

Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego  
Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa  
Instytut Techniki Lotniczej  
Zakład Awioniki



Streszczenie pracy doktorskiej  
mgr inż. Paulina KURNYTA-MAZUREK

## OPRACOWANIE I BADANIA ZAAWANSOWANYCH ALGORYTMÓW STEROWANIA MAGNETYCZNYM PODPARCIEM WIRNIKA SILNIKA ODRZUTOWEGO

Promotor: prof. dr hab. inż. Tomasz SZOLC, IPPT PAN

Promotor pomocniczy: ppłk dr inż. Maciej HENZEL, WML WAT

W prezentowanej rozprawie zastosowano interdyscyplinarne podejście do problemu sterowania położeniem wirnika maszyny szybkoobrotowej w magnetycznym układzie łożyskowania. Założono, że zastosowanie algorytmów predykcyjnych w magnetycznym układzie podparcia wirnika silnika odrzutowego poprawi własności dynamiczne układu sterowania oraz zmniejszy poziom amplitud drgań wirnika. Na tej podstawie sformułowano cel rozprawy doktorskiej, którym było wykonanie badań porównawczych teoretycznych i doświadczalnych przy wykorzystaniu klasycznego algorytmu sterowania i zaawansowanych predykcyjnych algorytmów sterowania dla oceny ich efektywności w zastosowaniach lotniczych, a w szczególności w układach łożyskowania magnetycznego wirników silników odrzutowych.

W pracy przedstawiono szczegółową charakterystykę predykcyjnych algorytmów sterowania wykorzystujących model parametryczny jak i nieparametryczny obiektu. Opisano przyjętą koncepcję i projekt magnetycznego układu podparcia wirnika silnika odrzutowego. Dodatkowo, przedstawiono wyniki analiz numerycznych metodą elementów skończonych zaprojektowanych podpór magnetycznych wykonanych przy wykorzystaniu programu Comsol Multiphysics. Wyznaczono tutaj m.in. rozkład indukcji magnetycznej oraz wypadkowe siły elektromagnetyczne generowane przez osiowe i promieniowe łożysko magnetyczne w różnych warunkach pracy przy stałej wartości prądu sterującego i zmiennej wartości szczeliny powietrznych. Otrzymane wyniki badań zapewniły w dalszych etapach realizacji pracy uzyskanie zakładanej na etapie projektowania siły elektromagnetycznej, a tym samym potwierdziły zdolność zaprojektowanego układu łożyskowania do przenoszenia przewidywanych obciążeń osiowych i promieniowych.

Podczas przeprowadzania badań teoretycznych przyjęto dwa modele matematyczne układu łożyskowania wirnika uwzględniające klasyczne podejście stosowane w dynamice maszyn wirnikowych, gdzie siły sprężyste podparcia łożyskowego traktowane są jako sumy iloczynów współczynników sztywności podpór łożyskowych i przemieszczeń promieniowych czopów wałów oraz współczynników tłumienia i prędkości promieniowych tych czopów. Natomiast, w drugim modelu (który posłużył do zaprojektowania algorytmów sterowania) potraktowano siły podparcia wirnika jako obciążenia zewnętrzne zależne od odpowiedzi układu.

Przeprowadzona analiza dynamiczna układu łożyskowania pozwoliła na określenie newralgicznych warunków pracy układu, przy których w późniejszym etapie badań dokonano sprawdzenia efektywności działania algorytmów sterowania. Dodatkowo, określono tutaj również zakres możliwości stosowania modelu sztywnego wirnika.

Podczas realizacji badań doświadczalnych zarejestrowano przebiegi czasowe prądu sterującego, przebiegi czasowe pionowych oraz poziomych przemieszczeń czopów łożyskowych wirnika, a także przebiegi czasowe wymuszenia kinematycznego przyłożonego do układu. Pomiarów dokonywano w różnych stanach pracy wirnika, tj. przy zerowej prędkości obrotowej i działaniu wymuszenia kinematycznego, w stanie nieustalonym przy rozruchu wirnika oraz w stanie ustalonym przy stałych prędkościach obrotowych. Dodatkowo, w stosunku do zarejestrowanych przebiegów czasowych przemieszczenia wirnika przy stałych prędkościach obrotowych wykonano analizę widmową FFT. Plan badań doświadczalnych przygotowano w taki sposób, aby ich wyniki można było porównać z wynikami uzyskanymi podczas badań teoretycznych wykonanych przy wykorzystaniu oprogramowania Matlab i SIMULINK.

Miarą efektywności zastosowanych predykcyjnych algorytmów sterowania były następujące wskaźniki: maksymalne amplitudy drgań czopów łożyskowych wirnika, maksymalne wartości prądów sterujących, a także parametry określające jakość regulacji, takie jak czas regulacji  $t_r$ , przeregulowanie  $A$  i uchyb regulacji w stanie ustalonym  $e_{ust}$ . Wyniki badań teoretycznych oraz doświadczalnych potwierdziły, że predykcyjne algorytmy sterowania położeniem wirnika w szczelinie powietrznej łożyska magnetycznego dają możliwość uzyskania lepszych własności dynamicznych niż układy sterowania z regulatorem PD, w tym powodują zmniejszenie amplitud drgań wirnika.

Po zrealizowaniu badań doświadczalnych została również przeprowadzona walidacja przyjętego modelu matematycznego, której wyniki potwierdziły słuszność przyjętych założeń. Ponadto, przedstawione rezultaty walidacji modelu matematycznego pozwalają przypuszczać, że zastosowanie predykcyjnych algorytmów sterowania pozwoli zminimalizować wpływ zjawiska rezonansu występującego w klasycznych układach łożyskowania.

Spełnienie podstawowego celu pracy przez teoretyczne i laboratoryjne zbadanie zaawansowanych algorytmów sterowania magnetycznym podparciem wirnika silnika odrzutowego oraz wyselekcjonowanie metod najbardziej odpowiednich sprawia, że ta perspektywiczna koncepcja łożyskowania staje się coraz bardziej realna. Ten fakt można uznać za tezę wynikającą z przeprowadzonych badań w tej rozprawie.

Paulina Keyka-Morcia