

dr hab. inż. Konrad Urbański
Politechnika Poznańska
Instytut Automatyki, Robotyki i Inżynierii Informatycznej
ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań

Poznań, 30 sierpnia 2017 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Karola Wróbla

pt.: **Analiza predykcyjnych metod sterowania napędami z silnikami indukcyjnymi**

1. Podstawa opracowania recenzji

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska mgr. inż. Karola Wróbla z Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej, pod tytułem *Analiza predykcyjnych metod sterowania napędami z silnikami indukcyjnymi*. Recenzja została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej (pismo W-5/862/2017 z dnia 14 lipca 2017 r.) na podstawie dostarczonej rozprawy doktorskiej pod wyżej wymienionym tytułem. Recenzja ma być wykorzystana w postępowaniu o nadanie mgr. inż. Karolowi Wróblowi stopnia naukowego doktora nauk technicznych w zakresie nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika.

2. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa liczy 177 stron druku komputerowego. Składa się z siedmiu rozdziałów podstawowych, spisu literatury zawierającego 112 pozycji, w tym trzy prace, w których mgr inż. Karol Wróbel jest współautorem. W rozprawie umieszczono także trzy załączniki. Na początku rozprawy znajdują się wykazy ważniejszych oznaczeń. Praca jest napisana poprawnym językiem, materiały graficzne (zdjęcia, charakterystyki i przebiegi) są przygotowane starannie i w znakomitej większości przypadków czytelne. Układ pracy nie budzi istotnych zastrzeżeń. Terminologia jest używana poprawnie. Autor rozprawy nie ustrzegł się jednak drobnych błędów edytorskich.

Kandydat określił dwa cele pracy, główny i dodatkowy. Jako cel główny określono „*opracowanie i przetestowanie w badaniach symulacyjnych oraz eksperymentalnych predykcyjnych (ze skończonym i nieskończonym zbiorem rozwiązań) algorytmów regulacji prędkości przekształtnikowych układów napędowych z silnikiem indukcyjnym oraz krytyczna analiza otrzymanych wyników*”. Jako cel dodatkowy określono „*opracowanie układów predykcyjnych (ze skończonym zbiorem rozwiązań) sterowania momentem oraz układu sterowania pozycją (z nieskończonym zbiorem rozwiązań) silnika indukcyjnego*”.

Bazując na przedstawionych celach pracy postawiono następujące tezy:

1. „Zastosowanie sterowania predykcyjnego w napędzie z silnikami indukcyjnymi zapewnia optymalną dynamikę w różnych stanach pracy przy znamionowych parametrach napędu”.
2. „Możliwe jest zaprojektowanie i praktyczne wdrożenie predykcyjnego układu sterowania prędkością silnika indukcyjnego ze skończonym zbiorem rozwiązań. Przez sformułowanie 'optymalna dynamika' widoczne w tezie pierwszej, rozumie się taki dobór parametrów regulatora predykcyjnego minimalizujący przyjętą postać funkcji celu przy znamionowych (użytych w algorytmie) parametrach napędu. Zapewnia to minimalizację odchylenia od zadanej trajektorii przy jednoczesnym ograniczeniu energii dostarczanej do układu”.

Aby zrealizować postawione cele i udowodnić postawione tezy autor dokonał krytycznego przeglądu literatury dotyczącej analizowanej tematyki, przeprowadził ocenę przydatności modeli silnika indukcyjnego do budowy predykcyjnych algorytmów regulacji, opracował predykcyjne regulatory ze skończonym zbiorem rozwiązań i z nieskończonym zbiorem rozwiązań, przeprowadził badania symulacyjne oraz eksperymentalnie zweryfikował wybrane struktury sterowania. Struktura rozprawy jest następująca:

- rozdział pierwszy zawiera wstęp oraz przegląd literatury z zakresu sterowania predykcyjnego i układów napędowych z silnikiem indukcyjnym, przedstawiono w nim też cele pracy, jej zakres tezy. W rozdziale drugim zamieszczono opis algorytmów predykcyjnych, ich generacje i odmiany. Rozdział trzeci prezentuje modele matematyczne silnika indukcyjnego oraz model przekształtnika. Została omówiona także struktura sterowania polowo-zorientowanego oraz modele dwumasowe dla układów z połączeniem sprzężystym. Rozdział czwarty zawiera opis stanowiska laboratoryjnego. Składa się ono z dwóch połączonych wspólnym wałem silników indukcyjnych (jako maszynę roboczą wykorzystywano dwa różne modele silników). Do sterowania badanej maszyny wykorzystano przekształtnik laboratoryjny, maszyna robocza zasilana była poprzez przekształtnik przemysłowy. Stanowisko umożliwia pomiar położenia obu współpracujących maszyn oraz pomiary prądów i napięć. Wyposażone jest w karty pomiarowe oraz komputer. W rozdziale piątym omówiono zagadnienia związane z algorytmem predykcyjnym z ciągłym zbiorem rozwiązań dla układu regulacji prędkości i strumienia silnika indukcyjnego, regulatora prędkości układu dwumasowego i regulatora położenia – opisano modele wykorzystywane do badań oraz przedstawiono i podsumowano wybrane wyniki symulacji oraz badań eksperymentalnych. W rozdziale szóstym omówiono zagadnienia związane z algorytmem predykcyjnym ze skończonym zbiorem rozwiązań dla regulatora momentu, regulatora prędkości oraz przedstawiono i podsumowano wybrane wyniki symulacji oraz badań eksperymentalnych. Rozdział siódmy zawiera podsumowanie pracy i wnioski końcowe a rozdział ósmy – spis literatury. Dodatkowo rozprawa zawiera trzy załączniki: w pierwszym zawarto opis badań kaskadowej struktury sterowania prędkością wykorzystującej algorytmy predykcyjne w układzie dwumasowym. Załącznik drugi zawiera porównanie predykcyjnych struktur regulacji

prędkości ze skończonym i ciągłym zbiorem rozwiązań - ze strukturą sterowania DFOC. W załączniku trzecim przedstawiono wybrane testy dotyczące odporności układów regulacji na zmiany parametrów układu napędowego.

3. Ocena podjętego tematu

W układach napędowych, zarówno przemysłowych jak i tych stosowanych w gospodarstwie domowym, powszechnie wykorzystuje się maszyny indukcyjne ze względu na prostą konstrukcję i zasilanie. Stosuje się je zarówno w napędach, w których nie jest wymagana regulacja prędkości, jak i w napędach o większych wymaganiach, co do precyzji sterowania – niezbędne jest wtedy jednak zastosowanie przekształtników w połączeniu z zaawansowanymi algorytmami sterowania. Umożliwia to uzyskanie nowych możliwości regulacyjnych - od układów sterowania skalarne, do układów sterowania polowo-zorientowanego dla osiągnięcia dobrych własności dynamicznych, poprzez szybkie algorytmy sterowania bezpośredniego.

W rozprawie przedstawiono wyniki badań predykcyjnych metod sterowania. Ta złożona obliczeniowo metoda wyznacza sterowanie, bazując na minimalizacji funkcji celu. Analizując aktualny stan napędu i przewidując jego przyszłe stany wykorzystując model napędu, algorytm odpowiednio wybiera optymalne ze względu na wybraną funkcję jakości sterowanie. Założone cele, główny i dodatkowy (opisane w pkt. 2 niniejszej recenzji) znakomicie wpisują się w aktualne trendy badawcze. Uważam więc, że zagadnienia podjęte w rozprawie są istotne zarówno z teoretycznego, jak i z aplikacyjnego punktu widzenia.

4. Ocena rozprawy

Istotną cechą opiniowanej pracy jest aktualność podjętej tematyki. Kandydat zaprezentował w opiniowanej rozprawie pełny cykl badawczy: przedstawienie problemu badawczego, analiza teoretyczna, opracowanie modeli i przeprowadzenie symulacji oraz weryfikacja laboratoryjna wyselekcjonowanych rozwiązań. Założone tezy zostały udowodnione poprzez bardzo szeroki zakres badań oraz ich szczegółowe opracowanie. Zdefiniowane cele pracy zostały osiągnięte.

Do najważniejszych osiągnięć Kandydata należy zaliczyć:

- opracowanie struktur sterowania predykcyjnego z ciągłym zbiorem rozwiązań dla układu z regulacją prędkości maszyny indukcyjnej dla modelu jedno- i dwumasowego oraz regulatora położenia dla układu z połączeniem sztywnym, w tym zastąpienie jednym regulatorem predykcyjnym zestawu czterech regulatorów struktury FOC
- przeprowadzenie w szerokim zakresie badań określających wpływ poszczególnych parametrów i struktur regulatorów predykcyjnych na pracę układu napędowego oraz przeprowadzenie szczegółowej analizy otrzymanych wyników
- eksperymentalna weryfikacja wybranych algorytmów sterowania predykcyjnego z ciągłym zbiorem rozwiązań oraz ze skończonym zbiorem rozwiązań

5. Wątpliwości i uwagi dyskusyjne

Lektura rozprawy nasunęła mi kilka pytań i uwag. Większość z nich ma charakter dyskusyjny, dlatego też proszę o odpowiedź na nie w trakcie publicznej obrony.

1. Str.8.: Dlaczego zastąpienie regulatora „klasycznego” inną strukturą miałyby oznaczać „hybrydową strukturę”?
2. Str. 17.: Załączniki – wzmianka o nich jest tylko we wstępie, w pozostałej części pracy nie ma do nich odniesienia, co sprawia wrażenie, że nie wiadomo, po co one są...
3. W treści pracy wielokrotnie pojawia się pojęcie „estymacja”, jednak nie pojawia się opis lub równanie estymatora, raczej równania kalkulatora określonej wielkości. Wielkości wyjściowe - estymowane/odtworzone - z bloków „obserwator” lub „estymator” na schematach nie są oznaczone dodatkowym symbolem (jak przyjmuje się zazwyczaj w literaturze: „^”). Tymczasem w równaniu (1.2) występuje symbol strumienia $\tilde{\Psi}_s^p$ (strumień estymowany?), który nie jest nigdzie w pracy zdefiniowany, a w załączniku 1. opisano układ z estymatorem, bez opisu estymatora.
4. Str. 41.: Wątpliwość budzi powiązanie czasu konstrukcji/uruchomienia napędu („nowoczesny” vs „stary”) z jego właściwościami, czy wymaganiami odnośnie parametrów pracy: „...w nowoczesnych układach ograniczenia dynamiki nie są dopuszczalne”.
5. UWAGA DYSKUSYJNA. Rys. 5.9, 5.11.: Czy prezentowane różnice o rozdzielczości (niektórych) wyników poniżej 1% zakresu w osi y ma potwierdzenie w wynikach eksperymentalnych? Czy analiza (rozdzielanie) przebiegów o takim zakresie zmian jest celowa? Jakie to może mieć znaczenie w rzeczywistym układzie?
6. UWAGA DYSKUSYJNA. Jak stwierdzono w rozprawie, parametry lub wartości wagowe dobierane są empirycznie. Nie wyliczono ich, nie wyznaczono za pomocą algorytmu optymalizacyjnego, nasuwa się więc pytanie: jaki wpływ na jakościową zmianę przebiegów (właściwości) - np. z rys.5.8 - może mieć zmiana tych parametrów?
7. UWAGA DYSKUSYJNA. Na rys. 6.29, 6.36b prezentowane zależności nie cechują się przebiegami monotonicznymi. Proszę o komentarz, czy w przypadku tak niewielkiej liczby punktów pomiarowych można wnioskować o charakterze tej zależności? Czy sprawdzono, jaki wpływ na te zależności ma np. krok obliczeń albo metoda całkowania?
8. Rys. 6.53b.: Czy regulator, który gwałtownie przełącza wartość strumienia zadanego(?) powinien być rekomendowany (dotyczy także innych prezentowanych przebiegów strumienia w tym rozdziale)? Brak legendy - przebieg w kolorze czerwonym to strumień zadany, czy odtwarzany?
9. Rys. 6.63, 6.73, 6.79, 6.80: Czy taki poziom oscylacji prędkości w stanie ustalonym jest akceptowalny? Brak legendy.
10. UWAGA DYSKUSYJNA. Wydaje się, że układy, które nie działają w pełni poprawnie (np. układ regulacji prędkości, który cechuje się dużymi oscylacjami prędkości w stanie ustalonym) nie powinny być prezentowane razem z układami pracującymi prawidłowo.

WA

W mojej opinii algorytmy, czy struktury sterowania będące w fazie testów, powinny się znaleźć np. w załączniku.

6. Dodatkowe uwagi krytyczne o charakterze redakcyjnym

1. Str. 5.: Wielkości fizyczne/względne są raz pisane wielką/małą literą, a dla innej wielkości są odwrotnie oznaczone w wykazie ważniejszych oznaczeń; opis prędkości Ω_k , ω_k jest niepełny w porównaniu z opisem Ω_2 , ω_2
2. Str. 6.: Wyrażenie „skończona sztywność charakterystyki” („skończoność sztywność charakterystyki”) jest nieprecyzyjne.
3. Str. 8.: Co doktryna „zrównoważonego rozwoju” ma wspólnego z algorytmami predykcyjnymi? Czy istnieją hybrydy bez „cech mieszanych”?
4. Str. 15.: Rozdział 1.3. nosi tytuł „Teza, cel i zakres pracy”, a w treści kolejność jest inna.
5. Str. 17.: Brak definicji DFOC, wcześniej wielokrotnie pojawia się tylko FOC.
6. Str. 40.: Niezręcznie wygląda porównanie „dwóch torów” do „toru pojedynczego”: „...*polegającą na sterowaniu zmiennymi poprzez dwa niezależne tory (analogicznie do sterowania momentem silnika prądu stałego)*”.
7. Jest niezgodność oznaczenia typu silnika w rozdziale 4. i w tabeli 4.1.
8. Czcionka opisów wykresów z rys.5.37-5.42 jest zdecydowanie za mała.
9. Str. 81.: Autor zastosował chyba nadmierny skrót myślowy pisząc: „*czyli prądu w tej osi i momentu elektromagnetycznego, a w konsekwencji również prędkości*”.
10. Rys. 5.46: Czy to są przebiegi dla rampy prędkości? Czy taki poziom oscylacji prędkości w stanie ustalonym jest akceptowalny?
11. Symbole użyte w równaniach nie powinny zmieniać swego znaczenia, tymczasem symbol α w rozprawie jest definiowany jako współczynnik skalujący lub położenie wału.
12. Str. 112.: Żargon: „*regulatory [...] pracują zdecydowanie lepiej*”.
13. Rys. 6.70.: Zdecydowanie nieczytelny.
14. Rys. 6.82.: Minimalistyczny opis rysunków. Brak legend i oznaczeń.
15. Załącznik 1.: Brak odwołania do równania (Z1.1).
16. Załącznik 2.: Czy porównanie struktur nie powinno być w części głównej rozprawy?

7. Wniosek końcowy

Przedstawione powyżej uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na finalną, pozytywną ocenę rozprawy. Rozprawa doktorska mgr. inż. Karola Wróbla pod tytułem *Analiza predykcyjnych metod sterowania napędami z silnikami indukcyjnymi* zawiera oryginalny i wartościowy dorobek naukowy. Założone cele pracy zostały osiągnięte. Autor wykazał się dużą wiedzą i umiejętnością prowadzenia badań empirycznych i symulacyjnych, wykazując samodzielność w pracy naukowej w zakresie nauk technicznych. Recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie naukowej elektrotechnika oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W związku z powyższym, zgodnie z obowiązującą ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Konrad Urbański