

Jan BURCAN, Anna SŁAWIŃSKA, Radosław BEDNAREK
Katedra Konstrukcji Precyzyjnych
Politechnika Łódzka

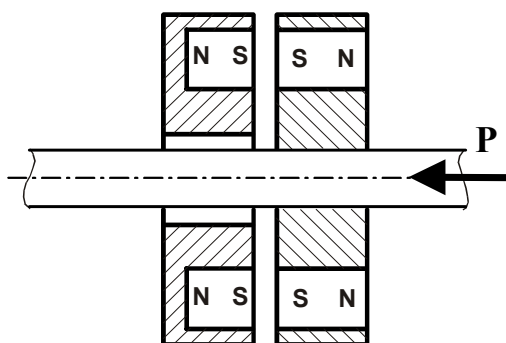
WYBRANE CHARAKTERYSTYKI PASYWNYCH WZDŁUŻNYCH ŁOŻYSK MAGNETYCZNYCH

Streszczenie: W referacie przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań jednostronnych i dwustronnych pasywnych wzdlużnych łożysk magnetycznych wykonanych ze związku NdFeB.

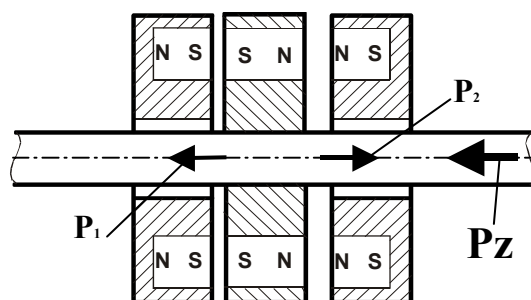
Własne badania modelowe wykazały ścisły związek nośności, sztywności i właściwości tłumienia drgań łożyska od jego cech konstrukcyjnych i materiałowych. Przykładowe przebiegi nośności, sztywności i współczynnika tłumienia łożysk wykonanych ze spieku NdFeB porównano z przebiegami nośności, sztywności i współczynnika tłumienia łożysk wykonanych z ferrytu i ferrytu strontu. Podano empiryczne zależności na nośność i współczynniki tłumienia dla drgań wymuszonych impulsem siły, skokiem siły i wychyleniem początkowym wirnika.

Badania przeprowadzono na jednostronnych i dwustronnych pasywnych łożyskach magnetycznych, zbudowanych z pierścieniowych magnesów trwałych wykonanych ze związku NdFeB. Schemat budowy łożyska jednostronnego przedstawia rysunek 1, schemat budowy dwustronnego rysunek 2.

Przebieg zmian wartości obciążenia (rys. 3) jest charakterystyką wyznaczającą siły między magnesami w funkcji szczeliny powietrznej między nimi.



Rys.1. Schemat łożyska jednostronnego [2]



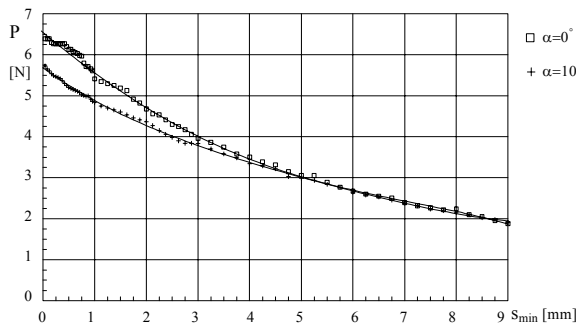
Rys.2. Schemat łożyska dwustronnego [2]

W przypadku jednostronnego łożyska tak wyznaczona charakterystyka oddziaływania magnesów jest jednocześnie charakterystyką łożyska, wyznaczoną statycznie, określającą jego nośność w funkcji szczeliny łożyskowej.

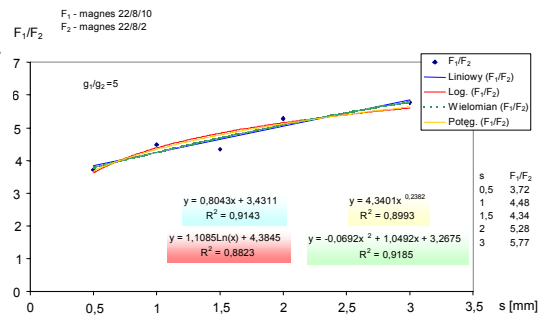
Jak wynika z porównania krzywych z rysunku 3, dla różnych kątów położenia magnesów względem siebie, uzyskuje się różne wartości siły wzajemnego oddziaływania magnesów, wskutek zwiększenia rozproszenia pola magnetycznego w zniekształconej szczelinie. Wskazuje to na potrzebę starannego montowania magnesów w łożysku.

Po zmontowaniu łożyska dwustronnego, układ znajduje się w stanie równowagi, w którym każde z łożysk przenosi montażowe obciążenie wzdlużne (rys. 7). Stan równowagi możliwy jest przy takich samych wartościach sił poosiowych pochodzących z obydwu części łożyska, tylko przeciwnie skierowanych. Jeżeli do budowy łożyska użyto takich samych magnesów układ łożyska dwustronnego działania jest całkowicie symetryczny. Odmiennosc któregoś z magnesów związanych z obudową może powodować asymetrię układu objawiającą się przede wszystkim zróżnicowanymi

wartościami szczelin łożyskowych po obu stronach wirnika w stanie zmontowania [2]. Niejednorodność własności na powierzchni roboczej wzdłuż jej obwodu będzie skutkowała wymuszeniem harmonicznym drgań. W tej sytuacji niezbędne było wzorcowanie każdego z łożysk układu. Znajomość charakterystyk każdego z łożysk była niezbędna do wyznaczania charakterystyk całego układu łożyskowego. Ważnymi z punktu widzenia pracy łożyska magnetycznego są sztywność i tłumienie.



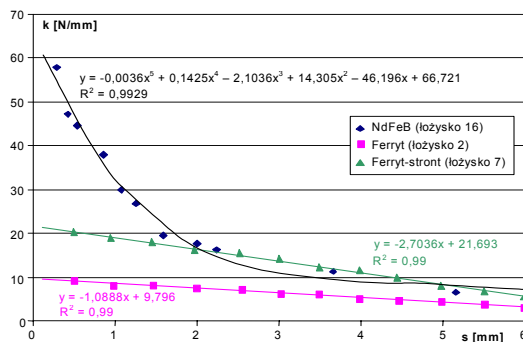
Rys.3. Zależność nośności pasywnego łożyska magnetycznego wzdłużnego od szczeliny s_{min} i kąta przekoszenia magnesów α [3]



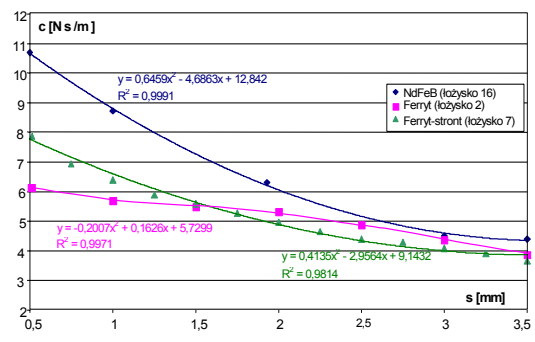
Rys.4. Porównanie nośności dwu łożysk jednostronnych $F_1(22/8/10)$ i $F_2(22/8/2)$ o takich samych wymiarach powierzchni i różnej grubości [1]

Zależność współczynnika sztywności od rodzaju materiału magnesu przedstawiono na rysunku 5 Dla wartości szczelin mających zastosowanie techniczne do budowy łożysk wzdłużnych największą wartość współczynnika sztywności uzyskano dla łożyska zbudowanego z magnesów trwałych wykonanych ze spieku NdFeB, mniejszą dla łożyska zbudowanego z ferrytu strontu, a najmniejszą dla łożyska wykonanego z ferrytu. Dla wartości szczeliny granicznej równej 0,2 mm wartości współczynnika sztywności łożyska zbudowanego z magnesów ze spieku NdFeB do współczynnika sztywności łożyska zbudowanego z magnesów ferrytowych, do współczynnika sztywności łożyska z magnesów wykonanych z ferrytu strontu mają się do siebie jak 6 do 2 do 1.

Rysunek 6 przedstawia zależność współczynnika tłumienia od rodzaju materiału magnesu. Współczynnik tłumienia osiąga największą wartość dla łożyska zbudowanego z magnesów trwałych ze spieku NdFeB, mniejszą wartość dla łożyska zbudowanego z ferrytu strontu, najmniejszą wartość dla łożyska zbudowanego z ferrytu. Dla wartości granicznej szczeliny równej 0,5 wartości współczynnika tłumienia łożyska zbudowanego z magnesów ze spieku NdFeB do współczynnika tłumienia łożyska zbudowanego z magnesów ferrytowych, do współczynnika tłumienia łożyska zbudowanego z magnesów wykonanych z ferrytu strontu mają się do siebie jak 10,8 do 7,8 do 6.

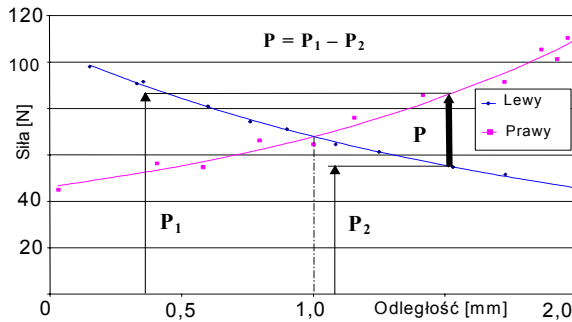


Rys.5. Zależność współczynnika sztywności w funkcji szczeliny [1]

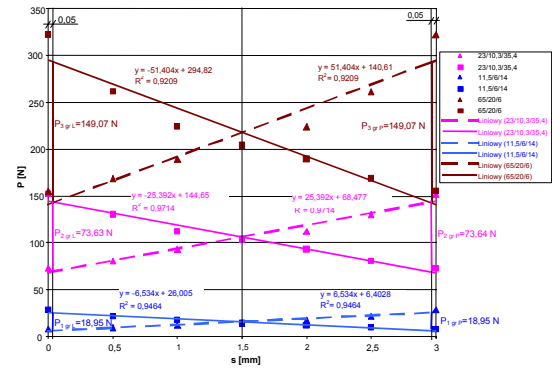


Rys.6. Zależność współczynnika tłumienia w funkcji szczeliny [1]

Sztywność pasywnego łożyska magnetycznego zależy od stojącej do dyspozycji nośności. Jak wykazano w dotychczasowych rozważaniach nośność istotnie zależy od właściwości magnesów, z których zbudowane jest łożysko. Zależy także w pewnym stopniu od kształtów. Rysunek 8 zestawia 3 różne łożyska dwustronne, mające zdecydowanie różne nośności. Łożyska zmontowano przy takiej samej wartości luzu łożyskowego, co pozwala na porównywanie nośności przy granicznej wartości szczeliny łożyskowej, wynoszącej w omawianym przypadku 0,05 mm.



Rys. 7. Zmiana obciążeń w łożyska dwustronnego wykonanego z magnesów NdFeB, o wymiarach $\Phi 34/\Phi 25/8$, pod wpływem obciążenia zewnętrznego



Rys. 8. Porównanie obciążeń przenoszonych przez łożyska pasywne dwustronne, szczelina montażowa $s = s_1 + s_2 = 3$ mm, minimalna szczelina graniczna $s_{gr} = 0,05$ mm [1]

Nie trudno zauważyć różnice nie tylko granicznych wartości obciążeń możliwych do przeniesienia przez porównywane łożyska.

Tłumienie pasywnego łożyska zależy również, podobnie jak nośność od stojącej do dyspozycji nośności. Skuteczność tłumienia osiąganego w łożysku zależy także od właściwości użytych do budowy łożysk magnesów.

Należy pamiętać, że w rzeczywistości łożyska pracują w różnych układach mechanicznych, np. w maszynach wirnikowych, pompach itp., które jakościowo i ilościowo zmieniają właściwości dynamiczne łożyskowanego układu i układu wirnik-łożyska. Mówiąc zatem o właściwościach dynamicznych łożysk, musimy mieć na uwadze konkretny przykład układu łożyska-maszyna. Wartości uzyskane z badań eksperymentalnych na stanowisku modelowym stanowią podstawowe informacje do prowadzenia analizy konkretnych układów łożyskowych. Analizując zmiany wartości współczynników sztywności i tłumienia, można uzyskać interesujące informacje o właściwościach dynamicznych układu, takich jak: częstotliwości drgań własnych, granica stabilności lub pozostałe parametry drgań, dla przypadku różnych wymuszeń zewnętrznych.

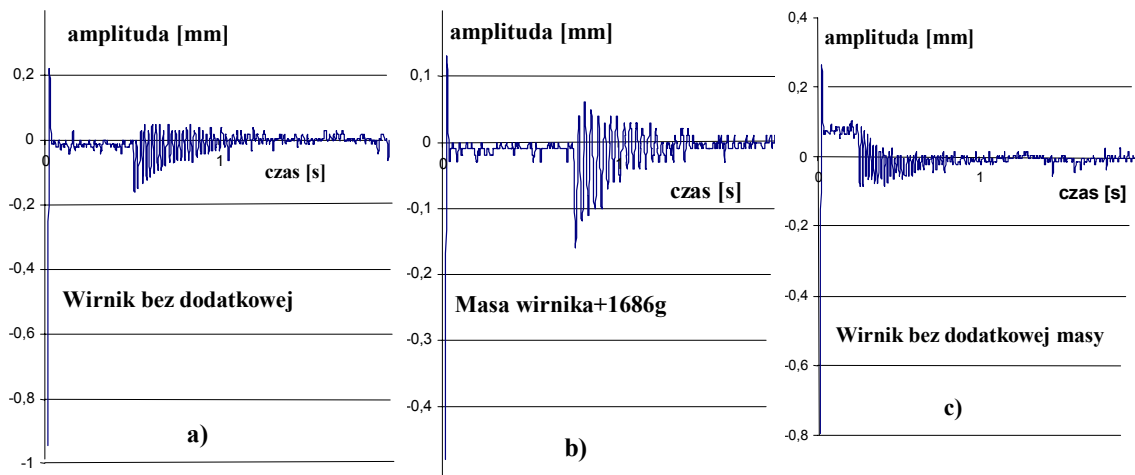
Przykładowe charakterystyki uzyskane z rejestracji drgań z wymuszeniem spowodowanym wychyleniem wirnika (a), impulsem siły (b), skokiem siły (c) łożyska nr 16 o wymiarach 34/25/8 dla szczeliny 0,5 mm przedstawiono na rys. 9.

Zwiększenie masy powoduje zwiększenie amplitudy drgań i tłumienia. Nośność badanych łożysk opisuje z dobrym przybliżeniem zależność (1) [1].

$$N(A, g, s, x) = \alpha \frac{g^{0,09} A^{0,33} x}{e^{0,14s}} \quad (1)$$

gdzie wartości współczynnika α , wynoszą dla różnych materiałów odpowiednio:

- dla magnesów ferrytowych $\alpha = 1,02$,
- dla magnesów z ferrytu strontowego $\alpha = 2,92$,
- dla magnesów NdFeB $\alpha = 6,5$ do $12,6$

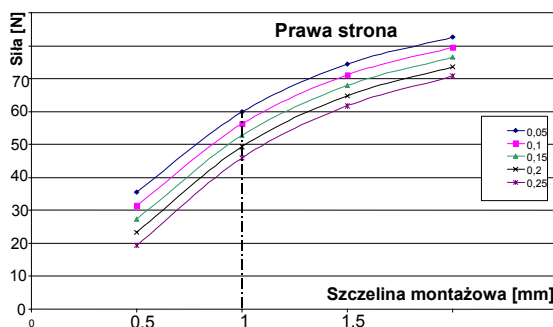


Rys.9. Rzeczywisty przebieg drgań z wymuszeniem : a) typu 1- spowodowanych wychyleniem wirnika -, b) typu 2 - spowodowanych impulsem siły, c) typu 3 – spowodowanych skokiem siły łożyska nr 16 (34/25/8); ze szczeliną 0,5 mm. Przypadki a) i c) bez dodatkowej masy wirującej, przypadek b) z dodatkową masą wirującą [1]

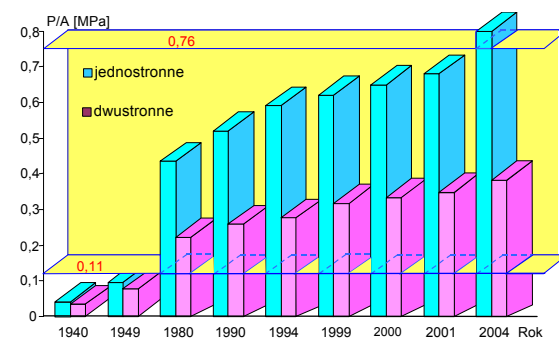
Na rysunku 10 zestawiono przykładowe przebiegi wartości sił rozwijanych przez badane łożyska.

Na rysunku 11 zestawiono porównanie trendu wzrostu względnego obciążenia pasywnych łożysk jednostronnych i dwustronnych P/A z wartościami średniego ciśnienia w filmie olejowym wzdłużnych łożysk ślizgowych smarowanych hydrodynamicznie, w ostatnim okresie.

Wykres sporządzono przy założeniu granicznej szczeliny łożyskowej $s = 0,05$ mm i szczeliny montażowej w dwustronnym łożysku wzdłużnym $s = s_1 + s_2 = 1,5$ mm. Przyjęto, że średnie wartości ciśnienia we wzdłużnych łożyskach ślizgowych smarowanych hydrodynamicznie zmieniają się, dla typowych nośności od 0,11 do 0,76 MPa – oznaczonych na rysunku kolorem jasno niebieskim.



Rys.10. Eksperymentalne przebiegi maksymalnego obciążenia granicznego dwustronnego łożyska



Rys. 11. Trend wzrostu względnego obciążenia P/A pasywnych łożysk jednostronnych i dwustronnych w ostatnim okresie [1]

W zależności od charakteru występującego obciążenia, zmienia się skuteczność tłumienia. Opisanie jedną zależnością wartości współczynnika jest mało precyzyjne. Znacznie korzystniej jest podać zależność dokładnie opisującą współczynnik tłumienia dla każdej postaci wymuszenia drgań.

Zależności do wyznaczania współczynników tłumienia można wyrazić następująco:
dla drgań z wymuszeniem typu 1, spowodowanym wychyleniem wirnika

$$c(A, g, s, x) = 0,06 \frac{g^{0,81} A^{0,32}}{x^{0,18} s^{0,4}} \quad (2)$$

- dla drgań z wymuszeniem typu 2, spowodowanych impulsem siły

$$c(A, g, s, x) = 0,15 \frac{g^{0,81} A^{0,18}}{x^{0,18} s^{0,4}} \quad (3)$$

- dla drgań z wymuszeniem typu 3, spowodowanych skokiem siły

$$c(A, g, s, x) = 0,09 \cdot e^{(0,76x^{-0,7})s} \frac{g^{0,81} A^{0,33}}{s^{0,6}} \quad (4)$$

gdzie: e – podstawa logarytmu naturalnego,
 g – grubość magnesu,
 A – pole powierzchni roboczej (czołowej) magnesu,
 s – wartość szczeliny łożyskowej,
 x – wartość przemieszczenia wirnika w stosunku do wyjściowego położenia równowagi.

WNIOSKI KOŃCOWE

1. Najwyższe nośności wzdłużnych pasywnych łożysk magnetycznych, dla danych materiałów i danych wymiarów pierścieniowych magnesów, uzyskuje się przy równoległościowym położeniu ich powierzchni roboczych. Przekoszenie powierzchni roboczych powoduje zmniejszenie nośności, tym większe im większy jest błąd nierównoległości powierzchni roboczych
2. Istotne znaczenie dla uzyskiwanych przez łożyska nośności ma materiał magnesów, z których zbudowane jest łożysko. Najmniejszą nośność osiągają łożyska zbudowane z magnetytu, większą łożyska wykonane z ferrytów, a największą magnesy spiekane ze związków NeFeB (neodym, żelazo, bor), wykonane z cząstek o rozdrobnionej strukturze, mniejszych od 50 nm. Własności magnesów składających się z tych samych pierwiastków mogą się znacznie różnić i zależą od sposobu ich wytwarzania, kombinacji składu, sposobu i kierunku magnetyzacji.
3. Systematyczne doskonalenie sposobów wytwarzania magnesów trwałych pozwala wierzyć w dalsze sukcesywne zwiększanie ich energii, co w konsekwencji umożliwi budowanie magnetycznych łożysk pasywnych o zwiększonej nośności w porównaniu do łożysk, które były przedmiotem badań w niniejszej pracy.
4. W przebadanych łożyskach, wykonanych z wysokoenergetycznych materiałów, uzyskano wartości nośności rzędu od kilkudziesięciu do kilkuset niutonów, dla małych wartości szczelin łożyskowych oraz przemieszczeń wirnika łożyska rzędu od kilku do kilkunastu setnych mm.
5. Przeprowadzone badania laboratoryjne dotyczyły modelowych zestawów łożysk. W rzeczywistym urządzeniu własności dynamiczne łożyskowanego układu różnią się, zarówno jakościowo jak i ilościowo od układu modelowego. Wartości uzyskane w badaniach modelowych dają podstawowe informacje oraz wyjściowe parametry do projektowania a także do prowadzenia konkretnych badań prototypowych i eksploatacyjnych układów łożyskowych o pożądanej dynamice.

LITERATURA

- [1] Sławińska A.: Rozprawa Doktorska nt: Badanie charakterystyk statycznych i dynamicznych wzdluznych magnetycznych lozysk pasywnych w aspekcie cech konstrukcyjnych i materialowych, Politechnika Lodzka, styczen 2005
- [2] Burcan J, Sławińska A: Eksperymentalne badania wzdluznych pasywnych lozysk magnetycznych, TRIBOLOGIA 3/2004 (195), str. 13 – 23, ISSN 0208-7774
- [3] Burcan J: Łozyska wspomagane polem magnetycznym, WNT, Warszawa 1996

CHOSEN CHARACTERISTICS OF PASSIVE AXIAL MAGNETIC BEARINGS

Summary: The paper presents the results of the author's experiments on passive axial one- and two-sided magnetic bearings, made of the compound NdFeB.

The experiments showed the dependence of load-bearing capability, stiffness and the ability to dampen the vibrations of a bearing on the bearing's structure and material. The exemplary courses of load-bearing capability, stiffness and the coefficient of vibration damping of bearings made from the NdFeB agglomerate were compared with the exemplary courses of load-bearing capability, stiffness and the coefficient of vibration damping of bearings made from ferrite and ferrite of strontium.

The paper contains empirical dependences for load-bearing capability and the coefficient of vibration damping for vibrations forced with the impulse of the force, force rush, and the initial displacement of the rotor.