

Dorota KOZANECKA

INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH
POLITECHNIKA ŁÓDZKA

Układy wykonawcze systemu aktywnego łożyska magnetycznego¹

Dr hab. inż. Dorota Kozanecka

Pracuje na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej. Od kilku lat zajmuje się problematyką aktywnego sterowania dynamiką linii wałów maszyn zawieszonych w łożyskach magnetycznych. Wyniki tych badań zawarła w monografii wydanej w 2000 r. pt. „Sterowane cyfrowo łożysko magnetyczne”, która jest jej pracą habilitacyjną.



Streszczenie

System aktywnego łożyskowania magnetycznego jest jakościowo różną technologią w porównaniu z klasycznymi rozwiązaniami, ponieważ położeniem czopa względem panwi steruje układ automatycznej regulacji. W swojej strukturze system zawiera układy wykonawcze, które stanowią uzwojenia poszczególnych par elektromagnesów panwi współpracujące ze sterowanymi cyfrowo impulsowymi wzmacniaczami mocy. W pracy przedstawiono koncepcję metody testowania układów wykonawczych łożyska, oraz wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych.

Abstract

An active magnetic bearing system is a qualitatively different technology in comparison with classical solutions. It is a combination of a mechanical system with an electronic automatic control system, which controls this mechanical system. An active magnetic bearing system comprises actuators, which are realised in the form of windings of individual pairs of bush electromagnets that interact with digitally controlled power amplifiers. The aim of this paper is to present diagnostic capabilities of the actuators for the designed digital structure of the bearing controllers. Some experimental investigations and numerical simulations are discussed.

Wprowadzenie

System zawieszenia wirnika maszyny w aktywnych łożyskach magnetycznych stanowi interesującą alternatywę w konstrukcji maszyn wirnikowych szczególnie tych, których zadaniem jest realizacja procesów technologicznych związanych ze spełnieniem szczególnych wymagań eksploatacyjnych. Dotyczy to np. pracy maszyny w zakresie bardzo niskich lub bardzo wysokich temperatur, w środowiskach agresywnych chemicznie lub w próżni. Stosowanie klasycznych rozwiązań węzłów łożyskowych takich maszyn wiąże

się z komplikacją konstrukcji i koniecznością stosowania złożonych podzespołów jak np. dodatkowe uszczelnienia lub bariery ograniczające przepływ ciepła pomiędzy elementami maszyny. Aktywne łożyska magnetyczne mogą funkcjonować w tych warunkach praktycznie bez ograniczeń a ich atrakcyjność wynika również z faktu, że rozwiązanie to eliminuje całkowicie kontakt mechaniczny wirującego czopa i panwi oraz znacząco zmniejsza straty mocy w porównaniu z łożyskami klasycznymi.

Tak zdefiniowany system podparcia wału pozwala na adaptacyjne sterowanie drganiami wirnika w różnych fazach pracy maszyny. Jest to unikatowa cecha sterowanego cyfrowo aktywnego łożyskowania magnetycznego, a jego zastosowanie stwarza nowe możliwości w dziedzinie budowy eksploatacji i diagnostyki maszyn.

Kraje o wysoko rozwiniętych technologiach od dłuższego czasu inwestują w rozwój tej dziedziny budowy maszyn. Francja, Stany Zjednoczone, Japonia, Szwajcaria dysponują wyspecjalizowanym zapleczem naukowym i badawczym, które pozwala na przemysłowe aplikacje tej technologii. Aktywne łożyskowanie magnetyczne stosowane początkowo wyłącznie w technice kosmicznej i wojskowej znajduje w chwili obecnej aplikacje w wielu różnych gałęziach przemysłu np:

- w wirnikowych maszynach przepływowych – sprężarkach, pompach i turbinach [1, 3],
- w urządzeniach stosowanych w technice próżniowej i w technice niskich temperatur – np. turboekspandery, pompy do transportu skroplonych gazów [3, 8],
- w prototypowych konstrukcjach silników turbogazowych. Koncerny produkujące silniki lotnicze (General Electric, Pratt & Whitney) rozwijają badania nad możliwością zastąpienia klasycznych węzłów łożyskowych aktywnymi łożyskami magnetycznymi. Dotyczy to zwłaszcza części gorącej silników turbiny, gdzie trudne warunki eksploatacyjne powodują szybkie zużycie łożysk [9],
- w wysokoobrotowych wrzecionach stosowanych w konstrukcji precyzyjnych obrabiarek [12],
- w przemyśle farmaceutycznym i w medycynie, gdy wymagana jest absolutna czystość i sterylność urządzeń oraz mediów roboczych [2],
- w nawigacyjnej technice lotniczej [4, 5],
- w prototypowych konstrukcjach silników elektrycznych, w których funkcje łożyska i silnika łączy się w jednym elemencie konstrukcyjnym. [11],
- w mikromechanice i robotyce ponieważ zapewniają wymaganą dokładność pozycjonowania (rzędu nm) [6].

Przytoczone przykłady oraz rosnące zainteresowanie ze strony rodzimego przemysłu wskazują, że istnieje potrzeba rozwijania i doskonalenia krajowej bazy naukowej i badawczej w tej dziedzinie.

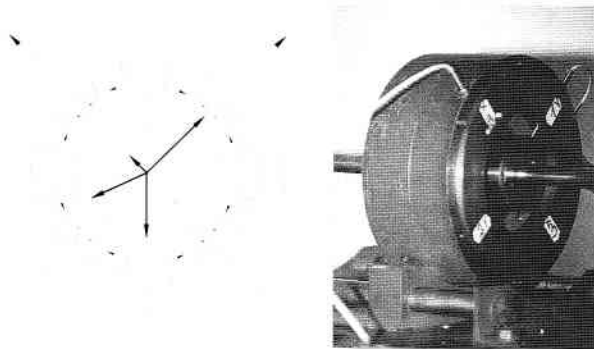
¹ Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego KBN Nr 7 T07C 034 12 i obszerne jej fragmenty były prezentowane na Krajowym Kongresie Metrologii w Warszawie w czerwcu 2001 r.

W Polsce od kilku lat badania nad technologią aktywnego łożyskowania magnetycznego prowadzone są w dwu ośrodkach akademickich: w Wojskowej Akademii Technicznej pod kierunkiem prof. Zdzisława Gosiewskiego, w zastosowaniu do lotniczej techniki nawigacyjnej oraz w Politechnice Łódzkiej w Instytucie Maszyn Przepływowych pod kierunkiem autorki. Ostatnio prace nad problematyką struktury regulatorów i algorytmów sterowania łożyskami podjęte zostały także w Instytucie Automatyki Akademii Górniczo-Hutniczej. W Instytucie Maszyn Przepływowych powstało specjalizowane laboratorium, w którym prowadzone są badania nad adaptacyjnym sterowaniem właściwościami dynamicznymi systemu wirującego maszyny w czasie jego funkcjonowania. Na stanowiskach badawczych rzeczywistych układów wirujących z aktywnymi łożyskami magnetycznymi sterowanym cyfrowo dokonywana jest eksperymentalna weryfikacja zaproponowanych rozwiązań konstrukcyjnych.

W artykule przedstawiono koncepcję oraz wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych uzyskane dla układów wykonawczych aktywnego łożyska magnetycznego.

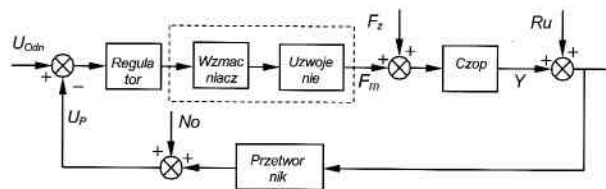
Poprzeczne łożysko magnetyczne

Mechaniczną strukturę poprzecznego łożyska magnetycznego tworzy czop oraz panew z czterema parami elektromagnesów równomiernie rozłożonymi na obwodzie. Położenie czopa, zawieszono bezkontaktowo w polu elektromagnesów panwi, jest kontrolowane za pomocą przetworników przemieszczenia, które montuje się w dwu wzajemnie prostopadłych osiach regulacji x , y (rys. 1).



Rys. 1. Schemat układu położenia czopa względem panwi i rozkładu sił działających na czop oraz widok rzeczywistej struktury łożyska

Elektromagnesy EM1, EM2 panwi współpracują z osią y generując wypadkową siłę F_{my} , natomiast elektromagnesy EM4, EM3 generują wypadkową siłę F_{mx} w osi x . Siły te muszą równoważyć efekty działania sił ciężkości i obciążenia statycznego $F_g + F_{stat}$ oraz efekt dynamicznych obciążeń zewnętrznych wywołany np.: wirującym wektorem niewyważenia resztkowego F_z . Zmiana położenia czopa względem zadanej pozycji generuje w systemie elektronicznego sterowania zmiany prądów zasilających uzwojenia panwi łożyska. Efektem regulacji jest zmiana sił oddziaływania elektromagnesów w poszczególnych osiach sprowadzająca czop do zadanego położenia [10]. Odpowiednie wartości prądów są generowane przez sterowane cyfrowo impulsowe wzmacniacze mocy. Sygnały sterujące szerokością impulsów PWM w każdym cyklu są wypracowane przez regulator, zgodnie z zadanym algorytmem, w funkcji pomiaru aktualnego położenia czopa względem panwi (rys. 2). Oprócz sił zewnętrznych F_z na system łożyskowy działają zakłócenia przypadkowe wprowadzane przez przetworniki pomiaru przemieszczenia N_o oraz zakłócenia, typu runout R_u , związane z niejednorodnością ścieżki pomiarowej. Określenie dopuszczalnego poziomu tych zakłóceń ma bardzo istotne znaczenie z punktu widzenia statecznej pracy systemu łożyskowego [7].



Rys. 2. Schemat blokowy systemu łożyskowego jako układu automatycznej regulacji (jedna oś sterowania)

Aktywne łożysko magnetyczne jest bardzo ciekawym obiektem z punktu widzenia metrologicznego, bowiem stabilną jego pracę w układzie automatycznej regulacji w istotny sposób determinują informacje zawarte w pomiarach. Cyfrowe sterowanie systemem aktywnego łożyska magnetycznego oprócz implementacji złożonych algorytmów regulacji daje również szerokie możliwości metrologiczne i diagnostyczne elementów jego struktury na różnych etapach budowy. Zostały one wykorzystane przy realizacji prezentowanej pracy.

Układy wykonawcze

System aktywnego łożyskowania magnetycznego zawiera w swojej strukturze układy wykonawcze, które stanowią uzwojenia poszczególnych par elektromagnesów panwi współpracujące z cyfrowo sterowanymi wzmacniaczami mocy [7]. Rozrzut rzeczywistych wartości parametrów elektrycznych uzwojenia dla poszczególnych par elektromagnesów, do którego dodaje się rozrzut technologiczny parametrów elementów struktury wzmacniaczy, będzie wprowadzać asymetrię właściwości dla osi sterowania.

Z punktu widzenia uproszczenia projektowania struktury i strojenia parametrów regulatora dla osiągnięcia statecznej pracy systemu, poszczególne układy wykonawcze łożyska powinna cechować symetria właściwości. Spełnienie tego warunku pozwoli na uniezależnienie charakterystyk mechanicznych systemu łożyskowego od właściwości układów wykonawczych dla każdej osi.

W tym celu została opracowana oryginalna koncepcja metody umożliwiającej diagnostykę układów wykonawczych. Pozwala ona na bazie analizy przyczyn, oddziaływać na efekty reakcji statycznych i dynamicznych mechanicznej części systemu na drodze programowej korekcji charakterystyk torów wykonawczych budowanego łożyska.

Realizacja metody wymagała opracowania:

- Eksperymentalnej procedury testowania właściwości każdego toru wykonawczego łożyska (metodyka oraz oprzyrządowanie).
- Numerycznej procedury testowania, odwzorowującej pracę układu wykonawczego łożyska na podstawie równań analitycznych. Wygenerowane numerycznie charakterystyki statyczne układów wykonawczych wypełnienie – *prąd sterujący* służy jako charakterystyki odniesienia, względem których dokonywana jest ocena wartości niezbędnej korekcji dla każdego toru układu wykonawczego.
- Procedury programowej korekcji, którą wprowadza się w przypadku stwierdzenia asymetrii właściwości charakterystyk torów wykonawczych łożyska.

Ostateczna weryfikacja metody i efektów korekcji wymaga powtórnego przeprowadzenia eksperymentalnej procedury testowania [7].

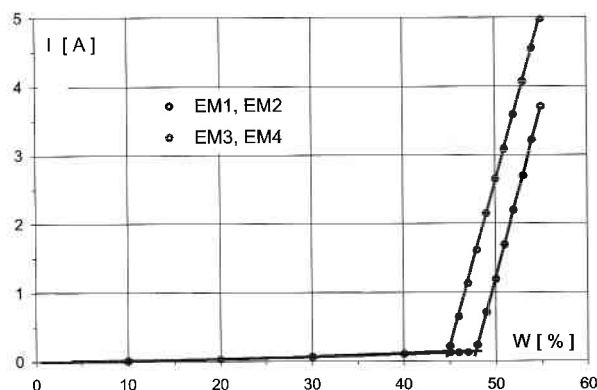
Eksperymentalna procedura testowania układów wykonawczych

Impulsowa praca wzmacniaczy mocy powoduje przełączanie elementów układu w jednym cyklu sterowania ze stanu przewodzenia

w stan odciecia. W obu tych stanach parametry układu przełączającego wraz z parametrami uzwojenia danego elementu panwi determinują wartości prądu płynącego w uzwojeniu w każdym cyklu impulsu sterującego [7].

Właściwości układu wykonawczego łożyska charakteryzuje zależność wypełnienie impulsów sterujących *PWM* – *prąd sterujący*. Opracowana procedura eksperymentalnego testowania układów wykonawczych łożyska pozwala na wyznaczanie charakterystyk prądu w uzwojeniach poszczególnych par elektromagnesów w funkcji zadanych parametrów pracy o następujących nastawianych wartościach:

- częstotliwość $f_{PWM}=500\text{Hz}\div 10\text{kHz}$,
- wypełnienie impulsów $W=0\div 100\%$, z rozdzielczością 0,1% lub 1%,
- napięcie zasilania elektromagnesów łożyska $U_2=30\text{V}; 40\text{V}; 50\text{V}; 60\text{V}; 80\text{V}$.



Rys. 3. Eksperymentalne charakterystyki wypełnienie – prąd sterujący dla obu osi sterowania łożyska

Dla zadawanych wartości wypełnienia *W* rejestruje się uśrednione w cyklach *PWM* wartości prądu wygenerowanego w układzie wykonawczym. Przebiegi tych charakterystyk dla rzeczywistych układów wykonawczych wykazały istotne różnice właściwości łożyska dla dwóch osi sterowania *x* i *y* (rys.3). W konsekwencji będzie się to przekładać na asymetrię właściwości mechanicznych układu dla tych osi po zamknięciu pętli sprzężenia zwrotnego i włączeniu układu sterowania systemem łożyskowym.

Numeryczna procedura testowania układów wykonawczych

Alternatywą dla kompensacji asymetrii właściwości układów wykonawczych łożyska na drodze projektowania odpowiedniej struktury i algorytmu regulatora jest programowa jej korekcja. W tym celu opracowany został program narzędziowy umożliwiający numeryczne odwzorowanie teoretycznych równań opisujących zjawiska zachodzące w obwodzie elektrycznym układu wykonawczego w funkcji czasu (tzn. w kolejnych okresach impulsów sterujących). Obliczenia wykonywane są dla zadanych parametrów uzwojenia elektromagnesów *L* i *R*, napięcia zasilania U_z i częstotliwości impulsów sterowania f_{PWM} .

Analizie poddano pracę układu wykonawczego. Każdy cykl impulsu sterującego *PWM* o danej częstotliwości f_{PWM} i wypełnieniu *W* wymusza dwa stany pracy wzmacniacza:

- ▷ stan ładowania, którego czas trwania $t_{ład}=W/f_{PWM}$. Elementy obwodu wzmacniacza pracują wówczas w stanie przewodzenia,
- ▷ stan rozładowania, którego czas trwania $t_{roz}=(1-W)/f_{PWM}$. Elementy obwodu wzmacniacza pracują w stanie odciecia.

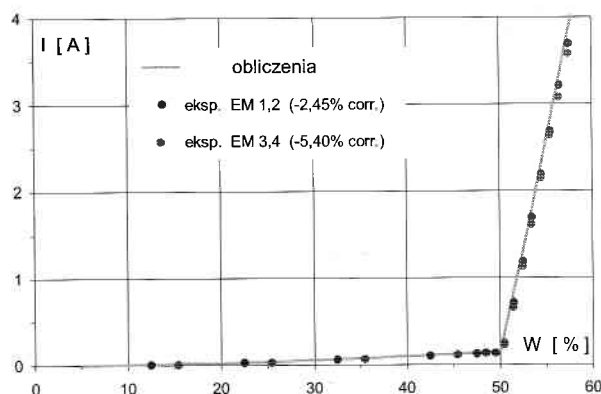
Wartość prądu sterującego dla danego wypełnienia, która generuje siłę magnetyczną łożyska, wynika z jej uśrednionej wartości w okresie *PWM* i została opisana zależnością:

$$I_{sr,i} = W_i \frac{I_{0i} + I_{max,i}}{2} + (1 - W_i) X_i \frac{I_{max,i} + I_{0i+1}}{2}$$

I_{0i} – prąd początkowy dla *i*-tego cyklu ładowania wzmacniacza.

I_{0i+1} – prąd początkowy dla *i+1*-ego cyklu ładowania wzmacniacza.

Współczynnik X_i określa dla danego cyklu stosunek czasu rozładowania do czasu, którym elementy elektroniczne wzmacniacza mocy spowodują wyzerowanie wartości prądu sterującego. W cyklach, w których prąd rozładowuje się do wartości I_{min} i I_{0i+1} współczynnik $X_i = 1$ [7].



Rys. 4. Teoretyczne i eksperymentalne charakterystyki wypełnienie – prąd układów wykonawczych łożyska po korekcji programowej $W=0\div 60\%$

Na rys. 4 (linia ciągła), przedstawiono wyznaczoną na podstawie obliczeń numerycznych charakterystykę wypełnienie – prąd sterujący dla zidentyfikowanych eksperymentalnie parametrów układu wykonawczego, aby na każdym etapie obliczeń możliwa była ich weryfikacja dla rzeczywistego obiektu.

Nominalne wartości parametrów przyjmowane do obliczeń były następujące:

- napięcie zasilania wzmacniacza $U_z = 80\text{V}$,
- indukcyjność uzwojenia $L = 80\text{mH}$,
- oporność obwodu $R = 3.1\Omega$,
- częstotliwość $f_{PWM}=1667\text{Hz} \Rightarrow TPWM= 600\mu\text{s}$.

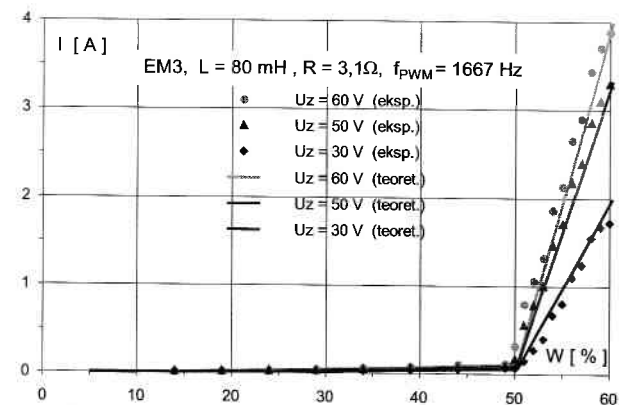
Korekcja i weryfikacja

Eksperymentalnie wyznaczone charakterystyki rzeczywistego łożyska (rys. 3) wykazały rozrzut właściwości dla poszczególnych jego osi. Zbieżność charakterystyk statycznych wypełnienie – prąd sterujący uzyskano po wprowadzeniu korekcji addytywnej ΔWA :

- dla torów układów wykonawczych w osi *y* EM1, EM2 – $\Delta WA = -2.45\%$,
- dla torów układów wykonawczych w osi *x* EM3, EM4 – $\Delta WA = -5.40\%$

Była ona związana z programową korekcją wypełnienia. Charakterystyki rzeczywiste torów wykonawczych wymagały także korekcji multiplikatywnej (WM). Korekcja multiplikatywna polega na skorygowaniu wartości oporności w obwodzie wzmacniacza mocy, przyjętej do obliczeń numerycznych, aby uzyskać jednokowe nachylenie liniowej części badanych eksperymentalnie i obli-

czonych numerycznie charakterystyk wypełnienie - prąd sterujący. W celu stworzenia płaszczyzny bezpośredniego porównania z charakterystykami rzeczywistego obiektu, jako nominalną, do obliczeń, przyjęto oporność obwodu wzmacniacza skorygowaną programowo o wartość $\Delta W M. = \Delta R = 1.1 \Omega$ w stosunku do wartości średniej pomierzonych oporności uzwojeń poszczególnych par elektromagnesów. Uwzględnia ona całkowitą oporność rzeczywistego obwodu układu wykonawczego łożyska i wynosi $(R_E + R_T) = R = 3.1 \Omega$.



Rys. 5. Teoretyczne i eksperymentalne charakterystyki wypełnienie – prąd układów wykonawczych łożyska po korekcji programowej dla różnych wartości napięcia zasilania wzmacniacza mocy

Efekty dokonanych korekcji w odpowiednich torach układów wykonawczych zostały pokazane na rys. 4. Zaznaczone punktami wartości prądu sterującego wyznaczone eksperymentalnie dla danego wypełnienia, dla wszystkich torów leżą na charakterystyce wygenerowanej numerycznie i odwzorowanej linią ciągłą.

Weryfikacji dokonano także badając przebiegi charakterystyk eksperymentalnych i numerycznych jednego toru wykonawczego łożyska współpracującego z osią x - EM3. Po odpowiedniej korekcji programowej wyniki badań dla różnych wartości napięcia zasilającego wzmacniacza mocy wykazały również zadawalającą zbieżność (rys. 5).

Podsumowanie

Rzeczywiste właściwości układów wykonawczych łożyska magnetycznego mają decydujący wpływ na pracę całego systemu łożyskowego.

Proponowana metoda pozwala na identyfikację a następnie dokonywanie odpowiednich programowych korekcji charakterystyk układów wykonawczych dla każdej pary elektromagnesów. Oczekiwany efektem tej korekcji jest uzyskanie izotropowych właściwości rzeczywistego systemu łożyskowego dla poszczególnych osi sterowania.

Zbudowany system poprzecznego łożyska magnetycznego ze sterowaniem cyfrowym, dla którego wyznaczono a następnie indywidualnie dostrojono właściwości statyczne i dynamiczne jego elementów wykonawczych, potwierdził możliwość wykorzystania zaproponowanej metody do projektowania łożyska.

Do programu sterowania wpisuje się wówczas cechy rzeczywistej, zaprojektowanej struktury, co pozwala na uzyskanie zadanych charakterystyk dynamicznych układu wirującego z łożyskiem magnetycznym.

Obszerne omówienie wyników badań, uzyskanych na modelowych stanowiskach badawczych, zainteresowany Czytelnik znajdzie w monografii [7].

Literatura

- [1] Agahi R., Schroder U., 1996, Industrial High Speed Turbogenerator System for Energy Recovery, Proceedings of the 5th Int. Symp. on Magnetic Bearings, Japan, pp. 381-387.
- [2] Allaire P. E., Kim H. C., Maslen E. H., Olsen D. B., Bearnson G. D., 1995, Prototype Ventricular Assist Device Supported on Magnetic Bearings, Proceedings of MAG'95-Magnetic Bearings, Drives and Dry Gas Seals, Virg., pp. 63-76.
- [3] Canders W., Ueffing N., i in., 1994, MTG400: A Magnetically Levitated 400KW Turbo Generator System for Natural Gas Expansion, Proc. of the 4th Int. Symp. on Magnetic Bearings, ETH Zurich, pp. 435-440.
- [4] Gosiewski Z., Falkowski K., 1996, Two Axial Gyroscope with Magnetically Supported Rotor, Proc. of the 5th Int. Symp. on Magnetic Bearings, Japan, pp. 65-70.
- [5] Gosiewski Z.: 1999, Łożyska magnetyczne dla maszyn wirnikowych. Podstawy Teoretyczne, Sterowanie i badania cz. II Biblioteka Nauk. Inst. Lotnictwa. Warszawa.
- [6] Komori M., Yamane T., 1996, Development of a Millimeter-Sized Active Magnetic Bearing System, Proc. of the 5th Int. Symp. on Mag. Bearings, Japan, pp. 405-410.
- [7] Kozanecka D., 2000, Sterowane cyfrowo łożysko magnetyczne, Praca hab., Wyd. Politechniki Łódzkiej, Zesz. Nauk. Nr 842, Rozprawy Nauk. Z. 271, Łódź
- [8] Mellor P., Mason P., Howe D., 1998, Nonlinear Control of Magnetic Bearings for High-Speed Flywheels, Proc. of the 6th Int. Symp. on Mag. Bearings, Massachusetts Inst. of Tech., USA, pp. 599-608.
- [9] Meeks C., McMullen P. i in., 1994, Lightweight Magnetic Bearing System for Aircraft Gas Turbine Engines, Proc. of the 4th Int. Symp. on Magnetic Bearings, Zurich, pp.429-434.
- [10] Schweitzer G., Traxler A., Bleuler H., 1993, Magnetlager, Springer-Verlag. Berlin.
- [11] Schob R., Barletta N., 1996, Principle and Application of a Bearingless Slice Motor, Proceedings of the 5th Int. Symp. on Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan, pp. 313-325.
- [12] Taniguchi M., Ueyama H., Nakamori M., Morita N., 1996, Cutting Performance of Digital Controlled Milling AMB Spindle, Proceedings of the 5th Int. Symp. on Magnetic Bearings, Japan, pp. 375-379.