

MODELOWANIE PASYWNYCH ŁOŻYSK MAGNETYCZNYCH

W artykule przedstawiany jest model siły magnetycznej między dwoma magnesami. Model został wyznaczony dla magnesów cylindrycznych. Pierwszy z magnesów jest źródłem niejednorodnego pola magnetycznego. Drugi magnes jest umieszczony w niejednorodnym polu magnetycznym i posiada sześć stopni swobody. Model opisuje siły odpychania między magnesami łożyska. Kierunek i wartość sił magnetycznych zależy od wektorów magnetyzacji magnesów.

PASSIVE MAGNETIC BEARING SIMULATION

In this paper is presented model of magnetic forces between two magnets. This model was made for cylindrical magnets. First magnet is source of heterogeneous magnetic field. Second magnet is located in heterogeneous magnetic field and it has six degree of freedom. Model is described repulsive forces between magnets of bearing. Direction and value of repulsive forces are depended on magnets of magnetization.

1. Wstęp

Do łożyskowania wysokoobrotowych wirników wykorzystuje się łożyska magnetyczne. Łożyska tego typu dzielimy na pasywne łożyska magnetyczne (ang. passive magnetic bearings PMB) oraz aktywne łożyska magnetyczne (ang. active magnetic bearings AMB).

Łożyska aktywne do utrzymania wirnika w stanie lewitacji, wykorzystują siły magnetyczne, których wartość ulega zmianie zależnie od położenia łożyskowanego wirnika względem nabiegunników elektromagnesu. Źródłem siły magnetycznej w łożysku magnetycznym są cewki elektromagnesów i magnesy trwałe [5].

Łożyska aktywne pobierają w trakcie pracy energię, która wykorzystywana jest do generowania siły magnetycznej sterującej położeniem wirnika. W wielu aplikacjach pobór energii z zewnątrz jest utrudniony lub niewskazany. Przykładem takiej aplikacji jest kinetyczny akumulator energii, którego zadaniem jest gromadzenie i przechowywanie energii. Tym samym łożyska aktywne, które pobierają energię w trakcie pracy, znacznie obniżają sprawność kinetycznego akumulatora energii[6].

Dlatego zaproponowano zastosowanie pasywnych łożysk magnetycznych w kinetycznym akumulatorze energii. Łożysko to zostanie wykorzystane do ograniczania ruchu osiowego wirnika i przenoszenia ciężaru pionowo ustawionego wirnika kinetycznego akumulatora energii.

Modelowanie pasywnych łożysk magnetycznych, będące jednym z etapów projektowania łożyska, wymaga głębokiej wiedzy z zakresu magnetyzmu, elektrotechniki i mechaniki. W dostępnej literaturze nie występują gotowe przykłady wyjaśniające zjawisko przyciągania i odpychania magnesów, które są dostosowane do

potrzeb inżynierów. Podstawowym ograniczeniem występującym w magnetostatyce jest zastosowanie modelu Gilberta do opisu magnesów. Model ten zakłada istnienie monopoli magnetycznych na wzór ładunków elektrycznych występujących w elektrostatyce.

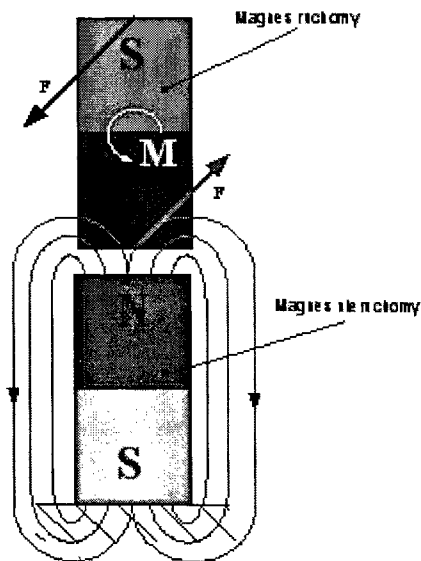
W artykule przedstawiony został model siły magnetycznej odpychającej magnes ruchomy od magnesu nieruchomego. Model pozwala ocenić poszczególne składowe siły magnetycznej. Tym samym jest możliwa ocena siły osiowej (w łożysku osiowym jest to składowa użyteczna) i sił promieniowych (w łożysku osiowym jest to składowa niepożądana). Na podstawie zaproponowanego modelu można przeprowadzić optymalizację pasywnego osiowego łożyska magnetycznego.

2. Konstrukcja łożyska pasywnego

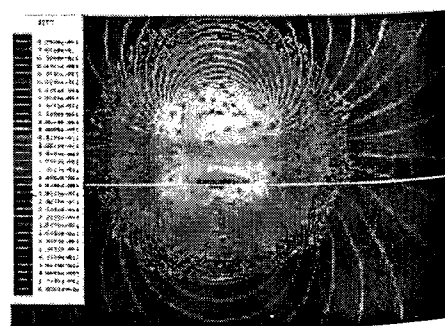
Do zbudowania łożyska magnetycznego wykorzystuje się dwa magnesy lub dwa zespoły magnesów (np. tablice Halbacha)[6]. W najprostszym przypadku są to dwa magnesy (rys. 1a), które odpychają się. Jeden z magnesów jest sztywno związany z obudową maszyny wirnikowej. Magnes ten nie może przemieszczać się. Drugi magnes umieszczony jest na swobodnym wirniku i może wraz z nim przemieszczać się. Magnes ruchomy posiada sześć stopni swobody i zachowuje się podobnie do igły magnetycznej kompasu, która ustawia się zawsze zgodnie z liniami zewnętrznego pola magnetycznego (rys. 1a).

W pasywnym łożysku magnetycznym możemy przyjąć założenie, że to magnes trwały, który nie przemieszcza się, jest źródłem stałego niejednorodnego pola magnetycznego (rys. 1b). Natomiast magnes trwały związany z wirnikiem ustawia się zgodnie z liniami zewnętrznego pola magnetycznego generowanego przez magnes związany z obudową maszyny wirnikowej.

a)



b)



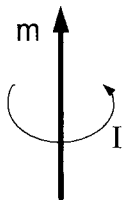
Rys. 1. Magnesy w układzie odpychającym a) niejednorodne pole magnesu b).

Ponieważ magnes związany z wirnikiem zachowuje się podobnie do igły magnetycznej, to magnes ten stara się obrócić i przesunąć biegun północny do bieguna południowego magnesu nieruchomego, natomiast biegun południowy stara się przesunąć tak by znalazł się w pobliżu bieguna północnego magnesu nieruchomego. Magnes umieszczony w stałym niejednorodnym polu magnetycznym wykonuje złożony ruch obrotowy. Tym samym występują składowe promieniowe siły magnetycznej łożyska pasywnego, co wywołuje ruch promieniowy wirnika. Ruch ten wpływa negatywnie na pracę całego systemu łożyskowania, ponieważ łożyska odpowiedzialne za sterowanie ruchem promieniowym wirnika, muszą eliminować składową promieniową siły magnetycznej pasywnego łożyska magnetycznego. Dlatego projektując pasywne łożysko magnetyczne należy tak ukształtować (dobrać) magnesy, aby składowa promieniowa osiowego łożyska pasywnego była jak najmniejsza.

3. Model siły magnetycznej pasywnego łożyska magnetycznego

Przed przystąpieniem do projektowania pasywnego łożyska magnetycznego, należy wyznaczyć model siły magnetycznej, która jest odpowiedzialna za lewitację wirnika (składowa osiowa pasywnego łożyska magnetycznego) oraz niepożądaną składową promieniową łożyska magnetycznego, którą należy ograniczyć.

Przed oszacowaniem siły magnetycznej należy przyjąć model magnesu. Do dalszej analizy przyjmujemy model Ampere'a dipola magnetycznego (rys. 2)[3]. Model ten traktuje magnes jak obszar, w którym występują bezstratne obwody prądu elektrycznego. Jako obwody prądu postrzegane są elektrony, które poruszają się po orbitach wokół jądra atomu.

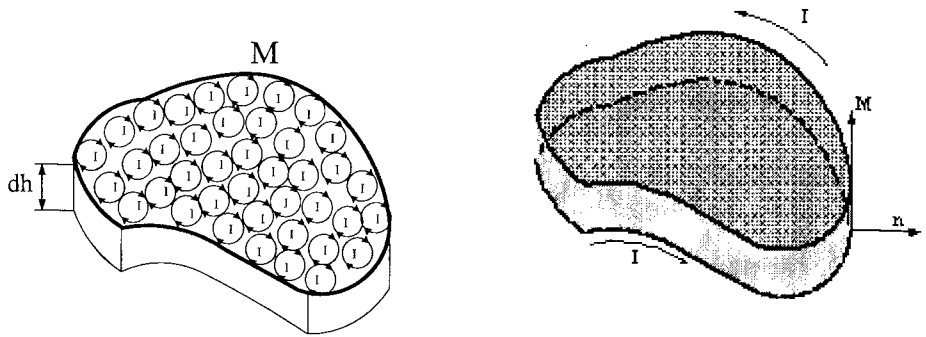


Rys. 2. Model dipola magnetycznego Ampere'a.

Magnes powstaje w wyniku przyłożenia silnego zewnętrznego pola magnetycznego. Spiny atomów, z których zbudowany jest magnes przyjmują orientację zgodną z zewnętrznym polem magnetycznym [1]. Po wyjęciu magnesu z zewnętrznego pola magnetycznego, magnes zachowuje uporządkowaną strukturę. Kierunek ruchu elektronów we wszystkich atomach jest taki sam, dlatego prądy powstające z sąsiednich bezstratnych obwodach elektrycznych znoszą się. Odstępstwem od tej reguły jest warstwa zewnętrzna magnesu. Bezstratne obwody elektryczne graniczące z powierzchnią magnesu nie mogą być zrównoważone [3]. Tym samym po powietrzni magnesu płyną mikroprądy, które będziemy nazywać prądami związanymi (rys. 3) [3]. Wartość prądu związanego jest równa:

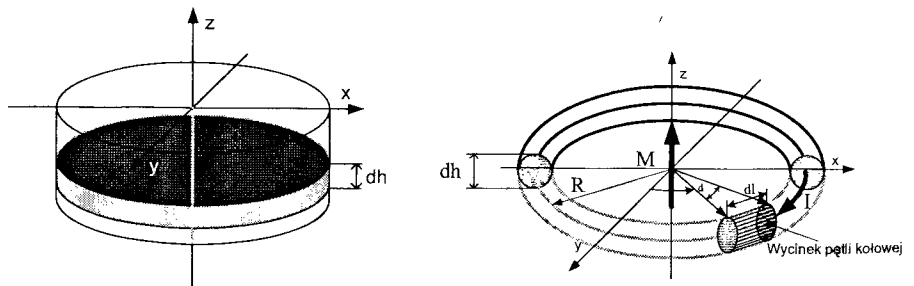
$$I = Mdh \quad (1)$$

gdzie: M – wektor magnetyzacji, dh – wysokość rozpatrywanej warstwy.



Rys. 3. Prądy związane w wycinku materii.

Do dalszej analizy przyjmijmy magnes w kształcie walca, z którego wytniemy cienką warstwę o grubości dh (rys. 4).

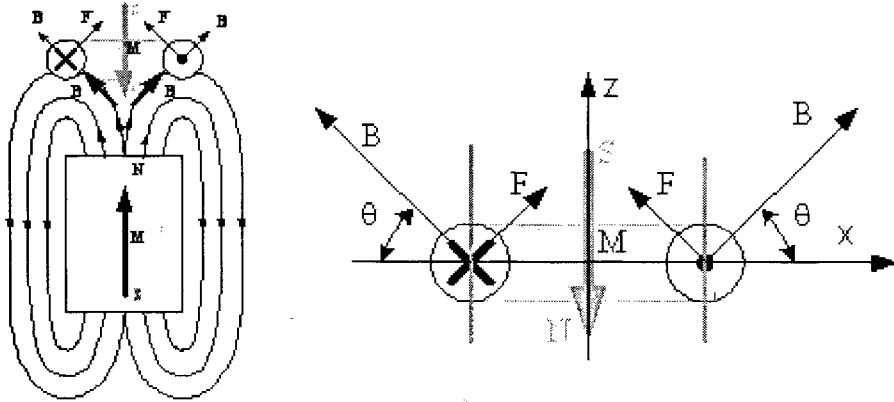


Rys. 4. Magnes cylindryczny i pętla kołowa dla wycinka o grubości dh .

Warstwę o grubości dh można traktować jako pętlę kołową, przez którą płynie prąd związany I . Jeżeli taką pętlę kołową umieścimy w niejednorodnym polu magnetycznym, pojawi się siła magnetyczna, która będzie przyciągać lub odpychać pętlę kołową. Kierunek siły zależy od orientacji wektorów magnetyzacji magnesów. Wektor magnetyzacji magnesu nieruchomego nadaje orientację liniom sił zewnętrznego pola magnetycznego, natomiast wektor magnetyzacji w magnesie ruchomym decyduje o kierunku płynącego prądu związanego przez pętlę kołową [1]. Oszacowanie wartości siły odpychania rozpatrzmy dla układu przedstawionego na rysunku 4.

W polu magnetycznym magnesu o orientacji wektora magnetyzacji przedstawionym na rys. 5, umieścimy pętlę kołową, która jest odpowiednikiem cienkiej warstwy magnesu. W pętli przepływa prąd I zgodnie z orientacją przedstawioną na rysunku 5. Możemy przyjąć, że na cienką warstwę magnesu działa pole magnetyczne o indukcji magnetycznej B i jest skierowane względem powierzchni wyznaczonej przez pętlę kołową pod kątem θ . Zakładamy że układ jest symetryczny wokół wektora magnetyzacji. Wartość indukcji magnetycznej jest równa:

$$\begin{aligned}\vec{B} &= [B_x \quad B_y \quad B_z] \\ B_x &= |B| \cos \Theta \cos \varphi \\ B_y &= |B| \cos \Theta \sin \varphi \\ B_z &= |B| \sin \Theta\end{aligned}\quad (2)$$



Rys. 5. Oddziaływanie niejednorodnego pola magnetycznego na pętlę kołową.

Na wycinek pętli kołowej dl przez który płynie prąd I (rys. 4) działa siłę Lorentza o wartości:

$$dF = I (d\vec{l} \times \vec{B}), \quad (3)$$

gdzie: dl – wycinek pętli kołowej o promieniu R , którego składowe w układzie związanym z pętlą kołową (rys. 4) przyjmują wartość:

$$\begin{aligned}dl_x &= -R \sin \varphi d\varphi, \\ dl_y &= R \cos \varphi d\varphi, \\ dl_z &= dh.\end{aligned}\quad (4)$$

Uwzględniając (2) i (4) w (3) wyznaczmy składowe siły magnetycznej działającej na wycinek dl pętli kołowej:

$$\begin{aligned}dF_x &= M |B| dh (R \sin \Theta \cos \varphi d\varphi - \cos \Theta \sin \varphi dh), \\ dF_y &= M |B| dh (\cos \Theta \cos \varphi dh + R \sin \Theta \sin \varphi d\varphi), \\ dF_z &= -M |B| dh R \cos \Theta d\varphi.\end{aligned}\quad (5)$$

Indukcja magnetyczna w magnesie opisana jest zależnością:

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M.$$

Na krzywej magnesowania możemy wyróżnić punkt, dla którego natężenie pola magnetycznego H jest równe zero. Wartość indukcji, dla $H=0$ nazywa się indukcją szczytkową lub remanencją i oznaczana jest przez B_r . Remanencja jest podstawowym parametrem podawanym przez producentów magnesów. Stąd wektor magnetyzacji jest równy:

$$B_r = \mu_0 M,$$

$$M = \frac{B_r}{\mu_0}. \quad (6)$$

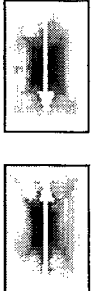
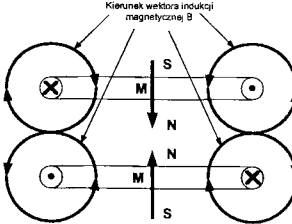
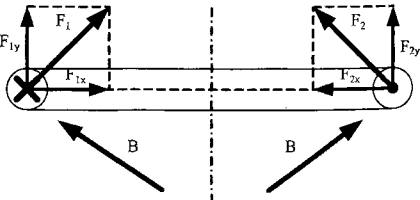
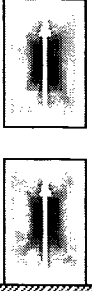
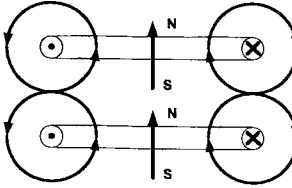
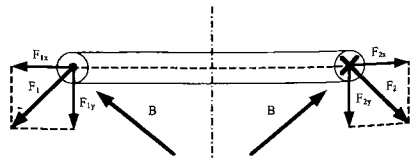
Uwzględniając (6) w (5), otrzymamy składowe siły magnetycznej działającej na wycinek pętli kołowej:

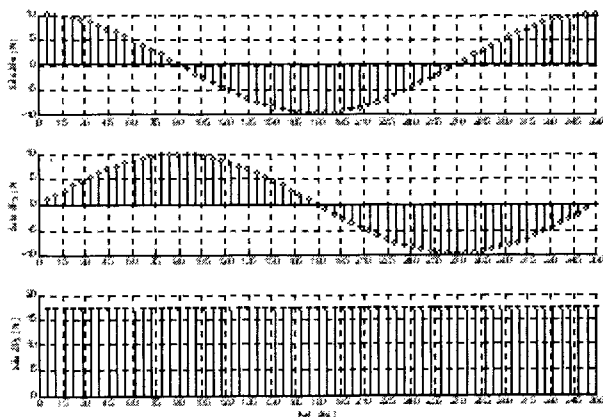
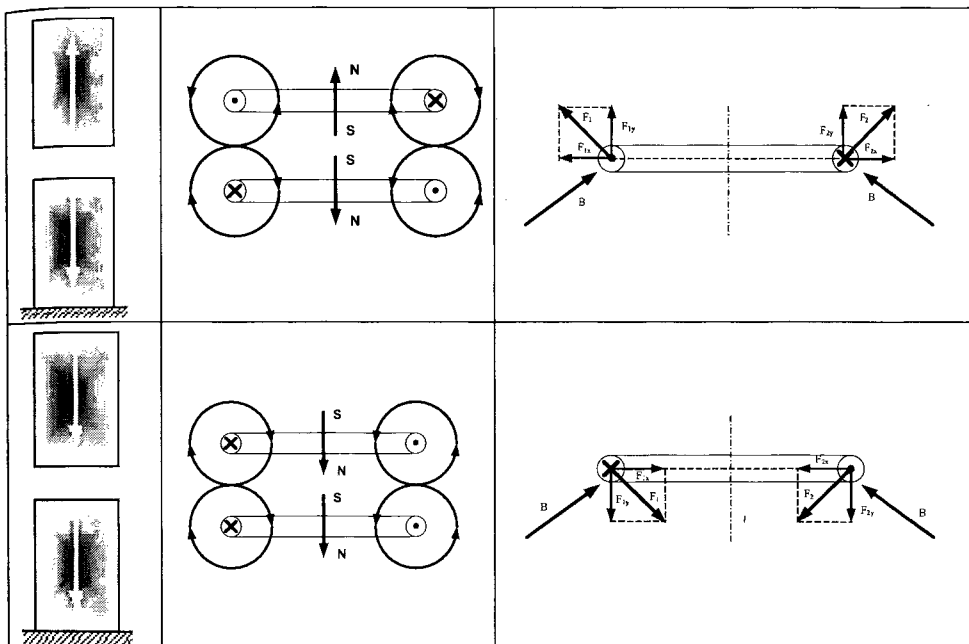
$$dF_x = \frac{B_r |B| dh}{\mu_0} (R \sin \Theta \cos \varphi d\varphi - \cos \Theta \sin \varphi dh),$$

$$dF_y = \frac{B_r |B| dh}{\mu_0} (\cos \Theta \cos \varphi dh + R \sin \Theta \sin \varphi d\varphi), \quad (7)$$

$$dF_z = -\frac{B_r |B| dh}{\mu_0} R \cos \Theta d\varphi.$$

Zależnie od orientacji wektorów magnetyzacji magnesu ruchomego i nieruchomego, możemy wyróżnić cztery przypadki oddziaływania magnesów, które przedstawiono w tabeli poniżej.

Ustawienie magnesów	Orientacja pętli kołowych magnesu związanego z obudową	Siła Lorentza i jej składowe
		
		

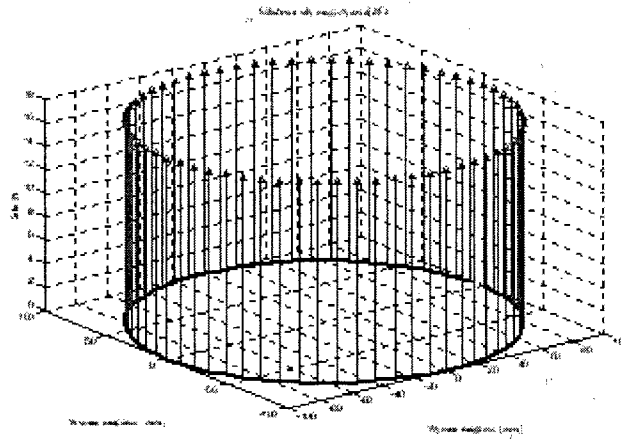


Rys. 6. Składowe siły magnetycznej w funkcji kąta ϕ dla $\theta = 30^\circ$.

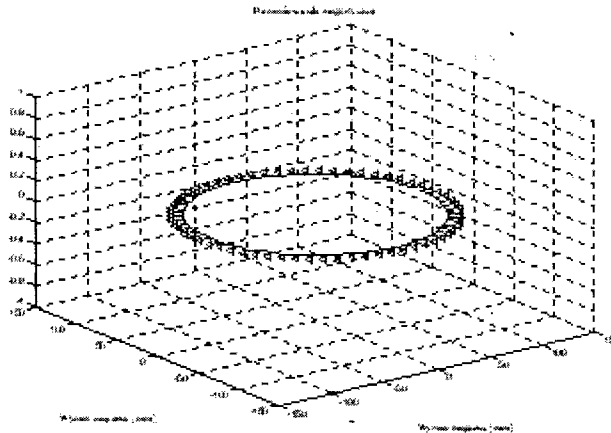
Korzystając z przedstawionego modelu, przeprowadzono analizę siły odpychania cienkiej warstwy magnesu, o promieniu $R=100$ [mm] i remanencji $B_r=1.1$ [T]. Przez pętlę kołową magnesu ruchomego przenika indukcja magnetyczna $B=0.4$ [T] pod kątem $\theta=30^\circ$. Do analizy wybrano warstwę magnesu o grubości $dh=0.1$ [mm]. Pętlę kołową podzielono na 64 punktu obliczeniowe.

Na rysunku 6 przedstawiono rozkład składowych siły magnetycznej na obwodzie pętli kołowej. Składowa dF_z w osiowym łożysku magnetycznym jest składową pozytywną, która utrzymuje wirnik akumulatora energii w stanie lewitacji. Natomiast składowe dF_y i dF_x są wielkościami pasożytniczymi, które powodują przesunięcie

magnesu w płaszczyźnie prostopadłej do osi wirnika. Na rysunku 8 przedstawiony jest rozkład składowej promieniowej siły magnetycznej. Natomiast na rysunku 7 przedstawiona jest składowa osiowa siły magnetycznej, a na rysunku 9 wypadkowa siła magnetyczna przyłożona do magnesu ruchomego.



Rys. 7. Rozkład na obwodzie magnesu składowej osiowej siły magnetycznej łożyska pasywnego.



Rys. 8. Rozkład na obwodzie magnesu magnetycznej siły promieniowej, która wytracająca wirnik z położenia równowagi.

Z zależności (7) wynika, że składowe siły magnetycznej zależą od kąta θ . Dla kąta $\theta=0^\circ$ uzyskamy maksymalną wartość składowej dF_z , jednak nie możemy wyeliminować składowych promieniowych dF_x i dF_y :

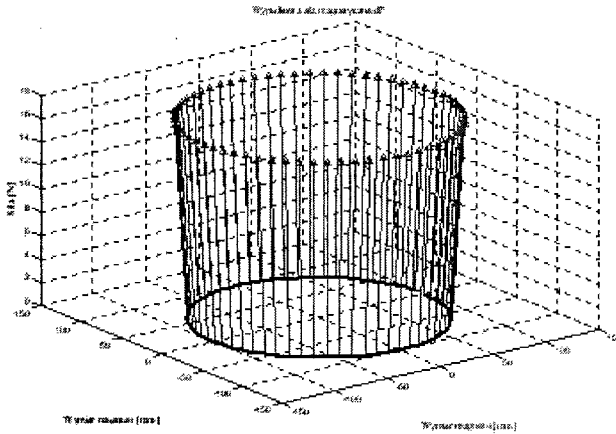
$$dF_x = -\frac{B_r |B|}{\mu_0} (dh)^2 \sin \varphi,$$

$$dF_y = \frac{B_r |B|}{\mu_0} (dh)^2 \cos \varphi,$$

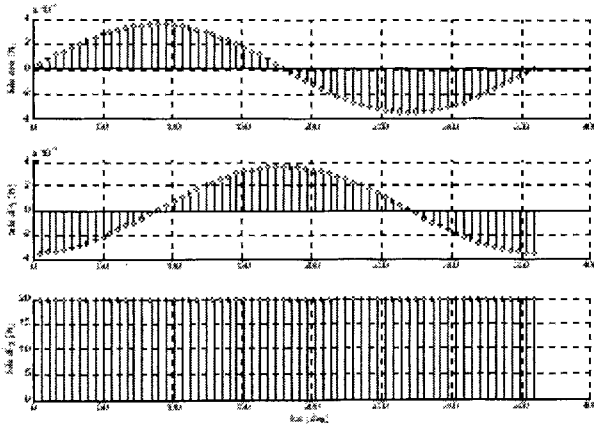
$$dF_z = -\frac{B_r |B| dh}{\mu_0} R d\varphi,$$

$$\text{dla } \theta=0^0.$$

(8)



Rys. 9. Rozkład na obwodzie magnesu wypadkowej siły magnetycznej.



Rys. 10. Składowe siły magnetycznej w funkcji kąta ϕ dla $\theta=0^0$.

Składowe promieniowe siły magnetycznej rosną wraz z kwadratem wysokości analizowanej warstwy. Na rysunku 10 przedstawiono rozkład składowych siły magnetycznej dla kąta $\theta=0^0$.

4. Podsumowanie

Przedstawiony model wyjaśnia mechanizm działania siły magnetycznej, która jest wynikiem oddziaływania na siebie dwu magnesów. Opierając się o powyższy model można zaprojektować pasywne łożysko magnetyczne, które będzie charakteryzowało się maksymalnie dużą składową siłą osiowej i minimalnymi składowymi siłami promieniowych. Model może zostać zastosowany do oceny sił magnetycznych między magnesami o różnych kształtach (np. pierścienie, prostopadłości, itp.).

Model nie uwzględnia zjawiska asymetrii, które polega na wnikanii indukcji magnetycznej w odcinki pętli kołowej pod różnymi kątami. Dodatkowo w modelu nie uwzględnia się zmiany kąta θ dla kolejnych warstw magnesu. Szczególnie drugie ograniczenie jest bardzo istotne przy modelowaniu łożysk pasywnych. Z rozkładu pola magnetycznego wokół magnesu (rys. 1b) wynika, że linie wnikaające w górne warstwy magnesu skierowane są pod kątami ujemnymi. Oznacza to, że część warstw magnesu może być odpychana a część przyciągana [4].

W przedstawionym artykule pominięto problem magnesu nieruchomego. Kształt magnesu oraz jego orientacja względem wirnika i obudowy przyrządu jest kolejnym bardzo istotnym etapem prac nad zbudowaniem sprawnego systemu łożyskowania wirnika z łożyskami pasywnymi. Magnes ten jest źródłem pola magnetycznego, którego linie sił muszą wnikać w magnes ruchomy pod odpowiednim kątem, co zapewnia uzyskanie odpowiednio dużej wartości siły osiowej i małych składowych promieniowych.

W ramach dalszych prac związanych ze zbudowaniem łożyska pasywnego przewiduje się uwzględnienie w modelu wpływu asymetrii niejednorodnego pola magnetycznego magnesu trwałego, modelu dynamicznego uwzględniającego model wirnika i promieniowych łożysk magnetycznych oraz weryfikację eksperymentalną w kinetycznym akumulatorze energii.

5. Literatura

- [1] D. Haliday, R. Resnick, J. „Walker: Podstawy Fizyki cz. 3”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005r.
- [2] H. Rawa: „Elektryczność i magnetyzm w technice”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994r.
- [3] D. Griffiths: „Podstawy elektrodynamiki”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005r.
- [4] S.C. Mukhopadhyay, C. Gooneratne, G. Sen Gupta: “Magnetic Bearing: An Integrated Platform for Teaching and Learning”, 2nd International Conference on Autonomous Robots and Agents, New Zealand 2004.
- [5] Z. Gosiewski, K. Falkowski: “Wielofunkcyjne łożyska magnetyczne”, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2003r.
- [6] Z. Gosiewski, K. Falkowski: „Pasywne łożysko magnetyczne dla kinetycznego akumulatora energii”, Seminarium „Postępy w Sterowaniu i Konstrukcji Bydgoszcz 2005”, Muszyńska 2005r.