

## EKSPERYMENTALNA WERYFIKACJA BADAŃ SYMULACYJNYCH STEROWANEGO CYFROWO SYSTEMU AKTYWNEGO ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO

*Streszczenie: Przydatność badań symulacyjnych w praktycznych zastosowaniach wymaga ich weryfikacji dla rzeczywistego obiektu. W pracy przedstawiono podstawowe założenia związane z opracowanym modelem symulacyjnym systemu aktywnego łożyska magnetycznego. Weryfikacji badań symulacyjnych i eksperymentalnych dokonano na zbudowanym stanowisku badawczym dla cyfrowo sterowanego poprzecznego aktywnego łożyska magnetycznego. Zaprezentowane wyniki potwierdziły zbieżność funkcjonowania modelu i rzeczywistej struktury łożyska.*

### EXPERIMENTAL VERIFICATION OF SIMULATION INVESTIGATIONS OF A DIGITALLY CONTROLLED ACTIVE MAGNETIC BEARING SYSTEM

*Abstract: In order to apply simulation investigations in practice, their verification for an actual object is needed. The basic assumptions connected with the developed simulation model of an active magnetic bearing system are presented. The simulation and experimental investigations have been verified on the test stand for a digitally controlled journal active magnetic bearing. The results discussed confirm a convergence between the operation of the model and real bearing.*

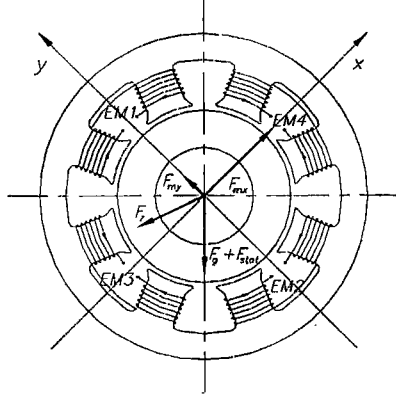
#### 1. WPROWADZENIE

Zaprojektowanie i skonstruowanie układu sterowania obiektami o bardzo wysokich wymaganiach technologicznych, do jakich należą maszyny z wirnikami zawieszonymi w polu magnetycznym jest uwarunkowane znajomością ich rzeczywistego modelu [1,2]. Dla tej klasy obiektów, matematyczny opis zjawisk jest złożony i nie pozwala na odwzorowanie jego funkcjonowania bez wprowadzenia wielu założeń upraszczających. Jeśli rozważy się koncepcję budowy modelu, dla którego zostaną opracowane procedury odwzorowujące rzeczywiste właściwości poszczególnych elementów systemu, wówczas uzyskany model będzie zbieżny z funkcjonowaniem rzeczywistej struktury łożyska [10].

Budowane obecnie systemy aktywnego magnetycznego podparcia wirników maszyn wyposażane są w cyfrowe układy sterowania, które oprócz możliwości implementacji złożonych algorytmów regulacji, dają również szerokie możliwości diagnostyczne wynikające z aplikacji technik pomiarowych na różnych etapach konstrukcji systemu. Układy sterowania reakcjami łożysk decydują o właściwościach dynamicznych systemu wirującego. Regulatory cyfrowe pozwalają np.: na zmianę właściwości dynamicznych łożysk w czasie ruchu dla różnych stanów pracy maszyny.

Aplikacja łożysk magnetycznych do podparcia wirników realnych maszyn wymaga opracowania odpowiednich metod projektowania uwzględniających specyfikę ich działania i równocześnie dostosowanych do wymagań obiektu.

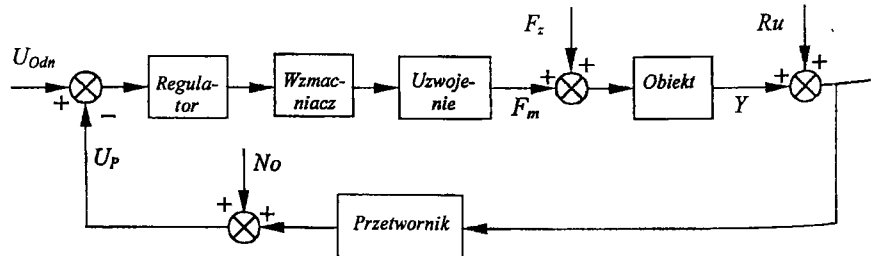
W IMP PŁ zbudowane zostało poprzeczne aktywne łożysko magnetyczne z cyfrowym układem sterowania [5,6,9]. Mechaniczną strukturę zbudowanego łożyska magnetycznego tworzy czop oraz panew z czterema parami elektromagnesów równomiernie rozłożonymi na obwodzie. Położenie czopa względem panwi jest kontrolowane za pomocą wiroprądowych przetworników przemieszczenia firmy *Bently - Nevada*, o średnicy  $d = 8 \text{ mm}$  i czułości statycznej  $7.870 \text{ V/mm}$ . Zostały one zamontowane w dwu osiach regulacji  $x, y$  wzajemnie prostopadłych i przesuniętych względem osi czopa o kąt  $45^\circ$ . Osie sterowania współpracują z odpowiednimi parami elektromagnesów (rys. 1).



- $EM1, EM2$  – elektromagnesy panwi współpracujące z osią  $y$
- $EM4, EM3$  – elektromagnesy panwi współpracujące z osią  $x$
- $F_z$  – wirujący wektor niewyważenia resztkowego
- $F_{mx}$  – siła elektromagnesu działająca w osi  $x$
- $F_{my}$  – siła elektromagnesu działająca w osi  $y$
- $F_g + F_{stat}$  – siła ciężkości i obciążenia statycznego

Rys. 1. Układ położenia czopa względem panwi łożyska i rozkład sił działających na czop

System aktywnego łożyskowania magnetycznego jest jakościowo różną technologią w porównaniu z klasycznymi rozwiązaniami, ponieważ jest połączeniem układu mechanicznego z elektronicznym układem automatycznej regulacji sterującym tym układem. Zmiana położenia czopa względem zadanej pozycji uruchamia w systemie elektronicznego sterowania regulację prądu przepływającego przez uzwojenie panwi łożyska. Efektem regulacji jest zmiana sił oddziaływania elektromagnesów  $F_m$  sprowadzająca czop do zadanego położenia. Odpowiednia wartość prądu jest generowana przez wzmacniacz mocy na podstawie sygnału wypracowanego przez regulator zgodnie z zadanym algorytmem sterowania w funkcji aktualnego położenia czopa  $Y$  mierzonego za pomocą przetworników przemieszczenia (rys. 2).



Rys. 2. Schemat ideowy systemu łożyskowego

Na system łożyskowy działają siły pochodzące np.: od niewyważenia  $F_z$  i obciążenia statycznego  $F_{stat}$  a także zakłócenia przypadkowe wprowadzane przez przetworniki pomiaru prze-

mieszczenia  $N_0$ , oraz zakłócenia związane z niejednorodnością ścieżki pomiarowej – typu runout  $R_u$ . Poziom tych zakłóceń ma bardzo istotne znaczenie z punktu widzenia statecznej pracy systemu [4,12].

System aktywnego łożyskowania magnetycznego zawiera w swojej strukturze układy wykonawcze, które stanowią uzwojenia poszczególnych par elektromagnesów panwi współpracujące z cyfrowo sterowanymi wzmacniaczami mocy [5,6,9]. 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 pracach przy projektowaniu i budowie systemu aktywnego łożyskowania magnetycznego sterowanego cyfrowo zastosowana została metoda, która na etapie budowy jego układów wykonawczych przewiduje badanie właściwości statycznych i dynamicznych rzeczywistych układów wykonawczych łożyska.

W tym celu opracowane zostały odpowiednie procedury pomiarowe pozwalające na wyznaczenie charakterystyk *wypełnienie - prąd sterujący* dla każdego toru wykonawczego łożyska. Na podstawie przebiegu tych charakterystyk dokonywana jest ocena rozrzutu ich właściwości w stosunku do przebiegu teoretycznego.

Wymagało to opracowania programu narzędziowego, który umożliwił, na podstawie analizy poszczególnych sekwencji pracy realnego, sterowanego cyfrowo impulsowego wzmacniacza mocy i zasilanych przez niego uzwojeń, odwzorować numerycznie równania opisujące w funkcji czasu (tzn. w kolejnych okresach impulsów sterujących) zjawiska zachodzące w obwodzie elektrycznym układu wykonawczego dla nominalnych parametrów uzwojenia elektromagnesów, napięcia zasilania i częstotliwości sterowania. Wygenerowane modelowe charakterystyki, stanowią podstawę do oceny wpływu zmian wartości poszczególnych parametrów rzeczywistego układu na ich przebieg. Pozwalają one na dokonywanie niezbędnych programowych korekcyj, których efektem jest uzyskanie symetrii właściwości poszczególnych osi sterowania projektowanego łożyska. Jest to bardzo istotne z punktu widzenia projektowania systemu sterowania łożyskiem.

Układy wykonawcze łożyska determinują działanie systemu a ich charakterystyki mają decydujące znaczenie przy wyborze sposobu regulacji. Jeżeli programowo doprowadzi się do symetrii funkcyjowania układów wykonawczych wówczas możliwe jest zastosowanie regulacji jednoukładowej, która polega na zastosowaniu jednego regulatora do obsługi obu osi sterowania łożyskiem. Takie rozwiązanie zostało zastosowane dla zbudowanego systemu łożyska poprzecznego i również wykorzystane do budowy jego modelu symulacyjnego.

## 2. KONCEPCJA BUDOWY MODELU SYMULACYJNEGO

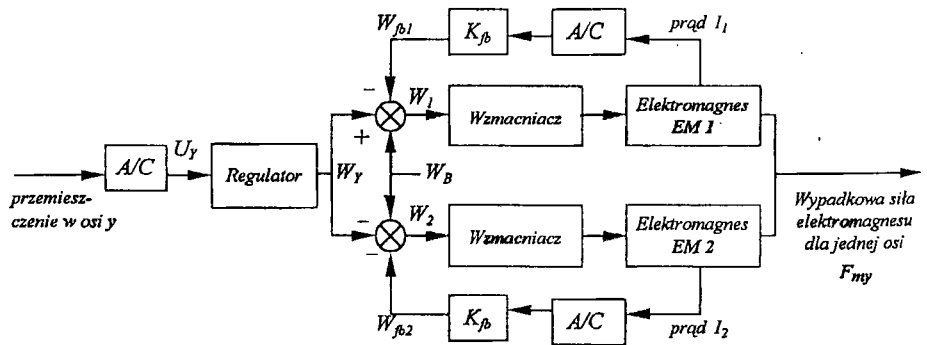
Podstawowym założeniem przy opracowywaniu modelu numerycznego systemu łożyskowego było zaproponowanie narzędzia, które pozwala na dostrajanie parametrów sterującego nim regulatora i wykonanie w szerokim zakresie badań dynamiki projektowanego systemu [10].

Warunkiem koniecznym było więc odtworzenie w modelu charakterystyk opisujących funkcyjowanie rzeczywistej struktury łożyska oraz jego elementów pomiarowych i sterujących.

Ideowy schemat systemu, który został wykorzystany do realizacji modelu numerycznego przedstawiony jest na rys. 3. Powstał on na bazie oprogramowania HP VEE firmy Hewlett-

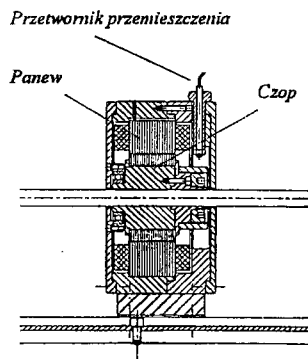
Packard. W modelu analizowany jest ruch masy  $m$  skupionej w środku geometrycznym czopa. Zastosowany w układzie regulator typu *PID* realizuje sterowanie dla obu osi  $x$  i  $y$ . Dla poszczególnych osi zastosowano sterowanie różnicowe z zadaną programowo wartością wypełnienia tzw. bazy  $W_B$ . Osie kontroli i sterowania, podobnie jak w realnym systemie łożyskowym (rys. 1), są wzajemnie prostopadłe i przesunięte względem osi pionowej o kąt  $45^\circ$ . Koncepcja budowy modelu zakłada możliwość numerycznego testowania właściwości dynamicznych systemu ze względu na zdefiniowane trzy poziomy danych związanych ze strukturą systemu łożyskowego takich jak:

- parametry fizyczne łożyska: masa podparta w łożysku, luz promieniowy łożyska magnetycznego, położenie początkowe czopa względem panwi,
- parametry struktury regulatora i układu sterowania: wartości graniczne wypełnienia  $W_{min}$ ,  $W_{max}$ , wartość wypełnienia tzw. bazy  $W_B$ , współczynnik sprzężenia zwrotnego  $K_{fb}$ ,
- parametry układów wykonawczych: częstotliwość impulsów sterujących  $f_{PWM}$ , napięcie zasilania wzmacniacza mocy  $U_Z$ , indukcyjność układu wykonawczego  $L$ , oporność układu wykonawczego  $R$ , wartość stałej łożyska  $K$ .



Rys. 3. Schemat układu regulacji dla jednej osi sterowania ( $y$ )

Model daje również możliwość analizy dopuszczalnych poziomów zakłóceń –  $F_z$ ,  $R_u$ ,  $N_o$ , jakie dla danego typu regulatora zapewniają odpowiedni zapas stateczności systemu łożyskowego. Stanowi on w pewnym sensie syntezę regulatora odpornego.



Rys. 4. Rzeczywista struktura łożyska

Do analizy wyników badań modelowych wybrano te same wielkości, które rejestrowane są w rzeczywistym systemie łożyskowym magnetycznego. Stwarza to możliwość bezpośredniej ich weryfikacji z eksperymentem (wypełnienie, przemieszczenie, położenie równowagi statycznej, trajektoria czopa, portret fazowy, charakterystyka Bodego, itp.). Weryfikacji dokonano na zbudowanym stanowisku do badań testowych, którego fragment przedstawia rys. 4. Badania stanu dynamicznego łożyska obejmują trzy zasadnicze fazy jego funkcjonowania:

- ❖ zawieszanie czopa w panwi,
- ❖ rozruch,
- ❖ praca przy stałej częstości obrotów.

Zaprezentowano wybrane wyniki badań dla pierwszej fazy pracy systemu.

### 3. WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA BADAŃ SYMULACYJNYCH

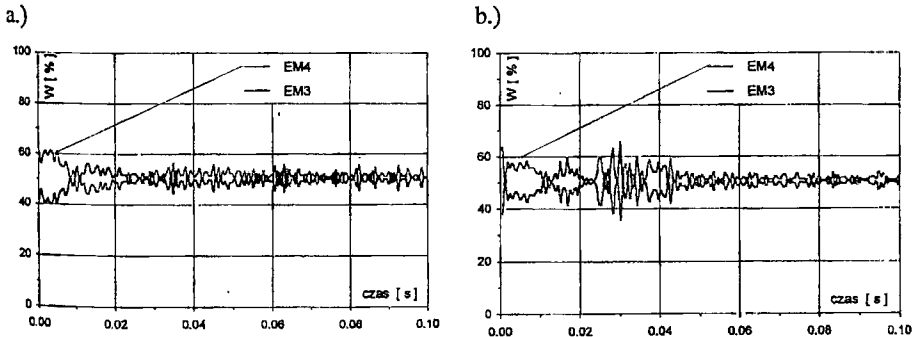
Nominalne wartości parametrów, które przyjęto do obliczeń modelowych były następujące:

- napięcie zasilania wzmacniacza mocy  $U_Z = 80V$
- częstotliwość impulsów sterujących  $f_{PWM} = 1667Hz \Rightarrow T_{PWM} = 600\mu s$
- indukcyjność uzwojenia elektromagnesu  $L = 80mH$
- oporność obwodu wzmacniacza mocy wraz a uzwojeniami  $R = 3.1\Omega$
- stała łożyska  $K = 2.4 \cdot 10^{-5} Nm^2/A^2$

Stała łożyska  $K$  oraz oporność i indukcyjność obwodu wzmacniacza mocy  $R, L$  zostały wyznaczone eksperymentalnie za pomocą odpowiednich procedur badawczych dla rzeczywistej struktury systemu łożyskowego, którego układy wykonawcze pracują przy podanych wartościach napięcia zasilania  $U_Z$ , i częstotliwości  $f_{PWM}$ .

Dla zaprezentowania możliwości badawczych opracowanego modelu i w celu stwierdzenia zbieżności jego funkcjonowania z rzeczywistym systemem, na wykresach 5 – 9 przedstawiono odpowiednio zestawione charakterystyki obliczone numerycznie dla zdefiniowanych nominalnych parametrów oraz zarejestrowane dla rzeczywistego systemu łożyskowego.

Dla jednej osi sterowania w danym czasie próbkowania wyliczane są impulsy o wypełnieniu proporcjonalnym do sygnału wypracowanego przez regulator na podstawie pomiaru przemieszczenia czopa względem panwi łożyska, po jego porównaniu z zadaniem wypełnieniem determinującym punkt pracy łożyska  $W_B$  oraz wypełnieniem odpowiadającym wartości prądu płynącego w uzwojeniu górnego i dolnego elektromagnesu  $W_{fb}$ . Wypełnienie  $W_{fb}$  jest realizowane poprzez zastosowanie dodatkowej pętli sprzężenia zwrotnego z możliwością programowego zadawania wartości współczynnika sprzężenia zwrotnego  $K_{fb}$ .



Rys. 5. Zmiany wypełnienia w czasie zawieszania czopa w panwi dla osi sterowania x (elektromagnesy: górny - EM4 i dolny - EM3)

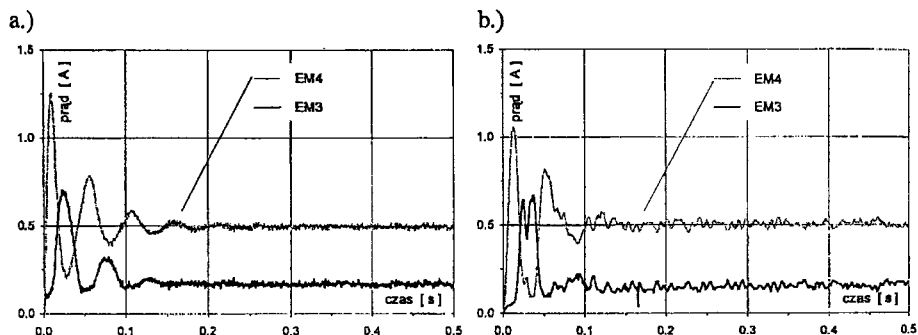
a.) obliczone na podstawie modelu, b.) zarejestrowane dla rzeczywistej struktury łożyska

Na rys. 5 a i b pokazano zmiany wypełnienia w funkcji czasu w fazie zawieszania czopa w panwi dla uzwojeń górnego EM4 i dolnego elektromagnesu EM3 współpracujących z osią x. Rejestracji danych dla rzeczywistej struktury systemu łożyskowego dokonywano za pomocą opracowanej procedury PRDP. Przedstawione wyniki obliczeń i rejestracji wykonano dla tych samych parametrów regulatora. Uzyskano dobrą ich zbieżność, która potwierdziła wiarygodność zbudowanego modelu.

Na podstawie wyliczonych wypełnień układy wykonawcze łożyska generują prądy sterujące uzwojeniami odpowiednich elektromagnesów panwi. Do algorytmu funkcjonowania modelu zostały wprowadzone zweryfikowane eksperymentalnie procedury odtwarzające działanie rzeczywistego układu wykonawczego dla zadanych parametrów. Dla rzeczywistej struktury

wprowadzono wyznaczone dla każdej pary uzwojeń wartości korekcji niezbędnych do uzyskania symetrii właściwości łożyska dla obu osi sterowania  $x$  i  $y$ .

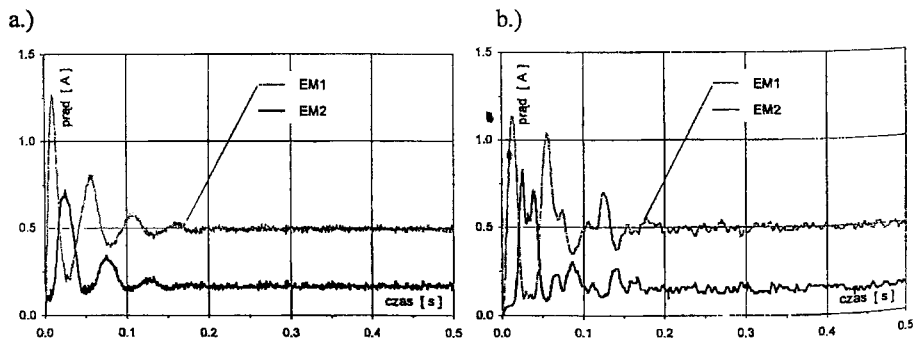
Na rys. 6, 7 a i b pokazane zostały zmiany prądu w funkcji czasu w fazie zawieszania czopa w panwi dla uzwojeń górnych  $EM4$ ,  $EM1$  i dolnych elektromagnesów  $EM3$ ,  $EM2$  współpracujących z odpowiednimi osiami sterowania  $x$  i  $y$ . Zmienne w czasie prądy sterujące dolnym i górnym uzwojeniem panwi w każdej osi sterowania są funkcją zmiany pozycji czopa względem panwi aż do osiągnięcia pozycji równowagi.



Rys. 6. Przebiegi prądów w uzwojeniach panwi łożyska w czasie zawieszania czopa w panwi dla osi sterowania  $x$  (elektromagnes: górny -  $EM4$  i dolny -  $EM3$ )

a.) obliczone na podstawie modelu, b.) zarejestrowane dla rzeczywistej struktury łożyska

Dla łożyska poprzecznego prądy w uzwojeniach górnych elektromagnesów  $EM1$ ,  $EM4$  po zawieszeniu czopa w panwi i osiągnięciu pozycji równowagi są większe niż w dolnych  $EM2$ ,  $EM3$ . Wprowadzona programowa korekcja wypełnienia dla poszczególnych osi łożyska (łożysko izotropowe) spowodowała, że prądy w obu uzwojeniach górnych elektromagnesów panwi  $EM1$ ,  $EM4$  są równe. Podobna sytuacja dotyczy prądów w uzwojeniach dolnych elektromagnesów  $EM2$ ,  $EM3$ . Potwierdza to również poprawność przeprowadzonej korekcji.

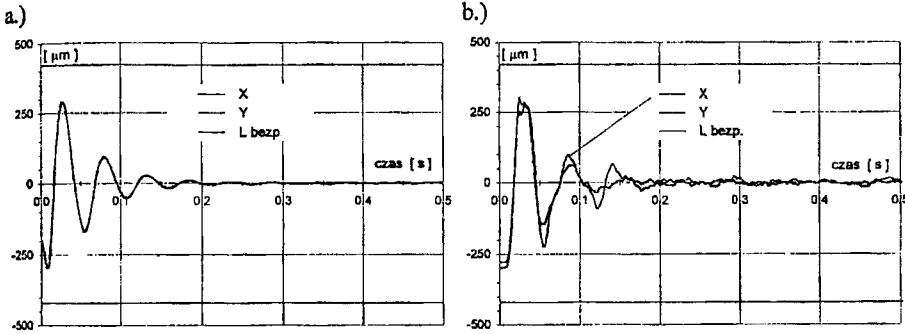


Rys. 7. Przebiegi prądów w uzwojeniach panwi łożyska w czasie zawieszania czopa w panwi dla osi sterowania  $y$  (elektromagnes: górny -  $EM1$  i dolny -  $EM2$ )

a.) obliczone na podstawie modelu, b.) zarejestrowane dla rzeczywistej struktury łożyska

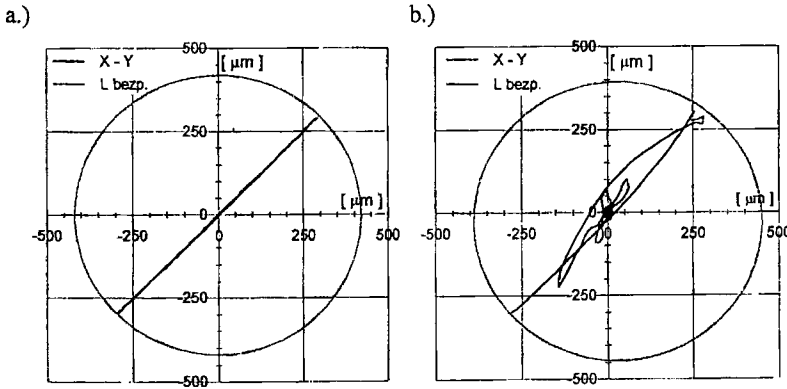
Na rys. 8 i 9 przedstawiono efekt działania systemu łożyskowego w pierwszej fazie jego pracy w postaci wyliczonych i zarejestrowanych zmian położenia czopa względem panwi w czasie dla obu osiach sterowania oraz złożonej z tych przebiegów orbity. Przy idealnej symetrii

właściwości układów wykonawczych dla każdej osi sterowania, jaka z założenia jest realizowana w modelu, otrzymuje się symetryczne przebiegi przemieszczenia czopa dla obu osi kontroli położenia  $x(t) = y(t)$  - rys. 8 a.



Rys. 8. Przeszaczenia w osiach sterowania x i y łożyska w czasie zawieszania czopa w panwi  
a.) obliczone na podstawie modelu, b.) zarejestrowane dla rzeczywistej struktury łożyska

W porównaniu z modelem, dla rzeczywistego układu w momencie startu występują niewielkie różnice w przebiegu przemieszczenia czopa dla poszczególnych osi sterowania. Mogą one być spowodowane np.: nieidealną geometrią czopa lub niesymetrycznym ustawieniem czujników położenia względem czopa (rys. 8 b).



Rys. 9. Orbita złożona z przemieszczeń w osiach sterowania x i y łożyska w czasie zawieszania czopa w panwi z zaznaczonym kołem luzów  
a.) obliczona na podstawie modelu, b.) zarejestrowana dla rzeczywistej struktury łożyska

Charakter zmian położenia czopa oraz czas jaki upływa od chwili zadziałania układu regulacji do chwili osiągnięcia stabilnego zawieszania masy podpartej w łożysku magnetycznym jest jednakowy dla modelu i badanej rzeczywistej struktury.

Uzyskana zgodność wyników badań modelowych i rzeczywistej struktury łożyska potwierdziła, że opracowany model symulacyjny stanowi wiarygodne narzędzie, które można wykorzystać do projektowania systemu łożyskowego i prognozowania tendencji zmian jego zachowania w obecności zadanego poziomu zakłóceń i zadawanych wymuszeń.

#### 4. PODSUMOWANIE

Opracowany model stwarza nowe możliwości badawcze łożysk magnetycznych i stanowi czytelne pod względem interpretacji narzędzie przydatne do obliczeń inżynierskich. Pozwala on na badania symulacyjne dynamiki masy zawieszony w panwi łożyska dla zmiennych w szerokim zakresie wartości parametrów regulatora i w obecności różnego rodzaju zakłóceń i wymuszeń.

Zbieżne z rzeczywistym, numeryczne odwzorowanie pracy rzeczywistego systemu łożyskowego pozwoliło na opracowania koncepcji metody identyfikacji zastępczych współczynników sprężystości i tłumienia łożyska.

Wiarygodny model teoretyczny umożliwiający analizę dynamiki łożyska w warunkach hipotetycznych, ekstremalnych obciążeń skraca czas projektowania i minimalizuje błędy, które mogą pojawić się na etapie uruchamiania prototypu systemu.

#### LITERATURA

- [1] Delprete C., Genta G., Repaci A.: *Numerical Simulations of the Dynamic Behaviour of Rotors on Active Magnetic Bearing*, ISROMAC-7, Proceedings of the 7 Int. Symp. on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Bently Nevada Corp., USA, February 1998, Vol. A pp 48-57.
- [2] Gosiewski Z.: *Łożyska magnetyczne dla maszyn wirnikowych. Sterowanie i badanie cz. II* Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa Warszawa 1999.
- [3] Kozanecka D.: *Eksperymentalna identyfikacja parametrów dynamicznych systemu wirnik łożysko – magnetyczne*, MKM'98, Szczecin – Międzyzdroje 1998, M. Konf. str. 313-318.
- [4] Kozanecka D.: *Kompensacja sygnału runout w systemach aktywnego łożyskowania magnetycznego wirników maszyn*, Krajowy Kongres Metrologii, Gdańsk 1998, Tom. 5, str. 49-56.
- [5] Kozanecka D., Kaczmarek A., Lech T.: *Testowanie sygnałów sterujących w aktywnych łożyskach magnetycznych, I Krajowe Warsztaty Technologii Szybkiego Prototypowania z Zastosowaniem Procesorów Sygnałowych*, Kat. Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH i Zespół Mechatroniki PAN, Kraków 1998, Mat. Konf. str. 87-94.
- [6] Kozanecka D.: *Cyfrowy regulator łożyska magnetycznego*, Konf. Naukowo Techniczna AUTOMATION'99, Warszawa 1999, Mat. Konf. PIAP str. 405 - 412.
- [7] Kozanecka D.: *Analiza właściwości dynamicznych modelowej sprężarki podpartej w aktywnych łożyskach magnetycznych*, Referat wygłoszony na XXVI Ogólnopolskim Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka., marzec 1999, Artykuł przyjęty do druku w ZN Polit. Śląskiej.
- [8] Kozanecka D.: *Analiza dynamiki zespołu wirującego z łożyskiem magnetycznym sterowanym cyfrowo*, Problemy Eksploatacji, kwartalnik nr 2 '99 (33), str. 65-73.
- [9] Kozanecka D.: *System magnetycznego zawieszenia wirnika maszyny sterowany cyfrowo*, XIII Krajowa Konferencja Automatyki, Opole 1999, Mat. Konf. T. 2, str. 311-314.
- [10] Kozanecka D., Lech T.: *Symulacyjny model dynamiki łożyska magnetycznego*, Metrologia i Systemy Pomiarowe, Kwartalnik PAN, 1999, artykuł przyjęty do druku po recenzji.
- [11] Kozanecka D.: *Dynamic Properties of the Rotor Magnetic Suspension System*, Symkom'99 Łódź, Politechnika Łódzka, CMP No 115, 1999, pp. 217-224.
- [12] Kozanecka D.: *Identyfikacja sygnału niejednorodności ścieżki pomiarowej w systemach aktywnego łożyskowania magnetycznego wirników maszyn*, Metrologia i Systemy Pomiarowe, Kwartalnik PAN 1999, artykuł przyjęty do druku po recenzji.