



Układ sterowania aktywnym zawieszeniem magnetycznym w lotniczym układzie wykonawczym*

Maciej HENZEL, Paulina MAZUREK

*Institut Techniki Lotniczej, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa,
Wojskowa Akademia Techniczna,
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa*

Streszczenie. Systemy pokładowe najnowszych statków powietrznych, takich jak: Boeing 787, Airbus A380, projektowane są według koncepcji „more electric aircraft” (MEA), która zakłada stosowanie coraz większej liczby elementów i układów elektrycznych. Rozwój technologii MEA umożliwił zastosowanie w konstrukcji urządzeń pokładowych aktywnych zawiesznień magnetycznych, których wprowadzenie eliminuje tarcie między współpracującymi parami kinematycznymi oraz umożliwia monitorowanie i diagnostykę stanu technicznego układów. Do systemów pokładowych wspieranych przez tę technologię należą również lotnicze układy wykonawcze, których zadaniem na pokładzie statku powietrznego jest przetworzenie za pomocą przetworników elektronicznych i mechanicznych wejściowej wielkości sterującej na precyzyjne wychylenie powierzchni sterowych.

W artykule przedstawiono wyniki badań aktywnego zawieszenia magnetycznego pod kątem oceny możliwości jego zastosowania w lotniczych układach wykonawczych. Obiektem analizy było sterowane prądowo homopolarne łożysko magnetyczne z magnesami trwałymi, które opracowane zostało w Zakładzie Awioniki i Uzbrojenia Lotniczego [1]. Podczas badań laboratoryjnych dokonano pomiaru charakterystyk czasowych i częstotliwościowych łożyska magnetycznego z regulatorami typu PD oraz PID. Parametry regulatorów zostały wyznaczone w środowisku Matlab na podstawie modelu matematycznego i symulacyjnego układu.

Słowa kluczowe: mechanika, zawieszenie magnetyczne, układ wykonawczy

* Referat pod tym tytułem został wygłoszony przez mgr inż. P. Mazurek podczas Seminarium Koła Naukowego Studentów Wydziału Mechatroniki WAT w dniu 30 maja 2010 r.

1. WSTĘP

Rozwój w dziedzinie układów elektrycznych, zarówno w obszarze źródeł zasilania, jak i w obszarze układów wykonawczych zaowocował pojawieniem się już w latach 70. XX wieku nowej koncepcji projektowania lotniczych systemów pokładowych o nazwie „all electric aircraft”. Koncepcja ta zakładała zastąpienie wszystkich systemów pokładowych statku powietrznego układami elektrycznymi. Rozważano wówczas m.in. możliwość zastąpienia silników odrzutowych silnikami elektrycznymi, które napędzałyby cały osprzęt elektryczny począwszy od sieci elektroenergetycznej, a skończywszy na prądniczo-rozruszniku zamocowanym w korpusie silnika. Wówczas dzięki rozszerzeniu funkcji prądniczo-rozrusznika do obsługi aktywnych łożysk magnetycznych można byłoby wyeliminować pokładową instalację olejową. Koncepcja ta oferowała ogromne możliwości rekonfiguracji silnika i płatowca oraz poprawę warunków użytkowania systemów pokładowych wynikających ze zmniejszenia masy, rosnącej niezawodności urządzeń, łatwiejszej konserwacji, zmniejszenia kosztów użytkowania, a przez to i wzrostu bezpieczeństwa lotu.

Jednak tak daleko idące zmiany w zakresie wyposażenia pokładowego trudno było zrealizować, zapewniając odpowiedni poziom bezpieczeństwa lotów. Dlatego koncepcja ta przerodziła się w koncepcję „more electric aircraft” (MEA), w której tylko wybrane systemy pokładowe były wspierane układami elektrycznymi. Technologia MEA w dziedzinie układów wykonawczych i systemów sterowania zaowocowała m.in. opracowaniem systemów typu „fly by wire” (FBW) i „power by wire” (PBW).

Technologia „fly by wire” obejmuje projektowanie, rozwijanie oraz realizację rozwiązań elektronicznych w systemach sterowania lotem. Dzięki temu zapewnia ona odpowiednią funkcjonalność urządzeń wykonawczych używanych zarówno w rozproszonej, jak i w scentralizowanej architekturze. Rozdzielony system sterowania zmniejsza ilość operacji przetwarzania danych w komputerach zarządzania lotem i oferuje większą elastyczność podczas rozwijania ich struktury. Technologia ta redukuje również masę systemów poprzez ograniczenie ich rozmiaru i ilości wykorzystywanych elementów.

Natomiast technologia „power by wire” obejmuje nowatorskie podejście do projektowania i rozwiązania zasilania elektrycznego urządzeń wykonawczych przy zachowaniu możliwości wychylania płaszczyzn sterowych statku powietrznego. Obejmuje ona eksploatację i adaptację technologii elektrycznych napędów silników w taki sposób, aby charakteryzowały się one odpowiednią wydajnością, niezawodnością oraz zapewniały bezpieczeństwo lotu i środowiska.

Rozwój systemów pokładowych według koncepcji MEA umożliwił zastosowanie w konstrukcji poszczególnych urządzeń pokładowych aktywnych zawieszek magnetycznych. Układy takie można spotkać m.in. w silniku lotniczym Trent 500 [3].

Zastosowanie takich układów eliminuje tarcie między współpracującymi parami kinematycznymi, umożliwia monitoring i diagnostykę stanu technicznego układów poprzez pomiar poziomu drgań i wartości sił. W silnikach lotniczych oraz układach wykonawczych zawieszenia magnetyczne pracują jako elementy łożyskowania podpór wału (wirnika) silnika. Taki sposób łożyskowania nazywany jest łożyskiem magnetycznym, tj. układem wykorzystującym siły przyciągania lub odpychania dla zapewnienia stabilnej lewitacji wirnika w otoczeniu punktu pracy [4].

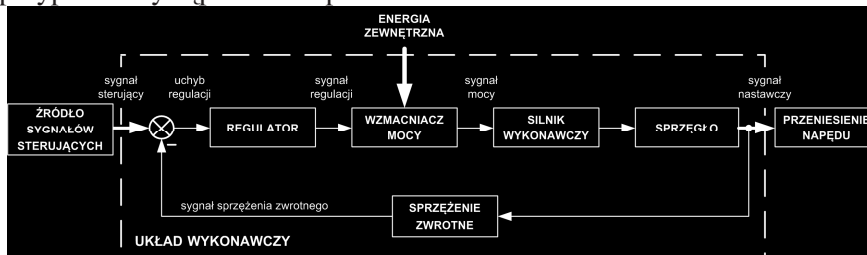
Mechanizmy wykonawcze znajdujące się na pokładzie statku powietrznego to układy wykorzystywane nie tylko do sterowania, ale również do wielu innych operacji, takich jak: otwieranie, zamykanie drzwi pasażerskich i towarowych, sterowanie pracą silnika i pracą hamulców aerodynamicznych, sterowanie pracą odwracaczy ciągu, pracą wlotów powietrza do układu klimatyzacji itp.

2. CHARAKTERYSTYKA UKŁADÓW WYKONAWCZYCH

Układy wykonawcze są ważnym elementem systemów sterowania, ponieważ w dużej części to od ich właściwości zależą parametry oraz cechy użytkowe tych systemów. Układy wykonawcze pełnią w większych systemach funkcję układów automatycznej regulacji o sygnale wyjściowym w postaci siły, momentu lub przemieszczenia. Na rysunku 1 przedstawiono strukturę układu wykonawczego, który reaguje na zadany sygnał sterujący i wypracowuje sygnał nastawczy o odpowiednim rodzaju, kształcie oraz mocy.

Zgodnie z przyjętą definicją układu wykonawczego, zadany sygnał sterujący podany na jego wejście jest porównywany w sumatorze z sygnałem nastawczym poprzez kanał sprzężenia zwrotnego w taki sposób, aby uchyb regulacji dążył do zera. Sygnał proporcjonalny do tego uchybu przekazywany jest dalej na wejście regulatora. Wyznaczony zgodnie z przyjętym prawem sterowania sygnał sterujący podawany jest na wejście silnika układu wykonawczego. Sygnał z regulatora jest najczęściej elektrycznym lub cyfrowym sygnałem małej mocy i wymaga wzmocnienia. Dla zrealizowania tego zadania wymagane jest najczęściej dostarczenie do układu dodatkowej energii zewnętrznej. Funkcję wzmacniacza mocy w układach wykonawczych pełni zespół elektroniczny, elektrohydrauliczny (elektropneumatyczny) lub hydrauliczny (pneumatyczny). Dalej, wzmocniony sygnał sterujący podawany jest na silnik, którego zadaniem jest jego przetworzenie w wielkość fizyczną, np. przemieszczenie, obrót, siłę lub moment. Wielkość ta zostaje zintegrowana poprzez sprzęgło z układem przeniesienia napędu oraz pętlą sprzężenia zwrotnego.

W tym przypadku sprzęgło pełni funkcję elementu zabezpieczającego układ wykonawczy przed negatywnym oddziaływaniem innych układów występujących w torze sterowania, ogranicznika maksymalnych wartości momentu lub siły oraz elementu rozłączającego silnik od pozostałych układów w przypadku wystąpienia niesprawności.

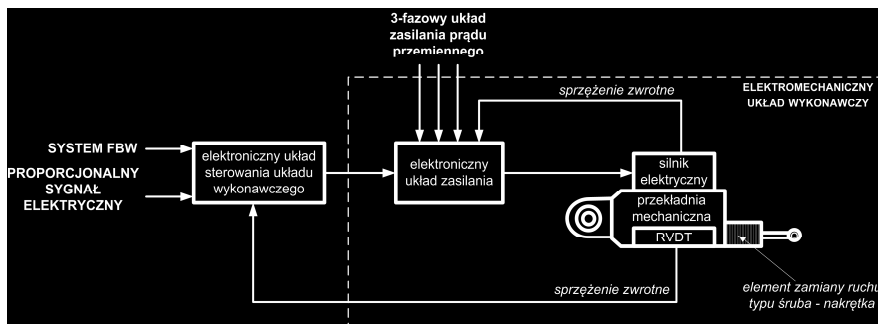


Rys. 1. Struktura układu wykonawczego

Fig. 1. The diagram of the servo actuator

W większości nowoczesnych konstrukcji lotniczych projektowanych zgodnie z koncepcją „more electric aircraft” hydrauliczne lub pneumatyczne układy wykonawcze zastępowane są układami elektrycznymi o odpowiedniej jakości i mocy. Takie rozwiązanie upraszcza system sterowania statku powietrznego, zwiększa niezawodność, a tym samym bezpieczeństwo lotu.

Elektryczne układy wykonawcze stosowane są w miejscach, gdzie zachodzi potrzeba generowania ruchu obrotowego rzadziej postępowego. Napędy takich układów uzyskują dużą moc w ruchu obrotowym, natomiast niewielką w ruchu postępowym. Prędkość obrotowa generowana przez napędy elektryczne może wynosić od około 600 do 3 000 obr/min, natomiast prędkość silników liniowych dochodzi do 10 m/s. Układy elektryczne są zazwyczaj sterowane metodami obniżającymi sprawność układu, która w prostych rozwiązaniach może wynosić nawet 95%.

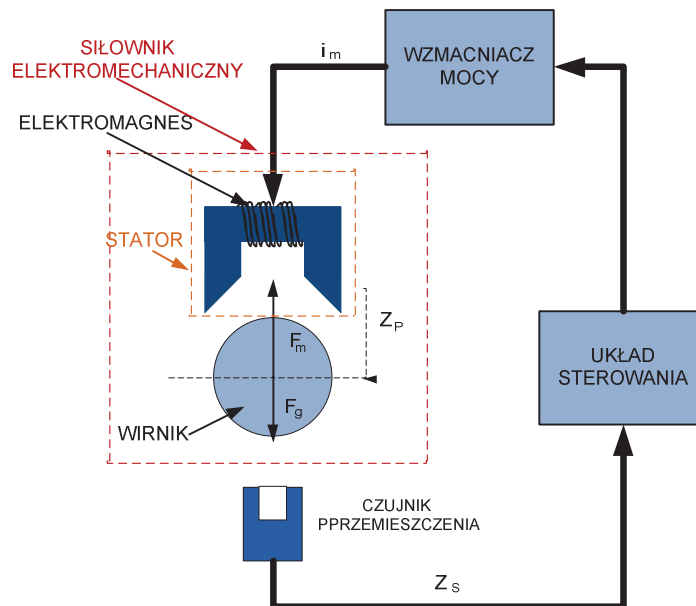


Rys. 2. Elektromechaniczny układ wykonawczy (EMA) [3]

Fig. 2. The electromechanical actuator (EMA)

Przykładowe rozwiązanie elektromechanicznego układu wykonawczego (EMA) stosowanego w systemach sterowania pokazano na rysunku 2. W układzie takim głównym elementem jest bezszczotkowy silnik elektryczny prądu stałego oraz przekładnia mechaniczna, której zadaniem jest zamiana ruchu obrotowego silnika na ruch postępowy. Przedstawiony układ wykonawczy może być zastosowany w układzie sterowania położeniem statecznika poziomego cywilnego statku powietrznego, klapami i slotami oraz w układzie sterowania śmigłowców. Oprócz wielu zalet układ taki posiada również wady. Jego podstawową wadą jest możliwość zakleszczenia się elementów mechanicznych, dlatego też układu takiego nie stosuje się w podstawowym układzie sterowania statku powietrznego.

Technologia zawiesznień magnetycznych umożliwia zwiększenie trwałości i niezawodności urządzeń elektrycznych oraz poprawia parametry eksploatacyjne. W układach takich wykorzystuje się zjawisko lewitacji magnetycznej, polegające na zrównoważeniu siły przyciągania pomiędzy elektromagnesem a ferromagnetycznym rdzeniem (rys. 3). W stanie równowagi rdzeń jest zawieszony w polu magnetycznym generowanym przez elektromagnes.



Rys. 3. Układ sterowania aktywnym zawieszeniem magnetycznym (AMB)

Fig. 3. The control loop of the active magnetic bearing (AMB)

W przypadku zmiany tego położenia czujnik pomiarowy rejestruje jego przemieszczenie i poprzez układ sterowania następuje wzmocnienie lub osłabienie siły przyciągania elektromagnesu, w zależności od kierunku przemieszczenia. Celem tego procesu jest kompensacja powstałego zaburzenia w położeniu rdzenia.

Położenie rdzenia ferromagnetycznego w płaszczyźnie pomiarowej mierzone jest w sposób ciągły przez czujnik przemieszczenia. Sygnał informujący o chwilowym jego położeniu (X_S) przesyłany jest do układu sterowania. Jeśli rdzeń znajduje się powyżej położenia równowagi (X_P), układ sterowania ogranicza prąd (i_m – prąd sterujący) płynący przez elektromagnes, a tym samym generowaną siłę magnetyczną. Natomiast jeśli znajduje się on poniżej zaplanowanego położenia, prąd płynący przez elektromagnes jest zwiększany. Gdy układ jest w stanie równowagi (jest stabilny), magnetyczna siła przyciągania (F_m) równoważy siłę ciężkości rdzenia (F_g).

Wprowadzenie do konstrukcji napędów elektrycznych aktywnych zawiesznień magnetycznych AMB (ang. *active magnetic bearing*) eliminuje występowanie tarcia pomiędzy wirnikiem a statorem silnika. Dzięki temu w konstrukcji układu wyeliminowane zostają układy smarowania, odprowadzania ciepła itp. W ten sposób układy takie stają się bardziej niezawodne i podatne eksploatacyjnie.

3. MODEL MATEMATYCZNY I SYMULACYJNY

Opracowanie modelu matematycznego oraz symulacyjnego jest niezwykle ważną fazą procesu projektowania. Analiza teoretyczna pozwala formułować wymagania eksploatacyjne oraz badać właściwości obiektu. W przypadku modelowania aktywnych zawiesznień magnetycznych daje również możliwość opracowania układu sterowania gwarantującego stabilność pracy układu. Poprawne działanie układu uzyskuje się dzięki procesowi sterowania nadążnego z odpowiednio zaprojektowanym regulatorem.

Do sterowania siłownikiem homopolarnym łożyska zastosowano regulatory typu PD oraz PID. Ich parametry wyznaczono na podstawie opracowanego modelu matematycznego i symulacyjnego. Otrzymane wyniki symulacji układu w środowisku Matlab zostały zweryfikowane podczas badań eksperymentalnych.

Wypadkowe siły elektromagnetyczne oddziałujące na wirnik łożyska są funkcjami nieliniowymi, dlatego zostały one zlinearyzowane w punkcie pracy. Stąd, wypadkowa siła oddziaływania magnetycznego działająca wzdłuż osi Oz opisana jest równaniem (1).

W punkcie pracy wypadkowa siła elektromagnetyczna (2) generowana przez elektromagnes dolny i górny równoważy się [1].

$$F_z = F_{Oz} + k_i i + k_s z \quad (1)$$

gdzie:

- F_{Oz} – wypadkowa siła elektromagnetyczna punktu pracy;
- i – wartość prądu sterującego;
- i_l – wartość prądu płynącego w cewce elektromagnesu;
- i_0 – nominalna wartość prądu sterującego $i_0 = i_l - i$;
- x_0 – nominalna szczelina powietrzna;
- z – przemieszczenie lewitującej masy;
- z_l – wartość szczeliny powietrznej; $z = x_0 - z_l$;
- k_i – sztywność prądowa łożyska;
- k_s – sztywność przemieszczeniowa łożyska.

$$F_{Oz} = \frac{4NA_p B_p i_0}{x_0} \quad (2)$$

gdzie:

- N – liczba zwojów cewki elektromagnesu;
- A_p – pole powierzchni nabiegownika;
- B_p – indukcja magnetyczna.

W siłowniku homopolarnym przemieszczenie wirnika w szczelinie powietrznej opisane jest równaniem różniczkowym (3).

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = k_i i + k_s z \pm F_{zk} \quad (3)$$

gdzie:

- m – masa wirnika;
- F_{zk} – siła zewnętrzna wytrącająca wirnik z położenia nominalnego.

$$ms^2 Z(s) - k_s Z(s) = k_i I(s) \pm F_{zk}(s) \quad (4)$$

Przyjmując prąd sterujący wirnika i siłę zewnętrzną jako wielkości wejściowe oraz dokonując przekształcenia Laplace'a równania (3), otrzymujemy równanie operatorowe (4). Z zależności tej możemy wyznaczyć funkcję przejścia (5) oraz transmitancję układu otwartego (6).

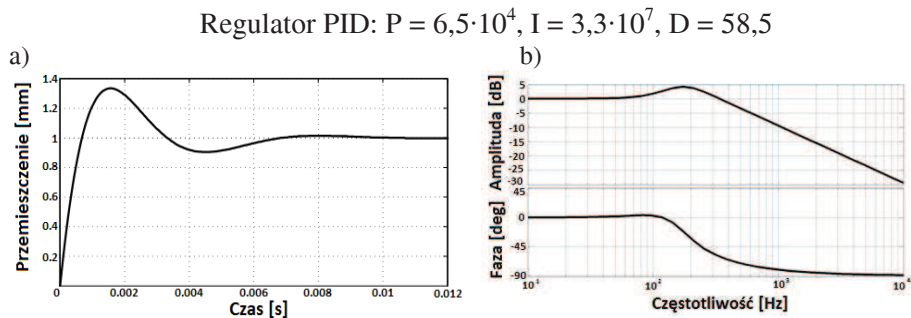
$$Z(s) = \frac{k_i I(s)}{ms^2 - k_s} \pm \frac{F_{zk}(s)}{ms^2 - k_s} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} G_{z,i}(s) \\ G_{z,f}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z(s)}{I(s)} \\ \frac{Z(s)}{F_{zk}(s)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_i}{ms^2 - k_s} \\ \frac{\pm 1}{ms^2 - k_s} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Łożyska magnetyczne są układami strukturalnie niestabilnymi, dlatego wymagają opracowania układu sterowania z regulatorem. Jednym z celów badań symulacyjnych było wyznaczenie parametrów regulatora pracującego w układzie sterowania położeniem wirnika łożyska magnetycznego. W tym celu wykorzystano środowisko Matlab – Simulink, w którym wyznaczono charakterystyki skokowe i częstotliwościowe układu sterowania (rys. 4).

Na rysunku 4a przedstawiono symulacyjne charakterystyki skokowe układu z regulatorem PID dla wymuszenia o wartości 0,1 mm (zakres ruchu wirnika łożyska wynosi $\pm 0,5$ mm). Dla takich parametrów regulatora nie wystąpił uchyb regulacji, a przeregulowanie wyniosło 30%. Parametry czasowe układu to czas regulacji równy 0,0028 s, czas narastania – 0,005 s, czas szczytowy – 0,0018 s.

Natomiast na rysunku 4b zamieszczono charakterystyki Bode układu z regulatorem PID. Dla analizowanego układu uzyskano wzmocnienie układu o wartości 1, szczyt rezonansowy M_r o wartości 4,21 dB dla częstotliwości rezonansowej $\omega_r = 173$ Hz, a szerokość pasma przenoszenia wyniosła 341 Hz. Z charakterystyki częstotliwościowej można odczytać częstotliwość drgań własnych układu, która wyniosła 245 Hz.



Rys. 4. Charakterystyki symulacyjne aktywnego zawieszenia magnetycznego:
a) charakterystyka skokowa; b) charakterystyka Bode

Fig. 4. The simulation characteristics of the active magnetic bearing:
a) the step response; b) the Bode diagram

4. STANOWISKO BADAWCZE

Obiektem badań było różnicowe, promieniowe łożysko homopolarne z magnesami trwałymi sterowane prądowo (rys. 6). W tego typu łożyskach każdy punkt na obwodzie ferromagnetycznego wału znajduje się pod biegunem o takiej samej polaryzacji. Tego typu siłowniki ze względu na położenie wirnika względem jego osi obrotu nazywane są również siłownikami ze wzdłużnym strumieniem magnetycznym.

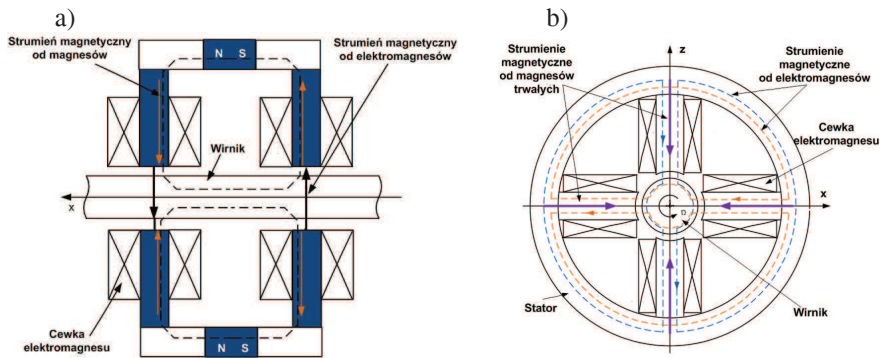
W odróżnieniu od klasycznych siłowników elektromechanicznych w prezentowanym siłowniku znajdują się magnesy trwałe, których zadaniem jest wytworzenie siły magnetycznej punktu pracy. Obwód ten wytwarza strumień magnetyczny stały w czasie. Natomiast drugi obwód magnetyczny tworzą cewki elektromagnesów, których zadaniem jest wytworzenie siły zmiennej w czasie do sterowania położeniem wirnika w szczelinie powietrznej.

Drogę strumieni magnetycznych obu obwodów magnetycznych przedstawiono na rysunku 5. Strumienie magnetyczne wytwarzane przez obwody magnetyczne dodają się w nabiegunnikach i szczelinach powietrznych (poza tymi miejscami przepływają niezależnie). Strumień magnetyczny wytwarzany przez magnes trwały przechodzi przez pierścień, lewy stator, szczelinę powietrzną, wirnik, ponownie przez szczelinę powietrzną, prawy stator i powraca do magnesu (rys. 5a). Natomiast droga strumienia magnetycznego wytwarzanego przez elektromagnesy przepływa przez nabiegunnik górny statora, szczelinę powietrzną, wirnik, ponownie przez szczelinę powietrzną i poprzez dolny nabiegunnik wraca do punktu wyjścia (rys. 5b).

Cewki elektromagnesów, mające taką samą liczbę zwojów, łączy się szeregowo oraz zasila z jednego zasilacza. Taka konfiguracja jest niezbędna do wytworzenia jednakowej zmiany strumienia magnetycznego w każdej szczelinie powietrznej oraz jednakowego prądu przepływającego przez cewki (strumień magnetyczny jest proporcjonalny do przepływającego prądu).

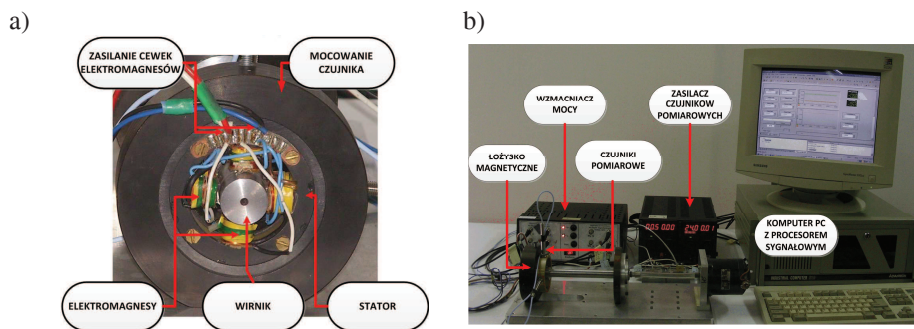
Stanowisko laboratoryjne do badania aktywnego zawieszenia magnetycznego (rys. 6) składa się z analogowego, dwukanałowego wzmacniacza mocy 10 V/5 A zasilającego cewki elektromagnesów łożyska, wiroprądowych czujników położenia wirnika w szczelinie powietrznej, zasilacza Sorensen XT 30-2 oraz systemu szybkiego prototypowania z procesorem sygnałowym. System ten umożliwia akwizycję i sterowanie układami rzeczywistymi w oparciu o struktury sterowania opracowane w środowisku Matlab – Simulink oraz ich implementację w środowisku ControlDesk firmy dSpace. Zapewnia to wygodne i intuicyjne zadawanie parametrów badanego układu w zakresie sygnałów wymuszenia, zmianę parametrów regulatora i amplitudy zadanego położenia wirnika itp.

Dodatkowo, na pulpicie sterowania można obserwować zmiany uchybu regulacji położenia wirnika, przebiegi prądów sterujących przepływających przez cewki elektromagnesów oraz inne sygnały sterujące.



Rys. 5. Schemat strumieni magnetycznych w łożysku magnetycznym [1]

Fig. 5. The diagram of the magnetic flux in the magnetic bearing



Rys. 6. Stanowisko laboratoryjne do badania AMB:

a) homopolarne łożysko magnetyczne; b) stanowisko laboratoryjne

Fig. 6. The lab stand for experimental tests of the AMB:

a) the homopolar magnetic bearing; b) the lab stand

5. WYNIKI BADAŃ

Podczas badań eksperymentalnych zarejestrowano charakterystyki czasowe i częstotliwościowe układu, które przedstawiono na rysunku 7. Z charakterystyk tych widać, że czas regulacji układu wyniósł 0,08 s, przeregulowanie 60%, uchyb regulacji nie występował, natomiast dla częstotliwości około 1,25 kHz wystąpił szczyt rezonansowy o wartości 33 dB.

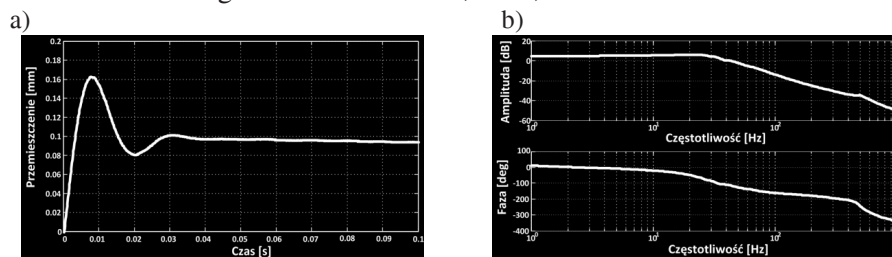
Otrzymane parametry regulacji podczas eksperymentu różnią się od tych uzyskanych podczas symulacji w pakiecie Matlab – Simulink.

Rozbieżności te wynikają z nieuwzględnienia podczas analizy matematycznej charakterystyki sprzętowej układu regulacji (wzmacniaczy mocy, kart oraz czujników pomiarowych). Badaniom symulacyjnym został poddany jedynie obiekt regulacji, którym jest łożysko magnetyczne z magnesami trwałymi.

Przeprowadzona analiza stabilności wykazała, że łożysko to nie zachowuje stateczności w układzie z regulatorem typu P. Stan równowagi osiąga w przypadku zastosowania regulatora PD, a najlepszymi parametrami regulacji cechuje się układ z regulatorem PID. Spostrzeżenia te potwierdzają zarówno badania symulacyjne, jak i eksperymentalne.

Parametry regulatorów w metodzie symulacyjnej zostały dobrane na podstawie analizy matematycznej łożyska (po linearyzacji sił na nie działających). Założono, że układ regulacji będzie układem nadążnym, składającym się z pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego oraz regulatora włączonego w tor główny sterowania. Wybrano taką konfigurację ze względu na lepsze parametry regulacji oraz dostępną realizację sprzętową. Otrzymane parametry regulatorów przeskalowano, uwzględniając charakterystykę sprzętową układu (przeskalowanie kart pomiarowych) oraz formę sygnałów pomiarowych i sterujących (zamiana przemieszczenia na napięcie) [5].

Regulator PID: $P = 2.7$, $I = 1$, $D = 0.003$



Rys. 7. Charakterystyki eksperymentalne układu:
a) charakterystyka skokowa; b) charakterystyka Bode

Fig. 7. The experimental characteristics:
the step response; b) the Bode characteristic

6. PODSUMOWANIE

Wraz z rozwojem techniki w dziedzinie napędów elektrycznych (technologia MEA) zaczęto poszukiwać rozwiązań, które nadawałyby się do eksploatacji w przestrzeni kosmicznej oraz obszarze narażonym na oddziaływanie substancji niebezpiecznych. Wtedy to na bazie innych technologii powstała technologia zawiesznień magnetycznych.

Do jej istotnych zalet należały przede wszystkim eliminacja konieczności smarowania łożysk oraz ich wymiany. Nowa technika miała zapewnić ich trwałość eksploatacyjną oraz zminimalizować ilość obsług konserwacyjnych.

Zawieszenie wału za pomocą siły magnetycznej generowanej przez łożysko magnetyczne zwiększa obszar zastosowań oraz przedłuża rewers urządzeń. Powstaje jednak potrzeba opracowania odpowiedniego systemu sterowania, który utrzymywałby wirnik w zadanym położeniu w szczelinie powietrznej.

W artykule opisano zaprojektowane stanowisko do badania właściwości aktywnego zawieszenia magnetycznego pod kątem zastosowania go w lotniczym układzie wykonawczym. Składa się ono z łożyska magnetycznego, ferromagnetycznego wirnika, analogowego wzmacniacza mocy, zbliżeniowych czujników wiropędowych, komputera klasy PC wraz z oprogramowaniem. Niektóre z tych elementów można zastąpić elementami alternatywnymi, które zwiększą jakość układu sterowania. Zamiast czujników wiropędowych można w układzie zastosować czujniki indukcyjnościowe (lub inne czujniki bezkontaktowe, np. pojemnościowe, optyczne). Obniżają one znacznie cenę łożyska magnetycznego oraz dają możliwość połączenia elementów wykonawczych z elementami pomiarowymi. Natomiast włączenie do układu regulacji sterownika cyfrowego współpracującego z procesorem sygnałowym daje możliwość adaptacji sterowania do zmieniających się właściwości eksploatacyjnych.

Technologię łożysk magnetycznych można z powodzeniem zastosować w lotniczych układach wykonawczych. W obecnie stosowanych rozwiązaniach stosuje się klasyczne łożyska kulkowe, które w nowoczesnym rozwiązaniu należałoby zastąpić elementami zawieszenia magnetycznego. Dzięki takiemu rozwiązaniu wyeliminowane zostałyby siły tarcia między wirnikiem a statorem. W ten sposób można otrzymać bezłożyskowy napęd elektryczny, charakteryzujący się lepszymi właściwościami dynamicznymi, wysoką niezawodnością oraz bezpieczeństwem pracy.

LITERATURA

- [1] Gosiewski Z., *Łożyska magnetyczne do maszyn wirnikowych. Sterowania i badanie*, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa, 1999.
- [2] Gosiewski Z., Falkowski K., *Wielofunkcyjne łożyska magnetyczne*, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa, 2003.
- [3] Moir I., Seabridge A., *Aircraft Systems Mechanical, electrical, and avionics subsystem integration*, Jon Wiley & Sons Ltd., 2008.
- [4] International Standard Norm ISO 14839 – 1:2002. *Mechanical vibration – Vibration of rotating machinery equipped with active magnetic bearings – Part 1: Vocabulary*.

- [5] Mazurek P., *Projekt koncepcyjny układu sterowania aktywnym zawieszeniem w lotniczym układzie wykonawczym*, praca dyplomowa pod kierownictwem dr. inż. Macieja Henzla, Warszawa, 2010.

The Control System of the Active Magnetic Bearing in the Aircraft Nacelle Actuation

Maciej HENZEL, Paulina MAZUREK

Abstract. The flight control system of the modern aircrafts, i.e. Boeing 787 and Airbus A380, are designed in the “more electric aircraft” technology (MEA). This technology make an assumption of the use more electrical elements in onboard systems to reduce weight of the pneumatic and hydraulic piping, easier maintainability and finally is enhanced safety of the flight. The adoption of MEA is brought the active magnetic bearing (AMB) to eliminate the friction force in practical application. The technology explores novel approaches to design the development of electrically powered actuators used to operate flight control surfaces.

In the paper there are presented the simulation and experimental results of the active magnetic bearing to use this technology in actuation systems. There are examining the homopolar magnetic bearing, which are designed in the Faculty of Avionics and Aviation Armament. During the experimental testing of the system there are measured the step responses and Bode characteristics of the control system with PD and PID controller. The parameters of the control system are assigned during the simulation in the Matlab – Simulink software. There are shown the construction of the active magnetic bearing and the structure of the lab stand.

Keywords: mechanics, magnetic bearing, actuator