

Prof. dr hab. Marian P. Kaźmierkowski
IEEE Fellow, Czł. rzec. PAN
Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej
Politechnika Warszawska

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Elektrotechniki
Warszawa-Międzyzlesie

Warszawa, 26.08.2019 r.

OPINIA

o rozprawie doktorskiej mgr inż. Mateusza KORZONKA

pt. "**Analiza stabilności wybranych estymatorów prędkości silnika indukcyjnego w różnych stanach pracy napędu**"

1. Aktualność tematyki

Rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Korzonka obejmuje 170 stron, zawiera 101 pozycji cytowanej literatury i poświęcona jest zagadnieniom estymacji zmiennych stanu w napędach bezczujnikowego sterowania wektorowego silników indukcyjnych. Sterowanie wektorowe to szeroka klasa napędów AC, w których układ sterowania oddziałuje nie tylko na częstotliwość i amplitudę wektorów napięcia, prądu czy strumienia, ale także na ich chwilowe położenie (fazę) zapewniając warunki pracy analogiczne jak w silnikach prądu stałego. Spośród stosowanych klasycznych metod sterowania wektorowego silników indukcyjnych wyróżnia się:

- Sterowanie polowo-zorientowane (ang. *Field Oriented Control - FOC*),
- Bezpośrednia regulacja momentu (ang. *Direct Torque Control – DTC*),
- Bezpośrednia regulacja momentu z modulacją wektorową (ang. *Direct Torque Control with Space Vector Modulation – DTC-SVM*).

Realizacja takich układów sterowania wymaga estymacji niedostępnych zmiennych stanu jak wektor strumienia wirnika lub stojana na podstawie łatwo mierzalnych wielkości napięcia i prądu stojana. W napędach bez czujnika mechanicznego dodatkowo estymowana jest prędkość/położenie wału wirnika. Systemy estymacji muszą spełniać wysokie wymagania dokładności i niezawodności generowanych sygnałów estymowanych, co nie jest łatwe szczególnie w obecności różnych zaburzeń i zmian parametrów występujących napędach przekształtnikowych. Istnieje wiele metod estymacji zarówno zmiennych stanu jak też parametrów silników indukcyjnych (patrz bogaty wykaz literatury przedmiotu w opiniowanej rozprawie), które ogólnie można podzielić na [3] a) metody z

zastosowaniem dodatkowego sygnału próbnego, b) metody algorytmiczne bazujące na modelu silnika indukcyjnego oraz c) metody wykorzystujące sztuczną inteligencję – sieci neuronowe i ich kombinacje z metodami zbiorów rozmytych. Najbardziej rozwiniętą grupą są metody algorytmiczne, a wśród nich metodą, która rokuje nadzieje na powszechne stosowanie w napędach indukcyjnych jest technika sterowania adaptacyjnego z modelem oznaczana skrótem MRAS Model Reference Adaptive System. Przy czym jak wykazał Ioan D. Landau - twórca podstaw teorii układów adaptacyjnych z modelem (I. D. Landau, *Adaptive Control – The Model Reference Approach*, New York, Marcel Dekker, 1979) systemy te mogą być stosowane dualnie zarówno do sterowania jak też do identyfikacji zmiennych stanu i parametrów obiektów sterowania.

Ta szeroka grupa zagadnień sterowania bezczujnikowego jest przedmiotem analizy i badań prezentowanych w niniejszej rozprawie. Należy przy tym podkreślić, że Zespół prof. Teresy Orłowskiej-Kowalskiej z Politechniki Wrocławskiej należy do wiodących ośrodków akademickich nie tylko w kraju, ale także za granicą, które zajmują się powyższą tematyką, a prezentowana rozprawa jest już kolejną, która wpisuje się w ten aktualny nurt wnosząc wyraźne elementy oryginalne „szkoły wrocławskiej”.

2. Zakres i ogólna charakterystyka rozprawy

Autor rozprawy sformułował następujące dwie tezy:

Teza 1 „Zastosowanie zmian w strukturze modelu adaptacyjnego i/lub modyfikacji algorytmu adaptacji w estymatorach prądowych $MRAS^{CC}$ i AFO zapewnia stabilną pracę estymatorów w generatorowym trybie pracy silnika indukcyjnego”.

Teza 2 „Zaprojektowane w postaci ciągłej zmodyfikowane estymatory $MRAS^{CC}$, po dyskretyzacji z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody Eulera zachowują swoje właściwości (w tym stabilność) podczas pracy w cyfrowej strukturze sterowania silnikiem indukcyjnym”.

W pracy Autor konsekwentnie dąży do udowodnienia sformułowanych tez posługując się metodami teoretyczno-analitycznymi oraz badaniami symulacyjnymi i eksperymentalnymi, jako sposobem weryfikacji wyników.

Rozdział 1 stanowi wstęp zawierający przegląd metod odtwarzania prędkości silników indukcyjnych (SI) stosowanych w bezczujnikowych napędach wektorowych ze szczególnym uwzględnieniem będących przedmiotem rozprawy układów adaptacyjnych z modelem (ang. Model Reference Adaptive Systems – MRAS). Rozważania te, poparte przeglądem problemów (stabilności, wpływu zmian parametrów SI) na bazie szerokiej literatury przedmiotu, stanowią punkt wyjściowy do sformułowania celu i tez oraz zakresu rozprawy.

Rozdział 2 przedstawia ogólną teorię układów MRAS w zastosowaniu do estymacji prędkości kątovej SI, w szczególności zastosowanie teorii Lapunova do wyprowadzenia ogólnego mechanizmu adaptacji.

Następnie w Rozdziale 3 Autor sformułował model matematyczny SI przyjmując prezentację na bazie wektorów przestrzennych oraz zapis w jednostkach względnych. Dla dalszych rozważań przyjmuje, że dynamika zmian stanów elektromagnetycznych SI jest wyższa od dynamiki zmian prędkości kątovej, co pozwala na pominięcie równania ruchu i przedstawienie modelu SI w postaci równania stanu opisującego procesy elektromagnetyczne, przy czym jako zmienne stanu przyjmuje wektory prądu stojana i strumienia skojarzonego wirnika. Tak sformułowany model SI jest następnie podstawą do jednolitej prezentacji rozważanych w rozprawie modeli estymatorów prędkości: adaptacyjnego obserwatora pełnego rzędu AFO (ang. Adaptive Full-order Observer), prądowo-prądowego MRAS^{CC} oraz prądowo-napięciowego MRAS^{CV}.

Obszerny i ważny merytorycznie Rozdział 4 zawiera teoretyczną analizę stabilności rozważanych estymatorów prędkości AFO, MRAS^{CC}, MRAS^{CV} na bazie przyjętej przez Autora następującej procedury: przedstawienie równania błędu estymacji zmiennych stanu, linearyzacja równania błędu wokół ustalonego punktu pracy, analiza stabilności zlinearyzowanej macierzy stanu stosując kryterium Hurwitza oraz kryterium biegunów/wartości własnych. Szczegółową analizę rozważanych estymatorów zawiera Podrozdział 4.2, natomiast metody poprawy stabilności w całym zakresie pracy silnikowej i generatorowej SI przy zastosowaniu kolejno trzech metod: doboru macierzy wzmocnień, modyfikacji algorytmu adaptacji przez wprowadzenie wartości kąta φ pomiędzy wektorem błędu estymacji prądu stojana a wektorem strumienia wirnika, wprowadzenie do modelu matematycznego estymatora dodatkowej zmiennej μ omówiono w Podrozdziale 4.3. Wnikliwe i systematyczne badania symulacyjne i eksperymentalne weryfikujące powyższe rozważania teoretyczne zarówno w zakresie regulacji ze stałym momentem jak i w zakresie regulacji strumienia stojana przedstawiono w Podrozdziale 4.4. Przy czym badano pracę estymatorów w układzie otwartym jak też w zamkniętym układzie sterowania wektorowego prędkości kątovej. Kończący Podrozdział 4.5 zawiera tabelaryczne zestawienie innych wersji estymatorów klasy MRAS (między innymi MRAS^F, Q-MRAS, X-MRAS, P-, O-, X-, Y-) oraz omówienie ich stabilności wraz z metodami jej poprawy.

Rozdział 5 omawia wpływ błędu parametrów SI (rezystancji obwodu wirnika i stojana oraz indukcyjności głównej) na stabilność pracy wszystkich analizowanych w Rozdziale 4 estymatorów. W modelu symulacyjnym estymatora pracującego w układzie otwartym zmieniano wartość analizowanego parametru o $\pm 10\%$, $\pm 30\%$ oraz $\pm 50\%$ wartości znamionowej i badano jego wpływ na stabilność i dokładność estymacji prędkości kątovej prezentując wyniki na płaszczyźnie prędkość-moment obciążenia ($\omega_m - m_L$). Ważnym wynikiem badań jest wykazanie, że wszystkie zmodyfikowane estymatory pracują stabilnie, ale pojawiają się błędy estymacji w wyniku błędnych parametrów SI. Dlatego dla poprawy dokładności estymacji prędkości wskazane jest wprowadzenie estymatorów

parametrów SI szczególnie w zakresach małych i wysokich prędkości. W kończącym Podrozdziale 5.2 omówiono również wpływ błędnych parametrów SI na stabilność pozostałych estymatorów MRAS nieanalizowanych szczegółowo w rozprawie.

Wpływ procesu dyskretyzacji układów ciągłych na stabilność estymatora MRAS^{CC} został przeanalizowany i przebadany w Rozdziale 6. Wyróżniono dwie metodyki projektowania układów emulacja analogowa (jeden element układu analogowego jest dyskretyzowany), projektowanie dyskretne. Przedstawiono modele dyskretne estymatora MRAS^{CC} przy zastosowaniu czterech metod całkowania numerycznego: Forward Euler, Backward Euler, Tustin, Modified Euler. Dla każdej z tych metod przeprowadzono wyniki symulacyjne dyskretnego estymatora MRAS^{CC} dla trzech czasów próbkowania $T_p = 0.125\text{ms}$, $T_p = 0.250\text{ms}$, $T_p = 0.5\text{ms}$ (Rys. 6.5 - 6.9) analizując estymację prędkości podczas rozruchu biegu jałowego dla zakresu $\omega_m = \{0.2, 0.5, 1.1, 1.4, 1.7\}\text{pu}$, a także estymacji strumienia wirnika i prądu stojana. Zdaniem Autora metoda Modified Euler jest najkorzystniejsza dla realizacji dyskretnego estymatora MRAS^{CC}. Na Rys. 6.10 przedstawiono charakterystyki mechaniczne, a na Rys. 6.11 nawrót prędkości dla czterech estymatorów dyskretnych.

Rozprawę kończą Rozdział 7 zawierający podsumowanie i wnioski końcowe oraz następnie Wykaz Literatury, a także cztery Załączniki: Szczegółowe wyprowadzenia niektórych równań, Modele matematyczne pozostałych MRAS, Parametry znamionowe i schematu zastępczego badanego SI, Opis i dane stanowiska z silnikiem napędowym 1.1kW i obciążającym 1.5kW oraz falownika firmy TWERD wraz z systemem sterowania DS1103 Texas Instruments.

3. Uwagi ogólne

Do uwag dyskusyjnych natury ogólnej, jakie nasunęły mi się w czasie studiowania rozprawy należą:

- a) Mimo szerokiej listy literatury przedmiotu rozprawy brak jest odwołania do pionierskiej i ważnej pozycji dotyczącej układów adaptacyjnych MRAS:

Ioan D. Landau, *Adaptive Control – The Model Reference Approach*, New York, Marcel Dekker, 1979.

W książce tej przedstawiono szeroko podstawy teorii układów MRAS.

- b) Jak Autor uzasadnia ograniczenie rozważań analizy stabilności algorytmów adaptacji rozważanej klasy estymatorów MRAS do metody Lapunova, pomijając metodę bazującą na teorii hiperstabilności i kryterium Popova preferowane przez I. D. Landau oraz wielu autorów pionierskich prac dotyczących estymatorów MRAS np.

S.-S. Perng, Y.-S. Lai, and Ch.-H. Liu, "A Novel sensorless controller for induction motor drives," in Proc. of EPE Trondheim, 1997, pp. 4.480-4.485 ?

- c) Brak jest również odwołania do pracy:

L. Harnefors, „Globally Stable Speed-Adaptive Observers for Sensorless Induction Motor Drives,” IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 54, no. 2, 2007, pp. 1243-1245,

gdzie Autor krytycznie analizuje globalną stabilność AFO dla indukcyjnych napędów bezczujnikowych.

- d) Jako czytelnik rozprawy odczuwam pewien brak zakończenia przedstawiającego przykładowe (duże) oscylogramy eksperymentalne napędu SI z wybranym estymatorem prezentujące nie tylko prędkość i moment elektromagnetyczny, ale także prądy stojana, strumienie wirnika i stojana, podczas powolnego nawrotu napędu? To pozwoliłoby ocenić poprawność pracy analizowanego napędu bezczujnikowego.

4. Uwagi szczegółowe

Redakcja Rozprawy jest wyjątkowo staranna i praktycznie nie zawiera pomyłek edytorskich i stylistycznych. Poniżej w tabeli podano nieliczne z nich.

Nr strony	Linia lub nr równania	Uwagi
19	11 i 12 wiersz od dołu	Styl: powtórzono dwa razy „Ponadto”
44	(4.23)	Jest: “ Ψ_{xy} ”, powinno być “ Ψ_{ry} ”
52	2 wiersz od dołu	„...wartość błędu estymacji prędkości, który różnie dla małych wartości...” - Zdanie niezrozumiałe
58 i dalej	Rys. 4.12 – 4.19	Opis osi rzędnych (y) „do góry nogami”
100 i dalej	Rys. 5.1 – 5.18	Opis osi rzędnych (y) „do góry nogami”
144 i dalej	Rys. 6.10 – 6.12	Opis osi rzędnych (y) „do góry nogami”

5. Ocena rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska ma charakter teoretyczno-eksperymentalny i stanowi pogłębienie teorii i praktyki wektorowego sterowania napędów indukcyjnych pracujących bez czujnika mechanicznego prędkości/położenia wału przy zastosowaniu do odtwarzania prędkości estymatorów prądowych MRAS – Model Reference Adaptive Systems.

Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością nowoczesnych metod estymacji oraz sterowania cyfrowego i przetwarzania sygnałów na bazie systemów DSP i FPGA w zastosowaniu do napędów falownikowych. Osiągnął sformułowany przez siebie cel, posługując się analizą teoretyczną oraz ilustrując wyniki rozważań systematycznymi badaniami symulacyjnymi oraz eksperymentalnymi na nowoczesnym stanowisku laboratoryjnym z napędem falownikowym o mocy 1.1kW.

Praca napisana jest konsekwentnie w logicznej sekwencji poczynając od omówienia podstaw układów adaptacyjnych z modelem MRAS oraz modeli matematycznych wybranych do badań wersji estymatorów prędkości AFO, MRAS^{CC} oraz MRAS^{CV}, poprzez szczegółową analizę ich stabilności i

metod jej poprawy, aż do analizy wpływu błędnych parametrów schematu zastępczego silnika indukcyjnego na stabilność i dokładność odtwarzania prędkości kątowej. Należy podkreślić, że wszystkie rozważania teoretyczne zostały przez Autora niezwykle systematycznie zweryfikowane zarówno wynikami badań symulacyjnych jak i laboratoryjnych.

Wśród nielicznych mankamentów pracy można wymienić: oscylogramy są zbyt małe, aby uchwycić różnice w przebiegach porównywanych; brak oscylogramów prezentujących pracę napędu bezczujnikowego z wybranym spośród analizowanych estymatorów MRAS.

Stosowana terminologia jest dokładna i prawidłowa. Praca w stosunku do stanu wiedzy tej dziedziny wnosi szereg nowych wyników i wniosków dotyczących właściwości i realizacji cyfrowych algorytmów estymacji prędkości kątowej przy zastosowaniu estymatorów prądowych MRAS, stanowiąc dojrzały dorobek osobisty Autora. Oceniam, że sformułowane na str. 20 tezy Rozprawy zostały udowodnione.

Za osiągnięcia własne Autora uznaję:

- Przeprowadzenie szczegółowej analizy stabilności i metod jej poprawy (Rozdz. 4), a także wpływu błędnych parametrów schematu zastępczego silnika indukcyjnego dla prądowych estymatorów prędkości AFO, MRAS^{CC} oraz MRAS^{CV} (Rozdz. 5);
- Propozycję, opracowanie modeli matematycznych i badania trzech metod poprawy stabilności estymatorów AFO i MRAS^{CC} poprzez: dobór macierzy wzmocnień G; modyfikację algorytmu poprzez dodanie kąta przesunięcia φ pomiędzy wektorem błędu estymacji prądu stojana a wektorem strumienia wirnika; wprowadzenie do modelu matematycznego estymatora dodatkowej zmiennej μ (Rozdz. 4.3 i 4.4);
- Opracowanie dyskretnej postaci modelu matematycznego estymatora MRAS^{CC} na bazie czterech różnych metod całkowania: Forward Euler, Backward Euler, Tustin, Modified Euler oraz przeprowadzenie badań porównawczych (Rozdz. 6);
- Przeprowadzenie pełnego cyklu badań weryfikujących proponowane i opracowane modele i algorytmy zarówno symulacyjnie jak i eksperymentalnie.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa Mgr inż. Mateusza KORZONKA pt. *"Analiza Stabilności wybranych estymatorów prędkości silnika indukcyjnego w różnych stanach pracy napędu"* niezależnie od uwag podanych w punktach 3 i 4 niniejszej recenzji, stanowi samodzielny i istotny wkład doktoranta do teorii i praktyki sterowania wektorowego bezczujnikowych napędów falownikowych z silnikami indukcyjnymi. Uzyskane rezultaty mają istotne znaczenie poznawcze i mogą być wykorzystane w dalszych pracach badawczych i aplikacyjnych przy projektowaniu cyfrowych układów odtwarzania

prędkości dla przemysłowych napędów indukcyjnych, gdy obecność czujnika na wale silnika jest niemożliwa lub niepożądana. Rozprawa stanowi dowód opanowania teorii i praktyki w zakresie estymacji i cyfrowego przetwarzania sygnałów dla energoelektronicznych układów napędowych oraz świadczy o dojrzałości naukowej Autora.

Na tej podstawie stwierdzam, że **opiniowana praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w artykule 13 pkt.1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 21.06.2016 r., poz. 882) a także w stosownych rozporządzeniach i przepisach wykonawczych.**

Stawiam, zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza KORZONKA do publicznej obrony przed Radą Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej.

Ponadto z uwagi na wyjątkowo staranne i wnikliwe opracowanie oraz pełen cykl twórczy obejmujący analizę i oryginalną hipotezę rozwiązania problemów sterowania bezczujnikowego oraz niezwykle systematyczną weryfikację symulacyjną i eksperymentalną, **wnoszę o wyróżnienie opiniowanej rozprawy.**

