

dr inż. Adam Piłat
AGH Katedra Automatyki

ANALIZA SZTYWNOŚCI I TŁUMIENIA AKTYWNEGO ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO

Niniejsze opracowanie przedstawia aktywne łożysko magnetyczne o trzech siłownikach oraz badania eksperymentalne regulatora od stanu mające na celu diagnozę wartości współczynnika sprężystości i tłumienia. Prowadzona dyskusja na temat aktywnego łożyska magnetycznego ilustruje zagadnienia związane z programowaniem tego szczególnego układu wykonawczego automatyki.

STIFFNESS AND DAMPING ANALYSIS OF ACTIVE MAGNETIC BEARING

This elaboration presents the active magnetic bearing composed of three electromagnetic actuators. The experimental investigation of the state-feedback controller focused on the mechanical properties like stiffness and damping coefficients is given. The discussion on active magnetic bearing as modern execution unit for automatics illustrates topics related to the programmable features of such devices.

1. WPROWADZENIE

Sterowane łożysko magnetyczne (SŁM) czy też aktywne łożysko magnetyczne (AŁM) stanowi przedmiot badań wielu ośrodków naukowych w Polsce i na świecie [10, 11]. Prowadzone badania zmierzają do doskonalenia konstrukcji, praw sterowania, minimalizacji kosztów wytworzenia i eksploatacji, nowych zastosowań w maszynach wirnikowych. Promieniowe łożysko magnetyczne znajduje zastosowanie w budowie maszyn ze względu na dwa typowe zadania jakie może spełniać [2, 3, 5, 11]:

- podparcie wirnika oraz aktywne łożyskowanie i tłumienie jego drgań,
- sterowanie drganiami wirnika łożyskowanego klasycznie celem eliminacji drgań, przejścia przez prędkość krytyczną.

Nowe możliwości realizacji i zastosowania technologii łożysk magnetycznych pojawiły się wraz z rozwojem technik bezkontaktowego pomiaru odległości, technik pomiarowych pola magnetycznego i prądu, przetwarzania sygnałów i sterowania cyfrowego. Aktualnie w SŁM wykorzystuje się sterowanie cyfrowe w różnych konfiguracjach (dedykowane komputery, mikrokontrolery, układy DSP czy FPGA oraz mieszane). Prowadzone prace nad algorytmami sterowania mają na celu uodpornienie algorytmu sterowania jak również zamknięcie pętli sprzężenia zwrotnego w najkrótszym czasie, co przyczynia się do zwiększenia parametrów dynamicznych SŁM. Zastosowanie łożysk magnetycznych wiąże się z wieloma korzyściami, wśród których można wymienić eliminację tarcia i medium smarującego, zwiększenie prędkości obrotowej, programową zmianę parametrów statycznych i dynamicznych łożyska, monitorowanie węzła łożyskowego. Na dzień dzisiejszy koszty wykonania kompletnego systemu SŁM są znaczne i w głównej mierze wynikają z zastosowanych technologii kontrolno-pomiarowych.

2. STEROWANE PROMIENIOWE ŁOŻYSKO MAGNETYCZNE

Projektowanie architektury systemu oraz prawa sterowania wymaga określenia zadań jakie stawiane są przed SŁM. Podstawowymi cechami układu sterowania w systemie łożyskowirnik są:

- wielowymiarowość – obiekt typu MIMO (ang. *Multiple Input Multiple Output*),
- strukturalna niestabilność związana z żądaniem wytworzenia stosownej siły elektromagnetycznej przez siłowniki celem zapewnienia lewitacji wirnika,
- programowalna dynamika – sprężystość i tłumienie węzła łożyskowego.

Równanie opisujące dynamikę lewitującego wirnika w SŁM można przedstawić w postaci [5] (rys. 1a):

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F \quad (1)$$

gdzie:

$q = [x \ y]^T$ jest wektorem stanu, $F = [F_x \ F_y]^T$ wektorem sił zewnętrznych działających na wirnik, a

$$M = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} \\ M_{yx} & M_{yy} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix}$$

są odpowiednio macierzami mas, sprężystości i tłumienia. Zastosowanie regulatora stabilizującego pozwala na programowe ustawienie wartości sprężystości K i tłumienia C . Ujęcie globalne problemu – dla całej przestrzeni łożyskowej – nie jest zadaniem trywialnym ze względu na fakt, iż siła elektromagnetyczna zależy w sposób nieliniowy od odległości między wirnikiem a elektromagnesem oraz prądem cewki elektromagnesu. Standardowo siła elektromagnetyczna jest opisywana jedną z poniższych zależności:

$$F_{em}(B) = A \cdot B^2 \mu_0^{-1}, \quad F_{em}(a, i) = -\frac{K}{4} \frac{i^2}{a^2}, \quad F_{em}(a, i) = \frac{1}{2} \frac{dL(a)}{da} i^2$$

gdzie: a – odległość pomiędzy powierzchnią wirnika, A – powierzchnia elektromagnesu, i – prąd cewki, K – stała elektromagnesu, B – indukcja, L – indukcyjność cewki, μ_0 – przenikalność magnetyczna.

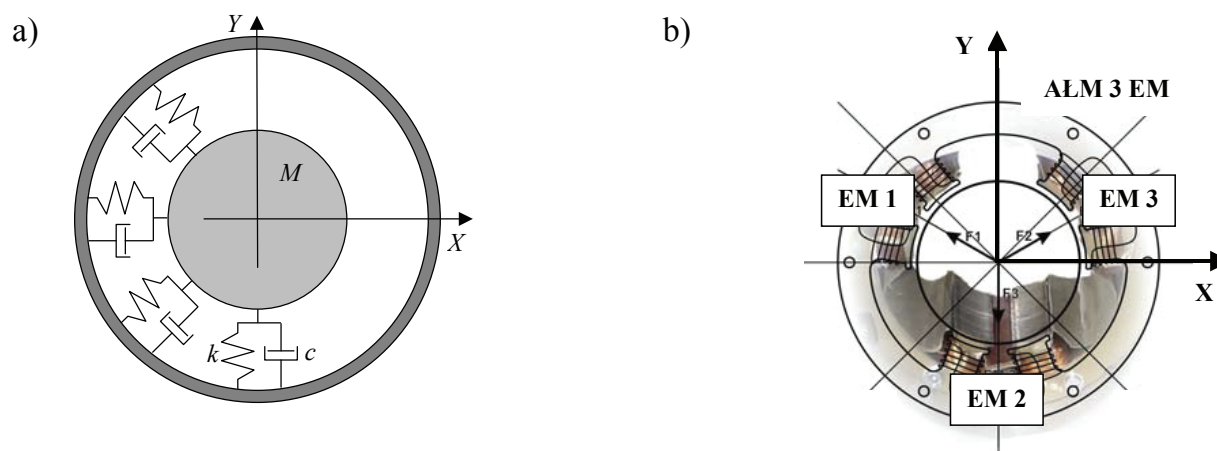
Syntezę regulatora można przeprowadzić dla modelu globalnego lub dokonując dekompozycji dla każdego z modeli lokalnych. Procedurę doboru nastaw można przeprowadzić dla układu zlinearyzowanego [2, 3, 5, 6, 10] lub nieliniowego wykorzystując linearyzujące sprzężenie zwrotne [6]. Projektowane prawo sterowania modyfikuje współczynniki K i C sterowanego łożyska. Z prowadzonych badań wynika, że osiągnięcie warunków pracy odpowiadających idealnemu łożysku charakteryzującemu się liniowymi współczynnikami sprężystości i tłumienia w całym obszarze lewitacji jest możliwe lecz ściśle związane z konstrukcją prawa sterowania i jego architekturą wykonawczą. W przypadku stosowania regulatorów lokalnych liniowych koniecznym jest modyfikowanie parametrów regulatora w zależności od punktu pracy, natomiast stosując regulator nieliniowy otrzymuje się zamknięty układ liniowy, dla którego projektowany jest regulator stabilizujący [6].

Każdy z elektromagnesów może być sterowany niezależnie lub też w połączeniu z siłownikiem naprzeciwległym w tzw. trybie różnicowym. Równanie 1 stanowi przypadek

idealny, do którego należy zmierzać w przypadku projektowania układu regulacji dla AŁM. Odporność układu na zakłócenia zewnętrzne można realizować poprzez stosowanie regulatorów odpornych (nieliniowe, rozmyte, H_{inf} i μ -synteza) bądź poprzez nadmiarowe ustawienie wartości współczynników sprężystości i tłumienia dla rozważanego przypadku. Należy zaznaczyć, iż w przypadku AŁM przy zastosowaniu liniowych form układu regulacji nie jest możliwym otrzymanie globalnych własności sztywności i tłumienia. Zawsze będą one zmienne ze względu na nieliniowości sił elektromagnetycznych. Obok zadania projektowania układu regulacji ważny etap stanowi weryfikacja zaprojektowanego regulatora. Można rozważyć podejście weryfikujące bazujące na modelu systemu wykorzystujące techniki obserwacji stanu i parametrów. Stosując liniowe bądź nieliniowe obserwatory możliwym jest estymowanie stanu i/lub parametrów układu przy założeniu pewnej struktury modelu matematycznego. Należy jednak zaznaczyć, że opracowanie modelu idealnego odpowiadającego układowi rzeczywistemu w 100 % jest niemożliwe a czynione założenia upraszczające powodują błędy estymacji. W niniejszej pracy analizie poddane zostaną wyłącznie sygnały pomiarowe położenia wirnika w przestrzeni łożyskowej.

Z technicznego punktu widzenia oczywistym jest, że wraz ze wzrostem wartości współczynnika sztywności wzrastają wymagania co do szybkości reakcji układu regulacji. Ta zaś jest limitowana rozwiązaniami cyfrowymi na które składają się poszczególne człony układu regulacji: filtracja, przetwarzanie A/C, czas wykonania obliczeń, przetwarzanie C/A lub aktualizacja sygnału PWM. Taki jest koszt programowej nastawy parametrów aktywnego węzła łożyskowego. Rys. 1b przedstawia wykonane na AGH SŁM o trzech siłownikach. Jest to konstrukcja badawcza służąca do poszerzenia wiedzy i testowania na rekonfigurowalnym stanowisku badawczym [7].

Maszyny wirnikowe [1, 4, 12] wymagają programowego prowadzenia dynamiki wirnika. Aktywne łożyska magnetyczne wraz z programowalnymi własnościami statycznymi i dynamicznymi są jednym z najlepszych rozwiązań technologicznych służących do realizacji tych zadań. Jednakże zapewnienie stosownych własności w węzle łożyskowym wymaga nie tylko zrealizowania zadania projektowania układu sterowania, lecz również jego weryfikacji na działającym obiekcie rzeczywistym. O ile nie wszystkie efekty są modelowane, co skutkuje w projektowanym regulatorze, to odpowiednie badania eksperymentalne pozwalają na sprawdzenie nastawionych parametrów łożyskowania.



Rys. 1. AŁM a) model dynamiczny, b) prototypowa konstrukcja aktywnego łożyska magnetycznego o 3 siłownikach

3. BADANIE EKSPERYMENTALNE

Najczęściej w badaniach eksperymentalnych stosuje się zewnętrzne źródła sił wymuszających oddziałujących na wirnik bądź obudowę urządzenia. Możliwym jest stosowanie młotków udarowych, zewnętrznych siłowników elektromagnetycznych lub innych urządzeń stanowiących źródło dodatkowej siły zewnętrznej. Szczególnie interesującym z punktu widzenia samoregulacji i adaptacji parametrów łożyska magnetycznego jest generowanie sił przez nie same. Dzięki superpozycji oddziaływań diagnostyka zachodzi wyłącznie w obrębie węzła łożyskowego. Dlatego też zaprojektowano szereg badań eksperymentalnych pozwalających na pozyskanie trajektorii ruchu wirnika w obrębie przestrzeni łożyskowej. Poniżej zostaną przedstawione wybrane trajektorie ilustrujące omawiane zagadnienia. Dla AŁM zaprojektowano regulator od stanu według metody przedstawionej w pracy [8]. Ustalono po dwie wartości współczynnika sprężystości i tłumienia otrzymując cztery zestawy parametrów (tabela 1) do przeprowadzenia badań eksperymentalnych.

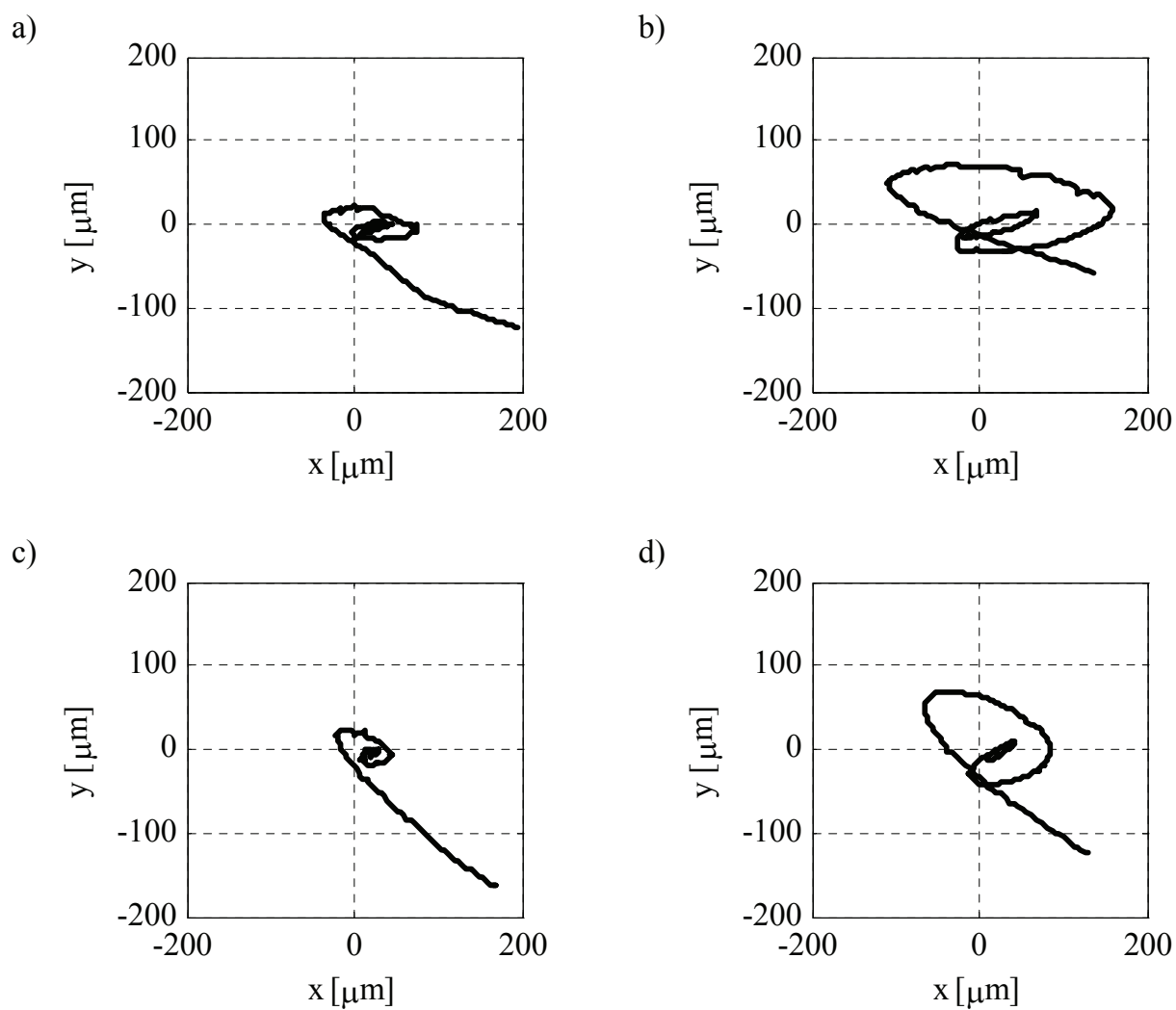
Tabela 1. Typy zestawów do badań eksperymentalnych

	K	C
Zestaw A	K_1	C_1
Zestaw B	K_2	C_1
Zestaw C	K_1	C_2
Zestaw D	K_2	C_2

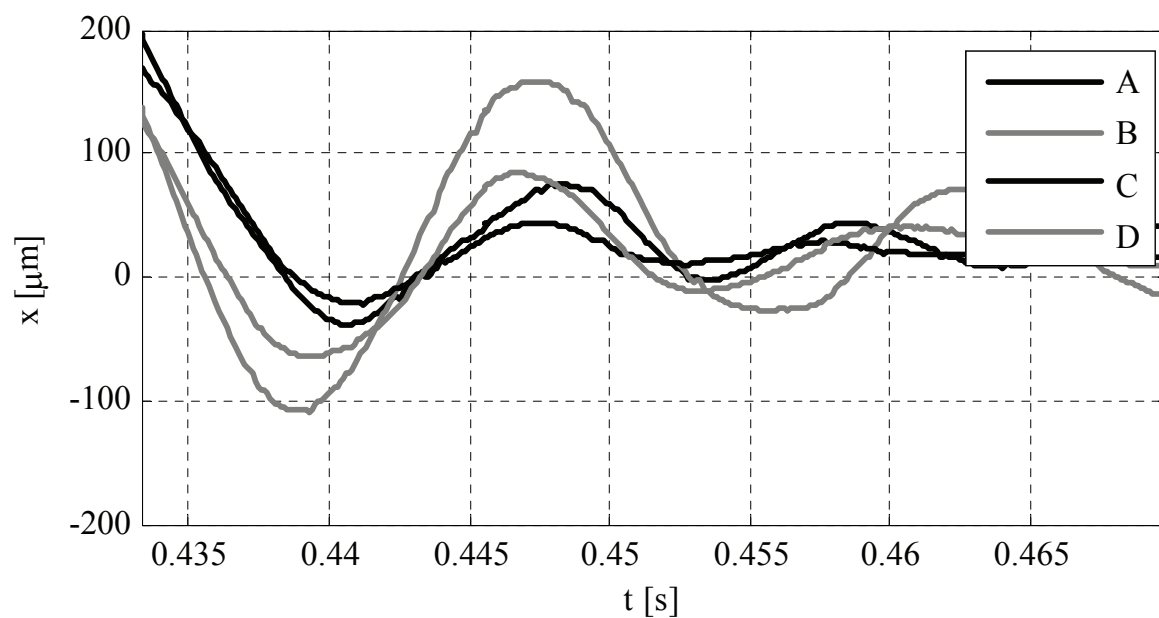
Z założenia wiadomo, że tak zaprojektowany regulator utrzymuje pożądane własności układu zamkniętego w punkcie linearyzacji. Jednakże z punktu widzenia badań interesującym jest jakie są skutki w przypadku oddziaływania na wirnik dodatkowych sił niż te związane ze stabilizacją. W AŁM o trzech siłownikach do dyspozycji dostępne są trzy siły elektromagnetyczne, przy pomocy których można uzyskać dodatkowe informacje o właściwościach statycznych i dynamicznych AŁM. Aby uwypuklić omawiane zagadnienia ustalono stabilizację dla niezerowego położenia wirnika w przestrzeni łożyskowej, co jest widoczne na ilustrujących eksperymenty wykresach. W przeprowadzonych badaniach zastosowano AŁM bez łożyska spoczynkowego (bezpieczeństwa), dzięki czemu ruch wirnika mógł się odbywać w całej przestrzeni łożyskowej o luzie promieniowym wynoszącym 400 μm .

3.1 Wymuszenie impulsowe

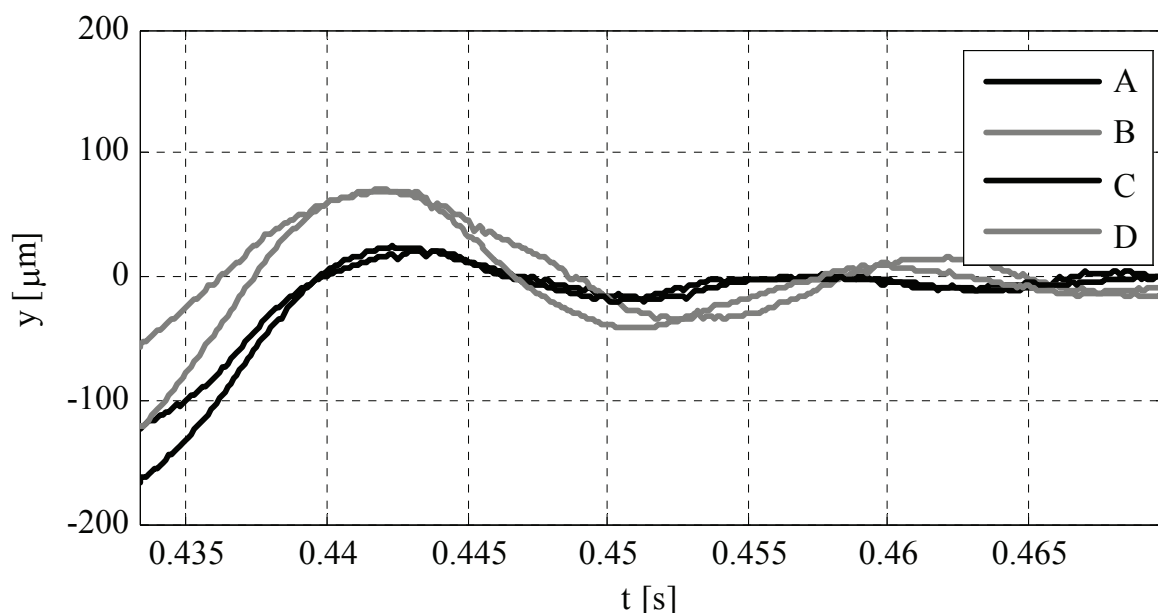
W pierwszym badaniu eksperymentalnych zastosowano wymuszenie impulsowe działające w jednym z siedmiu możliwych do uzyskania w tej konstrukcji kierunków. W wyniku zadziałania dodatkowej siły następuje przemieszczenie wirnika do nowego położenia. Od chwili zakończenia trwania impulsu wirnik powraca do punktu stabilizacji po trajektorii związanej z działaniem układu regulacji. Zarejestrowane trajektorie ruchu wirnika wykazują charakter nieliniowy. Jest to bezpośrednio związane z nieliniowym charakterem i rozkładem sił elektromagnetycznych i zastosowanym regulatorem liniowym.



Rys. 3. Trajektorie ruchu wirnika w przestrzeni łożyskowej dla poszczególnych zestawów badań: a) A, b) B, c) C, d) D



Rys. 4. Przemieszczenie wirnika w osi X po ustąpieniu impulsu wymuszającego

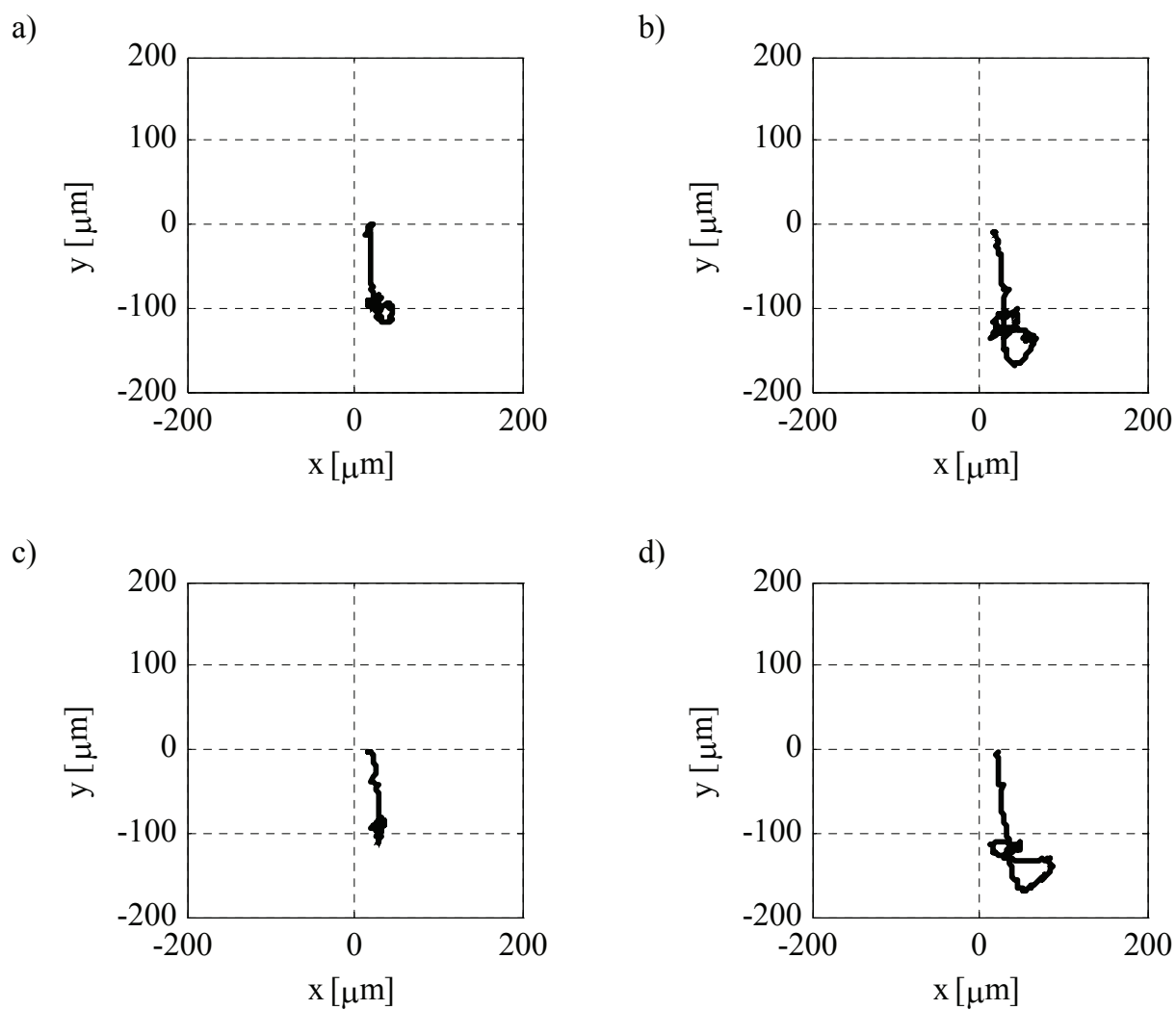


Rys. 5. Przemieszczenie wirnika w osi Y po ustąpieniu impulsu wymuszającego

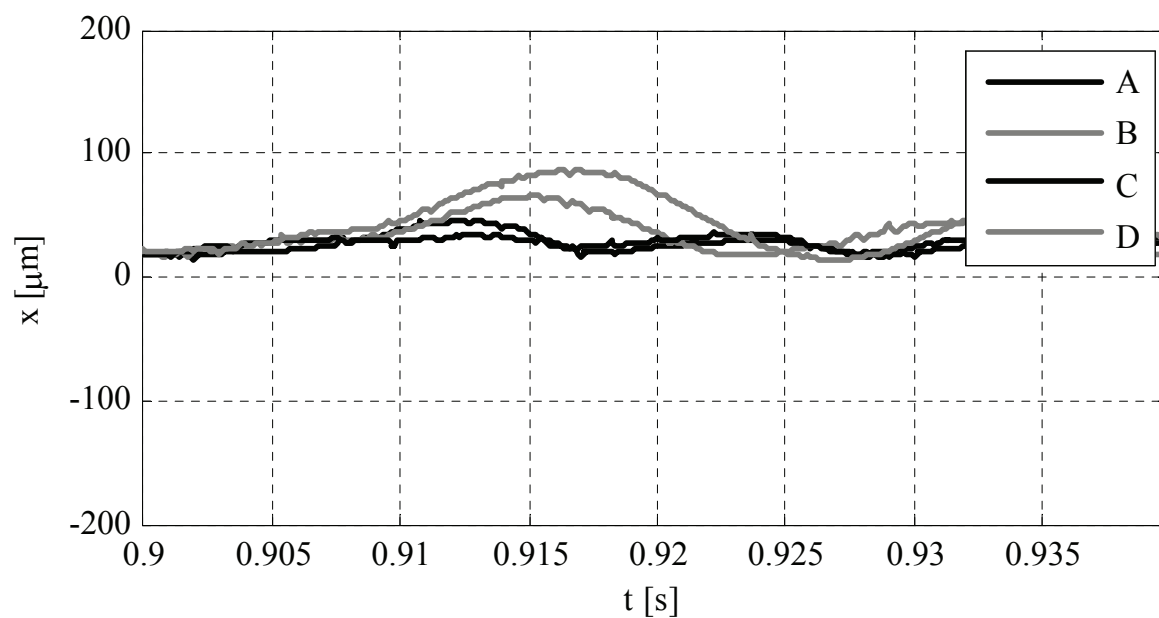
Analizując przebiegi czasowe można zauważyć zmiany spowodowane zastosowaniem innych współczynników tłumienia i sprężystości w poszczególnych zestawach badań. Zarejestrowane dane pokazują ugięcie statyczne związane z działaniem siły zewnętrznej różne dla różnych wartości współczynnika sprężystości. Widoczne jest również inne tłumienie w tych sygnałach. Ponadto obserwuje się zmianę przesunięcia fazowego. Zniekształcenia na trajektoriach ruchu świadczą o nieliniowej dynamice układu zamkniętego.

3.1 Wymuszenie stałe

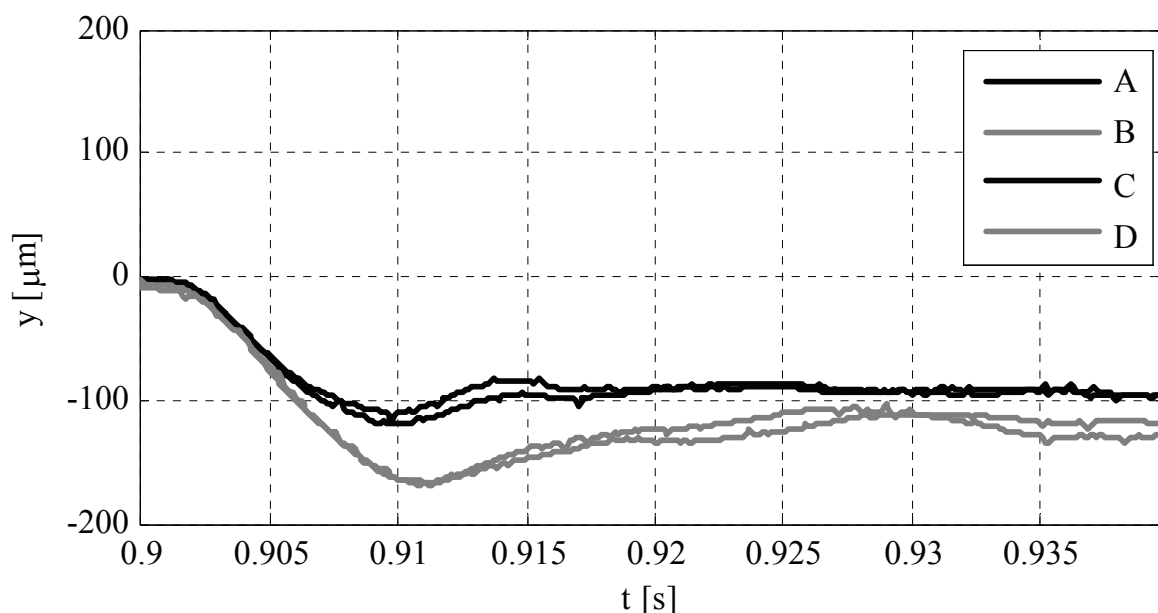
W drugim badaniu zastosowano działanie stałą siłą w jednym z siedmiu kierunków. Badanie to pozwala sprawdzić obecność członu całkującego bądź adaptacyjnego w układzie regulacji. W takim przypadku błąd ustalony będzie równy zero w pozostałych przypadkach będzie świadczył o własnościach sprężystych AŁM. Więcej, obserwacja oscylacji dla innego punktu stabilizacji pokazuje, że własności dynamiczne uległy zmianie. To zaś po raz kolejny potwierdza lokalność opracowanego regulatora. W tym eksperymencie zadziałała dodatkowa siła w kierunku pionowym – zgodnym z działaniem siły grawitacji i w osi elektromagnesu nr 2. Spowodowało to przemieszczenie wirnika w stronę siłownika nr 2. Nierównomierne przemieszczanie jest widoczne na przebiegach ilustrujących przemieszczenie w osi X, co świadczy o anizotropii AŁM. Dla zestawów A i C oraz B i D otrzymano inne ugięcia statyczne co jest związane z wartościami K_1 i K_2 . Porównując charakter odpowiedzi można zauważyć, iż tłumienie C również ulega zmianie.



Rys. 6. Trajektorie ruchu wirnika w przestrzeni łożyskowej dla poszczególnych zestawów badań: a) A, b) B, c) C, d) D



Rys. 7. Przemieszczenie wirnika w osi X podczas działania dodatkowej siły w osi Y



Rys. 8. Przesunięcie wirnika w osi Y podczas działania dodatkowej siły w osi Y

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania eksperymentalne ze skokową i trwałą zmianą sygnału wymuszającego, potwierdzają fakt, iż aby zapewnić pożądane własności dynamiczne określone przez współczynniki sprężystości i tłumienia w obrębie całej lub fragmentu przestrzeni łożyskowej należy stosować regulator nieliniowy bądź liniowy, ale o zmiennej strukturze. W przypadku, gdy wirnik, ma być stabilizowany wyłącznie w jednym punkcie pracy wystarczy zapewnić regulator liniowy, ale uodporniony na zakłócenia zewnętrzne. Opracowywane procedury detekcji prowadzą do uzyskania informacji o statycznych i dynamicznych łożyska magnetycznego. W pracy przedstawiono wymuszenia tylko w jednym z kierunków. Zrealizowane badania dla wszystkich możliwych siedmiu konfiguracji generowanych dodatkowych składowych siły wymuszającej potwierdzają skuteczność tej metody i możliwości detekcji składowych wartości współczynników sprężystości i tłumienia w badanym kierunku.

Niniejsze badania eksperymentalne stanowią początek badań nad technikami samoidentyfikacji łożyska magnetycznego, procesu wnioskowania własnościach statycznych i dynamicznych oraz adaptacji prawa sterowania. Dalsze prace badawcze są ukierunkowane na weryfikację współczynnika sprężystości i tłumienia w ruchu obrotowym wirnika.

Badania diagnostyczne wymagają zastosowania aparatury kontrolno-pomiarowej umożliwiającej nadpróbkowanie sygnałów pomiarowych i sterujących. Planuje się zastosowanie opracowanej konfigurowalnej aparatury do zadań diagnostyki i sterowania [9] do realizacji tych celów.

Analiza sprężystości i tłumienia aktywnego łożyska magnetycznego pozwala na określenie parametrów węzła łożyskowego. Z punktu widzenia zastosowania i dopasowania działania tego układu automatyki do warunków pracy analiza ta jest pożądana zarówno w fazie prototypowej jak i eksploatacyjnej.

PODZIĘKOWANIE

Praca powstała w ramach projektu badawczego 3585/B/T02/2009/37 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

BIBLIOGRAFIA

1. Gosiewski Z., Muszyńska A.: Dynamics of rotating machinery. Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Koszalinie, Koszalin 1992.
2. Gosiewski Z.: Łożyska magnetyczne dla maszyn wirnikowych. Podstawy teoretyczne. Wyższa Szkoła Inżynierska, Koszalin 1993.
3. Gosiewski Z.: Łożyska magnetyczne dla maszyn wirnikowych. Sterowanie i badanie. Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 1999.
4. Gryboś R. Dynamics of rotating machinery (in Polish), PWN, Warszawa 1994
5. Kozanecka D.: Sterowane cyfrowo łożysko magnetyczne. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Łódź 2000.
6. Piłat A., Stiffness and damping analysis for pole placement method applied to active magnetic suspension (in Polish), Automatyka, ISSN 1429-3447. 2009 vol. 13 no. 1 pp. 43–54
6. Piłat A., Control of Magnetic Levitation Systems, Ph.D. Thesis (in Polish), AGH University of Science and Technology, Department of Automatics, Poland, Krakow 2002
7. Piłat, A. Grega W., Reconfigurable test-rig for AMB control, Proceedings of 7th Conference on Active Noise and Vibration Control Methods, pp. 1–8, June 2005, Wigry, Poland
8. Piłat A., Testing of the programmable AMB spring and damping forces in a flexible rotor test-rig mode, ISMB 12, Wuhan China 2010
9. Piłat A., Klocek J., Modułowa aparatura do zadań diagnostyki sterowania – zgłoszone do prezentacji na Automation 2011.
10. Proceedings of the International Symposium on Active Magnetic Bearings (1988–2010)
11. Schweitzer G., Maslen E.H. (Eds.), Magnetic Bearings, Theory, Design, and Application to Rotating Machinery, Springer, 2009.
12. Wowk V.: Machinery Vibration, Measurement and Analysis. McGraw-Hill, Inc. 1991.