

ANALIZA ROZKŁADU SIŁ W PASYWNYCH ŁOŻYSKACH MAGNETYCZNYCH

Mariusz STĘPIEŃ, Bogusław GRZESIK

Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, Politechnika Śląska

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki modelowania pasywnych łożysk magnetycznych zbudowanych z magnesów neodymowych. Przedmiotem analizy są rozkłady pola magnetycznego wokół magnesów oraz wartości i kierunki sił działających pomiędzy magnesami. Zaproponowano i przebadano dwie konstrukcje łożysk magnetycznych zbudowanych z magnesów pierścieniowych oraz płytkowych ułożonych pierścieniowo. Badane były łożyska o średnicach zewnętrznych do 15 mm oraz siłach oddziaływania (udźwigu) do 10 N, przeznaczonych jako zawieszenie małych systemów napędowych. Analizę przeprowadzono w oparciu o dwuwymiarowe modele osiowosymetryczne zrealizowane w ANSYS APDL. Modele bazowały na elemencie elektromagnetycznym PLANE233. Wyznaczono charakterystyki sił oddziaływania w funkcji wzajemnego położenia elementów łożyska oraz wybranych gabarytów konstrukcyjnych jako parametru.

I. WSTĘP

Współczesne rozwiązania konstrukcyjne małych wysokoobrotowych napędów elektrycznych wymagają łożyskowania spełniającego szereg zaawansowanych wymagań, w tym w szczególności eliminacji oporów tarcia. Najkorzystniejszym rozwiązaniem wydają się bezkontaktowe łożyska magnetyczne [1]. Dotychczas stosowano łożyska aktywne lub hybrydowe, stabilizowane elektromagnetycznie. Współczesne trendy opierają się na łożyskach pasywnych stabilizowanych siłami żyroskopowymi. Dodatkowo stabilizacja wspomagana jest odpowiednimi zabiegami konstrukcyjnymi [2].

Przedstawione w niniejszej pracy badania są przykładem analizy łożyska magnetycznego pasywnego, małogabarytowego do zastosowań w napędach wysokoobrotowych. Zaproponowano konstrukcję łożyska opartą na magnesach cylindrycznych. W pierwszym przypadku analizowane jest łożysko klasyczne z układem dwóch sekcji cylindrów, w których zasadniczym oddziaływaniem jest oddziaływanie osiowe, natomiast oddziaływanie promieniowe sterowane jest odległością między cylindrami sekcji. Drugim rozwiązaniem jest łożysko stanowiące połączenie magnesu cylindrycznego z magnesami płytkowymi ułożonymi pierścieniowo. Siła oddziaływania takiego łożyska zmienia się silnie co do wartości i kierunku wraz z położeniem jednej części łożyska względem drugiego. Rozwiązanie takie nie jest powszechnie znane w literaturze, pozwala ono jednak na uzyskanie stabilnej pozycji łożyska w obydwu kierunkach (osiowym i promieniowym) i stanowi ciekawą alternatywę łożyska z dwoma magnesami cylindrycznymi.

W niniejszej pracy zaprezentowane zostały rozkłady pola magnetycznego wokół obydwu rozwiązań magnesów oraz przeprowadzona została analiza sił magnetycznych w funkcji położenia części łożyska względem siebie. Wykazano, że obydwa zaproponowane łożyska mogą z sobą współpracować ze względu na równowagę uzyskiwanych sił osiowych.

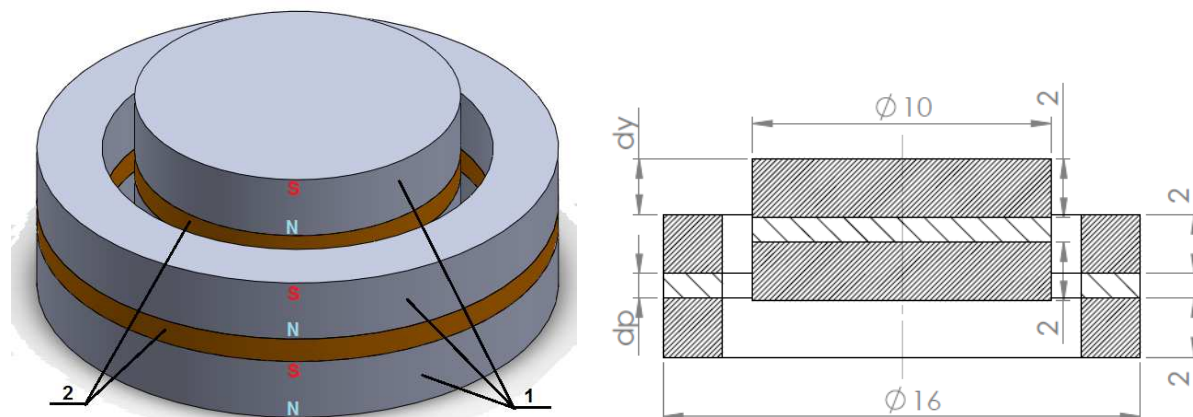
2. BUDOWA ŁOŻYSK MAGNETYCZNYCH PASYWNYCH

Badaniom w niniejszej pracy poddano dwa typy łożysk magnetycznych. Pierwszy z nich, określany dalej jako łożysko cylindryczne składa się z pary magnesów cylindrycznych oddziałujących na parę magnesów pierścieniowych. Magnesy w każdej z par odseparowane są między sobą przegrodą niemagnetyczną. Szczegóły budowy łożyska opisano w podrozdziale 2.1. Drugi typ łożyska, zwany łożyskiem mieszanym, składa się z magnesu pierścieniowego otoczonego magnesami płytkowymi ułożonymi w kształcie pierścienia na zewnątrz magnesu pierścieniowego. Budowę tego łożyska opisano w podrozdziale 2.2.

2.1. Łożysko cylindryczne

Łożysko cylindryczne będące przedmiotem analizy przedstawione zostało graficznie na Rys.1. Część zewnętrzna jest częścią nieruchomą, natomiast część wewnętrzna – częścią ruchomą. Gabaryty łożyska określone zostały na podstawie gabarytów dostępnych komercyjnie magnesów trwałych. Przekrój łożyska wraz z wymiarami umieszczono na Rys. 1b. W pracy analizuje się wyłącznie przesunięcie pionowe łożyska, przy założeniu, że przy wirowaniu łożyska następowało będzie jego centrowanie.

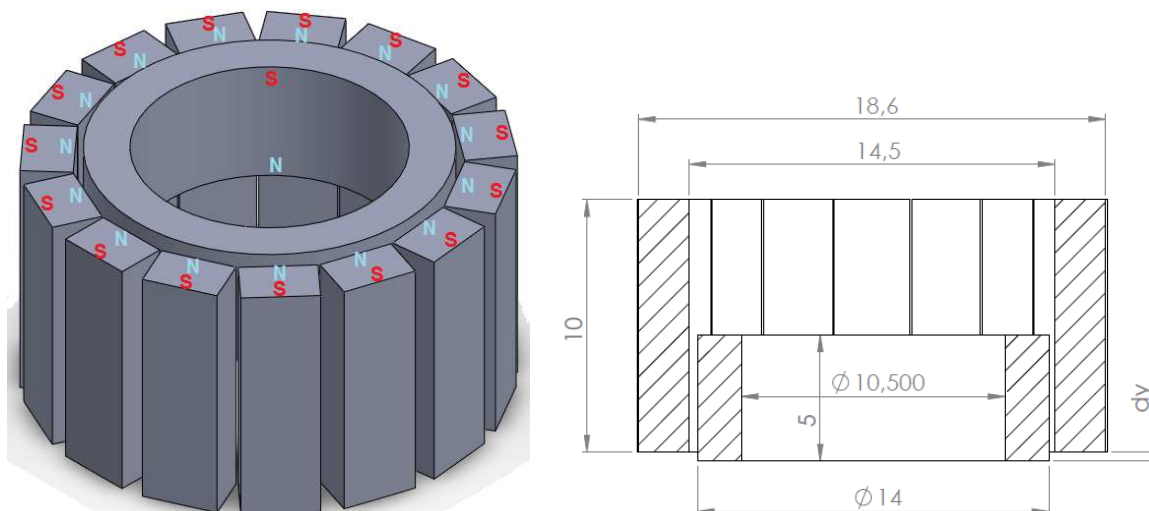
Łożysko składa się w każdej z części z dwóch magnesów trwałych przedzielonych przekładkami niemagnetycznymi. Na rys. 1a zaznaczono polaryzację magnesów. Przedstawiona polaryzacja powoduje przyciąganie się magnesów w każdej z sekcji, jednak na potrzeby analizy założono, że magnesy w każdej sekcji są nieruchome względem siebie. W pracy przebadano wpływ grubości przekładek na wartości działających w łożysku sił. Założono, że grubość podkładem w każdym analizowanym przypadku jest taka sama w części zewnętrznej łożyska (nieruchomej), jak i w części wewnętrznej.



Rys. 1. Łożysko cylindryczne, widok i przekrój, 1 – magnesy trwałe, 2 – przekładki niemagnetyczne, dp – grubość przekładki, dy – przesunięcie pionowe łożyska

2.2. Łożysko płytkowe

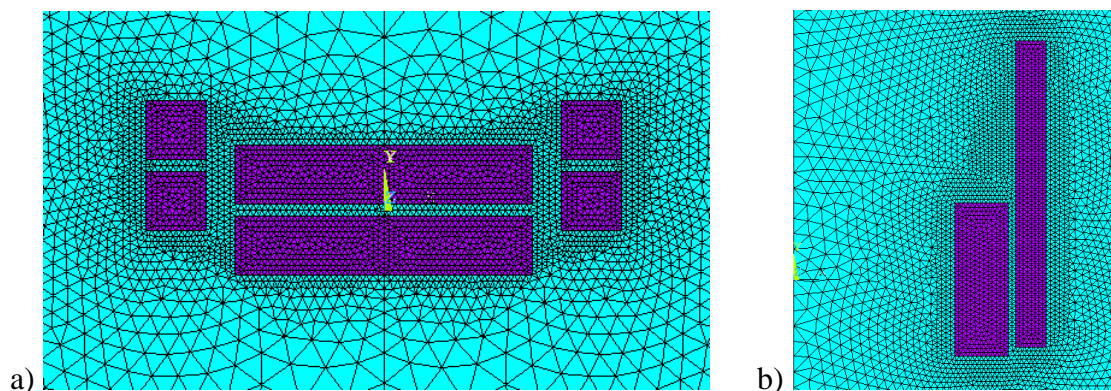
Łożysko płytkowe przedstawiono na Rys. 2. Łożysko złożone jest z ruchomego pierścienia oraz 15 płytek prostokątnych nieruchomych ułożonych promieniowo względem części ruchomej. Podobnie jak w przypadku łożyska cylindrycznego, wymiary magnesów wybrane zostały z dostępnego komercyjnie typoszeregu. Takie same są również pozostałe założenia konstrukcyjne łożyska. W przypadku łożyska płytkowego należy zauważyć, że łożysko ma swoje położenie startowe w ułożeniu symetrycznym i w związku z tym przesunięcie dy jest zerowe, jeżeli obydwie części łożyska położone są symetrycznie względem siebie (pokrywają się poziome płaszczyzny symetrii magnesów).



Rys. 2. Łożysko płytkowe, widok i przekrój, dy – przesunięcie pionowe

3. MODEL KOMPUTEROWY ANSYS

Badania układu lewitacji magnetycznej w łożyskach pasywnych prowadzone były w oparciu o dwuwymiarową analizę magnetostatyczną ANSYS. Model komputerowy oparto o osiowosymetryczny element PLANE233. Możliwe było również prowadzenie analizy przy wykorzystaniu elementu PLANE53, jednak użyty element umożliwił zastosowanie bardziej zaawansowanych makr do wyznaczania sił oddziaływania między magnesami (makro stosowane dla elementu PLANE53 – FMAGSUM z flagą FMAGBC – umożliwia dla elementu osiowosymetrycznego liczenie siły jedynie w kierunku pionowym, natomiast makro dla elementu PLANE233 – EMFT pozwala na wyznaczenie zarówno siły pionowej, jak i będącej w równowadze siły poziomej). Geometrię (fragment obejmujący magnesy) wraz z siatką dla analizowanych modeli przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 3. Geometria modeli wraz z siatką, a) łożysko cylindryczne, b) łożysko płytkowe

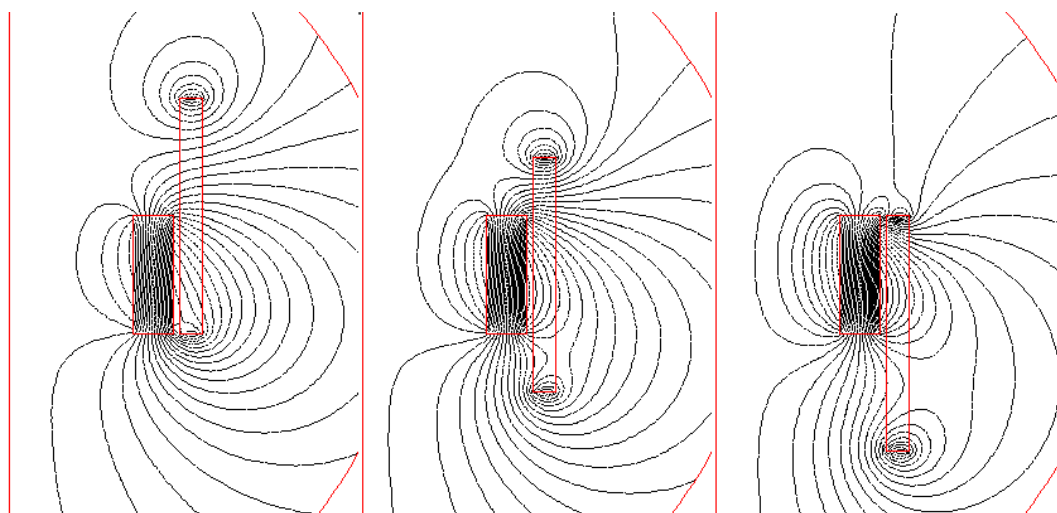
W modelu przyjęto, że parametry przekładki między magnesami, są takie jak parametry powietrza i nie wpływają na rozkład pola magnetycznego. Korzystając z danych katalogowych zdefiniowano namagnesowanie magnesów trwałych MGXX, określające natężenie pola koercji magnesu H_c (dla analizowanych magnesów MGXX było równe 955 kA/m) oraz przenikalność magnetyczną względną μ_r równą 1. W praktyce namagnesowanie określa się poprzez pole koercji H_c oraz indukcję remanentu B_r (równą dla analizowanych magnesów 1.2 T) [5]. Łatwo jednak zauważyć, że przenikalność względna określona zależnością (1)

$$\mu_r = \frac{B_r}{\mu_0 \cdot H_c} \quad (1)$$

dla podanych wartości B_r oraz H_c wynosi 1. W celu podwyższenia dokładności obliczeń w modelu zastosowano element nieskończony INFIN110. Siatkę w obszarze INFIN wygenerowano czworokątami, natomiast w pozostałym obszarze trójkątami. Model komputerowy zawierał około 9 tysięcy węzłów oraz 17 tysięcy elementów [6].

4. ROZKŁADU POLA MAGNETYCZNEGO WOKÓŁ MAGNESÓW TRWAŁYCH

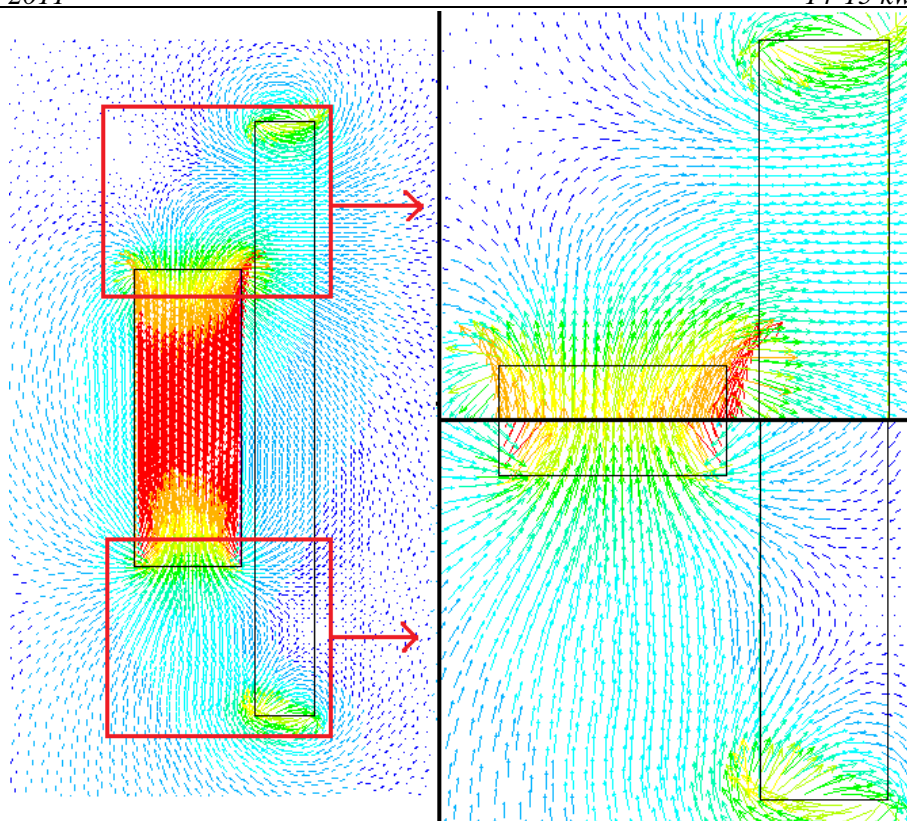
Siły oddziaływań magnetycznych między magnesami trwałymi wynikają z uzyskanego przy danej konfiguracji rozkładu pola magnetycznego. Na Rys. 4 przedstawiono rozkłady linii pola magnetycznego (linie łączące punkty o jednakowej wartości wektorowego potencjału magnetycznego). Rozkład linii pola magnetycznego obrazuje bezpośrednio, w których obszarach intensyfikuje się oddziaływanie magnetyczne.



Rys. 4. Rozkład linii pola magnetycznego w łożysku płytkowym

Analiza rozkładu linii pola magnetycznego z Rys. 4 wykazuje, że wraz z przesuwaniem magnesu zewnętrznego (na Rys. 4 magnes prawy) w dół, przechodzimy od sił przyciągających w kierunku poziomych (rozkład po lewej stronie) do sił odpychających (rozkład po prawej stronie). Ze względu na asymetrię pola przejście siły poziomej przez zero występuje przy położeniu różnym od położenia symetrycznego (rozkład środkowy). Analiza kierunków i wartości sił omówiona została w następnym rozdziale.

Rozkład wektorów indukcji magnetycznej dla położenia zerowego przedstawiono na Rys. 5. Zaznaczono i powiększono obszary biegunów magnesu cylindrycznego w celu pokazania jego oddziaływania z magnesem płytkowym. Widoczne jest silne przyciąganie magnesów w kierunku poziomym w górnej części łożyska (wektor indukcji magnesu cylindrycznego dodaje się do wektora pochodzącego od magnesu płytkowego) oraz przyciąganie w kierunku pionowym w dolnej części łożyska. Oznacza to, że w podanym położeniu magnes górny będzie poddawany działaniu siły obracającej go w kierunku ruchu wskazówek zegara. Zakładając jednak, że łożyska w silniku rozmieszczone są na wale symetrycznie, w związku z czym nie dojdzie do obrotu łożyska, a jedynie do jego przesunięcia w kierunku poziomym bądź pionowym. Przesunięcie to będzie zależne od wartości siły. Analizę sił przeprowadzono w następnym rozdziale.

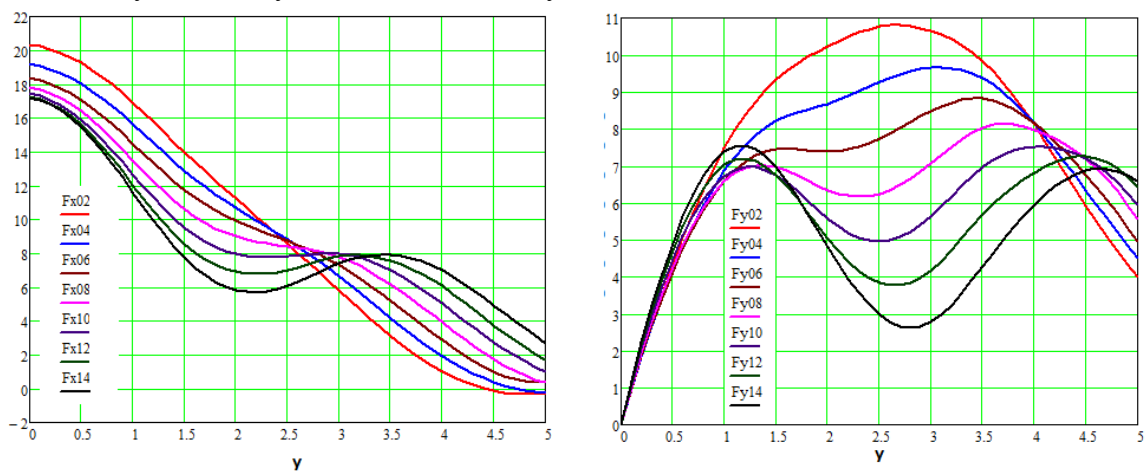


Rys. 5. Rozkład wektorów indukcji magnetycznej w łożysku płytkowym

5. ANALIZA ROZKŁADU SIŁ MAGNETYCZNYCH

5.1. Analiza sił w łożysku cylindrycznym

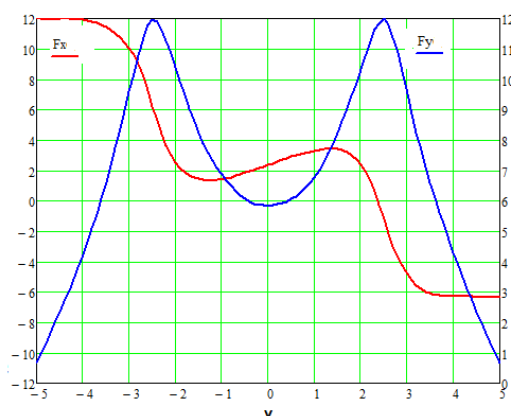
Analizę rozkładu sił magnetycznych (wartości i kierunków) prowadzono dla przesunięcia wzajemnego elementów łożyska w zakresie od 0 do 5 mm (ze względu na symetrię badano łożysko przy wychyleniu od położenia równowagi tylko w jednym kierunku). Analizę prowadzono dla różnych grubości przekładki między magnesami w zakresie od 0,2 mm do 1,4 mm. Wynik analizy zamieszczono na Rys. 6.

Rys. 6. Rozkład sił w łożysku cylindrycznym, siła promieniowa (F_x) oraz osiowa (F_y)

Przeprowadzona analiza wykazała, że siła promieniowa maleje wraz z przesunięciem łożyska z położenia równowagi. Zwiększanie grubości przekładki powoduje powstanie charakterystycznego siodła, w którym siła zmienia się nieznacznie przy znacznych zmianach przemieszczenia. Siła osiowa w układzie bez przekładek narasta, osiąga maksimum a następnie maleje. Wprowadzenie przekładek powoduje powstanie w zakresie wartości maksymalnych wywłaszczenie charakterystyki, a nawet jej zapadnięcie. Właściwość ta może być wykorzystana do uniewrażliwienia łożyska na nieznaczne zmiany położenia. W obydwu analizowanych kierunkach otrzymuje się siłę niezmienną w kierunku.

5.1. Analiza sił w łożysku płytkowym

Ze względu na asymetryczne oddziaływanie sił w łożysku płytkowym analizę oddziaływania sił przeprowadzono w zakresie od -5 mm do 5 mm wychylenia od położenia równowagi (symetrii położenia). Charakterystykę wartości i kierunków sił działających na łożysko zamieszczono na Rys. 7.



Rys. 7. Rozkład sił w łożysku płytkowym

Uzyskana w rezultacie analizy charakterystyka siły promieniowej (F_x) wskazuje, że jest to siła niesymetryczna względem położenia, a także że zmienia ona kierunek przy niezerowym położeniu (można znaleźć takie położenie łożyska, dla którego siła promieniowa jest zerowa). Siła osiowa (F_y) wykazuje zmienną monotoniczność i w badanym przedziale wykazuje dwa ekstrema. Na uwagę zasługuje fakt, że jest to siła symetryczna względem położenia równowagi i w badanym zakresie przyjmuje wyłącznie wartości dodatnie. Dużą stromość zmian można wykorzystać w tym układzie do szybkiego równoważenia zmian położenia w kierunku osiowym (nieznacznie przesunięcie spowoduje powstanie znacznej siły dążącej do powrotu do położenia poprzedniego).

6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono sposób i wyniki modelowania pasywnych łożysk magnetycznych przy wykorzystaniu analizy magnetostatycznej ANSYS. Przedstawiona analiza jest przykładem wielokryterialnej analizy magnetycznej, w której bazując na modelu 2D (lub analogicznie na modelu 3D) możliwe jest wyznaczenie rozkładu sił w statycznym układzie magnetycznym. Zgodnie z teorią Earnshawa nie jest możliwa równowaga statyczna magnesów trwałych, jednak ich wprowadzenie w stan równowagi poprzez inne zjawiska (np. siły żyroskopowe) jest możliwe tylko w przypadku gdy magnesy te będą w równowadze sił [4].

Przeprowadzona analiza obejmuje dwa rodzaje łożysk pasywnych, obydwa zawierające symetrię osiową i modelowane w 2D. Do wyznaczenia sił magnetycznych wykorzystano wbudowane makra ANSYS (EMFT). Parametry magnesów trwałych zdefiniowane zostały poprzez wartość pola koercji oraz przenikalność magnetyczną.

Przeprowadzono analizę rozkładów pola magnetycznego oraz rozkładów (kierunków i wartości) sił magnetycznych. Analizę przeprowadzono jako wielokryterialną (kryteriami była wartość przemieszczenia elementów magnesu względem siebie oraz grubość przekładki między magnesami w łożysku cylindrycznym). Wyznaczone rozkłady wykazały nieliniową zmienność sił wraz z przemieszczeniem, różną w kierunku osiowymi i promieniowym. W niektórych przypadkach zaobserwowano zmianę kierunku działającej siły.

Zaproponowane zastosowanie analizy MES do modelowania układów magnesów trwałych ma bardzo szerokie zastosowanie. Zakres stosowania oraz różnorodność łożysk pasywnych w ostatnich latach znacznie rośnie. Ponadto zaproponowaną metodę analizy można po niewielkiej przebudowie można zastosować do analizy łożysk magnetycznych i hybrydowych, a także do układów lewitacyjnych z elementami nadprzewodnikowymi.

LITERATURA

- [1] Chiba A. et al.: *Magnetic Bearings and Bearingless Drives*, Elsevier 2005
- [2] Qian K-X.: *Gyro-effect Stabilizes Unstable Permanent Maglev Centrifugal Pump*, *Cardiovas Eng*, 2007
- [3] Post R. et al.: *Ambient Temperature Passive Magnetic Bearings: Theory and Design Equations*, 6th Int. Symposium on Magnetic Bearings, Massachusetts, USA, 1998
- [4] ENES – Magnesy neodymowe; serwis internetowy <http://www.magnesy.pl>
- [5] ANSYS User Manual, ver. 13