mu(B)j_\varphi$$

oraz wzór na gęstość prądów wirowych:

$$(5) \quad \mathbf{j}_w = -\gamma \frac{\partial(r\mathbf{A}_\varphi)}{\partial t}$$

i pola przepływowego:

$$(6) \quad \mathbf{E}_w = -\frac{\partial(r\mathbf{A}_\varphi)}{\partial t}$$

przy czym: $\mathbf{j} = j_\varphi \mathbf{1}_\varphi$, $j_\varphi = j_c + j_w$

Obliczenia gęstości prądów wirowych będą ograniczone do pierwszej harmonicznej indukcji magnetycznej $B(r, z, t)$, której odpowiada harmoniczna gęstości prądu lokowanego w cewce $j_{c1}(\varphi, t) = j_{mc1} \sin 2\pi ft$

Wykorzystanie wzorów (1)-(6) prowadzi do równania:

$$(7) \quad \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial(r\mathbf{A}_\varphi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial(r\mathbf{A}_\varphi)}{\partial z} \right) + \gamma \frac{\partial(r\mathbf{A}_\varphi)}{\partial t} = -j_{mc1} \sin 2\pi ft$$

co w dziedzinie w dziedzinie zespolonej ma postać:

$$(8) \quad \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial(r\mathbf{A}_\varphi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial(r\mathbf{A}_\varphi)}{\partial z} \right) + j\gamma 2\pi f r \mathbf{A}_\varphi = -j_{c1}$$

Gęstość objętościowa mocy strat prądów wirowych i moc strat wyrażają odpowiednio wzory:

$$(9) \quad p_w = j_w E_w = \gamma 4\pi^2 f^2 (r\mathbf{A}_\varphi)^2$$

natomiast moc:

$$(10) \quad P_w = \int_V p_w dV$$

Siła zaczepowa

Siła zaczepowa wynika z oddziaływania pola magnetycznego występującego w wibroizolatorze i ferromagnetyków [1]. Tę niepożądaną siłę można ograniczyć dobierając odpowiednio wymiary elementów obwodu magnetycznego urządzenia. Do obliczenia siły zaczepowej wykorzystano metodę tensora naprężeń powierzchniowych Maxwella [9]. Według tej metody, w układzie z polem magnetycznym o indukcji \mathbf{B} , na element układu o objętości V zamkniętej powierzchnią S działa siła:

$$(11) \quad \mathbf{F} = \int_V \mathbf{f} dV$$

gdzie \mathbf{f} jest gęstością siły:

$$(12) \quad \mathbf{f} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} = \frac{1}{\mu} (\text{rot } \mathbf{B} \times \mathbf{B}).$$

Główną składową siły \mathbf{F} w wibroizolatorze jest składowa F_z . Biorąc pod uwagę tensor naprężeń powierzchniowych Maxwella, składową f_z gęstości siły \mathbf{f} można wyrazić wzorem:

$$(13) \quad f_z = \left\{ \frac{1}{\mu} \frac{\partial(B_x B_z)}{\partial x} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial(B_y B_z)}{\partial y} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial(B_z^2 - B^2/2)}{\partial z} \right\}$$

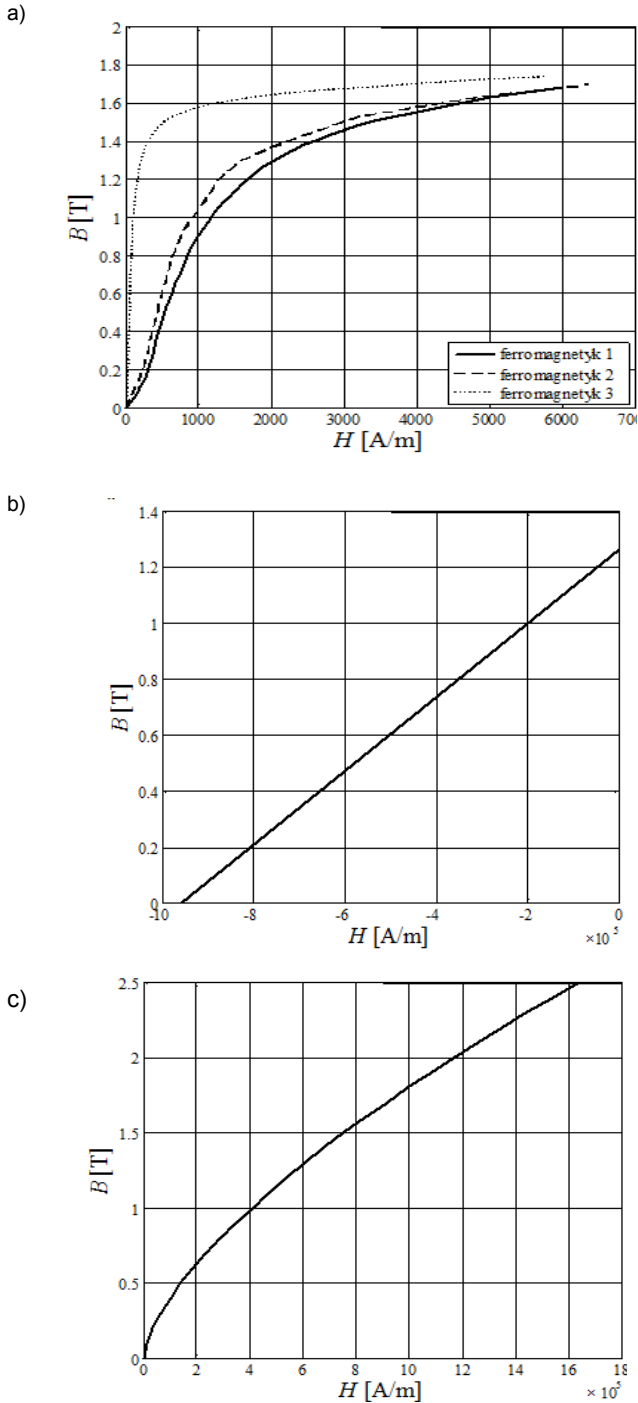
Składowa F_z zdefiniowana jako $F_z = \int_V f_z dV$ jest siłą zaczepową w wibroizolatorze.

Obliczenia

Do obliczeń przyjęto osiowo-symetryczny model MES wibroizolatora oraz charakterystyki magnesowania $B(H)$ elementów ferromagnetycznych, magnesu trwałego i cieczy MR jak na Rys. 3a-c. W obliczeniach wykorzystano zmodyfikowany wektor potencjału magnetycznego (rA) i liniowe elementy skończone. Równanie pola we współrzędnych walcowych (r, f, z) ma postać:

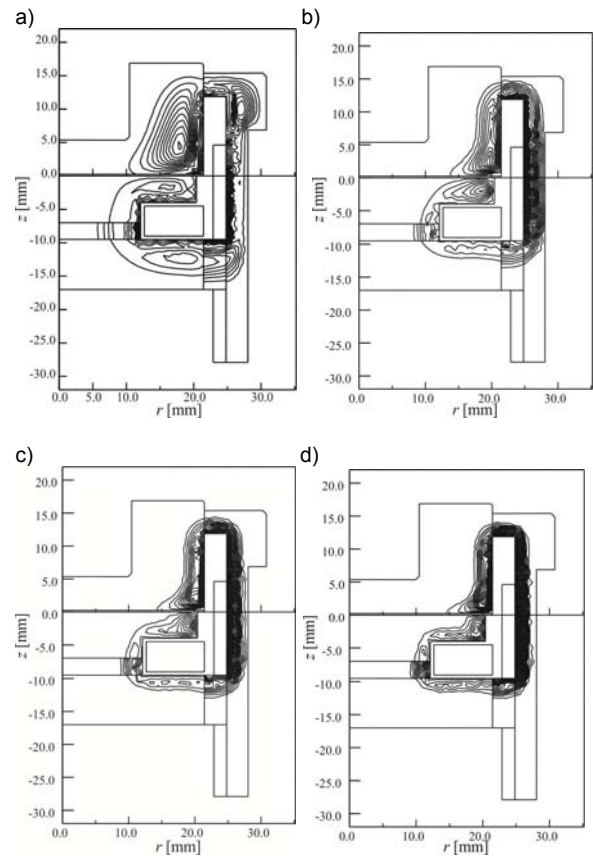
$$(14) \quad \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial(rA\varphi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial(rA\varphi)}{\partial z} \right) = -j_c$$

Liczba elementów skończonych wyniosła 4971, a liczba węzłów 2580.

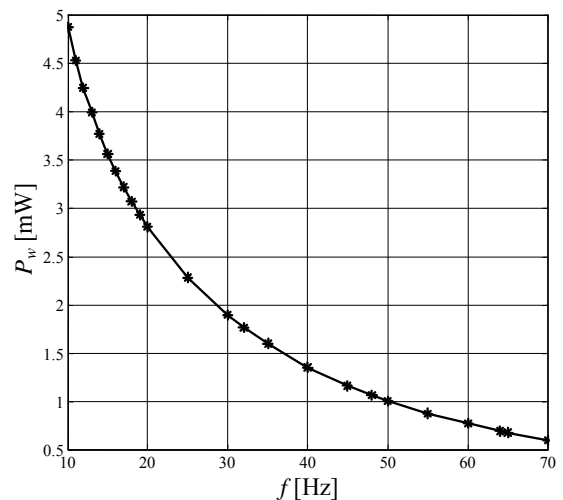


Rys. 3. Charakterystyki magnesowania: a) elementów ferromagnetycznych, b) magnesu trwałego, c) cieczy MR

Wyniki obliczeń strat wiroprowadowych pokazano na Rys. 4 i 5. Rys. 4 obrazuje rozkład gęstości mocy strat w elementach ferromagnetycznych wibroizolatora przy częstotliwości wymuszenia f : 16, 32, 48 i 64 Hz. Można zauważyć, że gęstość mocy strat zwiększa się ze wzrastającą częstotliwością, przy zmniejszającym się obszarze występowania strat. Z kolei na Rys. 5 przedstawiono zależność strat wiroprowadowych w elementach ferromagnetycznych od częstotliwości.

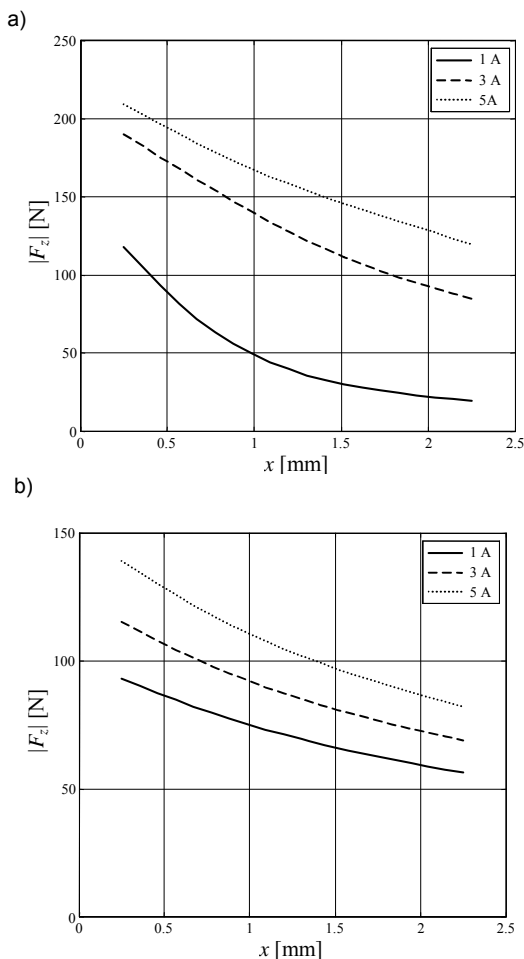


Rys. 4. Gęstość mocy strat wiroprowadowych w elementach ferromagnetycznych przy częstotliwości: a) 16 Hz, b) 32 Hz, c) 48 Hz, d) 64 Hz



Rys. 5. Zależność strat wiroprowadowych w elementach ferromagnetycznych od częstotliwości

Na Rys. 6 pokazano zależność siły zaczepowej od przemieszczenia tłoka wibroizolatora przy natężeniu prądu w cewce: 1, 3 i 5 A, dla przypadku gdy w urządzeniu nie występuje lub występuje magnes trwały. Wykresy dotyczą sytuacji, gdy kierunek przepływu prądu w cewce sterującej, wektor indukcji magnetycznej wynikający z prądem w cewce ma zwrot przeciwny do zwrotu wektora indukcji wytwarzanego przez magnes trwały.



Rys. 6. Zależność siły zaczepowej od wysokości szczeliny przy różnym natężeniu prądu: a) bez magnesu, b) z magnesem

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych gęstości mocy strat wiroprądowych i siły zaczepowej wibroizolatora z cieczą MR pracującą w trybie ściskania. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że:

- gęstość mocy strat zwiększa się przy wzrastającej częstotliwości i zmniejszającym się obszarze występowania strat,
- maksymalna siła zaczepowa osiąga wartość około 200 N, co stanowi 10% wartości siły wytwarzanej przez urządzenie.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że z jednej strony moc strat wiroprądowych jest mało znaczącym składnikiem w ogólnym bilansie mocy wibroizolatora, natomiast siła zaczepowa urządzenia powinna być ograniczona przez odpowiednie kształtowanie obwodu magnetycznego urządzenia.

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

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

LITERATURA

- [1] Boldea I., Linear Electric Machines, Drives and MAGLEWs Handbook, CRC Press, Taylor & Francis Group, (2013)
- [2] Farjoud A., Craft M., Burke W., Ahmadian M., Experimental investigation of MR squeeze mounts. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 22 (2011), 1645–1652,
- [3] Farjoud A., Vahdati N., Fah Y., MR-fluid yield surface determination in disc-type MR rotary brakes. Smart Materials and Structures, 17(3) (2008), 1–8
- [4] Gołdasz J., Sapiński B., Model of a squeeze mode magnetorheological mount. Solid State Phenomena, 177 (2011), 116–124
- [5] Griffiths D. J., Podstawy elektrodynamiki, PWN, Warszawa, (2001)
- [6] Dąbrowski M., Pola i obwody magnetyczne maszyn elektrycznych, WNT Warszawa, (1971)
- [7] Kim J. H., Damping control device with magnetorheological fluid and engine mount having the same, United States Patent Application Publication US 2012/0132492A1, (2012)
- [8] Opera-2d version 15R2, User Guide, Cobham Technical Services, Vector Fields Software, (2011)
- [9] Sapiński B., Krupa S., Matras A., Siła zaczepowa w elektromechanicznym przetworniku energii o ruchu liniowym, Przegląd Elektrotechniczny, R88, 12a/2012, 83–87
- [10] 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
- [11] Sapiński B., Krupa S., Analiza siły wibroizolatora z cieczą magnetoreologiczną działającą w trybie ściskania, Przegląd Elektrotechniczny (w druku)
- [12] Sapiński B., Wibroizolator z cieczą magnetoreologiczną, Biuletyn Urzędu Patentowego Nr 17 (1034) (2013), 27
- [13] Zhang X. J., Farjoud 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 (2011), 1717–1728

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