

Prof. dr hab. inż. Wojciech Jarzyna
Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin
tel. 81 5384339; e-mail: w.jarzyna@pollub.pl

Lublin, 06.12.2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Adameczyka

pt. „Wektorowe sterowanie tolerujące uszkodzenia czujników prądu w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi – detekcja, lokalizacja i kompensacja uszkodzeń”

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej z dnia 25 września 2023 r.

1. Ocena problematyki rozprawy

Badania w zakresie diagnostyki układów technicznych, a w szczególności układów napędowych, prowadzone są w wielu czołowych ośrodkach naukowych. Do ich realizacji wykorzystywane są różne metody badawcze. Wszystkie one wymagają dobrej znajomości obiektu i umiejętności określenia oceny stanu tego obiektu. Chronologicznie, jako pierwsze rozwijały się metody oparte na analizie sygnałów uzyskiwanych na podstawie badań doświadczalnych i modelowych. Takie podejście jest nadal aktualne, gdyż pozwala na opracowanie map relacji określającym wielowymiarowe zależności pomiędzy symptomami a klasyfikowanymi uszkodzeniami diagnozowanych układów.

Wspomniane metody oparte na analizie sygnałów mają jednak wiele ograniczeń wynikających z czasu ich realizacji, nieodzownego wyposażenia technicznego i kosztów sprzętowo-aparaturowych. Pierwsza z wymienionych wad niesie za sobą największe ograniczenia. Wieloargumentowe systemy diagnostyczne oparte na systemach czujnikowych nie spełniają wymagań diagnostyki w czasie rzeczywistym i nie nadają się do identyfikacji uszkodzeń, zwłaszcza w systemach sterowania wektorowego. Ograniczenia te Doktorant doskonale rozumie stąd w ślad za głównym nurtem badań Pani Profesor Teresy Orłowskiej-Kowalskiej podjął się On realizacji badań z zakresu detekcji, lokalizacji i kompensacji efektów oddziaływania uszkodzeń czujników prądu stojana na sterowany wektorowo układ napędowy.

Wybraną tematykę badań uważam za bardzo nowoczesną i w pełni zasługującą na zainteresowanie i dalsze szczegółowe rozwijanie.

2. Ocena układu rozprawy, zastosowanego piśmiennictwa, celu i hipotezy badawczej

Oceniana rozprawa doktorska liczy 164 strony i podzielona została na dziewięć rozdziałów merytorycznych, spis bibliografii, wykaz oznaczeń oraz skrótów. Dodatkowo

praca zawiera pięć załączników, w których są wyprowadzenia matematyczne, opis stanowiska laboratoryjnego, parametry techniczne silnika oraz z opis graficznego interfejsu kontrolno-sterującego ControlDesk.

Układ rozprawy jest zgodny z wymaganiami stawianymi pracom naukowym. W jej początkowej części znajduje się wprowadzenie, w którym Doktorant zaznajamia czytelnika z problematyką diagnostyki maszyn i napędów elektrycznych, dokonuje podstawowych podziałów metod diagnostyki i przytacza szereg opinii, bogato powołując się przy tym na literaturę. Powołania te realizuje bardzo profesjonalnie.

We wprowadzeniu, poza metodami diagnostyki maszyn i napędów, Autor omawiając problematykę sterowania odpornego na uszkodzenia i błędy, płynnie przechodzi do metod bezpośrednio związanych z tematem rozprawy. Uwagę koncentruje na programowych metodach detekcji uszkodzeń czujników prądu oraz na układach kompensacji tych uszkodzeń.

Przeprowadzony przez Doktoranta przegląd literatury ma charakter dyskusji naukowej. Doktorant podaje przykłady, przytacza argumenty stosowania najważniejszych metod, formułuje ich oceny i wysuwa wnioski. Taka logicznie uporządkowana metodyka prowadzi w efekcie do określenia celu, zakresu rozprawy oraz sformułowania tez naukowych. Przytaczając sformułowania Doktoranta *Głównym celem rozprawy 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*. Wynikają stąd dwie tezy naukowe, które Autor dzieli na dwa problemy:

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. ...*
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.*

Dalszy układ rozprawy obejmuje twórczą część teoretyczną z modelami i badaniami modelowymi, szczegółowymi badaniami symulacyjnymi wraz z ich weryfikacją doświadczalną, dyskusją oraz wnioskami. Bezpośrednie omawianie zawartości tych rozdziałów pominięto w niniejszej recenzji, gdyż opiniodawca skupił się na ocenie zastosowanych metod badawczych i oryginalności pracy.

3. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych

Zastosowane przez Doktoranta metody badawcze są zgodne z przyjętą metodyką prac doktorskich i składają się z:

- a) uzasadnienia podjęcia tematu, studiów literaturowych, analizy i dyskusji metod opisywanych w literaturze oraz określenia celów badawczych i wskazania problemu naukowego,

- b) przedstawienia rozważań modelowych, które stanowią bazę dla dalszych twórczych rozważań doktoranta,
- c) formułowania własnych modeli i prowadzenia twórczych badań modelowych,
- d) badań eksperymentalnych pozwalających na weryfikację wyników badań modelowych,
- e) formułowania wniosków, wskazania perspektyw kontynuacji prac badawczych.

Przytoczone niżej argumenty potwierdzają realizację wymienionych wyżej działań:

- Ad.a) Jak już wspomniano, zasadność podjęcia tematu przeprowadzona została w rozdziale pierwszym. W rozdziale tym przeprowadzono również obszerną krytyczną dyskusję metod diagnostycznych. Pozwoliła ona na sprecyzowanie problemu badawczego oraz określenie zakresu badań. Stąd w kolejnych rozdziałach powołania na literaturę dotyczyły głównie pozycji literaturowych, w których Doktorant był autorem bądź współautorem.
- Pragnę przy tym jednoznacznie pochwalić przyjęty przez Doktoranta sposób cytowania. Jest on zbliżony do układu harwardzkiego, w którym podaje się nazwisko twórcy i datę opublikowania. W takim układzie cytowane dzieła nie są już anonimowe, jak to się często dzieje jeżeli podaje się tylko numerki przypisany w wykazie bibliografii, zapominając kto je realizował.
- Ad.b) Sformułowane przez Doktoranta tezy jednoznacznie wskazują na jądro badań naukowych, którym są badania modelowe. Dlatego rozdziały drugi i trzeci zawierają nowe lub modyfikowane modele poprzedzone opisem matematycznym z szeroką interpretacją zapisów matematycznych oraz wektorowych metod bezpośredniego polowo-zorientowanego sterowania DFOC oraz bezpośredniego sterowania momentem z modulacją przestrzenną wektora DTC-SVM. Z wykorzystaniem tych modeli, w rozdziale czwartym przeprowadzono badania wpływu wybranych uszkodzeń lub błędów na pracę wymienionych wcześniej układów sterowania wektorowego.
- Ad.c) Formułowanie własnych modeli matematycznych i co za tym idzie modeli obliczeniowych jest w recenzowanej pracy metodą pozwalającą osiągnąć postawione cele naukowe. W tym zakresie osiągnięcia Doktoranta są bardzo obszerne. Składają się na nie rezultaty badań przedstawione w kilku rozdziałach.
- W części czwartej rozprawy Doktorant rozpoczyna modelowanie przypadków uszkodzeń, przedstawia używane pojęcia oraz stosuje ogólnie znane interpretacje, stanowiące punkt odniesienia w kolejnych częściach pracy.
 - Rozdziały piąty i szósty dotyczą wykonania badań składających się w efekcie na realizację celów rozprawy. Początkowo mają one charakter wstępny, a rozważania są dość oczywiste. Jednak w miarę zgłębiania się w kolejne części rozprawy, rozważania wydają się być coraz bardziej pasjonujące. Przykładowo końcowa część rozdziału piątego, w której przedstawione są modyfikacje obserwatora Luenbergera, umożliwiła uzyskanie unikatowych własności opracowywanego modelu. Opisująca dalej analiza przypadków wskazuje na obszary, gdzie opracowywane estymatory mają wysoką dokładność i mogą znaleźć praktyczne zastosowanie. Szczególnie interesujący wydaje się być podwójnie zmodyfikowany obserwator z

członem kompensacyjnym. Jego zastosowanie zwiększa dokładność estymacji, a przy tym, zdaniem Autora, nie wymaga znacznego zwiększenia nakładów obliczeniowych.

- W rozdziale szóstym, poza negatywnym wpływem rezystancji stojana i wirnika, Doktorant analizował wpływ czasu martwego przełączania tranzystorów w każdym z półmostków oraz rozważał metody kompensacji tego czasu. Zastosowane metody oparte były o cytowaną literaturę a Doktorant wprowadził wybrane modyfikacje współczynnika wypełnienia kompensując negatywne działanie czasu martwego przekształtnika, zmniejszając błąd o wartość zależną od obciążenia i definiowanego czasu martwego.
- Tytułowe zadania detekcji, lokalizacji i kompensacji Doktorant rozwija korzystając z wcześniej opracowanych modeli oraz wprowadzając ich miary i algorytm identyfikacji pojawienia błędu. Zaproponowany w rozdziale siódmym logiczny algorytm działania porównujący i klasyfikujący zdefiniowane wcześniej względne miary niedokładności odtwarzania prądów został zastosowany w kolejnej części pracy, w której zweryfikowano wyprowadzone modele podczas badań dynamicznych.

Ad.d) Weryfikacja eksperymentalna wykonana została z wykorzystaniem stanowiska istniejącego w Instytucie, a opisanego przez Doktoranta w załącznikach Z3, Z4 i Z5. Doktorant poznał szczegółowo to stanowisko, umiał wprowadzić wymagane modyfikacje, a w szczególności zaimplementować realizowane przez siebie algorytmy. Uzyskane wyniki badań w kilku miejscach rozprawy zostały umiejętnie porównane względem obliczeń, co umożliwiło przeprowadzenie interesującej dyskusji wyników.

Ad.e) Uogólnienia i konkluzje Doktorant przedstawił w ostatnim rozdziale Wnioski i uwagi końcowe. Doktorant odniósł się w nim do realizacji celów rozprawy. Zgodnie z następstwem treści zwięźle przedstawił osiągnięte rezultaty. Niestety spodziewane wskazanie kierunku kontynuacji przedstawionych badań pojawiło się dość enigmatycznie.

Podsumowując, zastosowane metody badawcze są zgodne z ogólnie przyjętymi wymaganiami rozpraw naukowych i mogą stanowić wzór poprawnej realizacji badań i redakcji prac doktorskich.

4. Ocena oryginalności osiągnięcia naukowego

Do oryginalnych osiągnięć Doktoranta zaliczam:

- Wykazanie konieczności stosowania aktywnej strategii CS-FTC, która zabezpiecza układ przed konsekwencjami wystąpienia uszkodzenia komponentu pomiarowego prądu i możliwością utraty stabilności pracy.
- Zaproponowanie rozwiązania pozwalającego na zachowanie pełnej kontroli nad układem napędowym nawet w sytuacji, gdy wszystkie czujniki pomiarowe prądu CS ulegną awarii.
- Opracowanie zmodyfikowanego obserwatora Luenbergera MLO z odpowiednio dobranym współczynnikiem wzmocnień k_0 macierzy \mathbf{G} oraz jego wersję rozszerzoną

o układ kompensacji prądu DMLO. Ten ostatni układ znacząco zwiększa średnią procentową poprawę dokładności estymacji prądu stojana w stosunku do pozostałych, znanych z literatury metod. Ponadto wykazuje dużą odporność na czas martwy tranzystorów.

- Wykazanie, że kompensacja czasu martwego tranzystorów kilkukrotnie poprawia dokładność odtwarzania prądu stojana.
- Zastosowanie adaptacyjnego współczynnika progowego, co pozwoliło na zwiększenie dokładności pracy detektora bazującego na obliczeniach residuum mierzonych i estymowanego prądu.
- Uzyskanie własności wykrywania, lokalizacji i kompensacji różnego rodzaju uszkodzeń czujników prądu CS.

Wymienione osiągnięcia na poziomie wyróżniającym potwierdzają uzyskanie przez doktoranta umiejętności prowadzenia twórczej pracy o charakterze analitycznym, modelowym jak i eksperymentalnym.

5. Uwagi redakcyjne, zagadnienia problemowe oraz pytania nt. zauważonych nieprawidłowości lub wątpliwości recenzenta

Praca jest dziełem bardzo inspirującym. Jej studiowanie wywołało szereg pytań, a przykładowe przytoczone są poniżej:

- a) Zastosowanie opracowanych układów w przemyśle może przynieść duże korzyści. Czy badania wdrożeniowe opracowanych metod detekcji, lokalizacji i kompensacji są w obszarze zainteresowań Doktoranta?
- b) Niektóre zagadnienia rozwijane w pracy prezentowane były wcześniej w publikacjach Autora, stąd Doktorant unikając powtarzania schematów i modeli pomija niektóre treści. Niestety brak pewnych modeli utrudnia analizę rozprawy. Dlatego poproszę o wyjaśnienie modeli MLO_D oraz MLO_C , których schematy (rys.6.19) odbiegają od typowych topologii obserwatora.
- c) Czy jest możliwość oszacowania wzrostu wymagań parametrów, jakie powinien spełniać mikroprocesor realizujący algorytm DMLO w porównaniu do podstawowych układów z analizowaną regulacją wektorową?
- d) Podczas pracy przekształtnikowego układu napędowego generowanych jest szereg wyższych harmonicznych. Czy w warunkach rzeczywistych ich istnienie nie zakłóca działania opracowanych modeli?
- e) Badania eksperymentalne przeprowadzono na układzie z maszyną indukcyjną o mocy 1,1kW. W silnikach tej wielkości z reguły występuje znaczna asymetria parametrów fazowych. Czy nie sprawiało to problemów podczas badań eksperymentalnych?
- f) Jakie kierunki badań w dalszej perspektywie zamierza podjąć Doktorant? Czy będą one inspirowane najczęściej pojawiającymi się uszkodzeniami w układach napędowych?

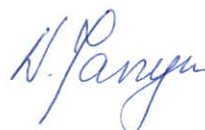
Doktoranta proszę o ustosunkowanie się do przedstawionych uwag formie pisemnej i przesłanie odpowiedzi z wykorzystaniem poczty elektronicznej na adres e-mail pobrany ze strony <https://ehms.pollub.pl/standard/staff.php>.

6. Ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia doktora w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Na podstawie przedstawionej dyskusji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Adamczyka stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz szczegółową wiedzą w zakresie modelowania i badań obliczeniowo-eksperymentalnych ukierunkowanych na detekcję, lokalizację i kompensację uszkodzeń wektorowo sterowanych napędów z silnikami indukcyjnymi. Realizując pracę naukową dowiódł posiadania umiejętności stosowania różnych metod badawczych co świadczy o posiadaniu kwalifikacji i umiejętności samodzielnego prowadzenia prac naukowych.

Uwzględniając wymienione argumenty wnioskuję, aby rozprawę doktorską mgr. inż. Michała Adamczyka uznać za istotny wkład Autora w rozwój dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Stwierdzam, że opiniowana praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Adamczyka do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej.



WNIOSEK O WYRÓŻNIENIE ROZPRAWY

W przypadku pozytywnego rozstrzygnięcia procedowania o nadanie Panu mgr. inż. Michałowi Adamczykowi stopnia naukowego doktora, wnioskuję o wyróżnienie ocenianej rozprawy doktorskiej. Podstawą takiego wniosku jest moja bardzo wysoka ocena przedstawiona w niniejszej recenzji, w której na poziomie wyróżniającym oceniłem poziom naukowy rozprawy, oryginalność metod badawczych oraz bogaty udokumentowany dorobek naukowy, na który składa się co najmniej 1 art. za 200pkt, 2 art. za 140 pkt. 1 art. za 100 pkt. i 5 art. za 70 pkt.

