

dr hab. inż. Stefan Brock, prof. PP
Politechnika Poznańska
Instytut Automatyki, Robotyki i Inżynierii Informatycznej
ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań

Poznań, 1 czerwca 2018 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jacka Listwana

pt.: **Analiza nieliniowych metod sterowania silnikiem indukcyjnym wielofazowym**

1. Podstawa opracowania recenzji

Przedmiotem opinii jest rozprawa doktorska mgr. inż. Jacka Listwana z Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej, pod tytułem *Analiza nieliniowych metod sterowania silnikiem indukcyjnym wielofazowym*. Recenzja została opracowana na zlecenie Pana Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej (pismo W-5/578/2018 z dnia 3 kwietnia 2018 r.) na podstawie dostarczonej rozprawy doktorskiej pod wyżej wymienionym tytułem. Recenzja ma być wykorzystana w postępowaniu o nadanie mgr. inż. Jackowi Listwanowi stopnia naukowego doktora nauk technicznych w zakresie nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika.

2. Charakterystyka formalna pracy

Opiniowana rozprawa doktorska liczy 159 stron druku komputerowego, zawiera 158 rysunków i zdjęć. Rozprawa jest podzielona na 8 rozdziałów merytorycznych, w tym wprowadzenie oraz wnioski i uwagi końcowe. Dodatkowo do pracy dołączono 3 załączniki, w którym przedstawiono charakterystykę i dokumentację układów napędowych wykorzystywanych w badaniach laboratoryjnych. Spis literatury zawiera 122 pozycji, w tym 18 prac autorskich Kandydata. Na początku rozprawy znajdują się wykazy ważniejszych oznaczeń. Praca jest napisana poprawnym językiem, Autor rozprawy nie ustrzegł się jednak drobnych błędów stylistycznych i gramatycznych. Układ pracy nie budzi istotnych zastrzeżeń. Materiały graficzne w pracy są staranne i czytelne, terminologia jest używana poprawnie.

3. Ocena podjętego tematu

Tematem przedstawionej rozprawy jest aplikacja wybranych nieliniowych metod sterowania dla układów napędowych z 5- i 6-fazowym silnikiem indukcyjnym. Zagadnienie sterowania wielofazowych silników indukcyjnych jest rozwijane w wielu ośrodkach w kraju i na świecie. Specyficzne cechy napędów asynchronicznych wielofazowych znajdują zastosowanie na przykład w pojazdach elektrycznych. W porównaniu do klasycznych rozwiązań 3-fazowych, napędy takie zapewniają mniejsze tętnienia momentu, lepsze stosunek mocy i generowanego momentu do masy silnika oraz zwiększoną niezawodność. Silniki wielofazowe wymagają jednak bardziej rozbudowanego przekształtnika energoelektronicznego, a także właściwych metod sterowania. Takie metody sterowania mogą zapewnić lepsze właściwości kompletnego napędu.



Efektom tych prac są liczne publikacje ukazujące się w czołowych czasopiśmie z zakresu elektroniki przemysłowej. Przedstawiona rozprawa dobrze wpisuje się w te kierunki badań. Uważam zatem, że zagadnienia podjęte w rozprawie są aktualne i ważne zarówno z poznawczego, jak i z aplikacyjnego punktu widzenia.

4. Zagadnienie naukowe analizowane w rozprawie.

W rozdziale pierwszym rozprawy Autor dokonuje szerokiego przeglądu literatury tematu wykorzystując klucz tematyczny. Przedstawione zostały publikacje dotyczące zagadnień konstrukcji silników indukcyjnych wielofazowych, ich zasilania i sterowania. Następnie Autor przedstawia zagadnienie sterowania silników wielofazowych, wyróżniając przy tym metody nieliniowe – w tym sterowanie ślizgowe i sterowanie rozmyte. Ostatnim elementem przeglądu literatury jest przedstawienie metod sterowania odpornych ma wybrane klasy uszkodzeń.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury tematu autor zauważa, że zagadnienia nieliniowego sterowania silnikiem indukcyjnym wielofazowym nie są wystarczająco przedstawione. Dlatego też zaprojektowanie i zbadanie takiego układu Autor stawia sobie za cel rozprawy doktorskiej.

W dalszej części rozdziału pierwszego Autor określa cel naukowy i tezę rozprawy. Celem pracy jest analiza wybranych metod sterowania nieliniowego przekształtnikowymi układami napędowymi z wielofazowymi silnikami indukcyjnymi klatkowymi, a następnie przeprowadzenie ich weryfikacji symulacyjnej i laboratoryjnej.

Autor rozprawy postawił następującą tezę:

Zastosowanie nieliniowych metod sterowania wielofazowym silnikiem indukcyjnym klatkowym pozwala na uzyskanie dokładnej regulacji zmiennych stanu silnika oraz zapewnia odporność układu sterowania na stany awaryjne występujące w układzie napędowym.

Tak sformułowana teza budzi pewne wątpliwości na gruncie metodologii nauki, gdyż jej falsyfikacja byłaby bardzo trudna. Uważam jednak, że godny podkreślenia jest szeroko określony cel pracy, zawierający zarówno aspekty rozważań teoretycznych (w postaci opracowania metod sterowania nieliniowego dla wybranej klasy aplikacji) jak i aspekty implementacyjne (w postaci weryfikacji zaproponowanych metod sterowania).

Dla uzyskania celu dysertacji Autor zaproponował przeprowadzenie kolejnych etapów, w ramach których opracowane zostały algorytmy sterowania, zweryfikowane następnie w trakcie badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

5. Przegląd i ocena wartości naukowej rozprawy

Po określeniu celu naukowego rozprawy i przedstawieniu przyjętej metodyki badań w rozdziale 2 Autor przedstawia modele matematyczne wielofazowych silników indukcyjnych. Po przedstawieniu postaci ogólnej, Autor przedstawia opis matematyczny silników 5- i 6-fazowego, które są głównym tematem pracy. Podobną strukturę ma kolejny, 3 rozdział rozprawy. W tym rozdziale przedstawione zostały modele matematyczne wielofazowych przekształtników energoelektronicznych o strukturze falowników napięcia. Dla przypadków przekształtników 5 i 6

Sporn

fazowych określono możliwe do uzyskania wektory napięć wyjściowych na płaszczyźnie zespolonej. W dalszej części rozdziału przedstawiono metodę modulacji wektora przestrzennego, zwracając przy tym uwagę na możliwość wyboru wektorów długich, średnich i zerowych. Jest to istotne dla napędów z silnikami wielofazowymi, w których należy minimalizować składowe prądów w dodatkowych układach współrzędnych Z .

W rozdziale 4 rozprawy przedstawione zostały wyniki badań symulacyjnych (dla silnika 5 fazowego) oraz symulacyjnych i eksperymentalnych (dla silnika 6 fazowego) napędu z klasyczną, kaskadową regulacją typu PI strumienia i prędkości. Dla syntezy układu sterowania zastosowany został estymator strumienia sprzężonego wirnika. Estymator został zaproponowany na podstawie równań silnika w nieruchomym, podstawowym układzie współrzędnych, przy dyskusyjnym założeniu pełnej znajomości i stacjonarności modelu silnika.

Dobry układ regulacji z regulatorami klasy PI zapewnia dobrą jakość regulacji, co zilustrowane zostało zarówno badaniami symulacyjnymi jak i eksperymentem fizycznym. Przedstawione zostały wyniki badań w postaci przebiegów, nie zebrano jednak wskaźników ilościowych.

W dalszej części zaprezentowano strukturę sterowania opartą o koncepcję sterowania bezpośredniego momentu i strumienia z modulacją wektora przestrzennego napięcia. Wyniki eksperymentalne potwierdziły przewidywania z badań symulacyjnych.

Główną, oryginalną częścią dysertacji jest rozdział 5, przedstawiający wybrane nieliniowe metody sterowania. Autor zdecydował się na trzy metody: sterowanie ślizgowe bazujące na ekwiwalentnym sygnale sterującym, sterowanie ślizgowe drugiego rzędu z ruchem *Super-Twisting* oraz sterowanie rozmyte.

Klasyczne sterowanie ślizgowe zostało przedstawione w rozdziale 5.1. Autor zaproponował kompleksowe podejście, polegające na zastąpieniu wszystkich regulatorów struktury kaskadowej przez regulatory ślizgowe. Efektem takiego podejścia są proste definicje powierzchni ślizgowej (równania 5.13, 5.20, 5.24 i 5.27) zredukowane do punktu w przestrzeni stanów. Autor szeroko wykorzystuje koncepcję sterowania ekwiwalentnego, która polega na kompensacji znanej części opisu dynamicznego obiektu. Takie podejście wymaga jednak dokładnej znajomości obiektu, w tym zakłóceń, oraz założenia o ciągłości sygnałów zadanych. W praktyce ostatni z tych warunków jest zapewniony poprzez wprowadzenie członu zadajnika o ograniczonym przyspieszeniu.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury Autor wybrał do dalszych prac metodę sterowania ślizgowego drugiego rzędu, w wariacie *SuperTwisting* (ST). Wyniki tych prac przedstawione zostały w rozdziałach 5.2 i 5.3. Tego typu regulator ma własności podobne do nieliniowej struktury proporcjonalno – całkującej. Regulatory te wykorzystane zostały zarówno w strukturze sterowania polowo-zorientowanego, jak i w przypadku sterowania klasy DTFC.

W kolejnym rozdziale 5.4 Autor podjął temat regulacji rozmytej, w połączeniu z metodami optymalizacji heurystycznej. Wykorzystana została stosunkowo prosta struktura regulatora o charakterze nieliniowego bloku proporcjonalno-różniczkującego, pokazana w rozdziale 5.4.1. Szkoda, że w rozprawie nie zostały zaprezentowane szerzej przeprowadzone

prace dotyczące właściwego doboru liczby i kształtu funkcji przynależności oraz reguł wnioskowania. Nie podane zostały także szczegóły implementacji mechanizmu algorytmów genetycznych, optymalizujących regulatory. Zamieszczone wyniki badań świadczą o poprawnej pracy kompletnego układu sterowania.

Wartościową częścią pracy jest rozdział 6, w którym Autor analizuje działanie układu napędowego w przypadku wystąpienia określonych sytuacji awaryjnych. Możliwość dalszej pracy napędu w takich przypadkach jest ważna w wielu aplikacjach, i stanowi jedną z głównych zalet napędów wielofazowych. Autor rozpatruje sytuację awarii sterowania jednego z mostków trójfazowych w przekształtniku zasilającym silnik. Autor wykazał, że w takiej sytuacji zaproponowane algorytmy działają poprawnie, a sprawny mostek przejmuje pełne obciążenie. Inną z analizowanych awarii jest uszkodzenie czujnika pomiaru prędkości. Dla uzyskania odporności na taką awarię Autor zastosował koncepcję redundantnego czujnika wirtualnego, utworzonego poprzez nieliniowy obserwator prędkości. W ten sposób Autor twórczo wykorzystał doświadczenia Ośrodka Wrocławskiego Automatyki Napędu Elektrycznego.

W rozdziale 7 przedstawione zostało stanowisko laboratoryjne, wyposażone w badany silnik obciążany silnikiem indukcyjnym pierścieniowym, przekształtniki energoelektroniczne i aparaturę sterująco-pomiarową.

W podsumowaniu pracy w ostatnim rozdziale 8 Autor dowodzi słuszności postawionej w rozprawie tezy.

Za główne osiągnięcia Kandydata uznać należy:

- Opracowanie algorytmów i wariantowych układów sterowania ślizgowego silnikiem indukcyjnym wielofazowym.
- Opracowanie algorytmów i wariantowych metod sterowania polowo-zorientowanego oraz bezpośredniego sterowania momentem z rozmytym regulatorem prędkości i modulatorem wektorowym.
- Opracowanie projektu i wykonanie stanowiska laboratoryjnego, w tym opracowanie koncepcji i projektu uzwojeń silnika indukcyjnego 6-fazowego.
- Przeprowadzenie cyklu badań symulacyjnych i eksperymentalnych zaproponowanych algorytmów sterowania.
- Wykonanie analizy zachowania się układów sterowania z 6-fazowym silnikiem indukcyjnym w wybranych stanach awaryjnych.

6. Wątpliwości i uwagi dyskusyjne

W trakcie lektury rozprawy nasunęło mi się kilka pytań. Większość z nich ma charakter dyskusyjny, dlatego też proszę o odpowiedź na nie w trakcie publicznej obrony.

1. W rozdziałach 2.1-2.2 przedstawione zostały ogólne równania dla maszyny wielofazowej, natomiast w rozdziale 2.3 równania po transformacji. Jednak warto by skomplikowane przekształcenia zilustrować dokładniej. Na przykład w jaki sposób z równania 2.5 można wyprowadzić równanie 2.34? Czy w równaniu 2.5 nie należy uwzględnić prądu wirnika? Czym jest wartość M w równaniu 2.15?

S. Brock.

2. W opisie matematycznym modulatora przestrzennego pominięto czas martwy pary kluczy energoelektronicznych w gałęzi. Czy takie pominięcie nie spowodowało błędów? W jaki sposób zostało to uwzględnione w badaniach eksperymentalnych?
3. Ponieważ wyniki rozdziału 4 traktowane są jako punkt odniesienia dla oceny regulatorów nieliniowych, istotne jest określenie metody doboru nastaw regulatorów PI. Dobór ten zależy od przyjętego kryterium jakości regulacji. Proszę o podanie informacji, jak dobrane zostały poszczególne regulatory.
4. Zaproponowany test polega na rozruchu silnika z ograniczonym przyspieszeniem do dużej wartości ustalonej prędkości, ruchu ze stałą prędkością, a następnie nawrocie także z ograniczonym przyspieszeniem. W tracie pracy ze stałą prędkością podany jest skokowo zmienny moment oporowy. Taki dobór testu budzi wątpliwości, co do możliwości oceny układu regulacji. Właściwości dynamiczne napędu są wymuszane przez zewnętrzny zadajnik sygnału referencyjnego. Dodatkowo przyjęty przez Autora sposób prezentacji (na wspólnym wykresie, w pojedynczej wspólnej skali) przebiegów prędkości zadanej i rzeczywistej w praktyce uniemożliwia prostą ocenę zarówno jakości śledzenia prędkości zadanej jak i minimalizacji uchybu dynamicznego związanego z momentem oporowym. Dodatkowo skala czasu, obejmująca kilka lub kilkanaście sekund zacierza obraz szybkich procesów przejściowych.
5. W jaki sposób dobierano w regulatorze ślizgowym "klasycznym" (na przykład w rozdziale 5.1.2.1) współczynnik wzmocnienia części przełączającej. Czy zapewnia to stabilność (osiągnięcie i następnie utrzymanie się wektora stanu na powierzchni ślizgowej), przy jednoczesnym ograniczeniu sygnału wyjściowego? Jak przyjęto zakres zmienności parametrów?
6. Równania ekwiwalentne zakładają znajomość momentu obciążenia oraz pierwszej pochodnej sygnału zadanego. Jak wyznaczono te sygnały?
7. Dla sterowania ślizgowego drugiego rzędu Autor przytacza za literaturą kryteria stabilności (podsumowane równaniami 5.43), jednak w dalszej części rozprawy nie pokazuje, jak wyznaczane były górne i dolne ograniczenia funkcji opisu obiektu dla poszczególnych regulatorów. Utrudnia to ewentualną próbę powtórzenia przeprowadzonych badań.
8. Przy zastosowaniu w strukturze jak na rys. 5.59 regulatora o strukturze z rys. 5.56 wydaje się nieuniknione wystąpienie uchybu ustalonego prędkości poza biegiem jałowym. Na rysunkach 5.60, 5.64 jednak taki efekt nie jest widoczny. W jaki sposób autor tłumaczy likwidację uchybu ustalonego bez obserwatora momentu oporowego lub członu całkującego?
9. Zabrakło mi w podsumowaniu określenia, jakie to zalety wnosi sterowanie nieliniowe w stosunku do PI. Wszystkie rysunki przebiegów prędkości wyglądają w zasadzie bardzo podobnie.

S. Brock

10. Jak wyglądają modele symulacyjne, na których prowadzone zostały badania? Czy uwzględnione w nich są takie efekty jak opóźnienia, filtry antyaliasingowe, pomiar prędkości na podstawie dyskretnego zliczania położenia?
11. (UWAGA DYSKUSYJNA) Autor w rozdziale 4 wykazuje, że wykorzystanie odpowiedniej sekwencji wektorów napięcia zmniejsza niepożądane prądy w układach Z. Czy celowa była by minimalizacja tych prądów poprzez utworzenie dodatkowego układu regulacji, działającego współbieżnie do podstawowego układu regulacji prędkości, strumienia i składowych prądu w osiach XY?

7. Dodatkowe uwagi krytyczne o charakterze redakcyjnym.

1. Skale niektórych rysunków (na przykład 4.7, 4.8) są zbyt małe i przez to nieczytelne.
2. Ten sam symbol (indeks gwiazdka) oznacza zarówno wartość zadaną (na przykład w równaniu 5.13), jak i część sygnału sterującego (ka w równaniu 5.32).
3. Przejście z równania 5.5 do 5.6 jest poprawne, chociaż nie oczywiste. Warto by to w pracy zamieścić.
4. Równanie 5.7 definiuje składową nieciągłą sygnału sterującego, której zadaniem jest kompensacja zmienności i błędów określenia modelu obiektu. Nie jest to jednak wzór projektowy, dla doboru tego składnika.
5. Podobny opis w równaniach 5.4 i 5.41 stosuje inne symbole. Czym to jest spowodowane.
6. Zapis równania 5.43 nie jest jasny. Czy elementy K_p , K_i są skalarami czy macierzami współczynników?
7. Jak wyglądają funkcje przynależności dla regulatorów rozmytych? Warto pokazać ilustracje powierzchni (z reguły nie płaszczyzny!) sterowania,

8. Wniosek końcowy.

Podsumowując powyższe uwagi uważam, że rozprawa doktorskiej mgr. inż. Jacka Listwana pod tytułem: *Analiza nieliniowych metod sterowania silnikiem indukcyjnym wielofazowym* zawiera oryginalny i wartościowy dorobek naukowy. Zapowiadane tytułem i sformułowane w rozdziale pierwszym cele pracy zostały osiągnięte. Praca łączy w sobie takie obszary wiedzy technicznej jak: energoelektronikę, teorię sterowania i metody inżynierii informatycznej. Autor wykazał się także dobrym opanowaniem metod badań empirycznych i symulacyjnych, dowodząc umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w zakresie nauk technicznych. Przedstawione uwagi krytyczne, w dużej mierze dyskusyjne, nie podważają tej oceny.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Jacka Listwana pod tytułem: *Analiza nieliniowych metod sterowania silnikiem indukcyjnym wielofazowym* stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a także wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie naukowej elektrotechnika oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Tym samym, 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.

Słofon Brock