

Prof. dr hab. inż. Lech M. Grzesiak  
Politechnika Warszawska,  
Wydział Elektryczny

## Recenzja

rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Michała Adamczyka**

pt. „*Wektorowe sterowanie tolerujące uszkodzenia czujników prądu w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi – detekcja, lokalizacja i kompensacja uszkodzeń*”  
opracowana na podstawie uchwały nr 728/31/RDND02/2021-2024 Rady Naukowej  
Dyscypliny „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne”  
Politechniki Wrocławskiej z dnia 25 września 2023 roku.

### 1. Ocena wyboru tematyki rozprawy

Analiza pracy i projektowanie układów napędowych prądu przemiennego typu Fault Tolerant Control (FTC) stanowi znaczący obszar badań naukowych prowadzonych w wielu uczelniach i laboratoriach przemysłowych. Analiza pracy takich układów jest przedmiotem licznych publikacji. W wielu zastosowaniach stawiane są wymagania aby napęd mógł pracować poprawnie (z pewnymi ograniczeniami) także w przypadku określonych uszkodzeń: silnika, przekształtnika, czy też czujników pomiarowych, których sygnały są wykorzystywane w strukturze regulacji. Ogólnie można rozważać rozwiązania z redundancją sprzętową (układy pomiarowe) lub też programową.

W pracy Autor koncentruje się nad zagadnieniem utrzymania akceptowalnych właściwości napędu w przypadku określonych uszkodzeń czujników pomiarowych prądów. Tematykę rozprawy należy uznać za interesującą pod względem teoretycznym i aplikacyjnym.

### 2. Charakterystyka pracy

Praca doktorska liczy 180 stron łącznie ze spisem literatury zawierającym 136 pozycji. Podzielona została na 9 rozdziałów, a istotne merytorycznie zagadnienia zostały przedstawione - moim zdaniem - w rozdziałach 5, 6, 7 i 8.

Rozdział 1 „WSTĘP” zawiera wprowadzenie do układów napędowych typu FTC. Opisano sposoby wykrywania uszkodzeń czujników prądu oraz metody odtwarzania sygnałów prądowych dla niektórych typów uszkodzeń.

Sformułowano następujące tezy naukowe:

**Teza 1: *Możliwa jest modyfikacja klasycznych obserwatorów Luenbergera pozwalająca na dalsze, prawidłowe obliczanie błędu estymacji prądu, nawet w przypadku, gdy dostępny jest jedynie sygnał z jednego nieuszkodzonego czujnika prądu w uzwojeniach stojana silnika indukcyjnego. Umożliwia to znaczne zmniejszenie wrażliwości proponowanego estymatora prądu stojana, na zmiany lub błędną identyfikację parametrów silnika indukcyjnego.***

**Teza 2: *Opracowany algorytm DMLO przeznaczony do detekcji i kompensacji uszkodzenia czujników prądu stojana umożliwi zachowanie pełnej kontroli nad***

**prędkością kątową silnika indukcyjnego sterowanego wektorowo (metody DFOC i DTC-SVM) w układzie typu FTC, w przypadku uszkodzenia jednego bądź obydwu czujników prądu.**

Moim zdaniem takie zdefiniowanie zadań badawczych jest poprawne i zgodne z wymaganiami stawianymi pracom doktorskim.

W rozdziale 2 zatytułowanym „MODELOWANIE MATEMATYCZNE PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH” przedstawiono opis matematyczny silnika indukcyjnego w postaci wektorowej korzystając z powszechnie znanych równań zaczerpniętych z literatury. W podobny sposób przedstawiono opis matematyczny przekształtnika napięcia i podstawowych metod jego sterowania PWM i SVM.

W rozdziale 3 „WEKTOROWE METODY CZĘSTOTLIWOŚCIOWEGO STEROWANIA SILNIKAMI PRĄDU PRZEMIENNEGO” opisane zostały 2 metody sterowania napędem prądu przemiennego. Pierwsza to struktura sterowania z orientacją wektora pola DFOC. W metodzie tej korzysta się z informacji o położeniu i module wektora przestrzennego strumienia wirnika. Autor przedstawił schemat blokowy struktury sterowania oraz przytoczył podstawowe zależności matematyczne opisujące taki układ napędowy. Zamieszczone zostały przykładowe przebiegi wybranych sygnałów otrzymane na drodze symulacji. W podobny sposób opisano metody sterowania DTC (z tablicą łączy) oraz DTC-SVM. Dla struktury DTC-SVM zamieszczono przykładowe wyniki z symulacji komputerowej.

W rozdziale 4 „WPŁYW USZKODZENIA CZUJNIKÓW PRĄDU STOJANA NA PRACĘ UKŁADU NAPĘDOWEGO” opisano rodzaje halotronowych czujników prądu, a następnie wyróżniono 6 różnych rodzajów możliwych uszkodzeń takich jak:

1. błąd wzmocnienia
2. offset
3. szum pomiarowy
4. nasycenie
5. zanikanie sygnału
6. całkowity zanik sygnału

Podano modele matematyczne opisujące poszczególne uszkodzenia oraz zamieszczono przykładowe przebiegi sygnałów prądowych dla każdego rodzaju uszkodzenia. Następnie (4.2.1) zostały przeanalizowane przypadki uszkodzeń czujnika prądu w napędzie sterowanym metodą DFOC (sterowanie wektorowe z orientacją układu odniesienia względem wektora przestrzennego strumienia wirnika). Zamieszczono wyniki badań symulacyjnych pokazujące przebiegi sygnałów: prędkości kątowej, momentu elektromagnetycznego, amplitudy wektora strumienia wirnika oraz składowych wektora przestrzennego prądu stojana w prostokątnym stacjonarnym układzie odniesienia. Oceniając wyniki badań symulacyjnych Autor stwierdził, „... *najmniejszy wpływ na stabilną pracę układu mają: błąd wzmocnienia, offset oraz szum pomiarowy. Układ, pomimo wystąpienia tego rodzaju uszkodzenia stara się wymusić takie sygnały sterujące, aby prędkość kątowa oraz strumień wirnika utrzymały wartości zadane. W przypadku nasycenia, zanikania bądź całkowitej utraty sygnału uszkodzenie CS doprowadza do utraty stabilności układu.*”

Moim zdaniem określenie *stabilna praca układu* nie jest dobrze wybrane. W teorii sterowania układ może być stabilny lub niestabilny przy czym są definiowane zmiany sygnałów w tych stanach. Oceniając przedstawione wyniki symulacji można stwierdzić jedynie czy napęd pracuje z zadanymi wartościami bliskimi sygnałom referencyjnym.

W niektórych analizowanych przypadkach, jeśli pomiar prądu jest błędny, występują zaburzenia wybranych sygnałów. Z kolei dla przypadku braku sygnałów pomiarowych prądu w fazach A i B moduł strumienia spada do zera ale to nie znaczy że układ jest niestabilny. W części (4.2.2) analizowana jest praca układu o strukturze sterowania DTC-SVM. Autor szczegółowo ocenia wyniki badań symulacyjnych i formułuje wnioski dotyczące wpływu poszczególnych rodzajów uszkodzeń na pracę układu napędowego. W podsumowaniu tego rozdziału wskazano na potrzebę modyfikacji tych podstawowych struktur sterowania dla przypadku uszkodzenia określonego jako nasycenie lub też całkowitego zaniku sygnału pomiarowego z czujników prądu.

W rozdziale 5 „METODY ESTYMACJI PRĄDU STOJANA” opisano 3 wybrane metody estymacji prądu stojana:

1. Estymacja prądu w oparciu o symetrię trójfazową
2. Algorytm Virtual Current Sensor
3. Estymator prądu oparty na zmodyfikowanym obserwatorze Luenbergera

Estymator (1) dotyczy przypadku kiedy są czujniki prądu w każdej z trzech faz, a w przypadku uszkodzenia jednego z czujników można w łatwy sposób wyznaczyć prąd w fazie z czujnikiem uszkodzonym korzystając z dwóch poprawnych pomiarów.

Estymator (2) korzysta z równań opisujących silnik indukcyjny klatkowy przy czym wymuszeniem jest napięcie stojana, a niewiadomymi prąd stojana i strumień wirnika. Wartość napięcia stojana jest obliczana na podstawie znajomości napięcia w obwodzie DC i współczynników wypełnienia w sygnale PWM.

Moim zdaniem są to struktury oczywiste i stanowią jedynie przykładowe rozwiązania wykorzystywane w dalszej pracy do analizy porównawczej.

Estymator (3) bazuje na obserwatorze Luenbergera. Zdefiniowany został wektor błędu obserwatora jako różnicę wartości mierzonej i odtwarzanej, a następnie podano zależności na współczynniki wzmocnień obserwatora (wyprowadzenie w załączniku). Wprowadzony został parametr  $k_0$ , który dla wartości równej 1 zeruje wszystkie wzmocnienia obserwatora. W takim przypadku równanie obserwatora sprowadza się do opisu silnika indukcyjnego w przestrzeni stanu, a współczynniki macierzy stanu zależą od prędkości kątowej  $\omega$ .

Ponieważ macierz stanu zależy od prędkości kątowej  $\omega$  to konieczna jest znajomość prędkości w każdej chwili czasowej.

Niestety w pracy nie podano bezpośrednio jak to jest uwzględniane w modelu symulacyjnym oraz układzie sterowania.

W dalszej części Autor proponuje modyfikację OL polegającą na wprowadzeniu prądów skorygowanych i zdefiniowaniu błędu estymatora jako różnicy wielkości estymowanych i skorygowanych. Wielkości skorygowane są dalej wyznaczane w różny sposób dla przypadków: nieuszkodzonych czujników, uszkodzeniu czujnika w fazie A, uszkodzeniu czujnika w fazie B oraz uszkodzeniu obu czujników.

Przytaczając wyniki symulacji dla OL i MOL wskazano lepsze właściwości estymatora MLO dla napędu FOC oraz napędu DTC-SVM. Algorytm MOL można uznać za autorski.

W rozdziale 6 „METODY POPRAWY JAKOŚCI ESTYMACJI PRĄDU STOJANA” Autor zauważa, że estymatory zmiennych stanu zależą od parametrów silnika co skłoniło go do badania wpływu zmian rezystancji stojana i wirnika oraz indukcyjności głównej. Badania przeprowadzono dla estymatora MLO, uwzględniając przy tym także wpływ parametru  $k_0$ . Badania zrealizowano dla różnie zdefiniowanych zakresów zmian prędkości kątowej i momentu obciążenia. Autor komentując wyniki badań ocenia wiele różnych kombinacji



przedstawionych na kilkudziesięciu rysunkach. W podsumowaniu stwierdzono, że dokładniejsze estymowanie prądów cechuje estymator MLO w porównaniu do LO. Zamieszczone zostały wyniki obliczeń dla 144 przypadków (str. 82). Ocena tych rezultatów, przez czytelnika jest praktycznie niemożliwa.

W podrozdziale 6.2 „Algorytm Dual Modified Luenberger Observer” zaproponowana została modyfikacja polegająca na zastosowaniu podwójnego obserwatora Luenbergera. Jeden z obserwatorów pracuje ze stałym współczynnikiem  $k_0$ , a drugi wykorzystuje przestrajany współczynnik  $k_0$  w zależności od parametru  $\lambda$ . Przytaczając przykładowe przebiegi prądów Autor stwierdza, że ten obserwator charakteryzuje się lepszymi wynikami odtwarzania prądów w porównaniu do poprzednio omawianych LO i MLO, Także ten algorytm DMOL należy uznać za autorski. Uważam, że jest to oryginalne rozwiązanie, ale na Rys. 6.19, podpisanym „Schemat algorytmu DMLO.” przedstawiona jest struktura blokowa estymatora a nie algorytm.

W kolejnym podrozdziale 6.3 „Estymacja rezystancji wirnika i stojana” opisano estymatory bazujące na: algorytmie VCS, modelu prądowym i napięciowym strumienia stojana, modelu neuronowym.

W dalszej części zawarta jest analiza jakości pracy estymatorów w strukturach sterowania wektorowego oraz przedstawiono obszernie wyniki badań rozważanych estymatorów.

W podrozdziale 6.4 „Wpływ czasu martwego falownika napięcia oraz jego kompensacji na jakość estymacji prądu stojana” analizowano działania estymatorów dla przypadków różnych czasów martwych w zakresie od 1 do 5  $\mu s$ . Autor stwierdza, że kompensacja czasu martwego jest celowa w przypadku algorytmu VCS w szczególności dla czasu martwego 5  $\mu s$  zwracając jednocześnie uwagę na niewrażliwość algorytmu DMLO na występowanie czasu martwego. Wyniki badań symulacyjnych zostały zweryfikowane eksperymentalnie.

W rozdziale 7 „DETEKCJA I LOKALIZACJA USZKODZEŃ CZUJNIKÓW PRĄDU” zaproponowano prosty algorytm detekcji uszkodzeń wykorzystujący różnicę pomiędzy prądami mierzonymi i estymowanymi. zamieszczono schemat blokowy kompensatora uszkodzeń. Proponowana strategia ma zapewniać detekcję dowolnego rodzaju uszkodzenia czujnika prądu i jego lokalizację niezależnie od stanu pracy napędu.

W rozdziale 8 „ANALIZA WEKTOROWYCH STRUKTUR STEROWANIA TOLERUJĄCEGO USZKODZENIA CZUJNIKÓW PRĄDU” przedstawiono wyniki badań na stanowisku laboratoryjnym z silnikiem indukcyjnym o mocy 1,1 kW - testując strategie sterowania DFOC oraz DTC-SVM. W podsumowaniu stwierdzono, że całkowity zanik sygnału oraz nasycenie czujnika prądu są najłatwiejsze do wykrycia i skompensowania. Podobnie oceniono kompensację w przypadku offsetu. Zwrócono uwagę, że trudne do wykrycia są przypadki wystąpienia błędu wzmocnienia w szczególności jeśli są one niewielkie.

### 3. Uwagi dyskusyjne i krytyczne

Praca jest bardzo obszerna i uważam, że pominięcie rozdziałów 2 i 3, w których zawarte są powszechnie znane (książkowe) opisy matematyczne silnika indukcyjnego klatkowego, przekształtnika o topologii dwu-poziomowego mostka 3-gałęziowego oraz struktur sterowania DFOC i DTC, nie wnoszą niczego nowego. Niektóre krótkie informacje takie jak opis matematyczny i schematy sterowania można umieścić odpowiednio w rozdziale 5 i 8.

Podobnie oceniam liczbę zamieszczonych wyników testów symulacyjnych. Także podawane wyniki liczbowe dotyczące dokładności estymacji prądu nie wnoszą istotnych informacji. Moim zdaniem powinny być wybrane te, które pozwalają jednoznacznie ocenić proponowane rozwiązania w sposób uogólniony.

Taki sposób przedstawienia wyników badań ma raczej formę raportu z przeprowadzonych testów.

W podrozdziale 6.3.3 zaprezentowany został neuronowy estymator rezystancji wirnika. Jest to architektura sieci jednokierunkowej o neuronach z liniową funkcją aktywacji. Do wyznaczenia wag stosowana była metoda wstecznej propagacji błędu. Jest to narzędzie, które pozwala wyznaczyć współczynniki wagowe sieci o takiej architekturze, ale w tym przypadku nie jest to konieczne i można to zrobić analitycznie.

Moim zdaniem brakuje w pracy precyzyjnego podania algorytmów estymacji czy też detekcji uszkodzeń w postaci diagramu przepływów. Tak podane algorytmy są pomocne przy analizowaniu oryginalności i istoty proponowanej metody estymacji czy też metod sterowania.

Po przeczytaniu pracy nasuwa mi się pytanie, czy Autor próbował wykonać testy dla przypadku, gdy po wykryciu uszkodzenia korzysta się z sygnałów uzyskiwanych z modelu silnika liczonego „online” bez dostępu do jakichkolwiek pomiarów?

#### Ocena celów naukowych.

Na stronie 28 podano, że „... Głównym celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest opracowanie układu tolerującego uszkodzenia czujników prądu w napędzie z silnikiem indukcyjnym sterowanym wektorowo, który ograniczy wpływ parametrów silnika na jakość detekcji oraz kompensacji uszkodzenia. Dodatkowym celem jest zapewnienie poprawnej pracy wektorowej struktury sterowania układem napędowym nawet w przypadku, gdy wszystkie czujniki prądu ulegną awarii ...”

Cel został poprawnie sformułowany, a w treści pracy są opisy i analizy dotyczące tych zagadnień.

#### Ocena źródeł literaturowych.

W spisie literatury podano 120 prac opublikowanych w czasopiśmie lub materiałach konferencyjnych oraz 14 książek. Spis jest uzupełniony o 15 pozycji w których mgr inż. Michał Adamczyk jest współautorem oraz o jedną publikację autorską. Można uznać, że jest to reprezentatywny zbiór obejmujący zagadnienia przedstawiane w pracy.

#### Ocena rozwiązania problemów naukowych i oryginalności

Autor podjął się rozwiązania zagadnień naukowych, które zostały sformułowane w tezach pracy.

Do najważniejszych osiągnięć Autora można zaliczyć :

- opracowanie kilku algorytmów estymowania prądu stojana - ze szczególnym uwzględnieniem oryginalnego algorytmu DML0 - zapewniających odtwarzanie wartości prądu w przypadku wystąpienia określonych uszkodzeń w czujnikach pomiarowych
- opracowanie własnego estymatora rezystancji wirnika, którego wprowadzenie poprawiało dokładność odtwarzania prądu stojana
- wykazanie, że kompensacja czasu martwego w sterowaniu przekształtnikiem ma istotne znaczenie w przypadku układów CS-FTC

- opracowanie układu detekcji uszkodzeń z adaptacyjnym modyfikowaniem współczynnika progowego
- przygotowanie i przeprowadzenie wielu testów komputerowych oraz eksperymentalnych

#### Ocena redakcji pracy.

Redakcja praca jest poprawna. Mam pewne zastrzeżenia do graficznej prezentacji. wyników symulacji czy też badań laboratoryjnych. Na wielu rysunkach nałożonych jest na siebie kilka, niewiele się różniących, przebiegów. Utrudnia to analizowanie prezentowanych wyników.

Przedstawianie rysunków w sposób taki, że część jest na jednej, a część, łącznie z podpisem, na drugiej stronie utrudnia porównanie prezentowanych wyników.

#### **4. Wniosek końcowy**

Sformułowane powyżej uwagi dyskusyjne nie zmieniają pozytywnej oceny pracy. Praca stanowi dojrzałe przedstawienie zagadnień sterowania tolerującego uszkodzenia czujników prądu w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi i stanowi oryginalny wkład Autora do teorii i praktyki w obszarze projektowania układów typu FTC. Autor wykazał się znajomością zagadnień z dyscypliny „Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne”, 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.

Moim zdaniem rozprawa doktorska - mgr. inż. Michała Adamczyka pt. *„Wektorowe sterowanie tolerujące uszkodzenia czujników prądu w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi – detekcja, lokalizacja i kompensacja uszkodzeń”* spełnia wymagania stawiane przez aktualnie obowiązującą ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Warszawa, 16-12-2023