



dr hab. inż. Tomasz Tarczewski, prof. UMK  
Katedra Automatyki i Systemów Pomiarowych  
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej  
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu  
ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń

Toruń, 6 grudnia 2023 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Michała Adamczyka

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

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgra inż. Michała Adamczyka z Politechniki Wrocławskiej, pt. „*Wektorowe sterowanie tolerujące uszkodzenia czujników prądu w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi – detekcja, lokalizacja i kompensacja uszkodzeń*”. Podstawę opracowania recenzji stanowi pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej, Pana prof. dra hab. inż. Andrzeja Dziejzica z dnia 16 października 2023 r. Recenzja ma być wykorzystana w postępowaniu o nadanie Panu mgr. inż. Michałowi Adamczykowi stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

### 2. Wprowadzenie

Napędy elektryczne odporne na awarie elementów energoelektronicznych lub czujników pomiarowych stały się w ostatnich latach przedmiotem badań w wielu ośrodkach naukowych ze względu na rosnące zainteresowanie systemami napędowymi o podwyższonym poziomie bezpieczeństwa stosowanymi m.in. w elektromobilności. W aplikacjach tego typu powszechnie stosowane są silniki prądu przemiennego (indukcyjne, synchroniczne o magnesach trwałych, reluktancyjne) oraz wektorowe algorytmy sterowania (FOC, DTC). Algorytmy te wymagają informacji o aktualnych wartościach wybranych zmiennych stanu takich jak: prądy fazowe, napięcie obwodu pośredniczącego falownika, prędkość kątowna. Sygnały te są również wykorzystywane do estymacji trudno mierzalnych wielkości takich jak: moment elektromagnetyczny i strumień stojana lub wirnika. Aktualne wartości zmiennych

stanu są kluczowe dla poprawnego działania napędu elektrycznego a zapewnienie odporności na uszkodzenie czujników pomiarowych jest szczególnie pożądane w aplikacjach o podwyższonym poziomie bezpieczeństwa.

W rozprawie doktorskiej przedstawiono zagadnienia badawcze dotyczące opracowania wektorowego układu regulacji tolerującego uszkodzenia czujników prądu w napędzie elektrycznym z silnikiem indukcyjnym. Wykonano obszerną analizę wpływu uszkodzeń czujników prądu na układ napędowy oraz przedstawiono autorskie algorytmy służące do detekcji i kompensacji uszkodzeń czujników prądu. Zaproponowane rozwiązanie zapewnia poprawną pracę wektorowej struktury sterowania napędem także w przypadku awarii wszystkich czujników prądu.

W mojej ocenie tematyka poruszona w rozprawie doktorskiej jest ważna i aktualna zarówno z badawczego jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Tematyka ta zawiera się w obszarze badań związanych z automatyką napędu elektrycznego, które obecnie wchodzi w zakres dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

### 3. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgra inż. Michała Adamczyka liczy łącznie 180 stron i składa się z 9 rozdziałów obejmujących: wstęp z celem, tezami naukowymi i szczegółowym zakresem prac oraz obecnym stanem wiedzy, część badawczą, wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych, wnioski i uwagi końcowe oraz bibliografię i załączniki. Spis literatury zawiera łącznie 136 pozycji, w tym 16 prac Doktoranta pochodzących z konferencji międzynarodowych organizowanych pod patronatem IEEE oraz opublikowanych w prestiżowych czasopismach posiadających IF. Analiza źródeł literaturowych została przeprowadzona w sposób właściwy.

W rozdziale pierwszym, będącym wprowadzeniem do rozprawy, autor przedstawił zagadnienia związane z detekcją i kompensacją uszkodzeń czujników prądu w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi oraz zamieścił cel i tezy pracy. Celem rozprawy było opracowanie metod wykrywania, lokalizowania i kompensowania uszkodzeń czujników prądu w układzie napędowym z falownikiem napięcia i silnikiem indukcyjnym. Problem naukowy został jasno sformułowany przez Doktoranta w postaci następujących tez naukowych:

„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.”,

„Opracowany algorytm DMLO przeznaczony do detekcji i kompensacji uszkodzenia czujników prądu stojana umożliwia 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.”.

W rozdziale drugim Doktorant przedstawił opis matematyczny przekształtnikowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym. Omówione zostało zastosowanie wektorów przestrzennych oraz transformacje układów współrzędnych w procesie modelowania silników. Przedstawiono również strategie modulacji stosowane w falownikach napięcia oraz model matematyczny falownika.

Rozdział trzeci przedstawia wektorowe metody sterowania silnikami prądu przemiennego tj. sterowanie polowo-zorientowane (FOC) oraz bezpośrednie sterowanie momentem (DTC-SVM).

W kolejnych rozdziałach zawarto najbardziej wartościowe treści ocenianej rozprawy doktorskiej. Analizę wpływu uszkodzeń czujników prądu na pracę układu napędowego przedstawiono w rozdziale czwartym. Piąty rozdział ukazuje estymację prądu stojana bazującą na autorskim algorytmie Virtual Current Sensor oraz na zmodyfikowanym obserwatorze Luenbergera. W rozdziale zaprezentowano porównanie opracowanych metod z referencyjnymi. Kompleksową analizę jakości estymacji prądu stojana uwzględniającą wpływ zmian parametrów silnika indukcyjnego zamieszczono w rozdziale szóstym. Na podstawie uzyskanych wyników zaproponowano algorytm Dual Modified Luenberger Observer charakteryzujący się wysoką jakością detekcji i kompensacji uszkodzeń czujników prądu. Rozdział zawiera również wyniki badań eksperymentalnych opracowanego rozwiązania oraz analizę wpływu czasu martwego na jakość estymacji prądu stojana. W rozdziale siódmym ukazano autorskie algorytmy detekcji, lokalizacji i kompensacji uszkodzeń czujników prądu. Wykazano, że zastosowanie adaptacyjnego współczynnika progowego pozwala na uzyskanie wysokiej skuteczności detekcji uszkodzeń w stanach ustalonych oraz przejściowych. Dzięki zastosowaniu algorytmu Dual Modified Luenberger Observer uzyskano odporność algorytmu detekcji na zmiany parametrów silnika indukcyjnego. Rozdział ósmy zawiera wyniki badań eksperymentalnych dwóch wektorowych struktur sterowania napędem elektrycznym z silnikiem indukcyjnym rozbudowanych o autorskie algorytmy zapewniające tolerancję uszkodzenia czujników prądu.

Tolu

W rozdziale dziewiątym zamieszczono podsumowanie przeprowadzonych prac badawczych, spostrzeżenia i wnioski, podsumowanie najważniejszych, oryginalnych osiągnięć Autora rozprawy oraz potencjalne kierunki dalszych badań.

#### 4. Ocena rozprawy

W recenzowanej rozprawie doktorskiej przedstawione zostały zagadnienia dotyczące estymatorów prądu stojana silnika indukcyjnego w kontekście wektorowego sterowania tolerującego uszkodzenia czujników prądu. Tematyka i przedstawione wyniki są oryginalne i istotne zarówno w skali krajowej jak i światowej. Zaletą rozprawy jest przedstawienie przez Doktoranta pełnego cyklu badawczego, w którym analiza teoretyczna jest uzupełniona wynikami badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych. Założony cel badań został zrealizowany a postawione tezy w pełni udowodnione.

Autor przygotowując rozprawę wykazał się znaczną wiedzą teoretyczną i praktyczną, umiejętnością prowadzenia badań naukowych oraz poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych wyników. Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć Autora należy zaliczyć:

- opracowanie modelu układu napędowego i przeprowadzenie badań symulacyjnych obejmujących analizę wpływu uszkodzeń czujników prądu na jakość pracy napędu z silnikiem indukcyjnym,
- opracowanie algorytmów estymacji prądu stojana w przypadku uszkodzenia czujników prądu oraz estymatora rezystancji wirnika,
- modyfikację obserwatora Luenbergera oraz opracowanie algorytmu bazującego na dwóch zmodyfikowanych obserwatorach,
- przygotowanie stanowiska badawczego umożliwiającego konfigurowanie układu napędowego, symulowanie uszkodzeń czujników prądu oraz akwizycję danych,
- opracowanie i przeprowadzenie badań eksperymentalnych wektorowego sterowania tolerującego uszkodzenia czujników prądu na układzie napędowego z silnikiem indukcyjnym.

#### 5. Uwagi dyskusyjne i szczegółowe

Redakcja pracy jest staranna, tym niemniej autor nie uniknął drobnych błędów edytorskich i stylistycznych, np.:

- autor korzysta z powszechnie stosowanego w napędzie elektrycznym terminu „odsprzęganie”, natomiast w jednym miejscu pracy wprowadza termin „autonomizacja”,



- formuły (5.4) i (5.5) zapisano czcionką mniejszą niż w pozostałych przypadkach,
- podczas omawiania wyników ukazanych na Rys. 5.2 Doktorant odnosi się do „powyższego rysunku” podczas gdy grafika została zamieszczona pod opisem,
- omawiając zestawione w tabelach 6.15 – 6.17 średnie procentowe wartości RMSE estymacji prądu i rezystancji stojana oraz rezystancji wirnika Doktorant wskazuje, że najniższe wartości błędu dla danego punktu pracy oznaczono kolorem błękitnym jednak w wierszu drugim tabeli 6.16 widoczne są wartości mniejsze od oznaczonych kolorem błękitnym.

Po przeanalizowaniu rozprawy nasuwa się kilka uwag o charakterze dyskusyjnym o różnej wadze merytorycznej, na które proszę Doktoranta o odpowiedź:

1. W podrozdziale 1.1. dotyczącym wprowadzenia do układów typu FTC Autor omawia techniki redundancji dzieląc je na sprzętowe i programowe. Proszę o wskazanie przykładowych aplikacji wykorzystujących układy napędowe, w których stosowane są obie omawiane techniki.
2. We wstępie do podrozdziału 3.1.2 ukazującego analizę pracy struktury sterowania DFOC Doktorant przedstawił warunki pracy napędu. Omawiając warunki zadawania momentu obciążenia wskazał, że „w czwartej sekundzie rozpoczęto hamowanie odzyskowe przy połowie momentu znamionowego”. Widoczne na Rys. 3.4 e, f przebiegi wskazują, że wartość momentu różni się od wskazanej. Proszę o wyjaśnienie przyczyn rozbieżności.
3. Analizując wpływ odsprzęgania na pracę układu napędowego ze strukturą DFOC Doktorant zauważył większe oscylacje składowych prądu dla struktury z odsprzęgnięciem torów sterowania (Rys. 3.4). Proszę o analizę tego zjawiska.
4. Analizując wpływ odsprzęgania na pracę układu napędowego ze strukturą DTC-SVM Doktorant stwierdził, że przebiegi dla obu przypadków są bardzo zbliżone. Czy w takim przypadku konieczne jest stosowanie odsprzęgania w rozważanej strukturze regulacji? W jakich warunkach pracy napędu mogą wystąpić negatywne konsekwencje spowodowane brakiem odsprzęgania?
5. W podrozdziale 5.3.1 dotyczącym modyfikacji obserwatora Luenbergera Autor przyjął założenie o dostępności trzech pomiarów prądu w trzech fazach. Zarówno wcześniejsze założenia jak i wyniki badań eksperymentalnych ukazane w dalszej części rozprawy bazują na pomiarach w dwóch fazach. Proszę o wyjaśnienie nieścisłości.
6. We wstępie do podrozdziału 6.1 Doktorant wymienia główną wadę estymatorów zmiennych stanu bazujących na modelach matematycznych. Proszę o podanie źródeł literaturowych.

7. W podrozdziale 6.1.2 zbadano wpływ parametrów na strukturę z czujnikiem prądu tylko w fazie *A*. Proszę o doprecyzowanie jaki rodzaj uszkodzenia czujnika prądu w fazie *B* przyjęto do analizy.
8. Proszę o wyjaśnienie dlaczego oś  $k_0$  na Rys. 6.12, 6.15 oraz 6.18 została wyskalowana w odniesieniu do parametrów silnika.
9. Omawiając wyniki zestawione w tabeli 6.7 i 6.8 Autor wskazuje na możliwość wprowadzenia adaptacyjnej zmiany współczynnika  $k_0$ . Proszę o wskazanie metody adaptacji, która zdaniem Doktoranta powinna zostać zastosowana w tym przypadku.
10. W podrozdziale 6.3.1 omówiono estymator rezystancji wirnika oparty na algorytmie VCS. Nastawy regulatora opisanego zależnością (6.5) zostały dobrane symulacyjnie. Proszę o wskazanie jakimi przesłankami kierował się Autor podczas doboru nastaw.
11. Na Rys. 6.35 przedstawione zostały wyniki estymacji wartości rezystancji wirnika w odniesieniu do wartości znamionowych. W początkowej fazie pracy napędu (tj. dla  $t < 2$  s) widoczne są gwałtowne zmiany. Co jest przyczyną takiego działania estymatora bazującego na algorytmie VCS?
12. W podrozdziale 6.4 zbadano wpływ czasu martwego tranzystorów oraz jego kompensacji na jakość estymacji prądu stojana. Na potrzeby analizy przyjęto trzy wartości czasu martwego: 1  $\mu$ s, 3  $\mu$ s oraz 5  $\mu$ s. Proszę o informację ile wynosi czas martwy tranzystorów zastosowanych w falowniku napięcia na stanowisku badawczym.
13. Na podstawie przeprowadzonej analizy Doktorant zaproponował realizację kompensacji czasu martwego z wykorzystaniem prądów estymowanych. Zestawione w tabeli 6.19 wyniki wskazują, że zbliżoną jakość estymacji prądu stojana można uzyskać dla metody bazującej na prądach referencyjnych. Dlaczego ta metoda kompensacji nie została wybrana?

## 6. Podsumowanie

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę rozprawy mgra inż. Michała Adamczyka z Politechniki Wrocławskiej. Recenzowana rozprawa doktorska pt. *„Wektorowe sterowanie tolerujące uszkodzenia czujników prądu w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi – detekcja, lokalizacja i kompensacja uszkodzeń”* zawiera rozwiązanie problemu naukowego, świadczy o bardzo dobrej wiedzy autora w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Przedstawione w rozprawie zagadnienia obejmują najnowsze osiągnięcia nauki i świadczą o bardzo dobrej znajomości tematyki prezentowanej przez Autora. Zaproponowana struktura wektorowego sterowania tolerującego uszkodzenia czujników prądu w układzie napędowym z silnikiem indukcyjnym

oraz autorskie algorytmy detekcji i kompensacji uszkodzeń mogą być podstawą dalszych prac zmierzających do implementacji przemysłowych.

**Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Michała Adamczyka z Politechniki Wrocławskiej, pod tytułem „*Wektorowe sterowanie tolerujące uszkodzenia czujników prądu w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi – detekcja, lokalizacja i kompensacja uszkodzeń*” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, wymienione w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2016 r. poz. 882 i 1311) z późniejszymi zmianami.**

**W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie pracy doktorskiej mgra inż. Michała Adamczyka do publicznej obrony. Dodatkowo, ze względu na wysoki poziom naukowy zrealizowanej rozprawy oraz oryginalność zastosowanych metod badawczych, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.**

Tomasz Tawewski