

Bronisław Tomczuk i Jan Zimon

Katedra Elektrotechniki Przemysłowej
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska
ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole
tel. 077 453 84 47 w. 148, fax 077 453 84 47 w. 139
e-mail: b.tomczuk@po.opole.pl, j.zimon@po.opole.pl

ŁOŻYSKO MAGNETYCZNE JAKO EKOLOGICZNY ELEMENT NAPĘDU ANALIZA POLA I WERYFIKACJA POMIAROWA

MAGNETIC BEARING AS ECOLOGICAL ELEMENT OF A DRIVE FIELD ANALYSIS AND MEASUREMENT VERIFICATION

Streszczenie: W pracy podjęto 2-wymiarową analizę pola w łożysku magnetycznym. W obliczeniach uwzględniono połączenia czołowe cewek wzbudzących. Z rozkładów indukcji magnetycznej określono współczynniki sztywności prądowej i przemieszczeniowej. Składowe indukcji magnetycznej porównano z wartościami zmierzonymi.

Słowa kluczowe: łożyska magnetyczne, lewitacja magnetyczna, modelowanie trójwymiarowe, sztywność prądowa i przemieszczeniowa

Summary: The 2D field analysis in a magnetic bearing has been undertaken in the work. The end connections of the exciting coils were included in the calculations. From the flux density distribution the factors of the current and displacement stiffness have been determined. The calculated flux density components have been compared with the measured values.

Keywords: Magnetic bearings, magnetic levitation, three-dimensional modeling, displacement and current stiffness

Krótki przegląd łożysk magnetycznych

Łożysko magnetyczne jest jednym z najciekawszych obiektów elektromechanicznych. Jest ono coraz częściej stosowane w układach napędowych o dużej prędkości obrotowej. Konstrukcja prostych łożysk magnetycznych jest stosunkowo stara. Ich zasada działania jest podobna do działania elektromagnesu, którego zwora jest przyciągana do jarzma. Rozwój elektroniki w ostatnim dwudziestolecu pozwolił na wdrożenie nowego sterowania tego typu łożysk w technice przemysłowej.

Łożyska magnetyczne z powodzeniem zastępują łożyska tradycyjne. Jednakże nie wymagają one smarowania olejowego lub innymi środkami chemicznymi. Są przyjazne środowisku (ekologiczne). Na szczególną uwagę zasługuje zastosowanie tego typu łożysk w zespołach maszynowych stosowanych w ekstremalnych warunkach. Można tu wymienić środowiska bliskie próżni, środowiska o bardzo niskiej lub bardzo wysokiej temperaturze oraz środowiska silnie zakwaszone lub środowiska zasadowe. Łożyska takie znajdują również zastosowanie w mikromaszynach, napędach wysokoobrotowych (nawet 380 000 obr/min) oraz akceleratorach cząstek. W praktyce, aby dobrze ułożyskować wał napędu, stosuje się zespoły łożysk magnetycznych różnych typów.

Łożyska magnetyczne ze względu na kierunek działania siły magnetycznej można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

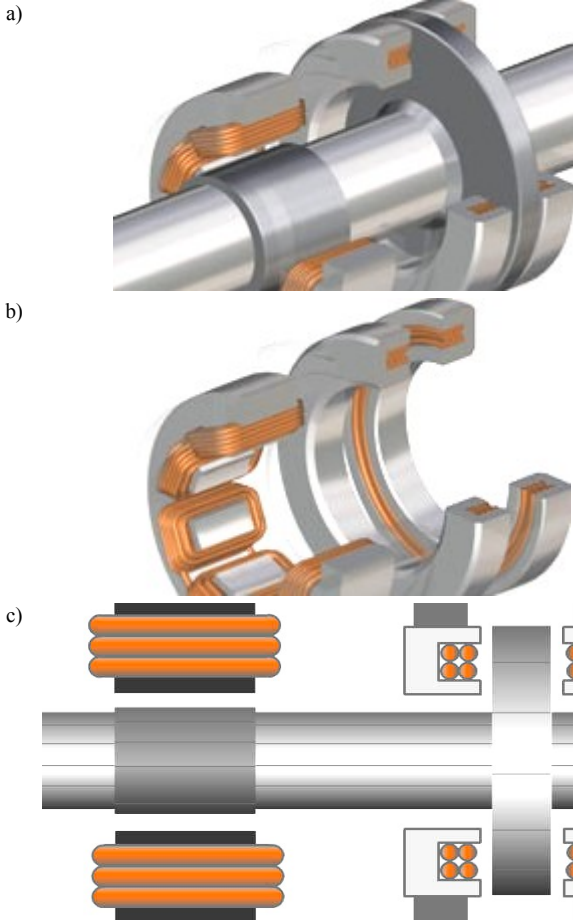
- a) łożyska osiowe,
- b) łożyska radialne.

Łożyska osiowe są stosowane w celu usztywnienia wału napędu w kierunku poosiowym, natomiast radialne mają na celu utrzymać wał w taki sposób, aby podniesiony w czasie pracy nie dotykał elementów konstrukcyjnych stojana (rys. 1a, b).

Wiele konstrukcji posiada zarówno cechy łożysk osiowych, jak i promieniowych. Na rysunkach 1a i b widać, że element wirujący może być zarówno podniesiony, jak i odpowiednio wysunięty poosiowo. Najbardziej widoczne jest to na rysunku 1c, gdzie wał razem z bieżnią łożyska jest zabezpieczony przed przesunięciem poosiowym.

Jedną z niewątpliwych zalet łożysk magnetycznych jest brak strat związanych ze zjawiskiem tarcia materiałów. Tarcie w klasycznych rozwiązaniach łożyskowań zmniejsza się za pomocą wprowadzania filmu cieczowego (najczęściej olejowego) bądź gazowego (gaz pod wysokim ciśnieniem) [3]. Rozwiązania te ograniczają prędkość obrotową oraz ulegają szybkiemu procesowi starzenia się. Chodzi tu szczególnie o substancje smarujące. Przykładowo można tu wymienić oleje i smary do łożysk tocznych. Tych wad nie posiadają rozwiązania oparte na łożyskach magnetycznych. Dlatego są one tańsze w eksploatacji. Łożyska magnetyczne wymagają bardzo skomplikowanego systemu sterowania. Podwyższa to w sposób bardzo znaczący koszt systemu

łożyskowania napędu. Ze względu na koszty inwestycyjne te typy łożysk są stosowane jedynie tam, gdzie jest to niezbędne, np. w ekstremalnych warunkach środowiskowych, oraz tam, gdzie wymagane są bardzo duże prędkości obrotowe. Jednakże coraz częściej znajdują one również zastosowanie w łożyskowaniu dużych generatorów elektrycznych.



Rys. 1. Zespół łożysk magnetycznych: a) z wałem napędu; b) bez wału; c) przekrój poprzeczny wzdłuż wału napędowego

Klasyfikacja typów łożysk magnetycznych pod względem zasady działania

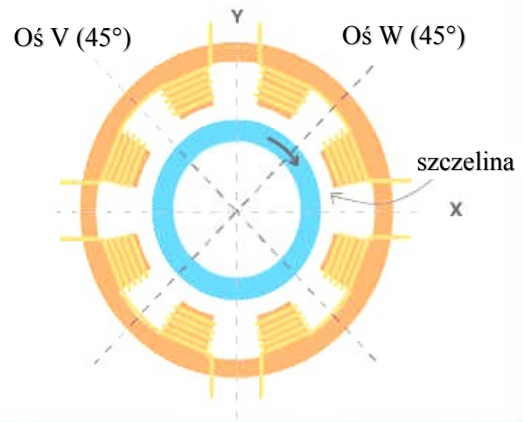
Łożyska magnetyczne ze względu na zasadę działania dzieli się na:

- a) aktywne (AMB),
- b) pasywne (PMMB),
- c) hybrydowe,
- d) wiroprądowe.

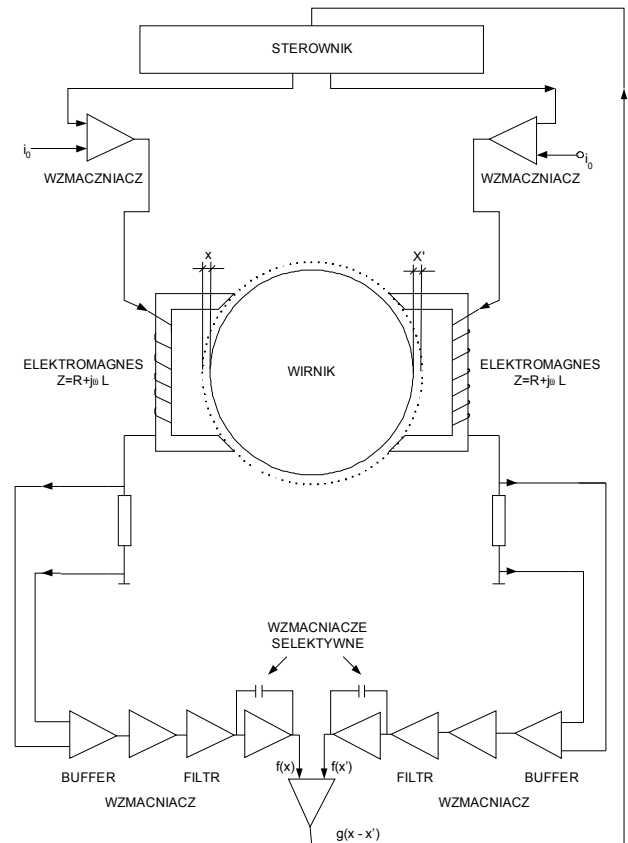
ad. a) Aktywne łożyska magnetyczne są oparte na zasadzie działania elektromagnesu. Na obwodzie stojana łożyska umieszcza się kilka elektromagnesów (najczęściej 4). Liczba elektromagnesów jest ograniczona możliwością sterowania łożyska (rys. 2). Elektromagnesy mogą przyjąć różne formy, np. zębów, podków scalanych oraz podków odseparowanych od siebie. Ponadto można wyróżnić modyfikacje kształtów i profili.

ad. b) Pasywne łożyska magnetyczne najczęściej zbudowane są z odpowiednio ułożonych magnesów trwałych. Istnieje

wiele rodzajów łożysk PMMB (*Permanent Magnet Magnetic Bearings*) [1] różniących się sposobem ułożenia magnesów trwałych. Łożyska pasywne mają zdolność samocentrowania się.



Rys. 2. Aktywne łożysko magnetyczne z elektromagnesami w formie scalonych podków o nieprofilowanych nabiegunkach



Rys. 3. Różnicowo-prądowa metoda realizacji sterowania łożyska magnetycznego: selfsensing bearing

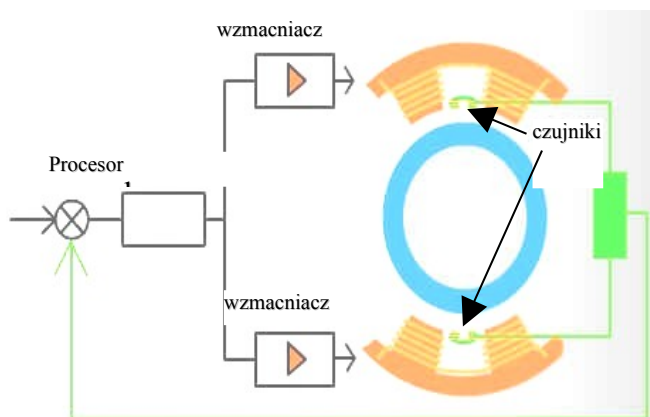
ad. c) Hybrydowe łożyska magnetyczne [2] zawierają w swojej budowie zarówno elektromagnesy, jak również magnesy trwałe. Szczelina łożysk magnetycznych między wałem a stojanem wynosi od kilkudziesięciu mikrometrów do 1 mm, w wyjątkowych rozwiązaniach dopuszcza się wielkość szczeliny do kilku milimetrów. Tak mała wartość szczeliny wymusza bardzo precyzyjne wykonanie

wszystkich elementów łożyska oraz poprawia nośność i sztywność łożyska.

W przypadku stosunkowo dużych szczelin stosuje się wzmocnienia siły elektromagnetycznej poprzez umieszczenie dodatkowych magnesów trwałych. Mała szczelina pozwala otrzymać stan nasycenia obwodu magnetycznego oraz wysoką wartość indukcji magnetycznej w powietrzu za pomocą niedużych wymuszeń prądowych. Natomiast duża szczelina linearyzuje obwód magnetyczny, lecz wymaga dużych napięć magnetycznych. Nasycenie się obwodu magnetycznego jest w pewnym sensie korzystne z uwagi na sterowanie prądowe łożysk magnetycznych.

ad. d) Łożyska wiroprowadowe działają na zasadzie lewitacji wiroprowadowej. Szczelina w tego typu łożyskach może wynosić nawet kilkanaście centymetrów.

Sterowanie łożysk magnetycznych [2, 4] najczęściej odbywa się na zasadzie różnicowo-prądowej (rys. 3) lub za pomocą czujników położenia (rys. 4). Sterowanie różnicowo-prądowe polega na sterowaniu sygnałem będącym różnicą prądów wymuszeń łożyska. Są one najczęściej stosowane ze względu na łatwość sterowania.



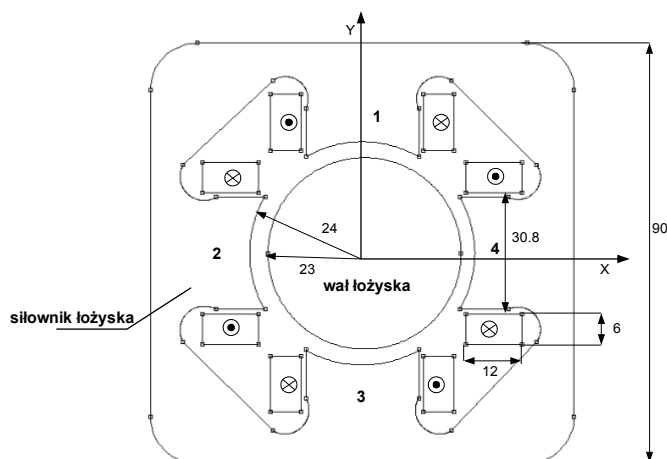
Rys. 4. Metody realizacji sterowania łożyska magnetycznego za pomocą czujników położenia.

Przykład analizy pracy łożyska typu aktywnego

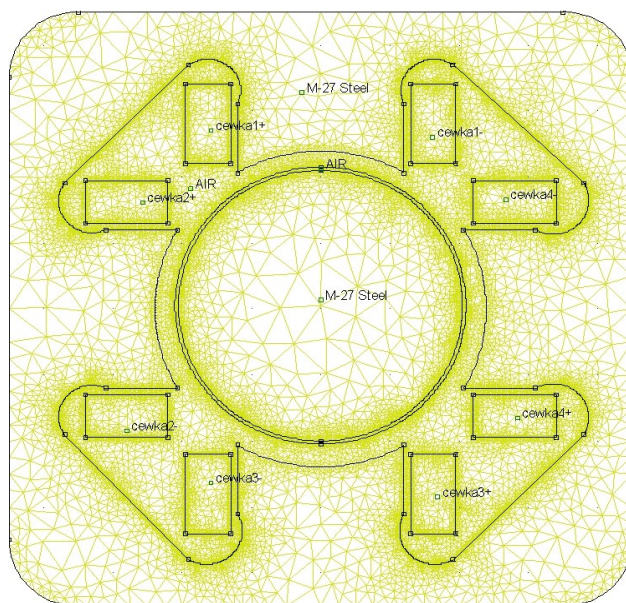
Rozpatrywano łożysko magnetyczne heteropolarne czterobiegunowe, którego szkic wraz z podstawowymi wymiarami przedstawiono na rysunku 5. Każde z czterech uzwojeń o liczbie $N = 160$ zwojów jest zasilane oddzielnie. Cewki siłownika łożyska magnetycznego są nawinięte drutem o przekroju czynnym $d = 0,55$ mm. Dla rozpatrywanego modelu fizycznego łożyska magnetycznego przyjęto następujące uproszczenia:

- 1) efekty krańcowe na końcach siłownika mają znikomy wpływ na parametry elektromagnetyczne łożyska magnetycznego,
- 2) znikomy wpływ prądów wirowych z uwagi na zastosowanie pakietowanego siłownika łożyska magnetycznego.
- 3) pominięto straty histerezy w żelazie z uwagi na małą wartość indukcji magnetycznej.

Na podstawie tych założeń przyjęto model matematyczny łożyska magnetycznego w oparciu o metodę elementów skończonych. Założono nieliniową charakterystykę magnesowania rdzenia.



Rys. 5. Szkic łożyska magnetycznego

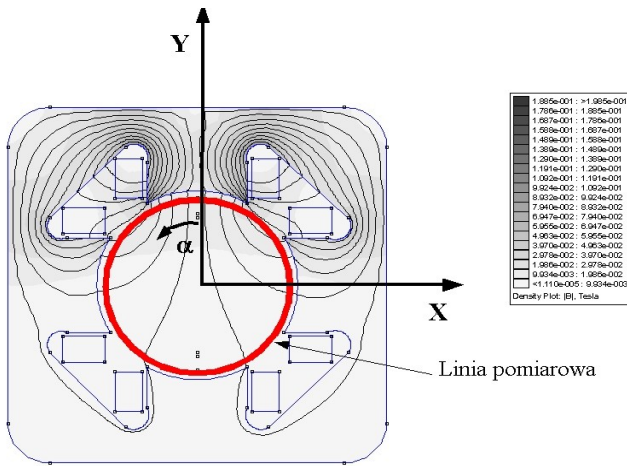


Rys. 6. Dyskretyzacja obszaru obliczeniowego łożyska magnetycznego

Obliczenia przeprowadzono w programie FEMM [5], dobierając odpowiednio siatkę dyskretyzacyjną (rys. 6) i przyjmując zerowe warunki brzegowe Dirichleta na zewnętrznym brzegu obszaru obliczeniowego. Obszar zdyskretyzowano 51 436 elementami trójkątnymi.

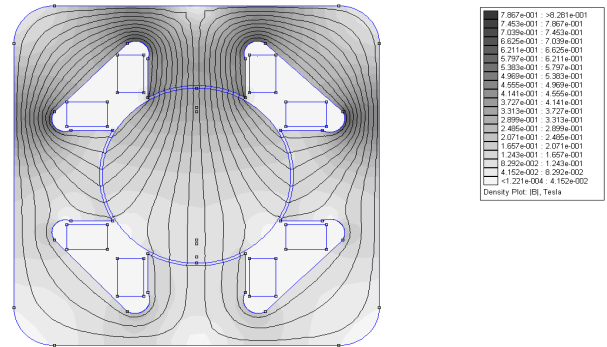
Wyznaczono rozkłady składowej promieniowej indukcji magnetycznej \vec{B} na okręgu w środku szczeliny łożyska magnetycznego, realizując różne kombinacje cewek wzbudzających pole magnetyczne.

Na rysunku 7 przedstawiono przykładową mapę modułu indukcji magnetycznej z naniesioną linią pomiarową oraz kierunkiem pomiaru. Ponadto naszkicowano linie sił pola magnetycznego. Wykonano weryfikację pomiarową indukcji magnetycznej siłownika łożyska magnetycznego, zasilając odpowiednie uzwojenia. Pomiary wykonano teslomierzem F.W.BELL 4048. W czasie pomiaru wał wyjęto z siłownika. Wyniki pomiarów porównano z wynikami obliczeń numerycznych, co przedstawiają rysunki 8 a-c.



Rys. 7. Mapa rozkładu indukcji magnetycznej w siłowniku łożyska magnetycznego wraz z zaznaczoną linią weryfikacji pomiarowej i kierunkiem pomiarów

Z wykreślonych rozkładów składowej promieniowej indukcji magnetycznej wynika, że największe wartości indukcji magnetycznej są w okolicach naroży nabiegunków siłownika łożyska magnetycznego. W obszarach między nabiegunkami wartość indukcji magnetycznej spada do wartości bliskiej zeru.



Rys. 9. Mapa rozkładu indukcji magnetycznej w łożysku magnetycznym wraz z umieszczonym centralnie wałem

Na podstawie mapy rozkładu indukcji magnetycznej przedstawionej na rysunku 9 można stwierdzić, że wszystkie uzwojenia siłownika są ze sobą silnie sprzężone, co komplikuje w znaczny sposób równania dynamiki obiektu. Ponadto zauważa się, że największa wartość indukcji magnetycznej jest w największych obszarach siłownika, zaś najmniejsza w przestrzeni między cewkami.

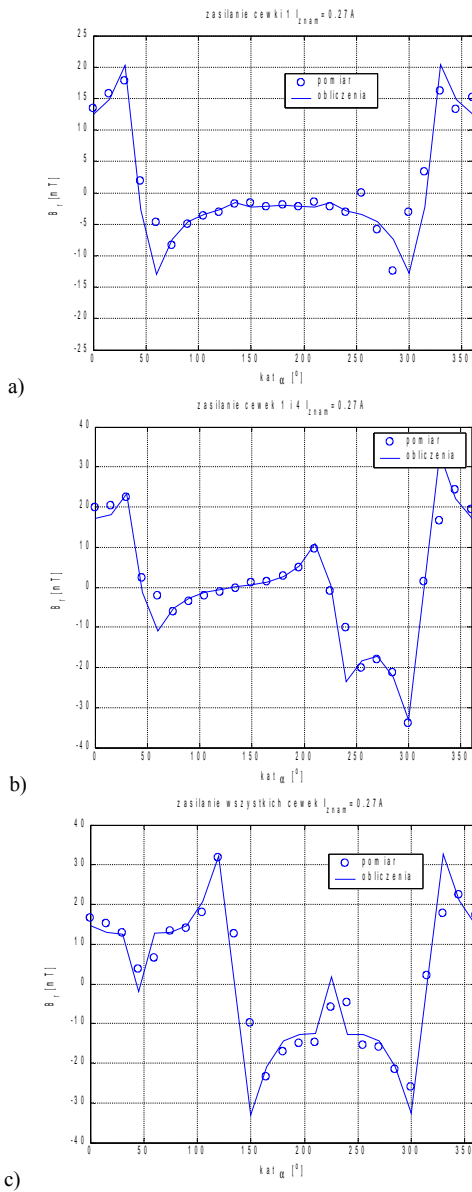
Wnioski

Łożyska magnetyczne mogą stanowić alternatywny sposób łożyskowania dla łożysk tradycyjnych. Niski poziom zużycia materiałowego ze względu na bezkontaktowe oddziaływanie na zawieszany element pozwala na stosowanie ich w ekstremalnych warunkach oraz przy bardzo dużych prędkościach. Ze względu na bezdotykowe zawieszenie obracającej się masy łożyska magnetyczne znacznie obniżają poziom hałasu, który występuje dla znacznych prędkości obrotowych maszyn. Znajdują one szerokie zastosowanie w medycynie jako elementy precyzyjnych maszyn chirurgicznych (przecinaków, wiertarek). Nie powodują one nagrzewania się wału ze względu na brak tarcia mechanicznego.

Założony model matematyczny, mimo przyjętych uproszczeń, można uznać za prawidłowy. Świadczą o tym wyniki obliczeń indukcji magnetycznej, które wykazują dużą zgodność z pomiarami. Model ten może być użyteczny w dalszych badaniach dotyczących kształtowania i optymalizacji obwodu magnetycznego łożyska magnetycznego.

Literatura

[1] Fremerey J.K.: Permanentmagnetische Lager, IGuV-Forschungszentrum Jülich, 2000
 [2] Gosiewski Z. i Falkowski K.: Wielofunkcyjne Łożyska Magnetyczne, IL-WAT, Warszawa, 2003.
 [3] Kozanecka D.: Sterowane cyfrowo łożysko magnetyczne, ZN Nr842, Politechnika Łódzka, Łódź, 2000.
 [4] Schweizer G., Traxler A. i Bleuler H.: Magnetlager, Springer Verlag, Berlin, 1993.



Rys. 8. Wyniki obliczeń i pomiarów rozkładu indukcji magnetycznej

- [5] Meeker D.: FEMM 4.0, User's Guide, Virginia 2003.