

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

Instytut Elektrotechniki  
Warszawa-Międzylesie

Warszawa, 28.08.2017 r.

## OPINIA

### o rozprawie doktorskiej mgr inż. Kamila KLIMKOWSKIEGO pt. "Analiza układów napędowych z silnikami indukcyjnymi odpornymi na uszkodzenia czujników pomiarowych"

#### 1. Aktualność tematyki

Rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Klimkowskiego obejmuje 249 stron i poświęcona jest zagadnieniom analizy, detekcji i kompensacji wpływu uszkodzeń czujników pomiarowych (enkodera inkrementalnego oraz przetworników prądu stojana) w systemach sterowania wektorowego napędów przekształtnikowych z silnikami indukcyjnymi oraz w efekcie opracowania napędu odpornego na typowe uszkodzenia tych czujników.

Spośród stosowanych klasycznych metod sterowania wektorowego silników indukcyjnych:

- 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*),

Autor rozpatruje system bezpośredniego sterowania FOC: *DRFOC* oraz *DTC-SVM*. Należy zauważyć, że aktualny rozwój wektorowych napędów indukcyjnych osiągnął tak wysoki stopień zaawansowania, że również w kraju istnieje ich seryjna produkcja (np. MEDCOM Warszawa system *DRFOC*, TWERD Toruń system *DTC-SVM*). Dlatego zagadnienia związane z odpornością i niezawodnością pracy takich systemów wysuwają się aktualnie jako pierwszoplanowe.

Właśnie ta grupa zagadnień jest przedmiotem analizy, systematycznych badań i znacznego udoskonalenia prezentowanego w niniejszej rozprawie. Należy przy tym podkreślić, że Politechnika Wrocławska należy do nielicznych ośrodków akademickich w kraju, które zajmują się powyższą tematyką, a prezentowana rozprawa wpisuje się w aktualny nurt wnosząc istotne elementy oryginalne.

## 2. Zakres i ogólna charakterystyka rozprawy

Autor rozprawy sformułował następujące tezy:

„1. Opracowane detektory uszkodzeń czujnika prędkości kątowej oraz prądu stojana, wykorzystujące reguły logiki, teorię sztucznych sieci neuronowych i obserwatorów zmiennych stanu, pozwalają na wczesną i pewną identyfikację oraz lokalizację awarii układów pomiarowych w złożonych układach wektorowego sterowania silnikiem indukcyjnym.

2. Opracowane detektory uszkodzeń czujników pomiarowych mogą być z powodzeniem wykorzystane w układach napędowych i mogą zapewnić stabilną pracę napędu pomimo wystąpienia awarii dowolnego czujnika pomiarowego, poprzez zmianę topologii układu sterowania.”

W pracy Autor konsekwentnie dąży do udowodnienia tezy posługując się metodami analitycznymi i sieci neuronowych oraz badaniami symulacyjnymi i eksperymentalnymi jako sposobem weryfikacji wyników. W pierwszej części rozprawy po *Spisie Treści* i *Wykazie ważniejszych oznaczeń*, Autor przedstawił obszerne *Wprowadzenie* oraz *Cel i zakres pracy* (Rozdział 1).

Dalej Rozdział 2 zawiera model matematyczny silnika indukcyjnego na bazie zespolonych wektorów przestrzennych oraz przegląd przekształtników stosowanych w zasilaniu i sterowaniu układów napędowych. W rozdziale tym omówiono również metodę modulacji wektorowej przekształtnika dwupoziomowego DC-AC w zakresie pracy liniowej oraz nadmodulacji.

W Rozdziale 3 przedstawiono metody sterowania częstotliwościowego silników indukcyjnych ograniczając się do sterowania skalarne  $U/f = \text{const}$  oraz dwóch metod wektorowych z regulatorami liniowymi: *DRFOC* oraz *DTC-SVM*.

Rozdział 4 omawia popularne metody odtwarzania strumienia wirnika oparte na symulatorach wykorzystujących modele matematyczne obwodów stojana (model napięciowy) i wirnika (model prądowy) oraz adaptacyjne estymatory prędkości kątowej działające w oparciu o technikę *MRAS - Model Reference Adaptive System*.

Rozdział 5 zawiera omówienie działania i właściwości czujników stosowanych w napędach regulowanych: prędkości (prądnice tachometryczne) i położenia (rewolwery, przetworniki optoelektroniczne, enkodery), a także popularnie stosowane w energoelektronice pomiary napięcia i prądu LEM działające na bazie efektu Halla.

O ile wiadomości zawarte w rozdziałach 1-5 stanowią wprowadzenie i przygotowanie ogólne do tematyki pracy, to Rozdział 6 jest pierwszym merytorycznym prowadzącym do budowy napędu odpornego na uszkodzenia czujników, gdyż zawiera analizę rodzaju uszkodzeń czujników oraz badania ich wpływu na pracę napędu. Autor wyróżnia uszkodzenia enkodera inkrementalnego jako praca: a) *przerywana* – ograniczenie liczby impulsów spowodowane blokowaniem otworów tarczy enkodera, b) *cyklicznie przerywana* – uszkodzenie elektroniki lub przewodów zasilających, c) *zerowa* – całkowite przerwanie pętli pomiarowej. Podobnie dla czujnika prądu stojana wyróżnia: a) całkowite

uszkodzenie, b) szum pomiarowy, c) zmiana wzmocnienia sygnału pomiarowego, d) przesunięcie fazowe, e) ograniczenie sygnału pomiarowego, f) przerywany sygnał pomiarowy. Dla wszystkich tych uszkodzeń przeprowadza systematyczne badania symulacyjne analizując ich wpływ na pracę napędu w dwóch przypadkach: ze sterowaniem DRFOC oraz DTC-SVM.

Obszerny Rozdział 7 prezentuje metodykę detekcji i kompensacji uszkodzeń czujników na bazie podejścia analitycznego. Na wstępie Autor przedstawia i omawia schematy detektora uszkodzeń czujnika prędkości dla sterowania wektorowego metodą DRFOC i DTC-SVM (Rys. 7.4) oraz definiuje progi diagnostyczne  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  dla obu metod równania odpowiednio (7.2) i (7.3). Następnie przedstawia systematyczne badania symulacyjne i eksperymentalne dla uszkodzeń enkodera inkrementalnego (Podrozdział 7.1), oraz czujników prądu stojana (podrozdział 7.2 detekcja na bazie uchybów zmiennych stanu oraz 7.3 detekcja na bazie mierzonych prądów w trzech fazach). Podano także zestawienie czasów detekcji uszkodzeń dla badanych różnych warunków pracy napędu: 100%, 5% i 125% prędkości znamionowej oraz praca nawrotna 100% prędkości i momentu obciążenia (Tabela 7.7 oraz 7.8).

Interesujący i twórczy jest Rozdział 8 w którym Autor omawia zastosowanie do detekcji czujników pomiarowych sztucznych sieci neuronowych SSN. Omawia kolejno zagadnienia wyboru sygnałów uczenia dla w przypadku uszkodzenia enkodera (Podrozdział 8.1.1), przetworników prądu stojana (Podrozdział 8.1.2), a także analizuje wybór algorytmów treningu (Podrozdział 8.1.3) oraz architektury SSN (Podrozdział 8.1.4). Tutaj także – podobnie jak w Rozdziale 7 - przedstawia systematyczne badania symulacyjne i eksperymentalne dla uszkodzeń enkodera inkrementalnego (Podrozdział 8.2), oraz czujników prądu stojana (Podrozdział 8.3 oraz 8.4). Rozdział kończy tabelaryczne zestawienie czasów detekcji uszkodzeń dla badanych różnych warunków pracy napędu: 100%, 5% i 125% prędkości znamionowej oraz praca nawrotna 100% prędkości i momentu obciążenia.

Rozdział 9 prezentuje koncepcje, warunki pracy i wyniki badań napędów DRFOC oraz DTC-SVM odpornych na uszkodzenia zarówno enkodera jak i przetworników prądu stojana. Wyniki badań eksperymentalnych ilustrują detekcję i kompensację uszkodzeń czujników w różnej sekwencji (enkoder, przetworniki prądu stojana lub odwrotnie) na bazie opracowanych w Rozdziale 8 detektorów neuronowych SSN.

Rozdział 10 podejmuje dyskusję i ocenę uzyskanych wyników badań, a także formuje najważniejsze osiągnięcia jakie zdaniem Autora wnosi praca.

Rozprawę kończą Wykaz Literatury obejmujący 217 pozycji książkowych i artykułów opublikowanych w czasopiśmie i materiałach konferencyjnych od 1960 [12] do 2017 roku [216] oraz trzy Załączniki: Z1 zawierający opis stanowiska laboratoryjnego, Z2 zawierający analizę wrażliwości detektorów uszkodzeń czujników pomiarowych na zmiany parametrów silnika

indukcyjnego i tranzystorów falownika, Z3 prezentujący badania uzupełniające detekcji uszkodzeń przetworników prądu stojana.

### 3. Uwagi ogólne

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

- a) Jak Autor uzasadnia wybór do badań dwóch metod sterowania wektorowego z regulatorami liniowymi i modulatorem DRFOC oraz DTC-SVM, a nie rozważa np. DTC?
- b) Wiele ważnych stwierdzeń i wniosków w rozprawie opiera się na licznie prezentowanych oscylogramach, jednakże z powodu ich małych wymiarów i rozdzielczości czytelnik często nie jest w stanie tego zweryfikować (np. Rys. 6. 3; 6.7 – 6.9; str. 138 Rys. 7.49; Rys. 8.49 – 8.64 oraz wyniki w Tab. 8.5 i Tab. 8.6).
- c) Dlaczego maksymalne wartości sygnałów diagnostycznych  $W_1$  różnicy prędkości enkodera oraz estymowanej znacznie różnią się dla systemu DRFOC oraz DTC-SVM (Tab. 7.1 oraz Tab. 7.4)?
- d) Na czy polega modyfikacja dokonana przez Autora (str. 150) w stosunku do metody podanej w pracy [144]?
- e) Jak Autor rozumie stwierdzenie na str. 224: „opracowanie metodyki wyznaczania wartości progów diagnostycznych, dla których detektory analityczne stwierdzają wystąpienie awarii;”?
- f) Która – zdaniem Autora - z opracowanych metod detekcji i kompensacji awarii czujników pomiarowych spełnia warunki wdrożenia?

### 4. Uwagi szczegółowe

Redakcja Rozprawy jest staranna, ale zawiera nieliczne pomyłki edytorskie i stylistyczne. Poniżej w tabeli podano niektóre z nich.

Nr strony	Linia lub nr równania	Uwagi
11	7 od góry	Nie wyjaśniony/rozpisany skrót FDI ?
12	5 od dołu	Nie wyjaśniony/rozpisany skrót FTC ?
29, 64	2 i 11 od góry	Autor używa określenia „prędkość obrotowa”, a dalej w modelu matematycznym silnika indukcyjnego używa (zgodnie z systemem SI) „prędkość kątowna”?
53, 72	2 od góry i dalej	Autor niepotrzebnie zbyt często cytuje na jednej stronie tekstu tę samą pozycję literatury, np. str. 53 cytuje 6 razy [73]; Podobnie na str. 72 cytuje 5 razy [173]?
77	pod rów. (6.2)	Jest „ $x_M$ ” a powinno być „ $x_m$ ”;
83	5 od dołu	Jest: „Hallotronowy przetwornik prądu może <u>zwracać</u> błędne wskazania pomiarowe...”; powinno być: „Hallotronowy przetwornik prądu może <u>dostarczać</u> błędne wskazania

		pomiarowe...”; Podobnie w tekście na str. 153!?
89	10 od góry	Jest: „...niesie minimalnie gorsze skutki dla pracy napędu w porównaniu do wpływu <u>jest</u> wystąpienia w strukturze sterowania polowo zorientowanego.” Powinno być: „niesie minimalnie gorsze skutki dla pracy napędu w porównaniu do wpływu wystąpienia w strukturze sterowania polowo zorientowanego.”
92	7 od dołu	Jest: „DTC-SVM (rys. 6.)” powinno być: „DTC-SVM (rys. 6.28)”;
113	2 od góry	Jest: „oraz $6,5s < t < 7,5s$ ”; powinno być: „oraz $6,5s < t < 8,5s$ ”
131	5 od góry	Jest: „W trakcie trwania procesu identyfikacji awarii (szary obszar zaznaczony na rys. 7.38b i 7.38c) zauważalne są znaczące wzrosty amplitud estymowanej prędkości i momentu elektromagnetycznego, oraz dużo słabsze strumienia wirnika. Składowe $i_{sx}$ i $i_{sy}$ prądu stojana również zareagowały na uszkodzenie przetwornika prądu.” Na tych oscylogramach nie ma ani przebiegu momentu ani składowych $i_{sx}$ i $i_{sy}$ prądu stojana!?
136	Rys. 7.47	Błędne podpisy!?
141	Rys. 7.54	Błędne podpisy!?
142	Rys. 7.55 i 7.56	Błędne podpisy!?
155	3 w środku	Jest: „Zasada działania algorytmu detekcji nie opiera się na porównywaniu amplitud poszczególnych sygnałów z progami granicznymi, lecz na wzajemnej relacji pomiędzy tymi wartościami.” – stwierdzenie niezrozumiałe!?
176	Rys. 8.12	Błędny podpis: nie ma (a) i (b)?
176	4 od dołu	Jest: „przedstawiono na rys. 8.23.”; powinno być: „przedstawiono na rys. 8.13.”
185	12 od góry	Jest: „Zanim awaria została wykryte...”; Powinno być: „Zanim awaria została wykryta...”;
189, 190	Rys. 8.33 i 8.34	Odczytanie czasów detekcji – niemożliwe?
228	Poz. [71]	Jest: „KAŹMIERKOWSKI, M. P., KRISHNAN, R., <i>Control in power electronics: selected problems</i> , Academic press, 2002.”; Powinno być: „KAŹMIERKOWSKI, M. P., KRISHNAN, R., <b>BLAABJERG F.</b> , <i>Control in power electronics: selected problems</i> , Academic press, 2002.

## 5. Ocena rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska ma charakter teoretyczno-eksperymentalny i stanowi pogłębienie teorii i praktyki zagadnień detekcji i kompensacji wpływu zakłóceń czujników pomiarowych w przekształtnikowych układach napędowych w celu realizacji nowoczesnych systemów o zwiększonej odporności. Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością energoelektroniki oraz nowoczesnych metod sterowania cyfrowego i przetwarzania sygnałów na bazie systemów DSP i FPGA. Osiągnął sformułowany przez siebie cel, posługując się analizą teoretyczną oraz wszechstronnymi, niezwykle systematycznymi badaniami symulacyjnymi i eksperymentalnymi na stanowisku laboratoryjnym z przekształtnikiem AC-DC-AC firmy TWERD 1.5kVA oraz silnikiem indukcyjnym o mocy 1.1kW.

Ważnym elementem stanowiska laboratoryjnego jest opracowanie oprogramowania zaimplementowanego na karcie DS1202 firmy dSPACE rozbudowanego o zaproponowane układy diagnostyczne (Załącznik 1).

Praca napisana jest konsekwentnie w logicznej sekwencji poczynając od omówienia modeli matematycznych silnika indukcyjnego, przekształtnika DC-AC i modulacji wektorowej, a także kolejnych systemów sterowania wektorowego i estymacji zmiennych stanu, przy czym do badań wybrano algorytmy DRFOC oraz DTC-SVM.

Autor dokonał dużego wysiłku, aby przedstawić obszerny i skomplikowany materiał w sposób systematyczny doskonale posługując się ilustracjami. Stosowana terminologia jest w większości prawidłowa. Praca w stosunku do stanu wiedzy tej dyscypliny wnosi szereg nowych wyników i wytycznych dotyczących właściwości i realizacji algorytmów detekcji i sterowania odpornych na zakłócenia czujników pomiarowych, stanowiąc dojrzały dorobek osobisty Autora. Oceniam, że sformułowane na str. 26 tezy Rozprawy zostały udowodnione.

#### **Za osiągnięcia własne Autora uznaję:**

- Dokonanie analizy i badań wpływu uszkodzeń enkodera inkrementalnego oraz przetworników prądu stojana na pracę układu napędowego (Rozdz. 6),
- Propozycja, opracowanie i przebadanie własnych algorytmów detekcji uszkodzeń enkodera oraz przetworników prądu stojana na bazie metod analitycznych (Rozdz. 7),
- Propozycja, opracowanie i przebadanie własnych algorytmów detekcji uszkodzeń enkodera oraz przetworników prądu stojana na bazie sztucznych sieci neuronowych (Rozdz. 8),
- Opracowanie koncepcji i przebadanie systemów sterowania wektorowego DRFOC oraz DTC-SVM odpornych na uszkodzenia czujników pomiarowych (Rozdz. 9),
- Zaprojektowanie, wykonanie i uruchomienie eksperymentalnego stanowiska badawczego rozbudowanego o zaproponowane układy diagnostyczne,
- Przeprowadzenie pełnego cyklu badań począwszy od opracowania modeli matematycznych i wykonania badań symulacyjnych i laboratoryjnych.

W ostatecznej ocenie pragnę także podkreślić, że materiał merytoryczny rozprawy został opublikowany w 25 pracach ([193] – [217]), w tym 10 prac w języku angielskim.

#### **6. Wniosek końcowy**

Recenzowana rozprawa Mgr inż. Kamila KLIMKOWSKIEGO pt. *"Analiza układów napędowych z silnikami indukcyjnymi odpornych na uszkodzenia czujników pomiarowych"*, niezależnie od uwag podanych w punktach 3 i 4 niniejszej recenzji, stanowi samodzielny i istotny wkład doktoranta do teorii i praktyki budowy odpornych układów sterowania wektorowego napędów indukcyjnych.

Uzyskane rezultaty mają istotne znaczenie poznawcze i mogą być wykorzystane w dalszych pracach badawczych i aplikacyjnych w przekształtnikowych napędach z silnikami klatkowymi. Stanowi ona doskonały dowód opanowania teorii i praktyki w zakresie napędów elektrycznych i energoelektroniki, cyfrowego przetwarzania sygnałów i sterowania mikroprocesorowego 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. nr 65 poz. 595 z późn. zm.) a także w stosownych rozporządzeniach i przepisach wykonawczych. Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Kamila Klimkowskiego do publicznej obrony przed Radą Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej.**

Ponadto z uwagi na wnikliwe opracowanie oraz pełen cykl twórczy obejmujący analizę i oryginalną hipotezę rozwiązania problemów detekcji i kompensacji uszkodzeń czujników pomiarowych, a także systematyczne i obszernie badania symulacyjne i eksperymentalne, **wnoszę o wyróżnienie opiniowanej rozprawy.**

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'K. Klimkowski', written in a cursive style.

