

Prof. dr hab. inż. Lech M. Grzesiak
Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny,
Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej
Koszykowa 75, Gm. E.
00-662 Warszawa

Recenzja

rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Karola Wróbla** pt. „*Analiza predykcyjnych metod sterowania napędami z silnikami indukcyjnymi*”

opracowana na podstawie uchwały Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej z dnia 10 lipca 2017 r.

1. Ocena wyboru tematyki rozprawy

Sterowanie predykcyjne jest opisywane od przeszło 30-tu lat, przy czym w początkowym okresie było stosowane do regulacji procesów wolno-zmiennych. Nieco później pojawiły się prace dotyczące wykorzystania metod predykcyjnych w sterowaniu przekształtnikami energoelektronicznymi i napędami elektrycznymi.

W aplikacjach napędowych najczęściej wykorzystywane jest sterowanie predykcyjne z modelem (Model Predictive Control), przy czym można wyróżnić algorytmy z nieskończonym (CCS-MPC) lub skończonym zbiorem rozwiązań (FCS-MPC). Sterowanie bazujące na algorytmie ze skończonym zbiorem rozwiązań (FCS-MPC) jest szczególnie interesujące ze względu na fakt, że przekształtnik energoelektroniczny może być sterowany bezpośrednio z pominięciem modulatora PWM. Istotne jest także to, że sterowanie predykcyjne może być stosowane do obiektów liniowych jak również nieliniowych. Sterowanie predykcyjne jest zaliczane do kategorii sterowań optymalnych. We wskaźniku jakości (funkcji celu) można uwzględnić ograniczenia nałożone na wybrane zmienne wielkości, co jest niezbędne w wielu aplikacjach napędowych. Aktualnie można znaleźć wiele publikacji związanych z tą tematyką, co świadczy o aktualności zagadnień, będących przedmiotem opiniowanej pracy.

Tematykę rozprawy należy uznać za interesującą i trafnie wybraną zarówno pod względem rozwiązania problemów teoretycznych jak i ewentualnych aplikacji przemysłowych.

2. Charakterystyka pracy i uwagi dyskusyjne.

Opiniowana praca doktorska jest bardzo obszerna i liczy 177 stron łącznie ze spisem literatury zawierającym 112 pozycji i załącznikami. Podzielona została na 7 rozdziałów,

a częściowo oryginalne, najbardziej wartościowe treści zostały przedstawione w rozdziałach 5 oraz 6.

We wstępie podano przegląd literatury dotyczącej zagadnień sterowania predykcyjnego i sterowania napędami elektrycznymi.

W podrozdziale 1.3 zostały przedstawione cele i tezy pracy:

„Głównym celem pracy jest 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.”

„Dodatkowym celem pracy jest opracowanie układów predykcyjnych (ze skończonym zbiorem rozwiązań) sterowania momentem oraz układu sterowania pozycją (z nieskończonym zbiorem rozwiązań) silnika indukcyjnego.“

Sformułowane zostały dwie 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“*

Pierwsza z podanych tez, pomimo dodatkowych wyjaśnień definiujących pojęcie „optymalna dynamika“, jest mało precyzyjna.

Drugie sformułowanie jest trywialne, ponieważ można wskazać wiele prac opisujących sterowanie predykcyjnego ze skończonym zbiorem rozwiązań dla napędów prądu przemiennego.

W rozdziale 2 przedstawiono definicje związane ze sterowaniem predykcyjnym oraz przytoczono - znane z literatury - klasyfikacje algorytmów predykcyjnych. Opisano podstawy projektowania wybranych typów regulatorów predykcyjnych.

W rozdziale 3 przedstawiono modele matematyczne maszyny indukcyjnej klatkowej, przekształtnika 3-fazowego, w topologii dwu-poziomowej, oraz układów z połączeniem sprężystym.

Zapisany na str. 34 wzór 3.2 jest błędny, ponieważ w tej postaci opisuje jedynie maszynę, która ma 1 parę biegunów.

Występujące zmienne takie jak napięcia, prądy i strumienie są **wektorami przestrzennymi** - precyzyjnie definiowanymi po wprowadzeniu odpowiednich założeń - a nie **wektorami**. Aby model był kompletny należy dopisać równanie ruchu.

W opisie modelu przekształtnika używane jest żargonowe określenie **klucz** zamiast poprawnego **łącznik energoelektroniczny**.

Przechodząc do opisu i projektowania regulatora predykcyjnego z ciągłym zbiorem rozwiązań (podrozdział 5.2) Autor buduje model matematyczny silnika indukcyjnego w jednostkach względnych. Występująca na str. 48 zależność 5.2 jest błędnie zapisana.

Czy potrzebne jest założenie, że układ odniesienia jest ustawiony tak, że jedna składowa wektora przestrzennego strumienia wirnika ($\psi_{r\gamma}$) jest równa zero i zapisanie modelu silnika dla takiego uproszczenia. Utrzymanie tego warunku w stanie przejściowym, jeśli strumień wirnika jest estymowany, nie jest możliwe. Model bez takiego założenia może być przecież wykorzystywany do obliczeń i ich nie utrudni. We wskaźniku jakości wykorzystywanym do obliczania regulatora predykcyjnego wykorzystywany jest moduł wektora przestrzennego strumienia, który zazwyczaj jest obliczany w estymatorze strumienia.

Czym jest uzasadnione wprowadzenia modelu o zapisie (5.7) - (5.8). Nie wynika on z zapisu równań (5.1) do (5.6), który to zapis dotyczy układu nieliniowego i niestacjonarnego. Model w dyskretnej przestrzeni stanu (2.1), na który powołuje się Autor na stronie 49, ma postać liniowego równania stanu. Jeśli została dokonana linearyzacja to należało podać w jaki sposób jej dokonano. Jaki jest sens dopisanie wielkości referencyjnych do równania (5.7)?

Moment obciążenia jest zazwyczaj traktowany jako zakłócenie (jeden z trzech sygnałów wejściowych) i powinien znaleźć się wektorze wejściowym, a nie wektorze stanu.

Z zapisu zależności (5.9) wykorzystywanej do wyznaczania sterowania optymalnego wynika, że z modelu obiektu należy wyznaczyć strumień i prędkość. Wielkości te powinny być wyznaczone dla zmodyfikowanego obiektu sterowania, pokazanego na rys. 5.1 w którym uwzględniony jest model odprężający.

Z drugiej strony nasuwa się pytanie, czy potrzebne jest wprowadzanie linearyzacji i odprężania jeśli regulator predykcyjny może być projektowany dla nieliniowego obiektu sterowania.

Brakuje informacji dotyczących modelu symulacyjnego. Dołączenie schematów blokowych i opisu modelu wykorzystywanego w symulacjach zdecydowanie ułatwiłoby ocenę przeprowadzonych badań. Bez tej informacji nie wiemy czy w symulacjach wykorzystywany był model dany równaniami (5.1) - (5.6) czy równaniami (5.7) - (5.8). Ta uwaga dotyczy także dalszych badań symulacyjnych zawartych w tym i następnym rozdziale.

W podrozdziale 5.3 opisany jest układ napędowy z połączeniem sprzężystym. Podobnie jak poprzednio model obiektu regulacji zapisany jest w postaci równań liniowych (5.10). Dlaczego wprowadzono do rozszerzonego wektora stanu zakłócenie (moment obciążenia) i sygnały referencyjne?

W podrozdziale 5.4 przedstawiony został układ serwonapędu (sterowanie położeniem wirnika) z regulatorem predykcyjnym. Zapis równań (5.13) i (5.14) wskazuje, że obiekt regulacji jest układem liniowym. Czym uzasadnione jest wprowadzenie do rozszerzonego wektora stanu momentu obciążenia i sygnałów referencyjnych?

W podsumowaniu rozdziału 5 zostało użyte sformułowanie, że ... *dobór nastaw regulatorów przeprowadza się w sposób empiryczny lub heurystyczny* ... , czym kierował się Autor dokonując wyboru nastaw?

Kolejny fragment pracy (rozdział 6) dotyczy zagadnień sterowania predykcyjnego ze skończonym zbiorem rozwiązań. Na stronie 84 Autor stwierdza, że ... *Należy również zaznaczyć, że struktura sterowania prędkością, jest nieobecna w literaturze, co dodatkowo uzasadnia przeprowadzenie jej szczegółowych badań* ... Prawdopodobnie Autor nie dokonał bardziej dociekliwego przeglądu literatury, ponieważ prace dotyczące predykcyjnych regulatorów prędkości są dostępne. Przykładowo można podać następujące pozycje:

- Esteban Fuentes; Dante Kalise; José Rodríguez; Ralph M. Kennel; Cascade-Free Predictive Speed Control for Electrical Drives, IEEE Transactions on Industrial Electronics (Volume: 61, Issue: 5, May 2014).
- Esteban J. Fuentes; César A. Silva; Juan I. Yuz; Predictive Speed Control of a Two-Mass System Driven by a Permanent Magnet Synchronous Motor, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, Volume: 59, Issue: 7, które dotyczą regulacji predykcyjnej prędkości w napędach z silnikami prądu przemiennego.

Istniejące (liczne) publikacje dotyczące predykcyjnego sterowania prędkością wskazują na aktualność zagadnień i nie umniejszają wartości niniejszej pracy.

Pomimo tej uwagi uważam ten rozdział (6) za najbardziej istotny w rozprawie. Budując algorytmy predykcyjne Autor bazował na nieliniowym modelu obiektu sterowania nie wprowadzając zbędnych uproszczeń.

W podrozdziale 6.2 przedstawiony został regulator predykcyjny momentu. Podano model matematyczny obiektu regulacji (równania 6.1 - 6.4) oraz dwie postacie funkcji celu (zależności 6.5 a i b). Autor zauważył, że ten rodzaj regulatora charakteryzuje się niezerowym uchybem ustalonym. Jest to typowa cecha standardowych regulatorów predykcyjnych. Zamieszczone wyniki badań symulacyjnych - dla 4 różnych horyzontów predykcji - pokazują, że opracowane algorytmy działają poprawnie.

W podrozdziale 6.3 przedstawiono predykcyjny regulator prędkości kątowej dla napędu z silnikiem indukcyjnym klatkowym. Podano model matematyczny, w stacjonarnym układzie odniesienia - zależności (6.7) - (6.11), - wykorzystywane do predykcyjnego wyznaczania sterowań. Funkcja celu dana jest zależnością (6.12), w której oprócz sygnałów prędkości i strumienia stojana wprowadzono składnik odpowiadający za ograniczenie częstotliwości przełączeń łączników energoelektronicznych falownika. W przedstawionej zależności uwzględniane są także ograniczenia nałożone na wybrane zmienne. Badania przeprowadzone zostały dla różnych horyzontów czasowych (od 1 do 3). W dalszej części pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, które potwierdzają skuteczność regulacji predykcyjnej przy założonych ograniczeniach. W podsumowaniu Autor szczegółowo formułuje wiele uwag i wniosków zarówno dotyczących regulatorów predykcyjnych z nieskończonym jak również skończonym horyzontem czasowym. Przesadnie rozbudowane opisy nie dają syntetycznej odpowiedzi na pytanie odnośnie istotnych cech poszczególnych struktur regulacji.

Do najważniejszych osiągnięć Autora należy zaliczyć:

- Opracowanie autorskich algorytmów regulatorów predykcyjnych i przeprowadzenie analizy wpływu wybranych parametrów na właściwości napędu.
- Przygotowanie modeli symulacyjnych dla regulatorów z nieskończonym horyzontem czasowym w odniesieniu do regulacji strumienia wirnika, momentu elektromagnetycznego, prędkości kątowej lub położenia kątowego dla napędu z silnikiem indukcyjnym zasilanym z falownika.
- Przygotowanie modeli symulacyjnych napędu dwumasowego z regulatorem predykcyjnym o nieskończonym horyzontem czasowym.
- Przygotowanie modeli symulacyjnych dla regulatorów ze skończonym horyzontem czasowym w odniesieniu do regulacji strumienia stojana i prędkości kątowej dla napędu z silnikiem indukcyjnym zasilanym z dwu-poziomowego falownika napięcia.
- Weryfikacja eksperymentalna wybranych struktur regulacji w różnych warunkach pracy.

3. Uwagi dotyczące zagadnień edytorskich

Praca jest zbyt obszerna, a wiele zamieszczonych wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych jest formą raportu z przeprowadzonych testów, a nie obrazem przedstawiającym najważniejsze właściwości wybranych struktur regulacji.

Pod względem językowym jest napisana poprawnie aczkolwiek występują określenia żargonowe takie jak np. „klucz” a nie „łącznik energoelektroniczny” czy też sformułowania takie jak: „wystawia dwa sygnały sterujące”, „za pomocą wektorów przestrzennych zorientowanych na strumień wirnika”, „jako najprostsze rozwiązanie tej sytuacji wybrano zadawanie prędkości po rampie”, „poprawia dynamikę stabilizacji regulowanych zmiennych”.

Niektóre z zamieszczonych rysunków, ze względu na nałożone na siebie przebiegi, są słabo czytelne.

4. Wniosek końcowy

Sformułowane powyżej uwagi dyskusyjne nie zmieniają pozytywnej oceny pracy. Praca stanowi dojrzałe przedstawienie zagadnień sterowania predykcyjnego i stanowi oryginalny wkład Autora do teorii i praktyki w obszarze projektowania regulatorów predykcyjnych z nieskończonym i skończonym zbiorem rozwiązań dla napędów z silnikiem indukcyjnym klatkowym. Autor wykazał się znajomością zagadnień z dyscypliny „Elektrotechnika”, umiejętnością formułowania celów badawczych oraz analizowania wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Uzyskane rezultaty mogą być pomocne w dalszych pracach badawczych, a także aplikacjach przemysłowych. W szczególności należy docenić fakt wykonania wielu badań

symulacyjnych i badań laboratoryjnych dokumentujących właściwości zaproponowanych algorytmów predykcyjnych.

Moim zdaniem rozprawa doktorska - „Analiza predykcyjnych metod sterowania napędami z silnikami indukcyjnymi” - **mgra inż. Karola Wróbla** spełnia wymagania stawiane przez „Ustawę z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 Nr 65 Poz. 596) z późniejszymi zmianami” i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Warszawa, 26-09-2017

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Lech Góral', is written over a vertical line that runs down the center of the page.