

CYFROWY REGULATOR ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO

Projektowanie regulatorów łożysk magnetycznych jest procesem złożonym. Duże częstotliwości obrotów wirników podpartych w łożyskach wymagają złożonych systemów sterowania a te z kolei powinna charakteryzować podatna struktura pozwalająca na dostrojenie parametrów regulatora do obiektu. Takie możliwości stwarza technologia prototypowania w zastosowaniu do cyfrowej techniki sterowania. Szerokie zainteresowanie technikami cyfrowego przetwarzania sygnałów pozwala 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.

DIGITAL CONTROLLER OF THE MAGNETIC BEARING

The design of a magnetic bearing controller is a significant challenge for several reasons. High-speed rotors require high bandwidth control systems, and the problems involved with tuning these systems require flexible control systems. This capability gives prototyping methodology, which seems to be very efficient way of shortening motion digital control system developing. In this paper the basic idea of digital control for active magnetic bearing elaborated in the Institute of Turbomachinery of the Technical University of Łódź with processor SAB80C167LM is presented.

1. WPROWADZENIE

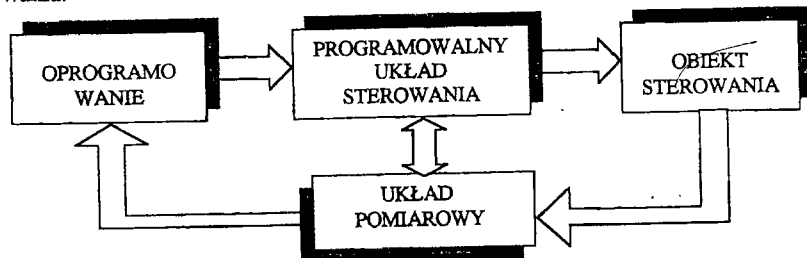
W ostatnich latach notuje się bardzo szerokie zainteresowanie technikami cyfrowego przetwarzania sygnałów, które pozwalają na realizację dowolnych algorytmów obliczeniowych, często niemożliwych do zrealizowania w ciągłych układach analogowych. Zastosowanie rozbudowanych układów programowalnych – procesorów, 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.

Jednym z istotnych aspektów projektowania współczesnych cyfrowych systemów sterowania jest odpowiedni dobór narzędzi, który skraca czas projektowania i eliminuje błędy pojawiające się na etapie uruchamiania prototypu. Szczególnie wydajną metodologią jest w tym przypadku technologia prototypowania (rys. 1).

Technologia prototypowania może rozwiązywać problemy związane z projektowaniem cyfrowych systemów sterowania według dwóch zasadniczych sposobów:

1. Modelowania obiektu i weryfikacji struktury układu sterowania dla przyjętego modelu.
2. Konstrukcji elastycznego układu regulacji bez konieczności dokonywania modyfikacji sprzętowej w przypadku, gdy projektant dysponuje fizycznie rzeczywistym obiektem sterowania.



Rys.1. System prototypowania

Podstawową cechą prototypowania jest możliwość szybkiej implementacji oraz modyfikacji algorytmów sterowania połączona z prostotą tworzenia warstw programowych w celu akwizycji danych pomiarowych i komunikacji z urządzeniami nadrzędnymi.

Konstrukcje nowoczesnych maszyn wirnikowych szczególnie te, którym stawia się specjalne wymagania eksploatacyjne coraz szerzej wykorzystują nowe rozwiązania systemów łożyskowania. Należą do nich łożyska magnetyczne, które umożliwiają aktywne sterowanie drganiami wirnika [1,2,3].

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. System zawieszenia wirnika maszyny w polu magnetycznym jest więc typowym przedstawicielem urządzenia z dziedziny mechatroniki, przy projektowaniu którego należy wykorzystać technologię prototypowania. Taka właśnie technologia została przyjęta przy projektowaniu i konstrukcji systemu cyfrowej regulacji dla aktywnego łożyska magnetycznego zbudowanego w IMP PŁ.

2. SYSTEM AKTYWNEGO MAGNETYCZNEGO ŁOŻYSKOWANIA

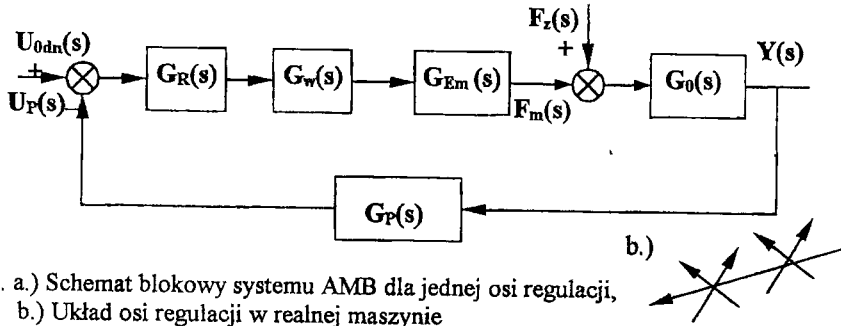
Schemat blokowy systemu AMB przedstawiono na rys. 2a. Aktywne łożysko magnetyczne (Active Magnetic Bearing-AMB) pracuje w systemie składającym się z elementów wykonawczych (elektromagnesów) $G_{Em}(s)$ utrzymujących wirnik maszyny w zadanym położeniu równowagi, regulatora $G_R(s)$ wypracowującego odpowiedni prąd dla elektromagnesów, wzmacniacza mocy $G_w(s)$, oraz czujników pomiarowych $G_p(s)$, kontrolujących położenie wirnika $G_0(s)$, które pracują w pętli sprzężenia zwrotnego. Zmienne siły generowane przez elektromagnesy łożyska wzdłuż osi kontroli powodują utrzymanie czopa w zadanej pozycji równowagi w panwi [1,2].

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. łożysko wzdłużne wymaga jednej osi kontroli. 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. 2b.).

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.

a.)



Rys. 2. a.) Schemat blokowy systemu AMB dla jednej osi regulacji, b.) Układ osi regulacji w realnej maszynie

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.

3. CYFROWY REGULATOR ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO.

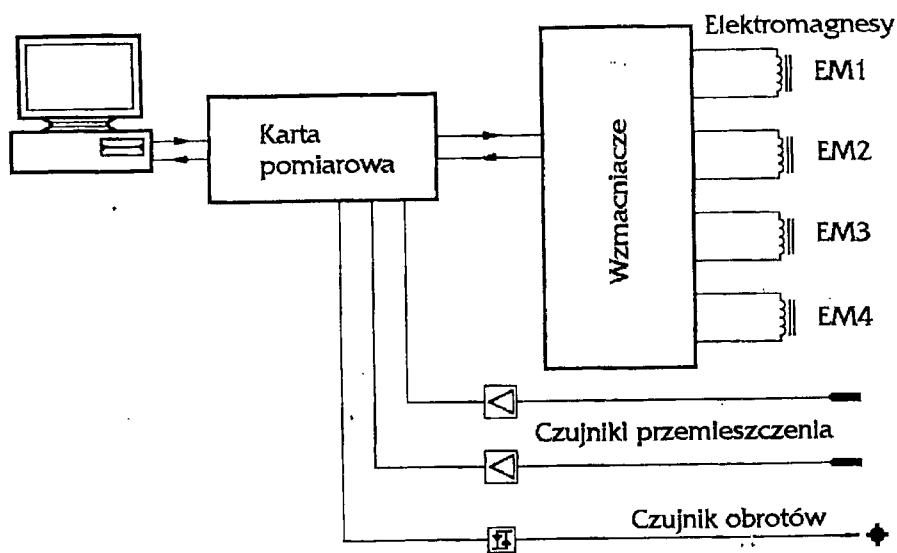
Głównymi elementami cyfrowego układu sterowania aktywnym łożyskiem magnetycznym w realizowanym projekcie regulatora jest karta pomiarowo-sterująca współpracująca z komputerem typu IBM-PC, moduł wzmacniaczy elektromagnesów oraz zestaw czujników przemieszczenia i obrotów (rys.3).

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 zastosowania w urządzeniach, którym stawiane są 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:

- Specjalizacja układów wejście/wyjście, która pozwala przypisać im wykonanie określonego zadania, bez konieczności zastosowania dodatkowego sterownika do jego realizacji. Pozwala to na szybką transmisyję danych uzyskiwanych w czasie realizacji algorytmu sterowania na jego pośrednich etapach, ponieważ są one łatwo dostępne.
- Rozbudowane układy liczników i komparatorów, umożliwiające sprzętowo realizację wielokanałowych rejestrów PWM. Eliminuje to procedury programowe niezbędne do tworzenia tego typu rejestrów a więc odciąża procesor.
- Liczniki realizują różne tryby pracy w zależności od wymagań. Dają możliwość generowania impulsów PWM w zakresie 4.8Hz - 78kHz ze zmiennym wypełnieniem.

Zadaną częstość określa jeden z rejestrów składowych PWM, natomiast drugi, niezależnie, pozwala na zadawanie zmian wypełnienia.

- 10-cio bitowy przetwornik A/D stanowiący integralną część mikroprocesora, zwiększa odporność na zakłócenia zewnętrzne i związane z nimi uszkodzenia. Zastosowane przetwarzanie aproksymacyjne o stałej liczbie kroków z możliwością zaprogramowania czasu próbkowania pozwala na optymalny dobór szybkości działania przetwornika ze względu na minimalizację wpływu zakłóceń na sygnał pomiarowy.



Rys. 3. Schemat cyfrowej regulacji łożysk magnetycznych

- Hierarchiczny system przerwań stwarza 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.
- Wbudowany układ kontroli bezpośredniego dostępu do pamięci DMA pozwalający na szybką transmisję bloków danych lub przejęcie kontroli nad magistralą systemu.
- Dużą liczbę instrukcji warunkowych procesora SAB80C167LM daje możliwość realizacji programu wymagającego podejmowania decyzji, która nie obciąża procesora.
- Procesory Siemens pozwalają na efektywne tworzenie programu ze względu na możliwość wykorzystywania standardowego osprzętu jak np.: pakiety kompilatorów języka wyższego rzędu, emulatory pamięci itp.

Działanie układu zależy od oprogramowania komputera nadrzędnego PC i modułu karty pomiarowo-sterującej. Oprogramowanie systemu jest realizowane w dwu etapach. Pierwszy obejmuje program obsługi karty pomiarowo-sterującej, natomiast drugi wymaga oprogramowania komputera nadrzędnego. Współpracę z komputerem nadrzędnym zapewniają cztery adresowalne porty służące do transmisji danych z lub do komputera. Po włączeniu mikroprocesor inicjalizuje swoje podzespoły i wystawia sygnał gotowości w połowie portu STATUSU. Po uzupełnieniu sygnałami z modułu sterownika otrzymujemy kompletne słowo stanu układu regulacji. Komputer nadrzędny odczytuje i dekoduje STATUS.

Jeśli stwierdzi stany awaryjne lub brak gotowości wystawia odpowiedni komunikat, w przeciwnym razie wysyła polecenie wykonania wybranej procedury. Mikrokontroler potwierdza otrzymanie polecenia i je wykonuje. Wyniki pomiarów wykonywanych podczas realizacji procedury odsyłane są do komputera nadrzędnego przez 16-to bitowy port danych.

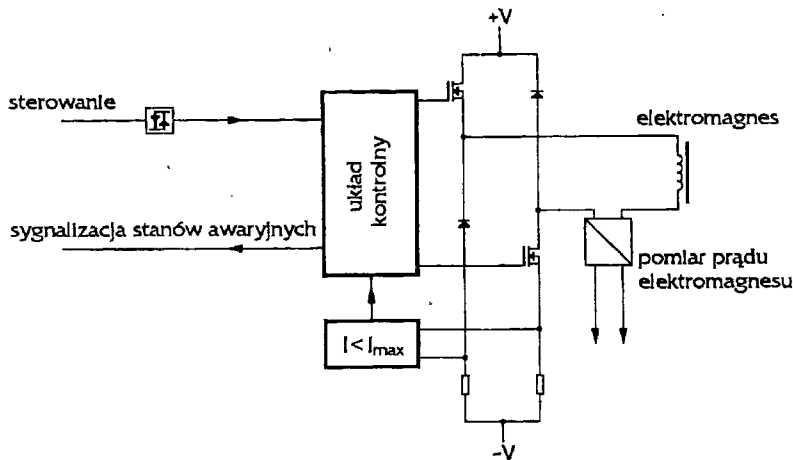
Procedura programowa karty umożliwia pomiar sygnałów napięciowych w 8 kanałach (pozycja wirnika), pomiar czasu lub częstotliwości w jednym kanale i wygenerowanie sygnałów sterujących PWM w 4 kanałach.

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. W przypadku braku sygnalizacji stanów awaryjnych sygnał z karty pomiarowo-sterującej podawany jest na wzmacniacz mocy, który steruje przepływem prądu przez uzwojenia elektromagnesu. Średnia wartość prądu zależy od częstotliwości i współczynnika wypełnienia impulsu generowanego przez kartę pomiarowo-sterującą.

4. MODUŁ STEROWNIKA

Moduł ten 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.



Rys. 4. Schemat wzmacniacza mocy systemu łożyskowego.

- 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 rozładujących.

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.

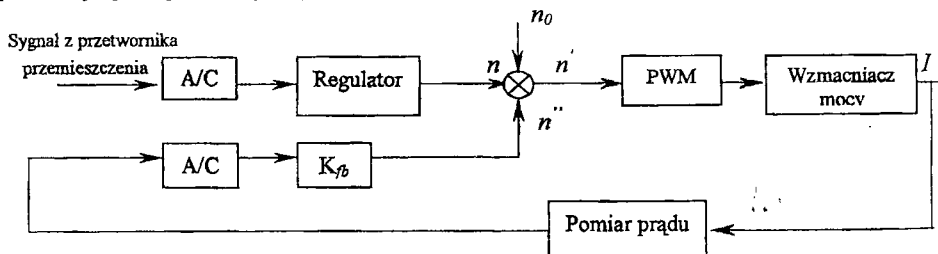
Z układu wzmacniacza wyprowadzony jest układ programowej kontroli prądu, który dla stanu $I < I_{max}$ podejmuje decyzję oysterowaniu wzmacniacza, natomiast w przypadku stwierdzenia stanu przekroczenia dopuszczalnej wartości prądu odcinaysterowanie.

5. CYFROWA REALIZACJA STEROWANIA

Wyspecjalizowane rejestry PWM generują w danym czasie próbkowania impulsy o wypełnieniu proporcjonalnym do wypracowanego sygnału z układu regulatora na podstawie pomiaru przemieszczenia czopa względem panwi łożyska, po jego porównaniu z sygnałem zadany oraz przetworzonym na impuls cyfrowy sygnałem prądowym płynącym w uzwojeniu elektromagnesu (rys. 5):

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

Impulsy PWM są generowane w tzw. jednostce CAPCOM (CAPture/COMpare przechwytyjąco-porównującej) procesora SIMENS SAB 80C167LM.



Rys.5. Struktura cyfrowego sterownika systemu łożyskowego

Oprogramowanie procesora pozwalające na realizację systemu aktywnego łożyskowania wirnika maszyny wymaga więc zdefiniowania cyfrowej reprezentacji sygnałów odpowiadających prądowi punktu pracy I_0 , prądowi sterowania I oraz przemieszczeniu wirnika. Dla wzmacniacza mocy definiuje się współczynnika przetwarzania KI , który pozwala określić wartość prądu wygenerowanego w uzwojeniu elektromagnesu:

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

Współczynnik przetwarzania KI jest funkcją parametrów wzmacniacza, którymi są: U_x - 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 .

W algorytmie programu założono: $n_0 = n'_0 + n''_0$ (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 wystawienie 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_{pb} (współczynnika sprzężenia zwrotnego – feedback factor), który jest zdeterminowany parametrami przetwornika A/C.

$$K_{pb} = K_{ni} K O I = \frac{n''_{\max}}{U_{REF}} \frac{U_{REF}}{I_{\max}} = \frac{n''_{\max}}{I_{\max}} \quad (7)$$

I_{\max} – graniczna wartość prądu sterującego

n''_{\max} – maksymalna liczba kroków czasowych wynikająca z rozdzielczości przetwornika A/C (dla 10-cio bitowego przetwornika $n''_{\max} = 2^{10} = 1024$).

U_{REF} – napięcie odniesienia przetwornika A/C = 5V.

Przedstawiona koncepcja definiowania cyfrowej reprezentacji parametrów poszczególnych elementów systemu sterowania łożyskiem magnetycznymi, które są niezbędne do jego oprogramowania stanowi jedynie wstępny etap pracy.

Zadania jakie ma realizować cyfrowy system sterowania jest 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.

W pracy nad systemem cyfrowego sterowania magnetycznym zawieszeniem wirników maszyn zastosowano takie rozwiązanie sprzętowo – programowe, które zapewnia możliwość tworzenia elastycznego oprogramowania. Technologia szybkiego prototypowania dla cyfrowego sterowania łożyskiem przyspiesza projektowanie i umożliwia eliminację ewentualnych błędów na kolejnych etapach jego konstruowania.

6. PODSUMOWANIE

Realizacja cyfrowego sterowania łożyskiem w technologii prototypowania wymagała opracowania odpowiednich algorytmów a następnie oprogramowania mikroprocesora oraz komputera nadrzędnego.

Doświadczenia zebrane w czasie prac nad tą problematyką doprowadziły do opracowania kilku pomocniczych procedur programowych, które pozwalają dokonywać korekty charakterystyk przyjętych, jako dane wejściowe do projektowania struktury i algorytmu cyfrowego regulatora łożyska [13].

Procedurę testowania sygnałów sterujących przedstawiono w pracy [14]. Służy ona do wyznaczania charakterystyk prądu w uzwojeniach poszczególnych elektromagnesów łożyska w funkcji zadanych parametrów pracy jak np.: częstotliwość impulsów wzmacniacza PWM, współczynnik wypełnienia, napięcie zasilania.

Wyznaczenie rzeczywistych charakterystyk elementów wykonawczych łożysk daje możliwość ich porównania z teoretycznymi założeniami przyjętymi do projektowania. Pozwala także precyzyjnie określić niektóre parametry elektronicznych układów regulacji dla konkretnej realizacji łożyska magnetycznego.

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.
- [3] Gosiewski Z.: *Łożyska magnetyczne dla maszyn wirnikowych. Sterowanie i badanie* cz. II Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa Warszawa 1998. (w druku)
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Foam -Zone Hsiao, An-Chen Lee; *An Investigation of the Characteristics of Electro-magnetic Bearings Using the Finite Element Method*, ASME Journal of Tribology Vol. 116 October 1994
- [7] 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.
- [8] Kozanecka D.: *Algorytmy sterowania aktywnych łożysk magnetycznych*, III Konferencja Naukowo Techniczna MECHATRONIKA'97, Warszawa 1997, Tom 2, str. 139-144.
- [9] 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.
- [10] Kozanecka D.: *Możliwości diagnostyczne systemów aktywnego magnetycznego zawieszenia wirników maszyn*, Konf. Nauk.-Tech. AUTOMATION'98, W-wa 1998, PIAP Mat. Konf. str.151-159.
- [11] 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.
- [12] Kozanecka D.: *Eksperymentalna identyfikacja parametrów dynamicznych systemu wirnik łożysko - magnetyczne*, MKM'98, Mat. Konf. Wyd. Polit. Szczecińskiej, str. 313-318.
- [13] Kozanecka D.: *Kompensacja sygnału runout w systemach aktywnego łożyskowania magnetycznego wirników maszyn*, Krajowy Kongres Metrologii, Gdańsk'98, Mat. Konf. Tom 5 str. 49-56.
- [14] 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.