

dr hab. inż. Konrad Urbański
Instytut Robotyki i Inteligencji Maszynowej
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki
Politechnika Poznańska

Poznań, 15 lipca 2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Deepaka Vyasa

pt. **Investigation and synthesis of selected control systems of multi-phase interior permanent magnet synchronous machine**

1. Podstawa opracowania recenzji

Przedmiotem niniejszej oceny jest rozprawa doktorska mgr. inż. Deepaka Vyasa, pt. *„Investigation and synthesis of selected control systems of multi-phase interior permanent magnet synchronous machine”*, przygotowana na Politechnice Gdańskiej. Recenzja została opracowana w związku z powołaniem mnie na recenzenta wspomnianej rozprawy doktorskiej przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Gdańskiej (uchwała nr 384/VII/2024/AEEiTK z dnia 8 kwietnia 2025 r.), na podstawie dostarczonej rozprawy pod powyższym tytułem. Recenzja ma być wykorzystana w postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

2. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa, wraz z załącznikami, liczy 171 stron druku komputerowego. Składa się z aneksów formalnych, sześciu głównych numerowanych rozdziałów oraz bibliografii zawierającej 145 pozycji, w tym publikację współautorską, w której Kandydat jest pierwszym autorem. Praca zawiera również listę symboli oraz listę skrótów. Całość napisana jest poprawnym językiem, choć sporadycznie pojawiają się niejasności lub osobliwe błędy. Materiały graficzne (ilustracje, charakterystyki i przebiegi) zostały przygotowane starannie i są czytelne. Struktura i forma pracy nie budzą zastrzeżeń. Terminologia jest stosowana poprawnie.

Głównym celem rozprawy jest opracowanie, analiza i weryfikacja zaawansowanych strategii sterowania bezczujnikowego dla wielofazowych synchronicznych maszyn z magnesami trwałymi (IPMSM), ze szczególnym uwzględnieniem układów trój- i pięciofazowych. Badania mają na celu zaprojektowanie i implementację nowych struktur obserwatorów i metod sterowania, zwłaszcza opartych na transformacjach zmiennych multiskalarnych, w celu poprawy dokładności,



stabilności i właściwości dynamicznych napędów IPMSM. W rozprawie przeprowadzono ocenę skuteczności tych rozwiązań poprzez analizę teoretyczną, symulacje oraz badania eksperymentalne, a także porównano z istniejącymi technikami sterowania bezczujnikowego.

Sformułowano następujące tezy badawcze:

- *Zaproponowana transformacja multiskalarna, wykorzystana w stacjonarnym układzie odniesienia pięciofazowego IPMSM dla wektorów: $\psi_{f(i)}$, $i_{s(i)}$ oraz $\psi_{s(i)}$, $i_{s(i)}$, pozwala na wyznaczenie statycznych praw sprzężenia zwrotnego dla obu strategii sterowania.*
- *W proponowanych strukturach układu sterowania rozważane są klasyczne regulatory proporcjonalno-całkujące (PI), predykcyjne oraz typu backstepping. Ponadto, podejścia te zapewniają niezależne sterowanie zmiennymi stanu w podukładach elektromechanicznych i elektromagnetycznych, nawet przy wprowadzaniu trzeciej harmonicznej.*
- *W proponowanych strukturach sterowania, wykorzystanie wektorów $\psi_{f(i)}$, $i_{s(i)}$ oraz $\psi_{s(i)}$, $i_{s(i)}$ w stacjonarnym układzie odniesienia pięciofazowego IPMSM umożliwia wprowadzanie trzeciej harmonicznej w celu zwiększenia wartości momentu wyjściowego.*

Aby zrealizować założony cel pracy oraz udowodnić postawione tezy, Kandydat przeprowadził krytyczny przegląd literatury dotyczącej analizowanego zagadnienia, zaproponował odpowiednią metodykę badawczą oraz przeprowadził analizę uzyskanych wyników. Doktorant opracował metody sterowania (w tym adaptacyjne), zbudował modele symulacyjne badanych struktur oraz oprogramował i uruchomił badane układy w środowisku laboratoryjnym. Ponadto przeprowadzono badania symulacyjne, a uzyskane wyniki zostały zweryfikowane eksperymentalnie.

Struktura rozprawy jest następująca: rozdział pierwszy przedstawia tło problematyki, przegląd literatury dotyczącej metod sterowania bezczujnikowego oraz formułuje cele i hipotezy badawcze. W rozdziale drugim rozwinięto szczegółowe modele matematyczne trój- i pięciofazowych synchronicznych maszyn z magnesami trwałymi w różnych układach odniesienia, stanowiące podstawę dalszych analiz. Rozdział trzeci prezentuje i analizuje struktury obserwatorów dla estymacji prędkości i położenia wirnika w badanych maszynach, wraz z analizą stabilności. W rozdziale czwartym opisano różne klasyczne i zaawansowane struktury sterowania — takie jak polowo-zorientowane, predykcyjne i typu backstepping, oparte na transformacjach multiskalnych, dla obu typów maszyn. Rozdział piąty zawiera wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych, które potwierdzają skuteczność zaproponowanych struktur obserwatorów i sterowania, wraz z analizą porównawczą względem istniejących metod. W rozdziale szóstym podsumowano główne wyniki, odniesiono je do celów pracy oraz wskazano możliwe kierunki dalszych badań. Następnie zamieszczono bibliografię oraz dwa załączniki.

Uwaga formalna: W mojej kopii rozprawy znajduje się „oświadczenie” Kandydata dotyczące rozprawy o innym tytule niż recenzowana („Załącznik nr 3/1...” s.1 /bez numeracji/).

3. Ocena podjętego tematu

Rozprawa dotyczy analizy i syntezy wybranych struktur sterowania dla wielofazowych synchronicznych maszyn z magnesami trwałymi (IPMSM), ze szczególnym uwzględnieniem konfiguracji trój- i pięciofazowych. Temat ten jest istotny z perspektywy obecnych trendów w napędach elektrycznych. W szczególności badania nad sterowaniem bezczujnikowym i zaawansowanymi strukturami obserwatorów odnoszą się do praktycznych wyzwań związanych z kosztami, złożonością i niezawodnością tradycyjnych systemów opartych na czujnikach. Tematyka pracy ma znaczenie w kontekście zaawansowanych strategii sterowania nieliniowego i transformacji multiskalarnych stosowanych w maszynach wielofazowych. Rozprawa rozwiązuje konkretne wyzwania inżynierskie, w tym projektowanie i implementację algorytmów sterowania i estymacji odpowiednich do praktycznych zastosowań. Uważam, że zagadnienia podjęte w pracy są istotne zarówno z teoretycznego, jak i praktycznego punktu widzenia.

4. Ocena rozprawy

Ważną cechą tej rozprawy jest aktualność podjętego tematu. Kandydat w recenzowanej pracy zaprezentował pełny cykl badawczy, obejmujący sformułowanie problemu badawczego, analizę teoretyczną, symulacje oraz laboratoryjną weryfikację wybranych rozwiązań. Założony cel pracy został osiągnięty. Wyniki testów są interesujące i potwierdzają postawione tezy. Przebiegi ilustrujące wyniki są zasadniczo dobrze dobrane i czytelne, co znacząco ułatwia zrozumienie i analizę prezentowanych zagadnień. Wykresy i schematy są czytelne i odpowiednio opisane. Pewnym drobnym mankamentem jest sporadyczny brak przebiegów prądu w osi d (tam, gdzie to jest uzasadnione), zwłaszcza wartości mierzonych względem zadanych, a nie tylko estymowanych (których także czasem brakuje na wybranych ilustracjach).

Do głównych osiągnięć rozprawy należą:

1. Opracowanie i implementacja zaawansowanych strategii sterowania bezczujnikowego dla trój- i pięciofazowych IPMSM.
2. Zastosowanie transformacji multiskalarnych umożliwiających skuteczne odsprężanie podukładów elektromechanicznych i elektromagnetycznych.
3. Opracowanie i uruchomienie sterowania predykcyjnego dla pięciofazowego IPMSM.
4. Implementacja sterowania backstepping dla pięciofazowego IPMSM.

Dodatkowo Kandydat przeprowadził szeroką analizę porównawczą nowych rozwiązań z istniejącymi metodami sterowania, wskazując na ich praktyczne zalety i potencjał zastosowań przemysłowych.

5. Wątpliwości i uwagi dyskusyjne

Lektura rozprawy nasunęła mi kilka pytań i uwag. Większość z nich ma charakter dyskusyjny, dlatego też proszę, aby Kandydat odniósł się do nich w trakcie publicznej obrony.



1. Rozprawa dotyczy sterowania bezczujnikowego maszyn elektrycznych, jednak aspekt ten nie został odzwierciedlony w tytule pracy - proszę o wyjaśnienie powodu pominięcia tej informacji.
2. Na stronie 3 zdanie „*Sensorless control techniques for IPMSM drive can be classified based on zero and low speed range and medium and high-speed range (speed above 10% of the rated speed)*” nie określa jasno, jak zdefiniowano zakres prędkości „above 10% of the rated speed”.
3. Nie jest to zarzut merytoryczny, lecz raczej uwaga formalna: moim zdaniem zakres struktur sterowania i zagadnień analizowanych w rozprawie jest na tyle obszerny, że mógłby stanowić podstawę do co najmniej dwóch osobnych doktoratów.
4. Wyniki przedstawiono głównie w formie wykresów, przebiegów i porównań opisowych, bez zastosowania formalnych miar oceny. W rozprawie nie zdefiniowano jednoznacznych kryteriów oceny ani funkcji jakości, zarówno w części teoretycznej, jak i przy prezentacji wyników. Ponadto wiele przedstawionych przebiegów różni się jedynie nieznacznie, przez co trudno jednoznacznie wskazać (przy braku określonej funkcji jakości), które struktury sterowania są „lepsze”, a które „gorsze”.
5. W pracy badane są struktury sterowania poprzez testy układów powstałych z różnych kombinacji strategii sterowania dla plane 1 i plane 2. Brak jest jednak wstępnej analizy teoretycznej omawiającej zalety i wady tych kombinacji - autor ogranicza się do analizy uzyskanych wyników, co niekorzystnie wpływa na jakość wniosków. Dodatkowo, duża liczba testowanych kombinacji, które dają w rezultacie niewielkie różnice, a także brak jasnych kryteriów oceny utrudnia sformułowanie jednoznacznych wniosków.
6. Rysunek 4.8 opisany jest jako „*control structure*”, jednak typowa struktura sterowania kończy się sygnałem sterującym, a nie „*analysis and conclusion*”. Schemat ten nie jest wyjaśniony w tekście pracy. Trudno określić cel lub znaczenie tego schematu.
7. Dla stosunkowo prostych układów przedstawionych na rys. 4.13 i 4.14, nastawy regulatorów w $G_{12CL(i)}$ i $G_{22CL(i)}$ zostały „wyznaczone”. Dlaczego nie zostały wyliczone? Czy tych nastaw nie da się wyznaczyć według określonego kryterium?
8. Pomimo dużej liczby testów, uzyskanych wyników symulacyjnych i eksperymentalnych, nie można bezpośrednio porównać ze względu na różnice w dynamice modelu i układu rzeczywistego (prawdopodobnie wynikające z rozbieżności parametrów modelu i obiektu rzeczywistego), a także ze względu na dobór różnych sygnałów do wizualizacji. To istotne ograniczenie pracy, ponieważ walidacja eksperymentalna założeń teoretycznych oraz umiejętność utworzenia modelu zgodnego z rzeczywistym obiektem są kluczowymi aspektami pracy doktorskiej. W pracy brakuje porównania modelu z obiektem rzeczywistym.
9. W analizie układu bezczujnikowego FOC w osiach dq dla PMSM rzeczywista wartość prądu i_d jest istotnym wskaźnikiem poprawności działania. Na wykresach ilustrujących działanie układu (np. rys. 5.6 i dalsze) brakuje tych kluczowych przebiegów. Wartość

estymowana i_d^* , pokazana na innych ilustracjach (np. rys. 5.12), bez znajomości błędu śledzenia prądu i_d , nie jest dostatecznie informatywna.

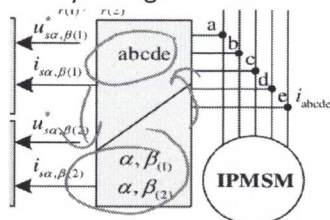
10. W analizie układu bezczujnikowego FOC w osiach dq dla PMSM, testy nawrotu z regulatorem momentu pracującym w ograniczeniu lub nawrotu bez obciążenia zostały poprawnie przeprowadzone. Jednakże można by uwzględnić dodatkowe testy – takie jak nawroty pod obciążeniem lub nawroty bez regulatora momentu pracującego w ograniczeniu. Dlaczego ograniczenie prądowe było ustawione na niską wartość? Czy możliwy jest nawrót bez pracy w ograniczeniu regulatora momentu? Pytanie dotyczy układu eksperymentalnego.
11. Proszę o rozwinięcie stwierdzenia dotyczącego rys. 5.6, gdzie podano, że oscylacje prędkości w tym układzie w warunkach eksperymentu wynikają z asymetrii maszyny. O jaką asymetrię chodzi? Czy dotyczy to tylko układu bezczujnikowego? Czy znajduje to potwierdzenie w wynikach symulacji?
12. Czy wszystkie dane liczbowe zawarte w tabelach Załącznika A są poprawne?

6. Dodatkowe uwagi redakcyjne

1. Lista skrótów oraz lista symboli nie są uporządkowane (np. alfabetycznie), co utrudnia odnalezienie wybranych oznaczeń.
2. Strona 16: skrót „mmf” nie został rozwinięty.
3. Strony 17 i 26: w tekście pojawia się „emf”, podczas gdy w liście skrótów figuruje „EMF”.
4. W niektórych miejscach pojawia się poprawne wyrażenie „ J is the moment of inertia”, podczas gdy w innych występuje „ J is inertia”, co w tym kontekście nie jest precyzyjne.
5. Strona 40 i kolejne: pojawiają się dziwne wtrącenia w tekście. Czy są to listy słów kluczowych? Nie są to pełne zdania ani wyjaśnienia.

In Fig. 3.2 (a), $c_\alpha = 1.0$ p.u. to 10.0 p.u. and $c_\theta = 0.0$ p.u., for $\omega_r = 1.0$ p.u., $\gamma = 0.2$ p.u., $k_c = 0.05$ p.u., $c_z = 0.05$ p.u., $T_L = 1.0$ p.u.

6. Na wielu schematach, począwszy od rys. 4.2, bloki transformacji współrzędnych, takie jak $abc(de)/\alpha\beta$ oraz $\alpha\beta/dq$, są schematycznie rysowane bez odniesienia do rzeczywistego kierunku transformacji.



7. Brakuje komentarza dotyczącego operacji „ $\odot$ ” i „ $\otimes$ ” użytych w równaniach 4.29, 4.31 i innych.
8. Czy na rys. 4.9 brakuje oznaczeń „^” dla zmiennych $x_{ij(i)}$ na wyjściu bloku „multi-scalar variables”?

9. Rys. 4.13, 4.14, 4.17: dlaczego w tych prostych układach z pomiarem w sprzężeniu zwrotnym pojawiają się estymowane wartości („^”)?
10. Dlaczego w spisie bibliografii nazwiska niektórych autorów lub tytuły są wyróżnione?
11. W pracy występuje szereg literówek i drobnych błędów pisowni.

7. Wniosek końcowy

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na ogólną, **pozytywną ocenę rozprawy**. Rozprawa doktorska mgr. inż. Deepaka Vyasa pod tytułem „*Investigation and synthesis of selected control systems of multi-phase interior permanent magnet synchronous machine*” zawiera oryginalny i wartościowy dorobek naukowy. Założony cel pracy został osiągnięty.

Podsumowując, można stwierdzić, że przedstawiona **praca spełnia wymagania** stawiane rozprawom doktorskim. Recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i świadczy o szerokiej wiedzy teoretycznej Kandydata w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz o zdolności do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa doktorska w mojej opinii spełnia wymagania określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2024, poz. 1571) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

15.7.25r.

