

AKTYWNE PROMIENIOWE ŁOŻYSKO MAGNETYCZNE*

W artykule przedstawiona została konstrukcja i charakterystyki dynamiczne promieniowego łożyska magnetycznego. Opisany został siłownik elektromechaniczny oraz współczynniki sztywności prądowej i przemieszczeniowej łożyska. Łożysko zostało zaprojektowane i wykonane w Wojskowej Akademii Technicznej.

ACTIVE RADIAL MAGNETIC BEARING

In this paper construction and dynamics characteristic of radial magnetic bearing is presented. There is described an electromagnetic actuator and current and displacement stiffness coefficients of magnetic bearing. The bearing was designed and made in the Military University of Technology.

1. WSTĘP

Zależnie od kierunku przenoszonych obciążeń, łożyska magnetyczne dzielą się na promieniowe, osiowe (oporowe) i łożyska skrośne. Do łożyskowania wirników wykorzystuje się odpowiednie zestawy powyższych łożysk, które ograniczają poszczególne stopnie swobody wirnika [1]. Należy zauważyć, że w promieniowych łożyskach magnetycznych wirnik może wykonywać nieznaczne ruchy kątowe oraz może przemieszczać się liniowo. Klasyczne łożyska promieniowe nie pozwalają na budowę tak elastycznych węzłów łożyskowych.

W Zakładzie Osprzętu i Automatyki Lotniczej WAT zaprojektowano i wykonano promieniowe i osiowe łożyska magnetyczne. Do ograniczania ruchów promieniowych wirnika opracowano typoszerzę łożysk magnetycznych przeznaczonych do łożyskowania wirników o średnicy do 89,3 [mm] i generujących maksymalne elektromagnetyczne siły nośne o wartości 200, 400, 600 i 1200 [N]. Opisane łożyska magnetyczne przeznaczone są do łożyskowania wysokoobrotowych wirników sztywnych i giętkich [2].

2. KONSTRUKCJA ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO

Łożysko magnetyczne zbudowane jest z siłownika elektromagnetycznego, czujnika mierzącego położenie wirnika w szczelinie powietrznej, regulatora i wzmacniacza mocy [1] (rys. 1).

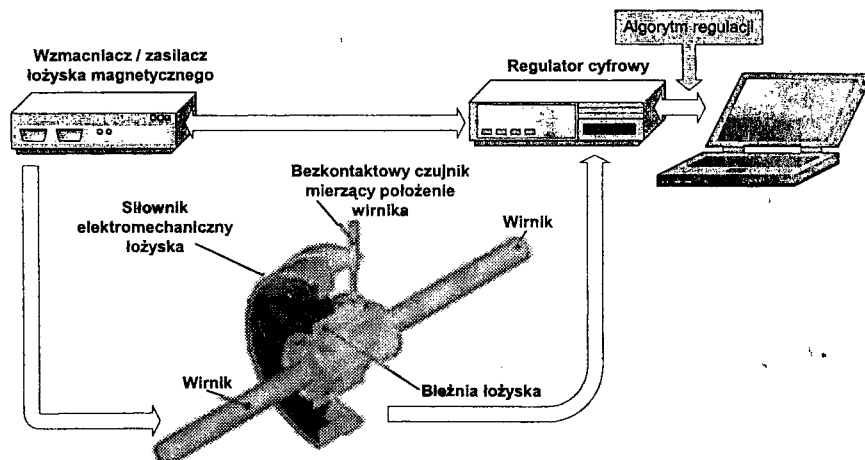
Podstawowym elementem łożyska jest siłownik elektromagnetyczny, który generuje siłę elektromagnetyczną przeciwdziałającą ruchowi wirnika w płaszczyźnie łożyskowania. Siłownik zbudowany jest z magnetowodu, który wykonany jest z pakietu blach transformatorowych oraz ośmiu cewek umieszczonych na nabiegunkach elektromagnesów

*Wykorzystano oprogramowanie dotowane przez Fundację na Rzecz Nauki Polskiej

siłownika. Elementem siłownika jest również bieźnia umieszczona na wirniku, której zadaniem jest ograniczanie prądów wirowych indukowanych w obracającym się wirniku. Bieźnia umożliwia łożyskowanie wirników wykonanych z materiałów nieferromagnetycznych, ponieważ bieźnia podobnie jak stator wykonana jest z pakietu blach transformatorowych.

Informacja o ruchu wirnika w płaszczyźnie łożyskowania rejestrowana jest przez bezkontaktowy czujnik mierzący położenie wirnika w szczelinie powietrznej. Do pomiaru przemieszczenia wirnika w szczelinie powietrznej wykorzystuje się różnicowe czujniki indukcyjne i pojemnościowe, czujniki optoelektroniczne oraz czujniki wiropądowe.

Podstawową zaletą czujników różnicowych jest ich łatwa kalibracja. W położeniu nominalnym wirnika odległości do elementów pomiarowych (elektromagnesów w czujniku indukcyjnym lub elektrody w czujniku pojemnościowym) są takie same, tym samym sygnał wyjściowy jest równy zero. Wadą tych czujników jest małe pasmo przenoszenia oraz wrażliwość na wpływ silnych pól elektromagnetycznych.



Rys. 1. Podstawowe elementy aktywnego promieniowego łożyska magnetycznego.

Czujniki optoelektroniczne posiadają dużą rozdzielczość oraz zakres pomiarowy często większy od średnicy łożyskowanego wirnika. Jednak czujniki tego typu nie mogą być stosowane do łożyskowania wirników pracujących w środowisku zanieczyszczonym. Również nie można ich wykorzystywać do łożyskowania wirników umieszczonych w ciekłych gazach. Praktycznie zastosowanie tych czujników poza stanowiskami laboratoryjnymi jest niewielkie.

Czujniki wiropądowe charakteryzują się bardzo dużym pasmem przenoszenia oraz rozdzielczością. Charakteryzują się opornością na wpływ obcych pól elektromagnetycznych jak również mogą pracować w aktywnym chemicznie środowisku (ciepły tlen, azot, woda morska itp.). Podstawową wadą czujników tego typu jest kłopotliwa procedura kalibracji czujnika. Również uzyskanie bardzo dużej dokładności pomiaru przemieszczenia wymaga zastosowania specjalnych powierzchni pomiarowych wykonanych z przewodzącego materiału diamagnetycznego (np. miedzi, aluminium).

Informacja o położeniu wirnika z czujników przekazywana jest do układu sterowania. Układ taki może być zrealizowany w technologii analogowej lub cyfrowej. Znaczenie regulatorów analogowych jest obecnie marginalne. Stosowane są do realizacji prostych praw sterowania

(PD i PID) w konstrukcjach, gdzie wymagana stabilność nastaw jest niewielka. Jednak posiadają jedną zasadniczą zaletę, jaką jest praca w czasie rzeczywistym.

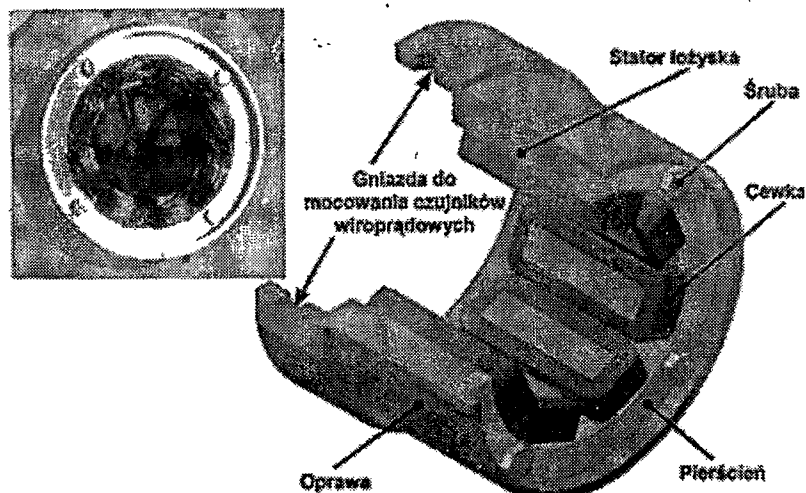
Obecnie większość nowoczesnych regulatorów realizowana jest w technice cyfrowej. Układy tego typu umożliwiają realizację praw sterowania regulatorów wyższego rzędu oraz regulatorów wielowymiarowych, wykorzystywanych do sterowania systemami typu MIMO. Regulatory cyfrowe wprowadzają do struktury łożyska obok składowania sprzętowego (hardware) oprogramowanie (software), przeznaczone między innymi do realizacji algorytmu sterowania. Jakość obu powyższych elementów decyduje o jakości układu sterowania łożyskiem magnetycznym, szczególnie w aplikacjach czasu rzeczywistego, gdzie obiektem sterowania jest obiekt strukturalnie niestabilny (siłownik elektromechaniczny łożyska). W regulatorach cyfrowych, oprócz układu realizującego prawo sterowania, należy jeszcze uwzględnić wpływ na pracę regulatora układu wejść (przetworniki A/C) i wyjść analogowych (przetworniki C/A).

Sygnały sterujące z regulatora przesyłane są do wzmacniaczy mocy, które zasilają cewki elektromagnesów. Do sterowania łożysk magnetycznych wykorzystuje się wzmacniacze analogowe i impulsowe. Zadaniem zasilaczy jest stabilizacja prądu płynącego przez cewki elektromagnesów.

Schemat strukturalny łożyska magnetycznego z zaznaczonymi podstawowymi jego elementami przedstawiony jest na rys. 1. W Zakładzie Osprzętu i Automatyki Lotniczej WAT prowadzane są prace badawczo – konstrukcyjne i wdrożeniowe nad wszystkimi wymienionymi wyżej elementami łożyska magnetycznego.

3. SIŁOWNIK ELEKTROMAGNETYCZNY ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO

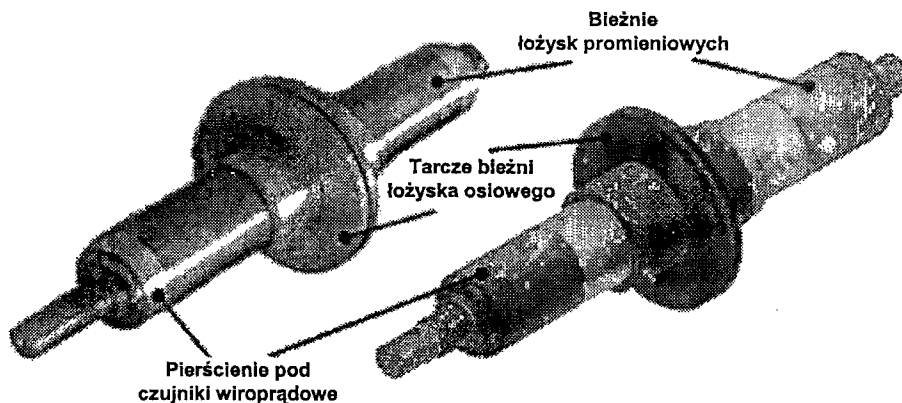
Siłownik elektromagnetyczny łożyska magnetycznego (oznaczony w dokumentacji technicznej jako LM-48/90/40), przeznaczony jest do łożyskowania wirników o średnicy do 47,5 [mm] oraz do generowania elektromagnetycznej siły nośnej o wartości do 400 [N]. Średnica zewnętrzna siłownika wynosi 96 [mm].



Rys. 2. Siłownik elektromechaniczny łożyska i jego przekrój.

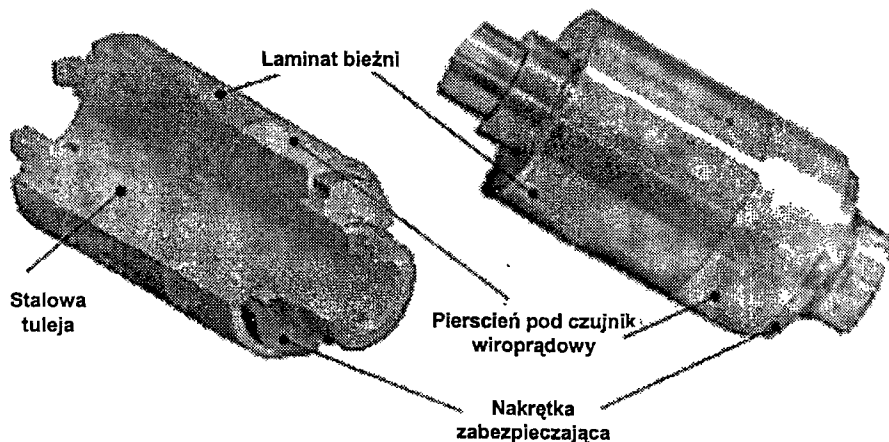
Stator wykonany jest z krzemowej żmnowalcowanej blachy transformatorowej o grubości 0,3 [mm]. Średnica wewnętrzna statora wynosi 48 [mm], natomiast średnica zewnętrzna 90 [mm]. Na nabiegownikach statora umieszczone są cewki wykonane z drutu nawojowego o średnicy 1 [mm]. Przez cewkę może przepływać prąd do 8 [A]. Każda z cewek elektromagnesów posiada po 30 zwojów. Konstrukcja siłownika przedstawiona jest na rys. 2.

Stator współpracuje z bieżnią łożyska, która umieszczona jest na łożyskowanym wirniku. Bieżnia wykonana jest z tego samego materiału co stator. Bieżnia jest pierścieniem o średnicy zewnętrznej do 47,5 [mm] i długości 45 [mm]. Średnica wewnętrzna zależy od średnicy łożyskowanego wirnika oraz od wymaganego minimalnego przekroju ścieżki strumienia magnetycznego [2].



Rys. 3. Rozmieszczeni bieżni wirnika sztywnego.

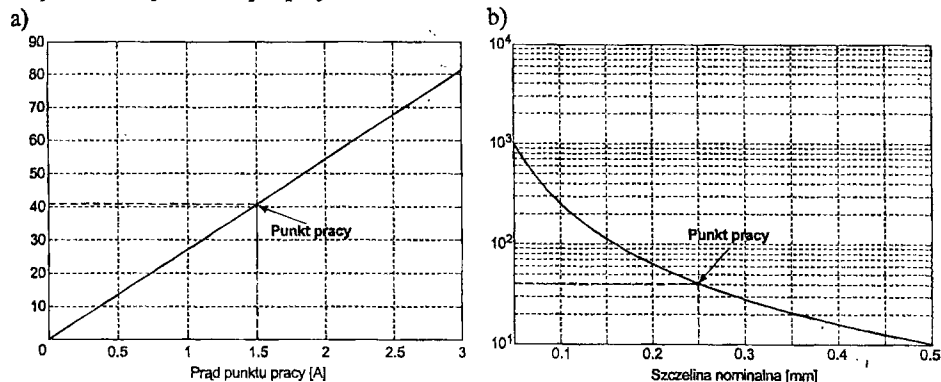
Bieżnie zostały dostosowane do współpracy z wirnikami sztywnymi i giętkimi. W przypadku wirników sztywnych bieżnia umieszczona jest bezpośrednio na wirniku (rys. 3). Tym samym bieżnia staje się integralnym elementem wirnika sztywnego. Jeden ze stopni wirnika przygotowany jest do współpracy z czujnikiem wiropądowym mierzącym położenie wirnika w szczelinie powietrznej.



Rys. 4. Konstrukcja bieżni wirników giętkich.

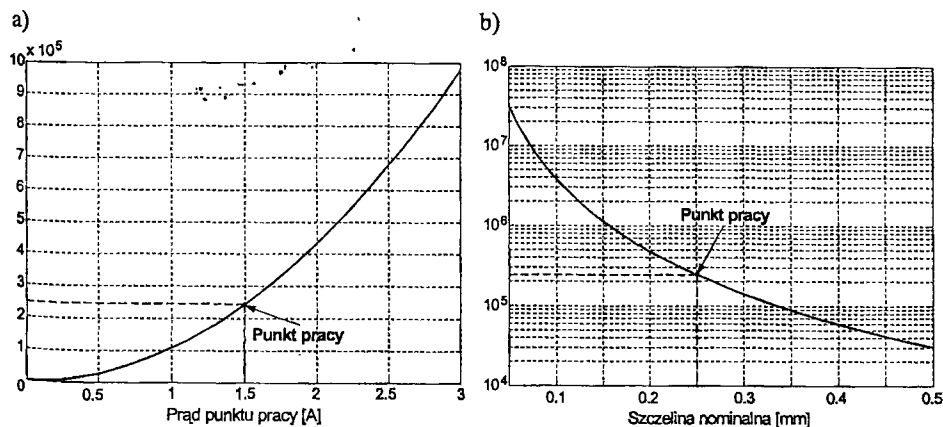
W wirnikach giętkich bieźnia umieszczana jest na specjalnej tulei (rys. 4). Rozwiązanie takie jest konieczne, ponieważ średnica zewnętrzna bieźni jest dużo większa od średnicy łożyskowanego wirnika. Oprócz bieźni łożyska, na tulei umieszczony jest pierścień duralowy współpracujący z czujnikiem wiropądowym.

Stator siłownika umieszczony jest w oprawie duralowej (rys. 2), w której znajdują się gniazda do mocowania czujników wiropądowych. Takie rozwiązanie umożliwia odpowiednie wzajemne usytuowanie osi i płaszczyzn łożyskowania już na etapie projektowania.



Rys. 5. Zmiana współczynnika sztywności prądowej k_i [N/A] w funkcji:
a) prądu punktu pracy; b) szczeliny powietrznej.

Dla siłownika elektromagnetycznego oszacowane zostały współczynniki sztywności układu, określone jako jego zdolność do przeciwstawiania się oddziaływaniu sił zewnętrznych. Współczynniki są funkcjami stałej elektromagnesu zależnej od jego parametrów oraz prądu w punkcie pracy i wartości szczeliny nominalnej. Współczynniki te zostały określone mianem sztywności prądowej i przemieszczeniowej. Analizę sztywności przeprowadzono dla prądu punktu pracy $i_0=1,5$ [A] i szczeliny nominalnej $x_0=0,25$ [mm]. Charakterystyki sztywności siłownika przedstawiono na rys. 5 i 6.

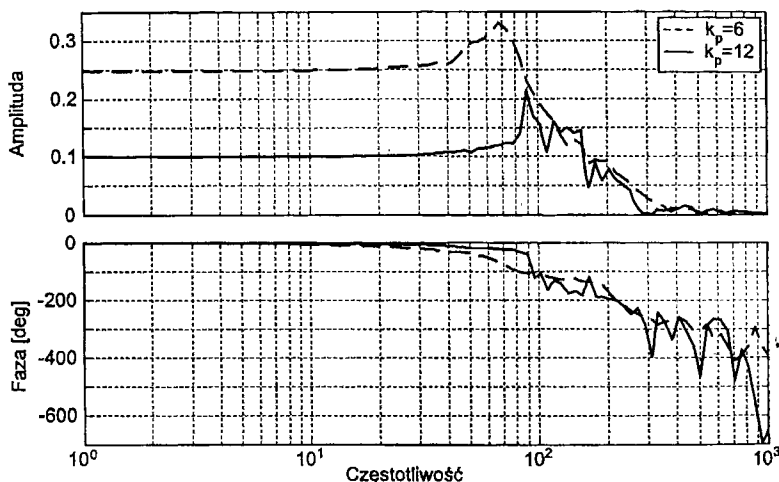


Rys. 6. Zmiana współczynnika sztywności przemieszczeniowej k_x [N/m] w funkcji:
a) prądu punktu pracy; b) szczeliny powietrznej.

4. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO LM-48/90/40

Do sterowania łożyskiem magnetycznym zastosowano cyfrowy wielowymiarowy regulator PID, zbudowany na bazie oprogramowania, kartach z procesorami sygnałowymi oraz kartach wejść i wyjść analogowych firmy dSPACE. Prawo sterowania regulatora zostało zrealizowane w procesorze sygnałowym TMS320C40. Informacja o położeniu wirnika rejestrowana jest przez 32 kanałową multipleksowaną kartę pomiarową wyposażoną w dwa 16-bitowe przetworniki A/C próbujące sygnały wejściowe z częstotliwością 10 [kHz]. Sygnały sterujące wysyłane są przez kartę z 16-bitowymi przetwornikami C/A.

Algorytm sterowania zrealizowany został w programie Matlab-Simulink, a następnie korzystając ze specjalistycznego oprogramowania (RTW i RTI) wygenerowana została aplikacja czasu rzeczywistego, która została uruchomiona w procesorze sygnałowym. Ponieważ system łożyskowania wirnika zawiera trzy łożyska (dwa promieniowe i jedno osiowe), a każde łożysko promieniowe zbudowane jest z dwóch siłowników, to w programie zamodelowano pięć regulatorów, sterujących poszczególnymi siłownikami.

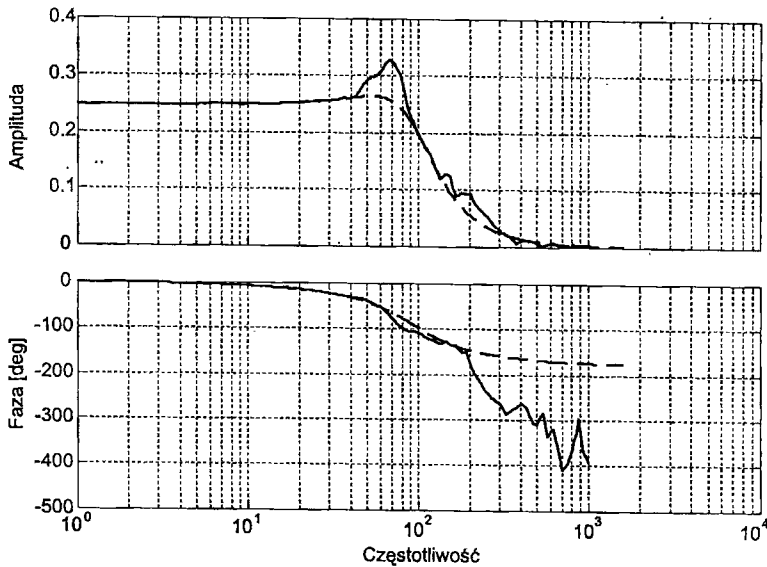


Rys. 7. Charakterystyka częstotliwościowa łożyska magnetycznego dla różnych wartości wzmocnienia proporcjonalnego regulatora.

Następnie stabilne łożysko magnetyczne podano badaniom eksperymentalnym, które miały na celu weryfikację parametrów dynamicznych łożyska magnetycznego, ocenę parametrów siłownika i weryfikację modelu symulacyjnego łożyska.

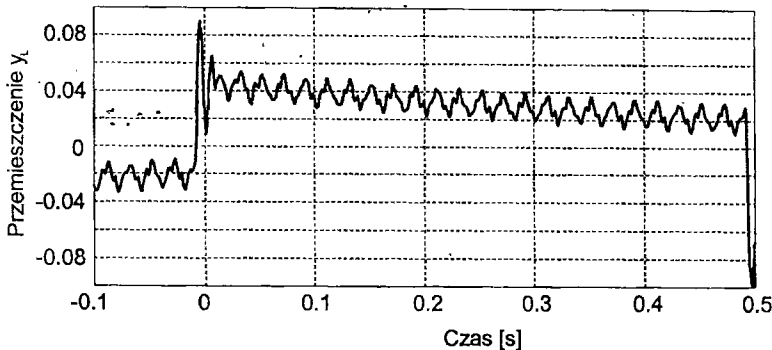
W zbudowanym prototypie uzyskano możliwość kształtowania własności dynamicznych i statycznych łożyska magnetycznego przez zmianę nastaw parametrów regulatora. Do oceny parametrów dynamicznych wykorzystano charakterystyki częstotliwościowe i skokowe łożyska magnetycznego. Charakterystyki wyznaczono przy różnych nastawach regulatorów PID.

Na rys. 7 przedstawiono charakterystykę częstotliwościową łożyska magnetycznego dla różnych wartości wzmocnienia części proporcjonalnej regulatora PID. Jak można zauważyć, wzrost wzmocnienia proporcjonalnego w regulatorze powoduje zmianę pasma przenoszenia łożyska oraz wzmocnienia statycznego.



Rys. 8. Porównanie charakterystyki częstotliwościowej łożyska (linia ciągła) z charakterystyką częstotliwościową modelu (linia przerywana).

Na rys. 8 przedstawiono porównanie charakterystyki częstotliwościowej uzyskanej z eksperymentu oraz wyników symulacji dla modelu matematycznego, który wykorzystano w procesie projektowania łożyska magnetycznego. Jak można zauważyć charakterystyki potwierdzają przyjęty model. W badanym łożysku zaobserwowano wpływ zakłóceń sygnałem o częstotliwości 50 [Hz] oraz jego nieparzystymi harmonicznymi (150, 250, 350 [Hz], itd.). Częstotliwość podstawowa występuje w obszarze rezonansu łożyska magnetycznego, co powoduje odchylenie charakterystyki modelu od charakterystyki łożyska w obszarze rezonansu.

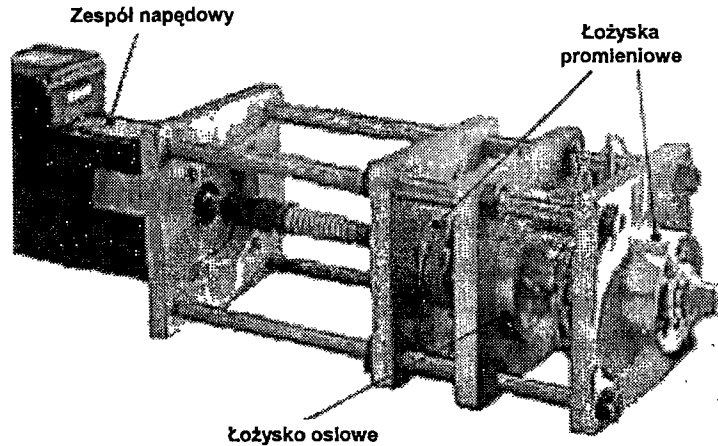


Rys. 9. Przykładowa odpowiedź łożyska na wymuszenie skokiem siły wytrącającej wirnik z punktu pracy w lewej płaszczyźnie łożyskowania.

Zakłócenie jest widoczne na charakterystyce skokowej, którą wyznaczono dla łożyska umieszczonego w lewej płaszczyźnie łożyskowania wirnika (rys. 9). Analizę przeprowadzono dla różnych wartości części różniczkującej regulatora, dla obu płaszczyzn łożyskowania.

5. PODSUMOWANIE

Przedstawione łożysko magnetyczne zostało wykorzystane do łożyskowania wirnika sztywnego w stanowisku laboratoryjnym przygotowanym w Zakładzie Osprzętu i Automatyki Lotniczej. Korzystając z zespołu napędowego, umożliwiającego regulację prędkości obrotowej z dokładnością do jednego obrotu na minutę, wirnik napędzany jest przez silnik elektryczny z prędkością obrotową do 4800 [obr/min] (rys. 10).



Rys. 10. Model laboratoryjny zawieszenia magnetycznego z wirnikiem sztywnym z dwoma łożyskami promieniowymi i jednym osiowym.

Łożyska tego typu mogą być wykorzystane do łożyskowania wirników i elektrowirzecion w różnych maszynach wirnikowych. Szczególnym obszarem zastosowań są maszyny wirnikowe pracujące w trudnych warunkach np. pompy wykorzystywane do transportu ciekłych gazów lub praca w wysokiej próżni.

Dostosowanie łożyska do określonych warunków pracy nie wymaga zmian konstrukcyjnych. Jedyne modyfikacje, które mogą się okazać konieczne, to dostosowanie oprawy łożyska do określonego typu czujnika, lub wprowadzenie powłok ochronnych zabezpieczających łożysko przed działaniem czynników erozyjnych np. wody morskiej, tlenu itd.

Aktywne łożyska magnetyczne są wykorzystywane do sterowania drganiami wirnika oraz modelowania złożonych ruchów wirnika, niezbędnych w maszynach skrawających do uzyskania specjalnych kształtów i powierzchni.

Niektóre z przedstawionych obszarów zastosowań łożysk magnetycznych wymagają dokładnych badań. Badania takie są prowadzone w Zakładzie Osprzętu i Automatyki Lotniczej WAT.

LITERATURA

- [1] Z. Gosiewski: *Łożyska magnetyczne dla maszyn wirnikowych Cz. I Podstawy teoretyczne*; Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Koszalinie, Koszalin 1993r.
- [2] Z. Gosiewski (kierownik pracy): *"Inteligentne" łożyska magnetyczne*; Materiały do sprawozdania z pracy badawczej KBN nr 7T07C03617 (w opracowaniu).