

PROBLEMY NIEKONWENCJONALNYCH UKŁADÓW ŁOŻYSKOWYCH
Łódź, 12 – 14 maja 1999 r.

Dorota Kozanecka
Instytut Maszyn Przepływowych
Politechnika Łódzka

**PROMIENIOWE AKTYWNE ŁOŻYSKO MAGNETYCZNE
STEROWANE CYFROWO**

SŁOWA KLUCZOWE:

aktywne łożysko magnetyczne, cyfrowe sterowanie, drgania giętne, częstość krytyczna

STRESZCZENIE

Projektowanie regulatorów łożysk magnetycznych jest procesem złożonym. Duże częstotliwości obrotów wirników podpartych w łożyskach wymagają systemów sterowania, które powinna charakteryzować podatna struktura pozwalająca na dostrojenie parametrów regulatora do obiektu. Takie możliwości stwarza cyfrowa technika sterowania pozwalająca na realizację złożonych struktur i algorytmów obliczeniowych. W pracy przedstawiono koncepcję cyfrowego regulatora aktywnego łożyska magnetycznego, który został zbudowany na bazie procesora SAB80C167LM firmy SIEMENS. w IMP PŁ.

1. WPROWADZENIE

Poszukiwania nowych rozwiązań łożyskowania w konstrukcjach maszyn wirnikowych, którym stawia się specjalne wymagania eksploatacyjne spowodowały, że obecnie coraz szerzej w praktyce stosuje się systemy aktywnego magnetycznego zawieszenia wirnika. [1,2,3].

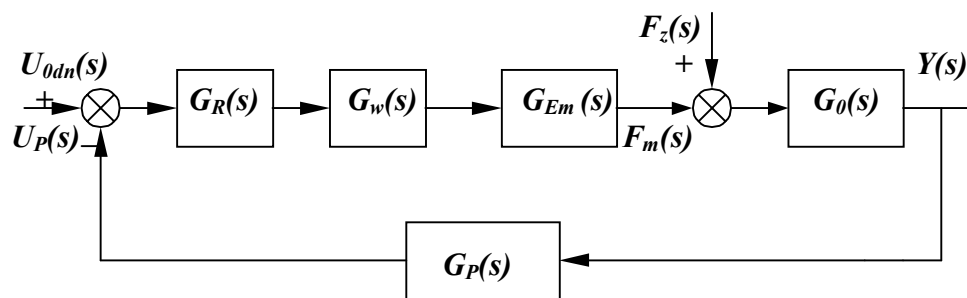
Problematyka aktywnego łożyskowania magnetycznego zaczyna coraz częściej pojawiać się w polskiej literaturze naukowo - technicznej. Wynika to z faktu, że wiele ośrodków na świecie pracuje nad tą tematyką, istnieje szereg aplikacji przemysłowych maszyn z aktywnym zawieszeniem magnetycznym wirnika i wkrótce ta technologia pojawić się może także w naszym przemyśle [1,2,6].

Budowa systemu aktywnego zawieszenia wirnika maszyny w polu magnetycznym wymaga współpracy specjalistów z dwóch dziedzin techniki bowiem jest połączeniem układu mechanicznego z elektronicznym układem automatycznej regulacji. Aktywne łożysko magnetyczne (Active Magnetic Bearing - AMB) pracuje w systemie składającym się z elementów wykonawczych (elektromagnesów) utrzymujących wirnik maszyny w zadanym

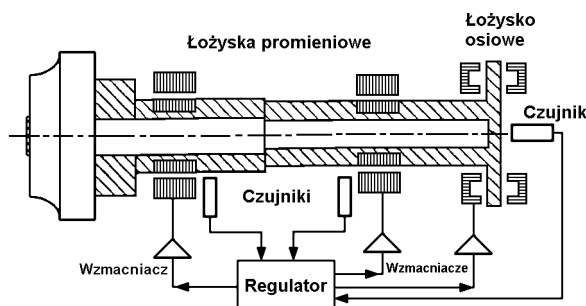
położeniu równowagi, czujników pomiarowych $G_P(s)$ kontrolujących to położenie oraz elementów sterujących, które stanowi regulator ze wzmacniaczem mocy. Regulator $G_R(s)$ na podstawie informacji o pozycji wału stanowiącego obiekt regulacji o transmitancji $G_o(s)$, wypracowuje odpowiednią wartość sygnału, która poprzez wzmacniacz mocy $G_w(s)$ steruje prądem w uzwojeniu panwi łożyska $G_{Em}(s)$ generując siłę magnetyczną (rys. 1a).

Maszyna wyposażona w system aktywnych łożysk magnetycznych wymaga wielokanałowego systemu ciągłego pomiaru położenia wirnika w korpusie. Położenie czopa w panwi łożyska poprzecznego jest kontrolowane za pośrednictwem czujników, które zwykle montuje się wzdłuż dwóch, prostopadłych do siebie osi. (AB i CD) Łożysko wzdłużne wymaga jednej osi kontroli X. Układ podparcia wału realnej maszyny musi zawierać co najmniej dwa łożyska poprzeczne i jedno łożysko wzdłużne, a więc pełny układ łożyskowania zawiera pięć osi kontroli i sterowania (rys. 1b,c).

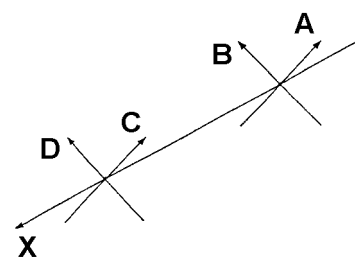
a.)



b.)



c.)



Rys. 1. a.) Schemat blokowy systemu AMB dla jednej osi regulacji; b.) schemat maszyny z aktywnymi łożyskami magnetycznymi; c.) układ współrzędnych pięciu osi kontroli pozycji wirnika

W Instytucie Maszyn Przepływowych Politechniki Łódzkiej od kilku lat trwają prace nad problematyką konstruowania i eksploatacji aktywnych łożysk magnetycznych w zastosowaniu do maszyn przepływowych małej i średniej mocy. Jednym z pierwszych ich efektów było stanowisko badawcze modelowej sprężarki przepływowej z wirnikiem o masie 60 kg podpartym w aktywnych łożysk magnetycznych zasilane, zintegrowanym z wałem, silnikiem elektrycznym wysokiej częstotliwości o mocy 150 kW przy 15000 obr/min.[7,8].

System łożyskowy wyposażony został w regulatory wykonane w technice analogowej. Doświadczenia zebrane w czasie eksploatacji stanowiska badawczego wykazały, że analogowe regulatory wrażliwe są na wpływ warunków zewnętrznych (np. temperatura) i uzyskanie jednoznacznych charakterystyk regulacji a więc jednoznacznych charakterystyk statycznych i dynamicznych systemu łożyskowego jest bardzo trudne. Podjęte zostały prace nad modernizacją stanowiska badawczego, która jest związana z zastępowaniem regulatorów analogowych wielowymiarowymi cyfrowymi układami sterowania.

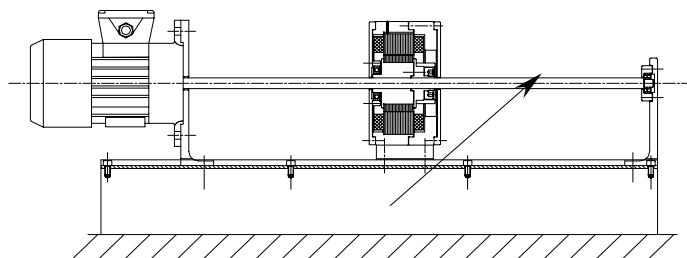
W pracy przedstawiono koncepcję systemu cyfrowego sterowania promieniowym łożyskiem magnetycznym zbudowanym w IMPPL.

2. CYFROWY REGULATOR ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO

W ostatnich latach notuje się bardzo szerokie zainteresowanie technikami cyfrowego przetwarzania sygnałów, które pozwalają na realizację dowolnych algorytmów obliczeniowych, często niemożliwych do zrealizowania w ciągłych układach analogowych. Zastosowanie rozbudowanych układów programowalnych – procesorów, pozwala na zmianę właściwości układu tzn. jego parametrów a także algorytmu działania poprzez wprowadzanie zmian w programie bez modyfikacji sprzętowej. Układy cyfrowe uniezależniają przetwarzanie sygnałów od mierzonych wielkości fizycznych co daje powtarzalność ich działania. Obecnie cyfrowe przetwarzanie sygnałów stało się nowoczesną, interdyscyplinarną dziedziną nauki i techniki o dużym znaczeniu i szerokim zastosowaniu np. w telekomunikacji, informatyce, robotyce, metrologii, medycynie i mechatronice.

W IMP PŁ zbudowane zostały dwa stanowiska badawcze, w których zastosowano także aktywne łożyskowanie magnetyczne lecz już z cyfrowym układem sterowania. Jednym z nich jest modelowa sprężarka przepływowa z poprzecznymi łożyskami aerodynamicznymi i wzdłużnym, aktywnym łożyskiem magnetycznym sterowanym cyfrowo [9,10]. Drugie jest stanowiskiem badawczym modelowego zespołu wirującego, którego główny element stanowi promieniowe aktywne łożysko magnetyczne *AMB* – rys.2.

Konstrukcja ta powstała w celu eksperymentalnej weryfikacji koncepcji utrzymania niskiego poziomu drgań w całym zakresie pracy układu z wirnikiem nadkrytycznym (rozwój, prędkość nominalna, wybieg) przez zastosowanie pomocniczego, aktywnego łożyska magnetycznego z systemem cyfrowego sterowania. Łożysko jest zamontowane w miejscu przewidywanych największych odkształceń dynamicznych wirnika. Obecność w układzie wirującym dodatkowego łożyska magnetycznego powoduje jakościową zmianę jego własności dynamicznych. Pozwala to na osiągnięcie nominalnych obrotów bez niebezpiecznych dla układu wirującego efektów związanych z przekraczaniem częstości krytycznej wirnika giętkiego.

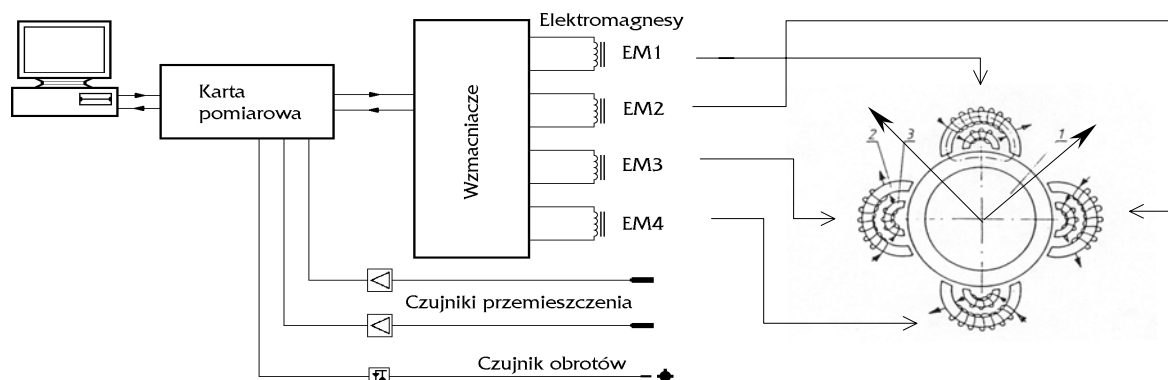


Rys 2. Stanowisko badawcze modelowego zespołu wirującego.

Bardzo istotnym elementem pracy jest cyfrowa realizacja systemu sterowania łożyskiem magnetycznym, która umożliwia uzyskanie programowo nastawialnych charakterystyk mechanicznych pomocniczego układu łożyskowego (sztywność, tłumienie).

Cyfrowy układ sterowania aktywnym łożyskiem magnetycznym w zrealizowanym projekcie regulatora stanowi karta pomiarowo-sterująca współpracująca z komputerem typu IBM-PC, moduł wzmacniaczy elektromagnesów oraz zestaw czujników przemieszczenia i obrotów (rys.3).

Karta pomiarowo-sterująca została zaprojektowana i wykonana jako karta dodatkowa do komputera typu IBM-PC. Podstawowym jej elementem jest 16-to bitowy specjalizowany mikroprocesor SAB80C167LM firmy SIEMENS przeznaczony do stosowania w urządzeniach, którym stawia się szczególne wymagania związane z realizacją procesu sterowania tymi urządzeniami. Do głównych cech charakterystycznych, które zadecydowały o jego wykorzystaniu dla celów cyfrowego sterowania systemem aktywnych łożysk magnetycznych można zaliczyć między innymi:

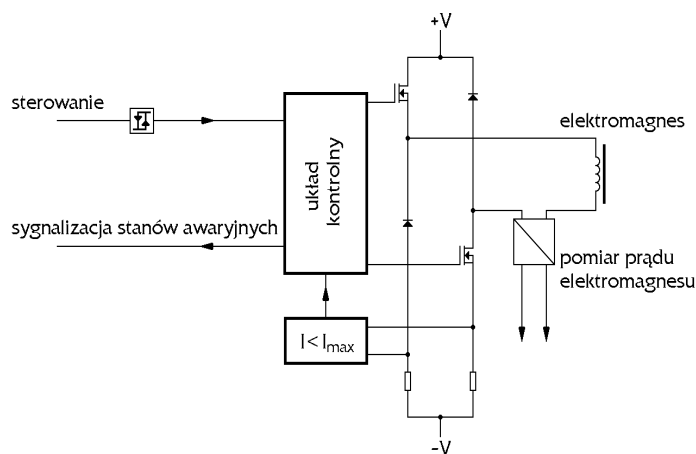


Rys. 3. Schemat cyfrowej regulacji łożyska magnetycznego.

- Specjalizacja układów wejście/wyjście, która pozwala przypisać im wykonanie określonego zadania, bez konieczności zastosowania dodatkowego sterownika do jego realizacji.
- Rozbudowane układy liczników i komparatorów, umożliwiające sprzętową realizację wielokanałowych rejestrów PWM.
- 10-cio bitowy przetwornik A/D stanowiący integralną część mikroprocesora, co zwiększa odporność na zakłócenia zewnętrzne i związane z nimi uszkodzenia.
- Hierarchiczny system przerwań stwarzający możliwość realizacji wielopoziomowego systemu zabezpieczeń. Jest to układ kontroli przerwań pozwalający na natychmiastową reakcję systemu na zdarzenia zewnętrzne jak w przypadku sterowania systemem aktywnych łożysk magnetycznych np. brak zasilania, wzrost temperatury bądź stany krańcowe położenia czopa w panwi.

Działanie układu cyfrowego sterowania promieniowym łożyskiem magnetycznym zbudowanym w IMPPŁ jest realizowane w dwu etapach i zależy od oprogramowania komputera nadrzędnego PC oraz oprogramowania obejmującego obsługę modułu karty pomiarowo-sterującej.

Karta pomiarowo-sterująca generuje sygnały w postaci fali impulsów prostokątnych o zmiennym wypełnieniu. Po odpowiednim ich uformowaniu przekazywane są do bloku kontroli, który otrzymuje także sygnał z układu pomiaru prądu w elektromagnesach łożyska. Jeśli sygnał ten wskazuje na przekroczenie granicznej wartości prądu, wzmacniacze mocy pozostają nieaktywne.



Rys. 4. Schemat wzmacniacza mocy systemu łożyskowego

W przypadku braku sygnalizacji stanów awaryjnych sygnał z karty pomiarowo-sterującej podawany jest na wzmacniacz mocy, który steruje przepływem prądu przez uzwo-

jenia elektromagnesu (rys.4). Średnia wartość prądu zależy od częstotliwości i współczynnika wypełnienia impulsu generowanego przez kartę pomiarowo-sterującą. Procedura programowa karty umożliwia pomiar sygnałów napięciowych w 8 kanałach (pozycja wirnika), pomiar czasu lub częstości w jednym kanale i wygenerowanie sygnałów sterujących PWM w 4 kanałach. Wyniki pomiarów wykonywanych podczas realizacji procedury odsyłane są do komputera nadrzędnego przez 16-to bitowy port danych.

Moduł wzmacniacza mocy ma za zadanie przetworzyć sygnały sterujące generowane przez wyspecjalizowane rejestry PWM na sygnały mocy zasilające uzwojenia elektromagnesów. Można w nim wyróżnić następujące bloki :

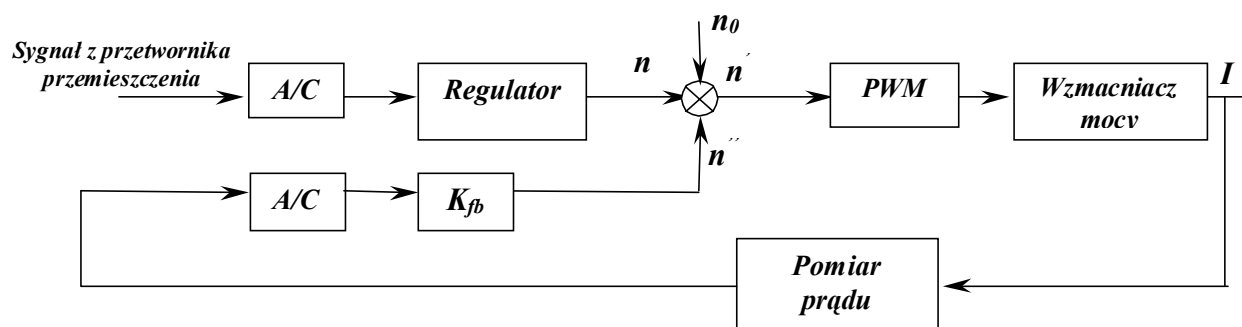
- we/wy – stanowiące połączenie z kartą pomiarowo-sterującą zapewniające galwaniczne rozdzielanie części sygnałów. W celu pełnej izolacji galwanicznej modułu sterownika i karty pomiarowej zastosowano optoizolatory oraz układy typu LEM do pomiaru prądu.
- blok generowania i kontroli sygnałów sterujących wzmacniaczami mocy zasilających elektromagnesy łożyska,
- wzmacniacze mocy z układami pomiaru prądu;

Do budowy wzmacniaczy zastosowano tranzystory mocy VMOS sterowane napięciowo. Cechą charakterystyczną tranzystorów jest dwustanowy cykl pracy: nasycenie - odcięcie. Przejście od stanu nasycenia do stanu odcięcia wymaga rozładowania układu po zaniknięciu impulsu sterującego prądem w uzwojeniu elektromagnesu, co jest zrealizowane poprzez zastosowanie szybkich diod rozładowujących.

Małe oporności źródło–dren ($R < 0.5\Omega$) powodują niskie straty mocy w układzie. W konsekwencji tranzystory nie grzeją się nadmiernie, a więc nie wymagają rozbudowanych układów chłodzenia. Osiąga się również dużą sprawność energetyczną układu wzmacniacza. Z układu wzmacniacza wyprowadzony jest układ programowej kontroli prądu, który dla stanu $I < I_{\max}$ podejmuje decyzję o wysterowaniu wzmacniacza, natomiast w przypadku stwierdzenia stanu przekroczenia dopuszczalnej wartości prądu odcina wysterowanie.

3. CYFROWA REALIZACJA STEROWANIA ŁOŻYSKIEM

Oprogramowanie procesora pozwalające na realizację systemu aktywnego łożyskowania wirnika maszyny wymaga zdefiniowania cyfrowej reprezentacji sygnałów odpowiadających prądowi punktu pracy I_0 , prądowi sterowania I oraz przemieszczeniu wirnika.



Rys.5. Struktura cyfrowego sterownika systemu łożyskowego

Wyspecjalizowane rejestry procesora generują impulsy PWM w tzw. jednostce CAPCOM (CAPture/COMpare przechwytyjąco-porównującej). W danym czasie próbkowania są to impulsy o wypełnieniu n' proporcjonalnym do wypracowanego sygnału z układu regulatora na podstawie pomiaru przemieszczenia czopa względem panwi łożyska n , po jego

porównaniu z sygnałem zadany n_0 oraz przetworzonym na impuls cyfrowy sygnałem prądowym n'' płynącym w uzwojeniu elektromagnesu (rys.5):

$$n' = n + n_0 - n'' \quad (1)$$

Dla wzmacniacza mocy definiuje się współczynnik przetwarzania KI , który pozwala określić wartość prądu wygenerowanego w uzwojeniu elektromagnesu:

$$KI = \frac{U_z - \Delta U}{R_E - R_T} \frac{1}{n'_{max}} \quad (2)$$

Współczynnik przetwarzania KI jest funkcją parametrów wzmacniacza, którymi są: U_z - napięcie zasilania wzmacniacza mocy, ΔU - spadek napięcia na tranzystorach mocy i diodach, R_E - oporność uzwojenia elektromagnesu, R_T - oporność tranzystora mocy w stanie przewodzenia, n'_{max} - największa liczba odpowiadająca wypełnieniu impulsów PWM równemu 50 %. Zależy ona od częstości rejestrów PWM – f_{PWM} oraz rozdzielczości Δt układu przechwytyjąco-porównującego CAPCOM.

$$n'_{max} = \left(\frac{\tau_{PWM}}{\Delta t} \right) \frac{1}{2} \quad (3)$$

W przypadku, gdy prąd w uzwojeniu elektromagnesu równy jest prądowi punktu pracy I_0 , tzn. czop łożyska znajduje się w zadanym położeniu, wówczas cyfrowa reprezentacja sygnału PWM jest równa n_0 :

$$n_0 = n'_0 + n''_0 \quad (4)$$

Liczba kroków czasowych n'_0 odpowiadająca współczynnikowi wypełnienia, gdy prąd w uzwojeniu panwi łożyska jest równy $I=I_0$ wynosi:

$$n'_0 = \frac{I_0}{KI} \quad (5)$$

Z wartością prądu I_0 związana jest także reprezentacja cyfrowa n''_0 określona dla danego przetwornika A/C:

$$n''_0 = n''_{max} \frac{I_0}{I_{max}} \quad (6)$$

Takie rozwiązanie zapewnia wysterowanie uzwojenia elektromagnesu prądem I_0 w przypadku, gdy czop łożyska znajduje się w zadanym położeniu.

Doprowadzenie wartości sygnału prądu sterującego I do węzła sumacyjnego w postaci liczby próbek n'' wymaga określenia współczynnika przetwarzania K_{fb} (współczynnika sprzężenia zwrotnego –feedback factor), który jest zdeterminowany parametrami przetwornika A/C.

$$K_{fb} = K_{mi} K_{OI} = \frac{n''_{max}}{U_{REF}} \frac{U_{REF}}{I_{max}} = \frac{n''_{max}}{I_{max}} \quad (7)$$

I_{max} - graniczna wartość prądu sterującego; n''_{max} - maksymalna liczba kroków czasowych wynikająca z rozdzielczości przetwornika A/C; U_{REF} –napięcie odniesienia przetwornika A/C = 5V

Przedstawiona koncepcja definiowania cyfrowej reprezentacji parametrów poszczególnych elementów systemu sterowania, które są niezbędne do jego oprogramowania stanowiła wstępny etap pracy nad cyfrowym sterowaniem łożyskiem magnetycznym.

Zadania jakie ma realizować cyfrowy system sterowania są zasadniczym czynnikiem decydującym o doborze jego struktury i oprogramowania. Wzrost wymagań stawianych tym systemom powoduje konieczność implementacji złożonych algorytmów i ich weryfikację eksperymentalną dla rzeczywistego obiektu.

4. PODSUMOWANIE

W prezentowanym systemie cyfrowego sterowania magnetycznym zawieszeniem wirnika maszyny zastosowano takie rozwiązanie sprzętowo – programowe, które zapewnia możliwość tworzenia elastycznego oprogramowania. Technologia szybkiego prototypowania dla systemu cyfrowego sterowania łożyskiem przyspiesza projektowanie i umożliwia eliminację ewentualnych błędów na kolejnych etapach jego konstrukcji.

Praca wykonywana jest w ramach projektu KBN Nr 7 T07TC 034 12. Jej celem jest wypracowanie technologii łożyskowania magnetycznego wirników maszyn umożliwiającej jej aplikację w przemyśle, który jest zainteresowany modernizacją funkcjonujących już maszyn o wysokich wymaganiach technologicznych.

LITERATURA

- [1] Schweitzer G., Traxler A., Bleuler H.: *Magnetlager*, Springer-Verlag, 1993.
- [2] Gosiewski Z.: *Łożyska magnetyczne dla maszyn wirnikowych. Podstawy Teoretyczne*, cz. I Monografie 33 Koszalin 1993, *Sterowanie i badanie* cz. II Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa Warszawa 1998. (w druku)
- [3] Baun D., Fittro R., Maslen E.: *Force Versus Current and Air Gap Calibration of a Double Acting Magnetic Thrust Bearing*, School of Engineering and Applied Science, Dep. of Mechanical Aerospace and Nuclear Engineering ROMAC Report No.397 UVA 1996.
- [4] Buhler Ph., Siegwart R., Herzog R.: *Digital Control for Low Cost Industrial AMB Applications*, Proceedings of the V International Symposium on Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan, August 28-30, 1996 pp. 83-88.
- [5] Burcan J.: *Łożyska wspomagane polem magnetycznym* WNT, W-wa 1996
- [6] Kozanecka D., Kozanecki Z., Krysiński J.: *Stanowisko badawcze modelowej sprężarki przepływowej z aktywnymi łożyskami magnetycznymi*, CMP Nr.111, Z.773, Łódź 1996, str. 97-104.
- [7] Kozanecka D.: *Algorytmy sterowania aktywnych łożysk magnetycznych*, III Konferencja Naukowo Techniczna MECHATRONIKA'97, Warszawa 1997, Tom 2, str. 139-144.
- [8] Kozanecka D., Kozanecki Z., Lech T.: *Application of an Auxiliary Active Magnetic Bearing for Modification of Dynamic Properties of Rotors*, Proceedings of the XIV World Congress IMEKO, Tampere Finland, June 1997, Vol. IX pp. 93-98.
- [9] Kozanecka D.: *Możliwości diagnostyczne systemów aktywnego magnetycznego zawieszenia wirników maszyn*, Konf. Nauk.-Tech. AUTOMATION'98, W-wa 1998, PIAP Mat. Konf. str.151-159.
- [10] Kozanecki Z., Kozanecka D., Lech T.: *Experimental Investigation Concerning a Few Measurement Aspects of Lateral and Torsional Vibration*, ISROMAC-7, Proceedings of the 7 Int. Symp. on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Bently Nevada Corp., Honolulu 1998 Vol. B pp 987-993.
- [11] Kozanecka D.: *Eksperymentalna identyfikacja parametrów dynamicznych systemu wirnik łożysko – magnetyczne*, MKM'98, Mat. Konf. Wyd. Polit. Szczecińskiej, str. 313-318.
- [12] Kozanecka D.: *Kompensacja sygnału runout w systemach aktywnego łożyskowania magnetycznego wirników maszyn*, *Krajowy Kongres Metrologii, Gdańsk'98, Mat. Konf. Tom 5 str. 49-56.*

- [13]. Kozanecka D., Kaczmarek A., Lech T.: *Testowanie sygnałów sterujących w aktywnych łożyskach magnetycznych*, I Krajowe Warsztaty Technologii Szybkiego Prototypowania Zastosowaniem Procesorów Sygnałowych, Kat. Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH i Zespół Mechatroniki PAN, Kraków, listopad '98, Mat. Konf. str. 87-94.

RADIAL ACTIVE MAGNETIC BEARING WITH DIGITAL CONTROL

KEYWORDS:

active magnetic bearing, digital control, lateral vibrations, critical frequency.

ABSTRACT:

The rapid development of active magnetic bearings is connected with new, previously unknown, possibilities of their utilisation. The application of magnetic bearings as a system of shaft suspensions gives supplementary diagnostic capabilities, unparalleled by classical solutions. An active magnetic bearing consists of a mechanical structure, electromagnetic coils, various sensors and a controller. This bearing requires control based on feedback of the position of a suspended object. For the last few years, in the Institute of Turbomachinery of Technical University of Łódź, research on active magnetic bearing technology has been carried out, including work in analog controllers, digital controllers, and algorithms, power amplifiers and magnetic bearing-rotor system dynamics. The design of a magnetic bearing controller is a significant challenge for several reasons. High-speed rotors require high band width control systems, and the problems connected with tuning of these systems require flexible control systems. The paper presents the basic idea of digital control for auxiliary active magnetic bearing that causes a qualitative change in dynamic properties of the rotating system, elaborated in the Institute of Turbomachinery of Technical University of Łódź, with the SAB80C167LM processor.

Recenzent: Jan Burcan