

Prof. dr hab. inż. Zdzisław Gosiewski
Politechnika Białostocka

Opacz Kolonia, 1. 09.2021

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Pauliny Kurnyta-Mazurek** nt.
**Opracowanie i badania zaawansowanych algorytmów sterowania
magnetycznym podparciem wirnika silnika odrzutowego**

Promotor: prof. dr hab. inż. Tomasz Szolc,

Promotor pomocniczy: ppłk dr inż. Maciej Henzel

Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

Lokalizacja tematyki rozprawy w technice

Tarcie w obrotowych parach kinematycznych ma wiele wad. Szczególne dotyczy to łożysk w maszynach wirnikowych. Poszukuje się rozwiązań je eliminujących. Do nich zaliczyć można łożyskowanie magnetyczne, gdzie sterowane siły pola magnetycznego niwelują nie tylko siły ciężkości, ale również przeciwdziałają innym siłom generowanym przez ruch wirnika czy przez proces realizowany w maszynie wirnikowej. Jednakże nośność tych łożysk jest znacznie niższa niż łożysk tocznych czy ślizgowych, a sam obiekt (wirnik) bez układu sterowania jest strukturalnie niestabilny. Tym samym właściwe zaprojektowanie układu sterowania jest kluczowym problemem przy rozpatrywaniu dynamiki maszyn wirnikowych z magnetycznymi węzłami łożyskowymi. W rozprawie doktorskiej mgr inż. Paulina Kurnyta-Mazurek przebadła różne prawa sterowania, szczególnie predykcyjne, celem znalezienia takich, które najlepiej spełniają kryteria jakości zamkniętego układu sterowania. Badania te przeprowadzone zostały dla modelu laboratoryjnego maszyny wirnikowej, której wirnik znacznie różni się od wirnika silnika odrzutowego. Tym samym tytuł pracy wydaje się być nieco mylący, gdyż praca dotyczy przede wszystkim projektowania i badania predykcyjnych praw sterowania dla tego łożyskowanego magnetycznie modelu laboratoryjnego wirnika.

Krytyczne omówienie pracy

Rozprawa liczy 189 stron, składa się z: Wprowadzenia, 5 rozdziałów, bibliografii (54 pozycje), spisu ważniejszych skrótów i oznaczeń oraz 2 załączników. We Wprowadzeniu zawarty jest przegląd literatury, na bazie którego Doktorantka wzorem firmy Roll-Royce postanowiła zbadać możliwości magnetycznego łożyskowania wirników w silnikach odrzutowych, szczególnie prądnico-rozrusznika wysokiego ciśnienia. Jest to zgodne ze światowym trendem rozwojowym wyrażonym hasłem „More Electric Engine”. Ponadto w tym krótkim rozdziale, na bazie literatury, zawarty jest przegląd typów łożysk magnetycznych i metod sterowania aktywnym zawieszeniem wirników. Zalety sterowania predykcyjnego skłoniły Doktorantkę do sprawdzenia pakietu tych metod w łożyskowaniu magnetycznym. Takie metody sterowania najlepiej sprawdzają się w przypadku obiektów z opóźnieniami. Te opóźnienia mają różne przyczyny, ale Doktorantka ich nie uwypukliła w przypadku rozpatrywanego obiektu.

W rozdziale 1 prezentowane są metody projektowania praw sterowania ruchem wirnika, które zostaną zastosowane na potrzeby sterowania zawieszeniem magnetycznym. Ruch wirnika będzie analizowany w płaszczyznach czopów łożyskowych zarówno podczas badań symulacyjnych jak i podczas badań laboratoryjnych. Pani Kurnyta-Mazurek zaprezentowała metodę strojenia regulatora PD, oraz zasady projektowania sześciu typów regulatorów predykcyjnych bazujących zarówno na modelu parametrycznym jak i nieparametrycznym obiektu. Na tym etapie analizy metody projektowania zostały zilustrowane przykładami numerycznymi przy użyciu prostych modeli matematycznych obiektu. Niestety są to różne modele obiektu sterowania – nie można więc na tym etapie porównać parametrów jakościowych zamkniętych układów sterowania.

W rozdziale drugim zgodnie z klasyczną regułą projektowania Autorka prezentuje kilka koncepcji zawieszenia wirnika silnika odrzutowego w łożyskach magnetycznych. Silnik odrzutowy TS-21 (o maksymalnej prędkości obrotowej równej 50500 obr/min) jest tym prototypem, którego konstrukcja ma ulec modyfikacji na potrzeby łożyskowania magnetycznego. Pokazana na rys. 2.6 modyfikacja nie jest według mnie najlepszym rozwiązaniem, gdyż (1) lokalizacja tarcz łożyska osiowego utrudni przepływ powietrza w kanale gazodynamicznym silnika, (2) umieszczenie łożyska #2 w części gorącej silnika będzie wymagało intensywnego chłodzenia, aby jego temperatura nie przekroczyła punktu Curie. Konstrukcję samych łożysk magnetycznych opisanych w tym rozdziale oceniam bardzo wysoko. Ich podstawowe parametry zostały wyznaczone na drodze obliczeń numerycznych. O istotnym znaczeniu tego etapu projektowania świadczy osiągnięcie maksymalnej wartości osiowej siły elektromagnetycznej równej 1500 N i promieniowej – 130 N, a więc wystarczających dla tego typu silnika odrzutowego pod warunkiem, że nie wykonuje on manewrów generujących duże przyspieszenia. To czego brakuje - to zestawienie wszystkich parametrów w postaci tabelarycznej, co w sposób istotny utrudniać będzie odtworzenie tych rozwiązań przez Czytelnika. Przyjęte zostało założenie, że wirnik można traktować jako bryłę sztywną, co przy łożyskowaniu magnetycznym dla małych prędkości obrotowych jest słusznym założeniem. Ale przecież ten wirnik ma

obracać się nawet 840 obr/s, a więc wykres Campbella powinien być analizowany co najmniej do tej częstości. Dla modelu wirnika sztywnego w tym rozdziale zostały obliczone nastawy regulatora PD, a następnie zostały przeprowadzone badania dynamiki układu zamkniętego z wykorzystaniem pakietu programów Matlab.

Rozdział 4 poświęcony jest badaniom różnych metod sterowania predykcyjnego zastosowanych w zawieszeniu magnetycznym wirnika. Doktorantka zaczęła od analizy dynamiki układu o jednym stopniu swobody, czyli dynamiki ruchu masy w jednym łożysku wzdłuż jednej osi sterowania. I o ile rys. 4.10 może wprowadzać w błąd, to rys. 4.20 jasno pokazuje, że wykorzystując klasyczny regulator PD wirnik jest najpierw stabilnie zawieszony w łożyskach magnetycznych, aby następnie pętlą zewnętrzną z regulatorem predykcyjnym modyfikowane było jego zachowanie dynamiczne. Można by było oczywiście korzystając z parametrów Markowa odpowiedzi impulsowej układu zamkniętego (patrz rozdział 5 w pozycji literaturowej [8]) zidentyfikować parametry układu otwartego i dla tego obiektu budować układ sterowania predykcyjnego. Jednak wówczas odpadłyby te metody predykcyjne, które oparte są na odpowiedzi impulsowej lub skokowej. Jeśli regulacja predykcyjna działa równolegle z regulacją PD, to zachodzi pytanie, czy wyniki przedstawiające na przykład prąd sterujący prezentują prąd zużyty przez jedną czy przez dwie pętle regulacyjne? Nie znalazłem odpowiedzi na to pytanie w treści pracy. Uważam również, że jeśli chcemy porównać układy sterowania, to należałoby porównywać regulatory predykcyjne z regulacją PID. Okazałoby się, że nie byłoby tak dużych różnic na przykład w wartościach uchybu ustalonego, gdyż część całkowita regulatora PID teoretycznie może zredukować uchyb do zera.

W dalszej części tego rozdziału Autorka powtórzyła te badania symulacyjne dla całego sztywnego wirnika, czyli do układu jednoczesnego sterowania wszystkimi czterema osiami łożysk promieniowych. Przeprowadziła symulację podnoszenia wirnika przez łożyska magnetyczne oraz jego rozruchu do prędkości obrotowej wynoszącej 6000 obr/min. Zarejestrowane zostały przebiegi czasowe ruchu osi wirnika w płaszczyznach łożyskowych dla przyjętych niewyważień statycznych i dynamicznych. Ponadto analizowane były ruchy wirnika podanego skokowym wymuszeniem siłowym i kinematycznym. Bez istotnych problemów wirnik przekracza prędkości krytyczne wynoszące (według tekstu na str.109) 43,4 obr/s i 50,1 obr/s lub (według tekstu na str.113) 50 obr/s i 74 obr/s.. Tu ponownie brak jest tabeli prezentującej wszystkie parametry układu, użyte w badaniach symulacyjnych. Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych stwierdzono, że najlepszymi wskaźnikami jakości regulacji wykazują się dwa algorytmy (1) EHAC (ang. Extended Horizon Adaptive Control) bazujący na modelu parametrycznym obiektu z horyzontem predykcji równym 15 oraz (2) MAC (ang. Model Algorithmic Control) bazujący na modelu nieparametrycznym z horyzontem predykcji równym 10. Należy dodać, że te badania symulacyjne zostały przeprowadzone dla prędkości wirnika nie przekraczających 200 obr/s. Zakres badań symulacyjnych Doktorantka dostosowała do planu badań eksperymentalnych.

Rozdział piąty zawiera prezentację wyników badań eksperymentalnych przeprowadzonych na modelu laboratoryjnym maszyny wirnikowej. Zaczyna się od

opisu wyposażenia kontrolno-pomiarowego stanowiska laboratoryjnego, a zdjęcie obiektu sterowania jest przedstawione na rys.5.2. Podczas badań predykcyjnych algorytmów sterowania rejestrowane były przebiegi czasowe prądu płynącego przez pary cewek elektromagnesów, przebiegi czasowe przemieszczania się czopów łożyskowych wirnika w kierunkach pionowym i w poziomym, a także przebiegi czasowe wymuszeń kinematycznych, którym poddawany był wirnik. Pomiarów wykonywano zarówno dla nieobracającego się wirnika, podczas procesu rozruchowego, jak i przy ustalonych różnych prędkościach obrotowych sięgających 2000 obr/min. Następnie przebiegi te były analizowane zarówno w dziedzinie czasu jak i dziedzinie częstotliwości z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera.

Nieoczekiwanie przy badaniu obracającego się wirnika pojawiły się liczne składowe harmoniczne częstotliwości podstawowej związanej z prędkością obrotową wirnika o charakterze bardzo podobnym do widma pękającego wału. Jak wykazała Doktorantka tym razem anizotropia sztywności miała związek z konstrukcją podatnego sprzęgła, łączącego wirnik z napędzającym go silnikiem elektrycznym. Po stosownej modyfikacji modelu matematycznego i symulacyjnego ich widma upodobniły się do widma sygnału uzyskanego na stanowisku laboratoryjnym. W wyniku przeprowadzonych badań Autorka stwierdziła, że przy zerowej prędkości obrotowej wirnika najlepsze wskaźniki jakości zamkniętego układu regulacji uzyskane zostały przez regulator MAC, natomiast najmniejsze wartości międzyszczytowe ruchu czopów łożyskowych przy różnych prędkościach obrotowych osiągane są dla różnych algorytmów sterowania. Ogólnie można potwierdzić, że zastosowanie dodatkowej pętli sterowania z regulatorem predykcyjnym poprawia wskaźniki jakościowe zamkniętego układu regulacji.

We Wnioskach Końcowych Dyplomantka podkreśla, że ograniczyła zakres badań eksperymentalnych dynamiki maszyny wirnikowej do prędkości jej wirnika nie przekraczającej 2000 obr/min, a więc nie zostały przekroczone prędkości krytyczne wirnika. Natomiast badania w procesie symulacji komputerowej były realizowane do prędkości 6000 obr/min, a więc powyżej prędkości krytycznych związanych z postaciami translacyjną i rotacyjną wirnika sztywnego. W tych zakresach prędkości dobrze swoją rolę spełniają wybrane regulatory predykcyjne EHAC i MAC. Należy jednak pamiętać, że tak rozbudowane algorytmy sterowania mocno obciążają obliczeniowo procesor, co nie jest bez znaczenia przy tak szybkim procesie regulowanym jakim są drgania wysokoobrotowej maszyny wirnikowej.

Ocena pracy

Uwagi krytyczne dotyczące rozprawy zawarłem w pierwszej części recenzji. Dlatego teraz odniosę się do osiągnięć i zalet pracy. Praca jest obszerna i dobrze opisuje badania, które przeprowadziła Doktorantka. A zakres tych badań, szczególnie eksperymentalnych, jest imponujący - nawet jeśli częściowo korzystała ze wcześniej skonstruowanych urządzeń w ramach projektu PBS1/B6/7/2012 pt.: „Wykorzystanie nowych technologii inżynierii powierzchni i łożysk magnetycznych w budowie miniaturowego turbinowego silnika odrzutowego”. Wart podkreślenia jest fakt, że prezentowane w pracy metody sterowania i zaprojektowane algorytmy praw

sterowania zostały przez Doktorantkę przebadane w warunkach laboratoryjnych i poprzez symulacje komputerowe, a na potrzeby badań symulacyjnych zostały stworzone stosowne modele matematyczne. Postawione zadania projektowe i badawcze rozwiązywała w sposób konsekwentny, jak to przedstawiłem w omówieniu zawartości rozprawy. O poprawności rozwiązania zadania badawczego świadczy wiele faktów zawartych w pracy doktorskiej. Chciałbym tu je uwypuklić oraz przedstawić podstawowe zalety rozprawy ze względu na wybór opracowanego materiału oraz badawczy wkład Autorki. Są to:

- Wystarczający przegląd literatury celem określenia aktualnego stanu badań z zakresu łożyskowania magnetycznego wirników oraz wykorzystanie dotychczasowego zasobu wiedzy w rozwiązywaniu problemów wynikających z badań proponowanego nowego rozwiązania.
- Opracowanie koncepcji i realizacja programu badań, szczególnie badań eksperymentalnych.
- Wykorzystanie do projektowania konstrukcyjnego, budowania modeli matematycznych, komputerowych badań symulacyjnych i badań eksperymentalnych kilku rozbudowanych pakietów programów takich jak: Autodesk Inventor, Matlab/Simulink, Comsol Multiphysics, ControlDesk.
- Zaproponowanie zmian konstrukcyjnych małego silnika odrzutowego i przeprowadzenie eksperymentów identyfikacyjnych celem wyznaczenia ich parametrów.
- Zaprojektowanie układów sterowania i wyznaczenie praw sterowania w kilku przebadanych metodach sterowania.
- Przeprowadzenie wielu badań symulacyjnych celem oceny pracy układów sterowania oraz ich walidacji i porównania z wynikami badań eksperymentalnych.
- Zaprojektowanie, wykonanie i oprogramowanie stanowiska laboratoryjnego oraz zbudowanie odpowiednich torów pomiarowych i sterujących, głównie w oparciu o wyposażenie firmy dSpace na potrzeby badań eksperymentalnych.
- Przeprowadzenie obszernych badań laboratoryjnych, a następnie wyznaczenie wielu charakterystyk zarówno statycznych jak i dynamicznych dla zaproponowanych układów sterowania magnetycznym zawieszeniem wirnika.
- Zaproponowanie charakterystyk i wskaźników jakości, które pozwoliły na porównanie i ocenę poszczególnych rozwiązań zarówno od strony hardware'u jak i software'u.
- Wyciągnięcie wniosków z badań oraz wskazanie kierunków doskonalenia rozwiązań technicznych.

Rozwiązania powyższych problemów oraz zastosowane do rozwiązania narzędzia i metody świadczą o dobrym przygotowaniu Doktorantki do prowadzenia badań naukowych i o znakomitej wiedzy w zakresie obejmującym tematykę rozprawy doktorskiej. Obszerność pracy i zakres przeprowadzonych badań pracy świadczą o dużej pracowitości dysertacji.

Poczynione przeze mnie wcześniej krytyczne uwagi nie umniejszają wagi uzyskanych wyników. Powinny być natomiast uwzględnione w dalszych badaniach i

publikacjach wyników badań. Jeszcze raz podkreślam, że praca świadczy o dużej wiedzy Doktorantki i Jej przygotowaniu do samodzielnych badań.

Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska jest wartościowym opracowaniem naukowym, a jednocześnie ma bardzo duże znaczenie praktyczne. Biorąc pod uwagę zakres i poziom opracowania rozprawy doktorskiej, rzetelność przeprowadzonych badań i wnioskowań oraz ich praktyczne znaczenie dla rozwoju napędów lotniczych stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji praca pt. *„Opracowanie i badania zaawansowanych algorytmów sterowania magnetycznym podparciem wirnika silnika odrzutowego”* odpowiada warunkom stawianym rozprawom doktorskim w myśl stosownej Ustawy. Dlatego też wnoszę o dopuszczenie jej Autorki, mgr. inż. **Pauliny Kurnyta-Mazurek** do publicznej obrony.

