

## PROJEKTOWANIE I WYZNACZANIE PODSTAWOWYCH CHARAKTERYSTYK HOMOPOLARNEGO ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO

W artykule przedstawiono uporządkowany zbiór procedur przeznaczonych do projektowania łożysk magnetycznych z magnesami trwałymi. Korzystając z powyższego algorytmu zaprojektowano laboratoryjny model promieniowego łożyska magnetycznego, którego charakterystyki statyczne zostały przedstawione w artykule.

## DESIGN AND CALCULATION OF BASIC CHARACTERISTICS OF HOMOPOLAR MAGNETIC BEARING

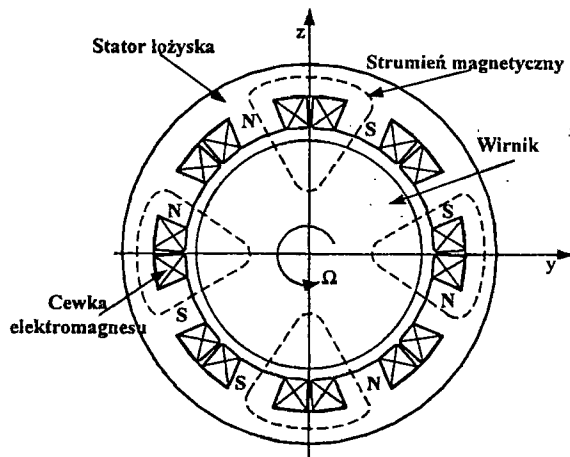
In the paper procedures of design of the permanent magnet biased magnetic bearing are described. These procedures are used to design a lab model of radial magnetic bearing and its the static characteristics are given.

### 1. Wstęp

Aktywne łożyska magnetyczne są obecnie jedynymi powszechnie stosowanymi urządzeniami, które umożliwiają bezkontaktowe łożyskowanie wirnika. Do ich podstawowej zalety należy zaliczyć brak tarcia pomiędzy współpracującymi parami kinematycznymi. Wylimitowanie smarów i olejów, stosowanych w klasycznych metodach łożyskowania, pozwala stosować łożyska magnetyczne w warunkach wysokiej próżni i w środowisku chemicznie aktywnym (np. metan). Kolejną zaletą łożysk magnetycznych jest duża prędkość obrotowa łożyskowanego wirnika ograniczona jego wytrzymałością. Pozostałe zalety łożysk magnetycznych przedstawione są w monografii [3].

Wyróżnia się heteropolarne i homopolarne łożyska magnetyczne. W łożysku heteropolarnym (rys.1) obracający się wirnik przemieszcza się pod różnoimiennymi biegunami. Oznacza to, że umieszczony na obwodzie wirnika punkt przechodzi pod biegunem północnym a następnie południowym. Podczas jednego pełnego obrotu wirnika, następuje czterokrotna zmiana biegunowości, a tym samym ma miejsce czterokrotne przemagnesowanie wirnika. Łożyska tego typu, ze względu na prostą konstrukcję są często stosowane w maszynach wirnikowych (konstrukcja łożyska jest zbliżona do konstrukcji stojanów silników elektrycznych).

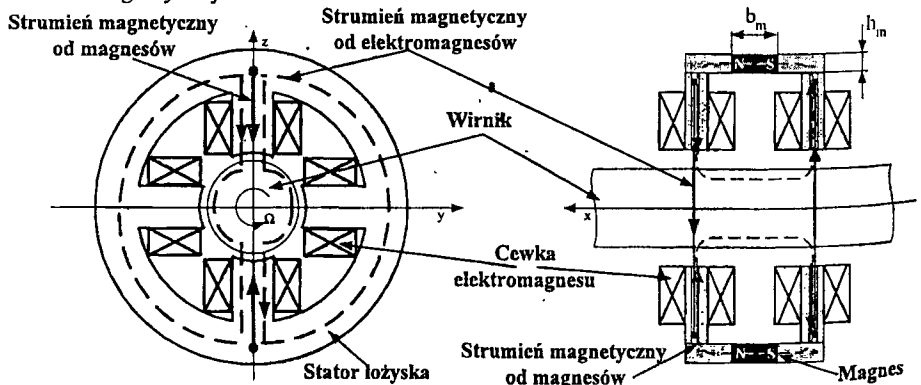
Natomiast w łożysku homopolarnym (rys.2), wirnik podczas pełnego obrotu przechodzi zawsze pod jednoimiennymi biegunami. W łożyskach tego typu wykorzystuje się magnesy trwałe, jako źródło strumienia magnetycznego punktu pracy. Zastosowanie magnesów



Rys. 1. Heteropolarne łożysko magnetyczne.

trwałych oraz ograniczone przemagnesowywanie wirnika powoduje, że łożyska tego typu posiadają liczne zalety w stosunku do łożysk heteropolarnych. Należą do nich:

- zmniejszenie wymiarów oraz redukcja masy łożyska,
- zmniejszenie poboru energii elektrycznej,
- redukcja prądów wirowych,
- redukcja strat związanych z rozproszeniem strumienia magnetycznego,
- ograniczenie efektu nagrzewania się wirnika,
- ograniczenie strat ze względu na histerezę magnetyczną materiału wirnika,
- zmniejszenie wartości ujemnego współczynnika sztywności przemieszczeniowej, co poprawia odporność oraz stabilność układu sterowania zawieszeniem magnetycznym.



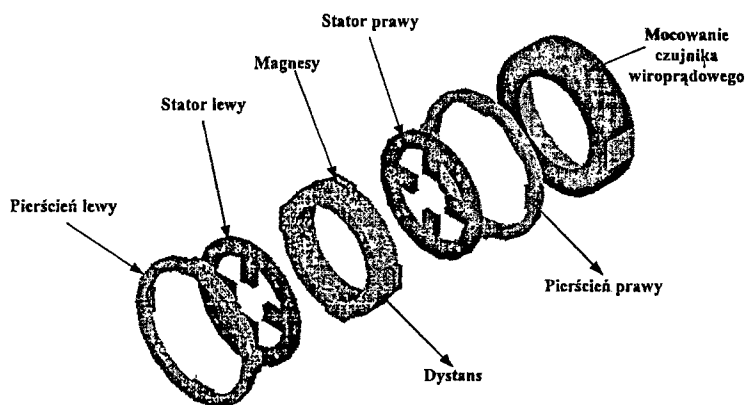
Rys. 2. Homopolarne łożysko magnetyczne z magnesami trwałymi.

Wadą homopolarnego łożyska jest brak możliwości sterowania punktem pracy, co uniemożliwia kształtowanie jego sztywności. Wady tej pozbawione są łożyska heteropolarne.

W artykule przedstawiony jest algorytm projektowania homopolarnego łożyska magnetycznego z magnesami trwałymi oraz jego charakterystyki statyczne.

## 2. Konstrukcja promieniowego homopolarnego łożyska magnetycznego

Łożysko z magnesami trwałymi posiada dwa obwody magnetyczne. Pierwszy obwód magnetyczny generuje siłę punktu pracy. Źródłem energii magnetycznej w tym obwodzie jest magnes trwały (neodymowy lub samarowo – kobaltowy), który generuje stały strumień magnetyczny (statyczny obwód magnetyczny). Do sterowania położeniem wirnika w szczelinie powietrznej łożyska, wykorzystuje się siły elektromagnetyczne generowane przez elektromagnesy. W tym obwodzie magnetycznym, zmianie ulega wartość i kierunek strumienia magnetycznego (dynamiczny obwód magnetyczny). Wymienione obwody magnetyczne wprowadzają ograniczenia, które są uwzględnione w konstrukcji łożyska.



Rys. 3. Konstrukcja homopolarnego łożyska magnetycznego.

Konstrukcja łożyska magnetycznego przedstawiona jest na rys. 3. Podstawowymi elementami łożyska magnetycznego są dwa statory (lewy i prawy), które wykonane są z pakietu blach oddzielonych lakierem. Konstrukcja statorów ogranicza prądy wirowe indukowane w dynamicznym obwodzie magnetycznym. W statorze umieszczone są nabiegunniki, na które nawinięto cewki. Statory umieszczone są w pierścieniach wykonanych z materiału magnetycznie miękkiego, które wykorzystane są do kierowania strumienia magnetycznego generowanego przez magnesy trwałe. Pomędzy pierścieniami umieszczone są magnesy trwałe. Statory oddzielone są dystansem wykonanym z materiału diamagnetycznego. Łożysko wyposażone jest w czujniki wiropądowe lub czujniki indukcyjne (zależnie od wersji), których zadaniem jest określanie położenia wirnika w szczelinie powietrznej.

Integralnym elementem łożyska magnetycznego jest bieźnia umieszczona na wirniku [2]. Bieźnia ogranicza prądy wirowe generowane przez dynamiczny strumień magnetyczny oraz umożliwia swobodne przenikanie strumienia generowanego przez magnesy pomiędzy statorami. Bieźnia zbudowana jest z trzech tulejek, dwu zewnętrznych i jednej wewnętrznej (rys. 4). Bezpośrednio na wirniku znajduje się tulejka wykonana z materiału magnetycznie

miękkiego, na której umieszczone są dwie tuleje wykonane z pakietu blach. Tulejki z pakietu blach znajdują się pod nabiegownikami statora.

### 3. Algorytm projektowania łożyska magnetycznego z magnesami trwałymi

Projektowanie aktywnego łożyska magnetycznego można podzielić na dwa etapy. W pierwszym etapie określa się wymiary łożyska, jego parametry elektryczne i magnetyczne. Powyższe wielkości wyznaczane są na podstawie przenoszonych przez łożysko obciążeń statycznych i dynamicznych oraz właściwości magnetycznych i elektrycznych materiałów, z których wykonane jest łożysko. W drugim etapie projektowania wyznacza się model dynamiczny łożyska i układu sterowania. Ten etap projektowania omówiony jest w artykule [4].

#### 3.1. Obciążenie przenoszone przez łożysko magnetyczne

Obciążenie, które przenosi łożysko jest sumą obciążenia statycznego (siła ciężkości) i obciążenia dynamicznego (siła zewnętrzna) działającego na łożyskowy wirnik:

$$F_{\max} = mg + F_z, \quad (1)$$

gdzie:  $F_{\max}$  – maksymalna siła elektromagnetyczna generowana przez łożysko,  $m$  – masa wirnika sprowadzona do płaszczyzny łożyskowania,  $g$  – natężenie pola grawitacyjnego Ziemi  $g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$ ,  $F_z$  – zewnętrzna siła działająca na łożyskowy wirnik po sprowadzeniu do płaszczyzny łożyskowania. Siła  $F_{\max}$  decyduje o wartości maksymalnego strumienia magnetycznego generowanego przez elektromagnes  $\phi_{e,\max}$  i wartości strumienia generowanego przez magnes trwały  $\phi_m$ .

#### 3.2. Maksymalny strumień generowany przez elektromagnesy łożyska oraz wymagany strumień magnetyczny generowany przez magnes trwały

Siła  $F_{\max}$  generowana przez łożysko magnetyczne jest równa [1]:

$$F_{\max} = \frac{8\phi_m^2}{\phi_{e,\max}} F_{em}, \quad (2)$$

gdzie:  $F_{em}$  – siła elektromagnetyczna generowana przez cewkę elektromagnesu, gdy szczelina powietrzna nie jest przemagnesowywana przez magnes trwały:

$$F_{em} = \frac{\phi_{e,\max}^2}{2\mu_0 A_p}, \quad (3)$$

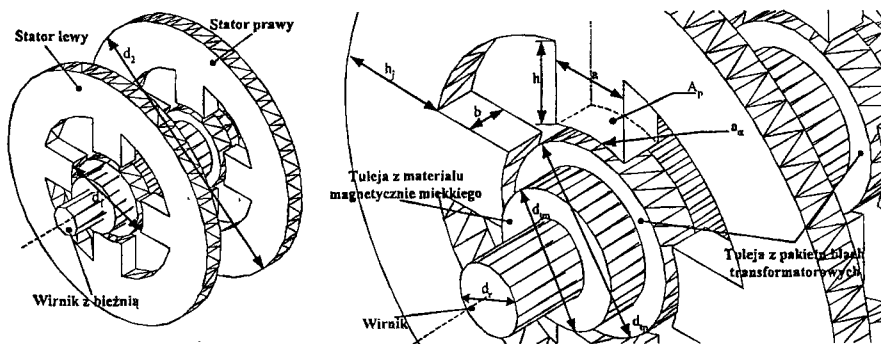
gdzie:  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni,  $A_p$  – efektywne pole przekroju nabiegownika statora. Podstawiając zależność (3) do równania (2) oraz uwzględniając warunek, że strumień magnetyczny generowany przez magnes jest ośmiokrotnie większy od strumienia generowanego przez elektromagnes ( $\phi_m > 8\phi_{e,\max}$ ), wyznaczono maksymalny strumień generowany przez elektromagnes i strumień magnetyczny generowany przez magnes trwały:

$$\phi_{e.\max} > \sqrt{\frac{\mu_0 A_p F_{\min}}{32}}, \quad (4)$$

$$\phi_p = \frac{\mu_0 A_p F_{\min}}{4\phi_{e.\max}}. \quad (5)$$

### 3.3. Dobór szczeliny powietrznej

Szczeliną powietrzną określamy stałą odległość od wirnika do nabiegownika łożyska magnetycznego, gdy wirnik znajduje się w punkcie pracy. Szczelina powietrzna pod każdym z nabiegowników jest dokładnie taka sama. Dobór tego parametru jest istotnym elementem algorytmu projektowania łożyska magnetycznego i jest kompromisem pomiędzy jakością i ceną łożyska magnetycznego a wartością dopuszczalnego obciążenia. Mała szczelina powietrzna zapewnia duże siły elektromagnetyczne, a tym samym łożysko magnetyczne może przenosić większe obciążenia statyczne i dynamiczne. Jednak zastosowanie bardzo małych szczelin powietrznych ( $x_0 > 0.1$  [mm]) jest kłopotliwe ze względu na jakość wykonania łożyska i wirnika oraz wymaga zastosowania bardzo dokładnych i drogich czujników mierzących położenie wirnika w szczelinie powietrznej. Zazwyczaj szczeliny powietrzne przyjmuje się o wartości z przedziału  $0.3 \leq x_0 \leq 1.5$  [mm] [2].



Rys. 4. Podstawowe wymiary łożyska magnetycznego.

### 3.4. Wymiary statora i bieżni homopolarnego łożyska magnetycznego

Maksymalny strumień magnetyczny generowany przez elektromagnesy oraz strumień generowany przez magnesy decyduje o wymiarach statora, bieżni łożyska oraz magnesu. Podstawowe wymiary statora i bieżni pokazane są na rys. 4. Przystępując do projektowania statora łożyska magnetycznego należy przyjąć następujące parametry:  $b$  – osiową długość statora,  $h$  – wysokość nabiegownika statora,  $A_p$  – efektywne pole przekroju nabiegownika w szczelinie powietrznej,  $B_{nas.}$  – wartość indukcji magnetycznej przy której materiał znajduje się w stanie nasycenia magnetycznego,  $a$  – szerokość nabiegownika statora. Powyższe wielkości podlegają weryfikacji w kolejnych etapach projektowania łożyska magnetycznego. Ponadto wysokość nabiegownika  $h$  decyduje o maksymalnych rozmiarach cewek.

Średnica wewnętrzna tulei wykonanej z materiału magnetycznie miękkiego jest równa średnicy wirnika  $d_r$ , natomiast średnica zewnętrzna jest wyznaczana z następującej zależności:

$$d_{im} \geq \frac{2\phi_m}{B_{nas. a}} + d_r. \quad (6)$$

Średnica wewnętrzna tulei wykonanej z pakietu blach jest równa średnicy  $d_{im}$ , natomiast średnica zewnętrzna wynosi:

$$d_{ip} = d_{im} + 2 \frac{\phi_{e.max} + \phi_m}{B_{nas. b}}. \quad (7)$$

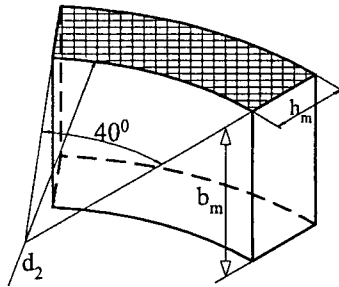
Średnica wewnętrzna statora  $d_1$  i zewnętrzna  $d_2$  odpowiednio są równe:

$$d_1 = d_{ip} + 2x_0, \quad (9)$$

$$d_2 = d_1 + 2h + 2h_j, \quad (10)$$

gdzie:  $x_0$  – szczelina powietrzna,  $h_j$  – wysokość jarzma, która jest równa:  $h_j = \frac{\phi_{e.max}}{B_{nas. b}}$ .

### 3.5. Wymiary magnesu trwałego



Rys. 5. Wymiary magnesu.

Wymiary magnesu zależą od rodzaju materiału, z którego wykonany jest magnes oraz maksymalnego strumienia  $\phi_m$ . W łożyskach magnetycznych stosuje się głównie magnesy samarowo-kobaltowe i neodymowe, które charakteryzują się liniową krzywą odmagnesowania oraz dużą gęstością energii magnetycznej. Dla magnesu określa się punkt pracy z uwzględnieniem obciążenia, jakim jest szczelina powietrzna  $x_0$ . Punkt ten określony jest przez natężenie pola magnetycznego ( $H_m$ ) oraz indukcję magnetyczną ( $B_m$ ) generowaną przez magnes w szczelinie powietrznej. Po wyborze materiału na magnes i wyznaczeniu jego punktu pracy, wymiary

magnesu są tak dobrane by uzyskać wymaganą wartość strumienia magnetycznego  $\phi_m$  w szczelinie powietrznej.

Kształt typowego magnesu jest przedstawiony na rys. 5. Projektując łożysko magnetyczne z magnesami trwałymi należy określić wysokość  $h_m$  i długość osiową  $b_m$  magnesu (rys. 5):

$$h_m = \frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{36\phi_m \eta}{B_m \pi} + d_2^2} - d_1 \right). \quad (11)$$

$$b_m = \frac{-2x_0 \phi_m \epsilon}{\mu_0 H_m A_p}. \quad (12)$$

W wyrażeniach (11) i (12) występują dwa współczynniki, które uwzględniają straty strumienia magnetycznego  $\eta$  oraz wpływ reluktancji jaką wprowadzają materiały magnetycznie miękkie  $\epsilon$ . Współczynniki te przyjmują odpowiednio wartości  $\epsilon=1.2$  i  $\eta=3$  [2].

### 3.6. Parametry cewki elektromagnesu

Projektując cewkę elektromagnesu należy określić liczbę zwojów  $N$  oraz maksymalny prąd jaki przepływa przez cewkę  $i_{\max}$ . Parametry cewki zależą od wartości strumienia  $\Phi_{e,\max}$ :

$$\Phi_{e,\max} = \frac{\mu_0 A_p N i_{\max}}{x_0} \quad (13)$$

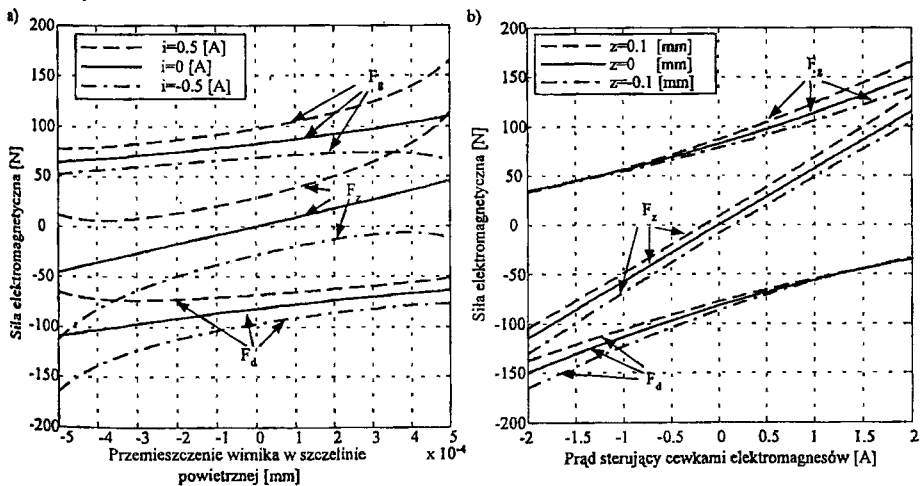
Uwzględniając w zależności (2) równania (3) i (13) wyznaczono liczbę amperozwojów:

$$\Theta = N \cdot i_{\max} = \frac{x_0 F_{\min}}{4\phi_m} \quad (14)$$

Z zależności (14) można wyznaczyć maksymalną wartość prądu płynącego przez cewki elektromagnesów dla założonej liczby zwojów. Prąd  $i_{\max}$  decyduje o średnicy drutu nawojowego zastosowanego w cewkach.

### 4. Charakterystyki statyczne zaprojektowanego łożyska magnetycznego

Korzystając z powyższego algorytmu zaprojektowano a następnie wykonano łożysko magnetyczne, dla którego wyznaczono charakterystyki statyczne. Charakterystykami statycznymi łożyska magnetycznymi określamy zależność pomiędzy prądem sterującym łożyskiem i położeniem wirnika w szczelinie powietrznej a siłą wypadkową  $F_z$  generowaną przez łożysko.



Rys. 6. Charakterystyki statyczne łożyska magnetycznego.

Na rys. 6 przedstawiono charakterystyki statyczne zaprojektowanego łożyska magnetycznego, które wyznaczono w oparciu o model analityczny [4]. Dodatkowo na rys. 6 zaznaczono siły generowane przez poszczególne elektromagnesy (górną  $F_g$  i dolną  $F_d$ ). Charakterystyka statyczna siły elektromagnetycznej w funkcji położenia wirnika w szczelinie powietrznej, dla trzech wartości prądu sterującego, jest przedstawiona na rys. 6a. Różnicowe łożysko magnetyczne zapewnia liniową charakterystykę statyczną jedynie przy zerowym prądzie

sterującym. Niezerowa wartość prądu sterującego zawęża liniowy zakres charakterystyki statycznej do wartości równej ok. 10% szczeliny powietrznej. Stąd układ sterowania łożyska magnetycznego powinien ograniczać maksymalne przemieszczenia wirnika do 10% wartości szczeliny powietrznej. Przekroczenie dopuszczalnego przemieszczenia wirnika uaktywnia sprzężenia skrośne pomiędzy siłownikami łożyska magnetycznego z magnesami trwałymi [2].

Zmiana prądu sterującego w mniejszym stopniu wpływa na liniowość charakterystyki statycznej (rys. 6b). Przy zmianie prądu sterującego w zakresie od -1 do 1 [A] charakterystyki statyczne są liniowe, niezależnie od położenia wirnika w szczelinie powietrznej.

Na podstawie analizy przedstawionych charakterystyk statycznych zweryfikowano dopuszczalne obciążenie łożyska magnetycznego, prąd sterujący oraz wartość maksymalnego przemieszczenia wirnika.

## 5. Podsumowanie

Zastosowanie magnesów trwałych obniża pobór energii elektrycznej przez łożysko magnetyczne. Na rys. 6 przedstawiono charakterystyki statyczne z których wynika, że zmiana prądu sterującego o 1 [A] powoduje wygenerowanie przez łożysko magnetyczne wypadkowej siły o wartości ok. 57 [N] (rys. 6b). Uzyskanie tak dużej sztywności prądowej [4, 5] w łożysku heteropolarnym o zbliżonych parametrach (liczba zwojów, pole przekroju nabiegownika, szczelina powietrzna) wymaga prądu punktu pracy równego 45 [A]. Oznacza to, że niezależnie od przenoszonych przez łożysko obciążeń, zawsze przez cewki musi przepływać tak duży prąd punktu pracy. Równocześnie współczynnik sztywności przemieszczeniowej jest dużo większy (sztywność przemieszczeniowa łożyska homopolarnego wynosi  $k_s=8.8198 \cdot 10^4$ , natomiast sztywność przemieszczeniowa łożyska heteropolarnego jest równa  $k_s=5.2657 \cdot 10^6$ ). Tak duża wartość sztywności przemieszczeniowej jest zjawiskiem negatywnym, ograniczającym obszar stabilności łożyska magnetycznego [5]. Obniżenie sztywności przemieszczeniowej w łożysku heteropolarnym oznacza obniżenie prądu punktu pracy, co wiąże się ze zmniejszeniem sztywności prądowej a tym samym ze zmniejszeniem wypadkowej siły elektromagnetycznej generowanej przez łożysko magnetyczne.

Korzystając z przedstawionego algorytmu w Zakładzie Osprzętu i Automatyki Lotniczej WAT zostało wykonane promieniowe łożysko magnetyczne z magnesami trwałymi. Obecnie prowadzone są prace nad przygotowaniem algorytmu projektowania osiowego łożyska magnetycznego z magnesami trwałymi.

## LITERATURA

- [1] A.-Ch. Lee, F.-Z. Hsiao, D. Ko: *Analysis and Testing of Magnetic Bearings with Permanent Magnets for Bias*; JSME International Journal, Series C, Vol. 37, No. 4, 1994.
- [2] Y.-H. Fan, A.-Ch. Lee: *Design of a Permanent/Electromagnetic Magnetic Bearing-controlled Rotor System*, Journal of The Franklin Institute, Vol. 334B, No. 4, 1997.
- [3] Z. Gosiewski: *Łożyska magnetyczne dla maszyn wirnikowych Część I*, Wyższa Szkoła Inżynierska w Koszalinie, Koszalin, 1993.
- [4] Z. Gosiewski, K. Falkowski: *Projektowanie układu sterowania łożyska magnetycznego*, Konferencja AUTOMATION 2000, Warszawa, 2000.
- [5] K. Falkowski: *Opracowanie laboratoryjnego modelu giroskopu z magnetycznie zawieszonym wirnikiem i jego badanie*, Rozprawa doktorska, Warszawa, 1999.