

# PROBLEMY NIEKONWENCJONALNYCH UKŁADÓW ŁOŻYSKOWYCH

Łódź 09-10 maja 1995 roku

Zdzisław Gosiewski, Tomasz Grzegorzcyk,  
Krzysztof Falkowski (*Wojskowa Akademia Techniczna*)

## BADANIA MODELOWE ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO

### SŁOWA KLUCZOWE

aktywne łożysko magnetyczne, liniowy model obiektu, sterowanie, symulacja

### STRESZCZENIE

W referacie omówiono budowę i zasadę działania aktywnego łożyska magnetycznego dla wirnika sztywnego. Przeanalizowano możliwości bezdotykowego pomiaru przemieszczeń wirnika w zawieszeniu magnetycznym oraz możliwe metody sterowania siłownikiem łożyska. Przedstawiono również komputerowo wspomaganie modelowanie układu aktywnego łożyska magnetycznego oraz analizę dynamiki zamkniętego układu regulacji.

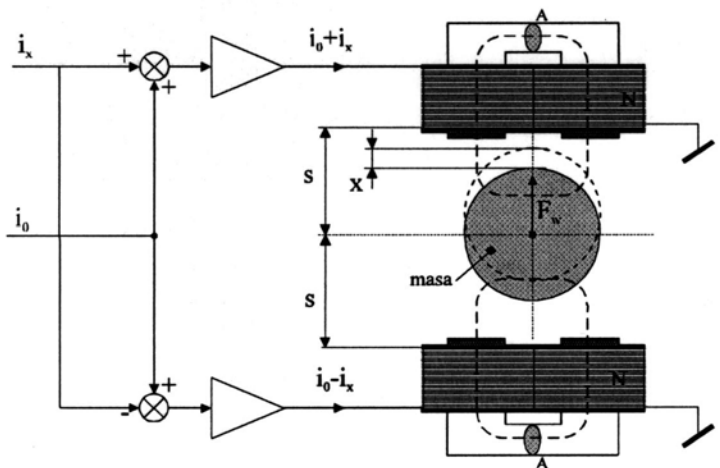
### WPROWADZENIE

Przedstawiony w referacie układ aktywnego zawieszenia magnetycznego staje się ostatnio w świecie coraz częściej stosowanym, alternatywnym sposobem łożyskowania wirników zarówno w bardzo małych jak i bardzo dużych maszynach wirnikowych. Cenne zalety rozpatrywanego sposobu łożyskowania, między innymi takie jak: możliwość precyzyjnego pozycjonowania wirnika względem stojana, wyeliminowanie smarowania oraz drgań i hałasu, możliwość stosowania w bardzo niskich ciśnieniach oraz w szerokim zakresie zmian temperatur i prędkości obrotowych powodują, iż w niektórych zastosowaniach są one wręcz niezastąpione [2]. Łożyska magnetyczne utrzymują wirnik w zawisie zarówno na kierunku promieniowym jak i na kierunku osiowym. Niezbędne do tego, wymagane zmiany sił magnetycznego oddziaływania elektromagnesów na wirnik, uzyskuje się w zamkniętym układzie regulacji, w którym źródłem sygnałów sterujących są czujniki mierzące wychylenia wirnika z położenia równowagi względem stojana lub inne wielkości fizyczne związane z działaniem elektromagnesów jak: prądy lub indukcja w szczeliny. Sterownik (regulator) znajduje się zwykle poza maszyną wirnikową w oddzielnej obudowie. Przed bezpośrednim stykiem z elektromagnesami, podczas awaryjnego wyłączenia zasilania, chronią wał pomocnicze łożyska kulkowe lub ślizgowe, z odpowiednim luzem.

### ZASADA DZIAŁANIA SIŁOWNIKA W UKŁADZIE RÓŻNICOWYM DWU-CEWKOWYM

Podstawowym elementem składowym układu łożyska magnetycznego jest siłownik. Dla jednego stopnia swobody tworzą go: wzmacniacz mocy i dwa elektromagnesy w ustawieniu osiowo-przeciwstawnym, sterowane różnicowo przez wspólny regulator [ 1 ].

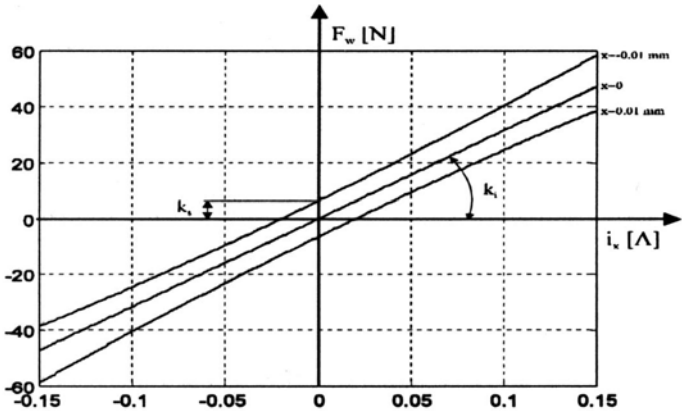
Budowę i zasadę działania siłownika promieniowego wyjaśnia rysunek 2. Analogicznie działający siłownik ustala położenie poosiowe wału wirnika.



Rys. 1. Siłownik promieniowy łożyska magnetycznego

W centralnym położeniu wirnika na kierunku działania danego siłownika przez cewki jego elektromagnesów płynie prąd  $i_0$  ustalający punkt pracy łożyska. Oba elektromagnesy działają na wał z jednakową siłą przeciwnie skierowaną (siła wypadkowa  $F_w=0$  - rys.2). Różnicowe sterowanie siłą magnetycznego oddziaływania elektromagnesów na wał polega na symetrycznej zmianie wartości prądów w ich cewkach o wartość  $i_x$  co prowadzi do pojawienia się wypadkowej siły oddziaływania magnetycznego:

$$F_w = k_s x + k_i i_x \tag{1}$$



Rys. 2. Charakterystyka wypadkowej siły elektromagnesów w funkcji zmiany  $i_x$ .

Ujemny współczynnik sztywności przemieszczeniowej  $k_s$  (siła rośnie, gdy szczelina maleje) powoduje, iż wał wirnika w punkcie pracy ( $i_0, s$ ) znajduje się w położeniu równowagi chwiejnej, a układ otwarty jest niestabilny. W związku z tym głównym celem wprowadzenia zamkniętego układu sterowania staje się stabilizacja układu i utrzymanie wału w położeniu centralnym niezależnie od przewidywanych wymuszeń zewnętrznych. W zdecydowanej większości przypadków jako sygnał wejściowy w układzie sterowania brane jest pod uwagę przemieszczenie wału.

BEZKONTAKTOWE METODY POMIARU PRZEMIESZCZENIA WAŁU WIRNIKA

W łożyskach magnetycznych przemieszczenie wału wirnika jest aktywnie sterowane. W dużym stopniu skuteczność sterowania zależy od charakterystyk zastosowanego

czujnika przemieszczenia. Pod uwagę mogą być brane jedynie czujniki bezkontaktowe, umożliwiające pomiar liniowych przemieszczeń elementów wirujących, z maksymalnie dużą rozdzielczością, o liniowej charakterystyce przetwarzania w całym przewidywanym zakresie pomiarowym. Ze względu na specyfikę pomiaru przy wyborze czujników należy również zwrócić uwagę na dopuszczalny zakres temperatury pracy, temperaturowy dryf zera i czułości, odporność na zakłócenia od zewnętrznych pól elektromagnetycznych i innych zewnętrznych czynników zakłócających.

Do znanych bezkontaktowych czujników pomiarowych nadających się do wykorzystania w aktywnym łożysku magnetycznym można zaliczyć hallotrony, czujniki optoelektroniczne oraz indukcyjne czujniki wiroprowodowe [2].

## UKŁADY STEROWANIA SIŁOWNIKA ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO

W odniesieniu do siłownika aktywnego łożyska magnetycznego brane są pod uwagę następujące, możliwe do realizacji układy sterowania:

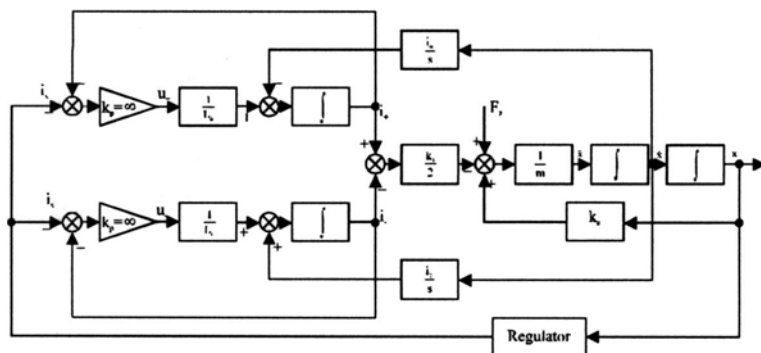
- układ sterowania prądowego z pomiarem przemieszczenia wału  $x$ ,
- układy sterowania napięciowego z pomiarem przemieszczenia  $x$  i prądów  $i_+$ ,  $i_-$  lub z pomiarem tylko obydwu prądów, bez pomiaru przemieszczenia  $x$  (tzw. self-sensing),
- układy sterowania indukcją magnetyczną  $B$  w szczelinie z pomiarem strumienia magnetycznego i przemieszczenia  $x$  lub jednego z prądów  $i_+$  lub  $i_-$  w uzwojeniu. Przedstawione możliwe układy sterowania są wynikiem analizy modelu dynamiki siłownika

w przestrzeni stanu dla różnych możliwych konfiguracji wektora stanu  $x$  oraz różnych możliwych zestawów zmiennych wejściowych  $u$  i wyjściowych  $y$  z uwzględnieniem sterowalności i obserwowalności układu.

W układach tych mogą być realizowane różne algorytmy sterowania: stosowane powszechnie regulatory PD lub PID, regulatory optymalne LQR lub LQG, regulatory proporcjonalne w układzie sprzężenia od wektora stanu lub regulatory  $H^\infty$  [3].

### Układ sterowania prądowego

Do projektowania układu sterowania prądowego wykorzystać można prosty model obiektu sterowania czyli siłownika, gdyż w tym przypadku można pominąć dwa stany skojarzone z dwoma uzwojeniami siłownika ( $i_+$  i  $i_-$ ) w wewnętrznej pętli sterowania - do wystąpienia napięcia nasycającego. Prądy te są bowiem zarówno wielkościami sterującymi jak i rzeczywistymi, fizykalnymi zmiennymi stanu i dlatego właśnie dynamika wewnętrznej pętli sterowania może być pomijana przy projektowaniu pętli zewnętrznej - z prądem jako wielkością sterującą przemieszczeniem  $x$  wału. W układach sterowania prądowego powszechnie wykorzystuje się proste regulatory typu PD lub PID.



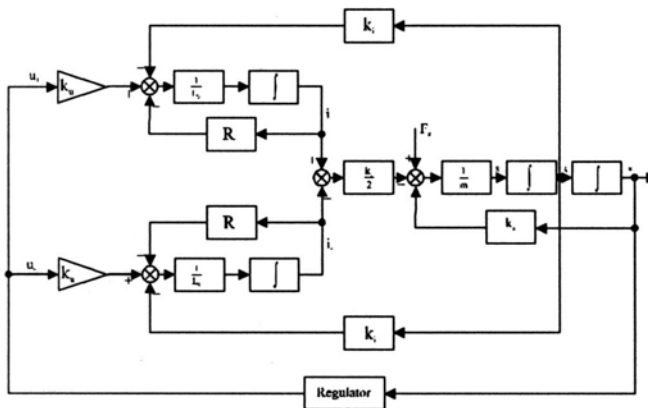
Rys. 3. Model układu sterowanego prądowo

Siłownik łożyska magnetycznego sterowanego prądowo jest jednak niedoskonałym źródłem siły, ponieważ w równaniu pojawia się niepożądany czynnik  $k_s x$  co odpowiada ujemnej sprężystości układu sprężystego. Poza tym układy sterowania prądowego są wrażliwe na szумы i opóźnienia pomiarowe, nasycenie magnetyczne rdzenia elektromagnesu oraz ograniczają możliwości linearyzacji układu. Reguły sterowania prądowego są słuszne przy założeniu, że wartość prądu w uzwojeniach cewek elektromagnesów zmienia się bardzo szybko i idealnie nadąża za wartością żadaną. Aby założenie było słuszne, należy w praktyce w pętli wewnętrznej zastosować wzmacniacz o wysokim wyjściu napięciowym. Jedynie taki wzmacniacz gwarantuje odpowiednio szybką zmianę prądu w obwodzie z indukcyjnością  $L$ .

### Układ sterowania napięciowego

W układzie sterowania napięciowego jako zmienne sterujące wybrano dwa napięcia  $u_+$  i  $u_-$  zasilające odpowiednie elektromagnesy. Pozytywny wynik badania sterowalności układu w pełni potwierdza słuszność wyboru. Układ pozostaje obserwowalny, gdy co najmniej dwa spośród trzech wyjść ( $i_+$ ,  $i_-$ ,  $x$ ) będą dostępne dla regulatora. Umożliwia to zrealizowanie układu sterowania napięciowego w połączeniu z pomiarem prądu i przemieszczenia lub tylko prądów, w tzw. układzie self-sensing. W układzie tym wykorzystuje się sprzężenie (przeciwwrażliwość) od podukładu mechanicznego do elektrycznego polegające na zmianie prądów przy zmianie szczeliny. Sterowanie napięciowe bywa stosowane w przypadku układów wrażliwych na szумы, o dużych wymaganiach dokładnościowych. Wymaga ono stosowania bardziej skomplikowanego regulatora oraz bardziej szczegółowego uwzględnienia rezystancji  $R_{cu}$  uzwojeń i efektu rozproszenia magnetycznego w tworzonym modelu. Do zalet sterowania napięciowego można zaliczyć:

- większą odporność na opóźnienia i szумы pomiarowe,
- zmniejszone ryzyko wprowadzenia materiału rdzeni w stan nasycenia,
- możliwość zapewnienia małej sztywności układu,
- możliwość stosowania prostych wzmacniaczy napięciowych,
- lepsze wykorzystanie granicznej wartości wzmocnienia w układzie.



Rys. 4. Model układu sterowanego napięciowo

Jednym z możliwych rozwiązań napięciowego układu sterowania jest układ typu selfsensing z zastosowaniem obserwatora Luenbergera i regulatora LQR w pętli sprzężenia od odtworzonego wektora stanu. Układ sterowania tego typu pozwala na dowolne kształtowanie dynamiki układu objętego sprzężeniem oraz eliminuje konieczność stosowania bardzo drogich czujników przemieszczenia.

Ze względu na zalety przedstawione w punkcie 4.2, w tym między innymi możliwość realizacji interesującego układu self-sensing, dokonano analizy dynamiki układu siłownika sterowanego napięciowo. Siłownik w układzie 2-cewkowym, różnicowym jako obiekt sterowania jest układem wielowymiarowym, stacjonarnym, zlinearyzowanym w otoczeniu punktu pracy. Jego dynamikę daje się więc najprościej przedstawić w postaci modelu w przestrzeni stanu:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} \end{aligned}$$

W modelu tym, wektor stanu  $\mathbf{x}$  składa się z dwóch elektrycznych zmiennych stanu  $i_+$  oraz  $i_-$  a także dwóch mechanicznych zmiennych  $x$  i  $\dot{x}$ :

$$\mathbf{x} = [i_+ \quad i_- \quad x \quad \dot{x}]^T$$

Dla tak przyjętego wektora stanu macierz stanu  $\mathbf{A}$  obiektu (układu otwartego) ma postać:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_0} & 0 & 0 & -\frac{k_i}{L_0} \\ 0 & -\frac{R}{L_0} & 0 & \frac{k_i}{L_0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_i}{2m} & \frac{k_i}{2m} & \frac{k_s}{m} & 0 \end{bmatrix}$$

W rozpatrywanym, napięciowym układzie sterowania  $u = [u_+ \quad u_-]^T$ , a macierz sterowania ma postać:

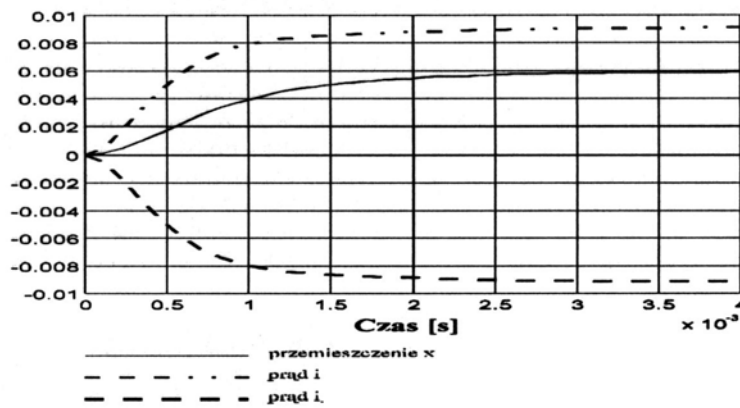
$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_0} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

Postać macierzy obserwacji  $\mathbf{C}$  zależy od zakładanych możliwości pomiarowych.

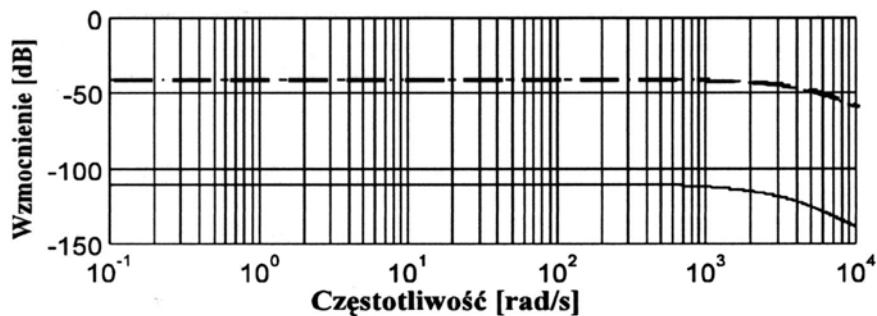
W oparciu o pakiet programowy MATLAB-SIMULINK, dla założonych parametrów konstrukcyjnych projektowanego siłownika, zbudowano i przebadano jego model komputerowy. Układ sterowania zamodelowano z wykorzystaniem regulatora optymalnego LQR w pętli sprzężenia zwrotnego od wektora stanu (zakładając wstępnie dostępność wszystkich zmiennych stanu).

Posługując się przedstawionym modelem przeprowadzono badania symulacyjne siłownika dla różnych wymuszeń. W ramach badań zarejestrowano i przeanalizowano charakterystyki czasowe przemieszczenia wału oraz zmiany prądów w uzwojeniach elektromagnesów jako wyniki zachowania układu siłownika zakłócanego impulsem siły, skokiem jednostkowym (rys. 6) oraz szumem białym (w układzie rzeczywistym - zmienne obciążenia zewnętrzne, bicia wału, drgania podstawy itp). Analizie poddano również charakterystyki częstotliwościowe układu (rys. 7).

Wyniki analizy otrzymanych charakterystyk w pełni potwierdzają przydatność zastosowanego układu sterowania napięciowego z regulatorem LQR.



Rys. 6. Charakterystyka skokowa



Rys. 7. Charakterystyka częstotliwościowa

## BIBLIOGRAFIA

- [ 1 ] Haberman H. : Łożyskowanie magnetyczne aktywne. Przegląd mechaniczny, Nr 10 i 11 1981.
- [2] Gosiewski Z.: Łożyska wirnikowe dla maszyn wirnikowych, czy. 1: Podstawy teoretyczne. Wydawnictwo Uczelniane WSI, Koszalin 1993.
- [3] Schweitzer G.: Magnetlager. Springer-Verlag, Berlin 1993.

## MODEL TESTING OF MAGNETIC BEARINGS

### SUMMARY

Structure and operational principles of active magnetic bearing for rigid rotor are presented. The possibility of contactless measurement of rotor displacement is analysed. Different method for actuator control are described. The results of computer simulation of system dynamics are presented.

*Recenzja: prof. dr hab. inż. .tan Burcan*