

Wrocław, 25.04.2019

dr inż. Grzegorz Tarchała
Politechnika Wroclawska
Wydział Elektryczny
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

OBSZAR NAUK TECHNICZNYCH

Załącznik nr 1
do wniosku z dnia 25 kwietnia 2019
o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

AUTOREFERAT

przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych

w języku polskim

1. Imię i nazwisko

Grzegorz Jakub Tarchała

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

- Stopień doktora w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie elektrotechnika. Tytuł rozprawy doktorskiej: *Zastosowanie ruchu ślizgowego do sterowania i estymacji zmiennych stanu układów napędowych z silnikami indukcyjnymi*, uzyskany 8 lipca 2013, promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Teresa Orłowska-Kowalska. Recenzenci rozprawy doktorskiej: prof. dr hab. inż. Krzysztof Zawirski (Politechnika Poznańska), prof. dr hab. inż. Andrzej Bartoszewicz (Politechnika Łódzka). Rozprawa została wyróżniona przez Radę Naukową Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej.
- Dyplom magistra inżyniera. Wydział Elektryczny Politechniki Wrocławskiej, kierunek Automatyka i Robotyka, specjalność Automatykacja Maszyn, Pojazdów i Urządzeń. Tytuł pracy magisterskiej: *Analiza estymatorów parametrów stojana i wirnika dla bezczujnikowego układu wektorowego sterowania silnikiem indukcyjnym*, 2009, promotor pracy: prof. dr inż. Teresa Orłowska-Kowalska.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 01.12.2013 – obecnie, adiunkt w Katedrze Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych (do 30.09.2014 Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych) Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej.
- 01.10.2012 – 30.11.2013, asystent w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej.

4. Identyfikatory naukowe i strony internetowe

- ORCID: orcid.org/0000-0001-7457-9674
- SCOPUS: scopus.com/authid/detail.uri?authorId=46462274400
- Publons: publons.com/researcher/1473519/grzegorz-tarchaa/
- ResearcherID (aktualnie część Publons): **J-2597-2012**
- Google Scholar: <https://scholar.google.pl/citations?user=H2-p50UAAAAJ&hl=pl>
- Strona www: www.kmnipe.pwr.edu.pl/gtarchala.xml
- Spis publikacji wnioskodawcy: dona.pwr.edu.pl/szukaj/default.aspx?nrewid=465880

5. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789)

A. Tytuł osiągnięcia naukowego

Jako podstawę wszczęcia czynności w postępowaniu habilitacyjnym zgłaszam cykl powiązanych tematycznie 10 publikacji (jedno i współautorskich) zatytułowany:

„Wybrane metody odpornego sterowania i estymacji zmiennych stanu w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi”

Przedstawiony do oceny powiązany tematycznie cykl publikacji stanowi wkład do dziedziny **nauk technicznych**, w zakresie dyscypliny **elektrotechnika**.

B. Wykaz prac naukowych zaliczonych do cyklu:

- I. Tarchała Grzegorz (100%), *Sliding mode speed control of an induction motor drive using time-varying switching line*, Power Electronics and Drives, vol. 2 (37), nr 2, s. 103-116, 2017, www.doi.org/10.5277/PED170109, punkty MNiSW=6.
Mój udział procentowy – 100%.
- II. Tarchała Grzegorz (60%), Sobański Piotr (20%), Orłowska-Kowalska Teresa (20%), *Fault tolerant sliding mode direct torque control of induction motor with inverter reconfiguration*, 26th IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Edynburg, Szkocja, 19-21 czerwca 2017, www.doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001526, punkty MNiSW=15.
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji i algorytmu sterowania, modeli matematycznych i symulacyjnych, przeprowadzeniu badań oraz współredakcji tekstu. Byłem również prezentującym artykuł podczas sesji konferencyjnej. Mój udział procentowy szacuję na 60%.
- III. Tarchała Grzegorz (100%), *Discrete Sliding Mode Control of induction motor torque and stator current components*, 18th IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Budapeszt, Węgry, s. 675-680, 26-30 września 2018, www.doi.org/10.1109/EPEPEMC.2018.8521937, punkty MNiSW=15.
Mój udział procentowy – 100%.
- IV. Dybkowski Mateusz (40%), Orłowska-Kowalska Teresa (20%), Tarchała Grzegorz (40%), *Sensorless traction drive system with sliding mode and MRASCC estimators using direct torque control*, Automatika, vol. 54, nr 3, s. 329-336, 2013, www.doi.org/10.7305/automatika.54-3.169, IF=0,302, punkty MNiSW=15.
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji, modeli matematycznych i symulacyjnych, przeprowadzeniu badań symulacyjnych i eksperymentalnych dotyczących estymatora z ruchem ślizgowym. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

- V. Tarchała Grzegorz (100%), *Ślizgowy adaptacyjny estymator prędkości kątowej silnika indukcyjnego o zmodyfikowanym algorytmie adaptacji*, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 92, nr 5, s. 84-89, 2016, www.doi.org/10.15199/48.2016.05.16, punkty MNiSW=14.
Mój udział procentowy – 100%.
- VI. Tarchała Grzegorz (80%), Orłowska-Kowalska Teresa (20%), *Equivalent-signal Based sliding mode speed MRAS-type estimator for induction motor drive stable in the regenerating mode*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, nr 9, s. 6936-6947, 2018, www.doi.org/10.1109/TIE.2018.2795518, IF=7,050, punkty MNiSW=50.
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu analizy literatury, opracowaniu koncepcji i modeli matematycznych, wykonaniu badań symulacyjnych i eksperymentalnych, współudziale w redakcji tekstu. Mój udział procentowy szacuję na 80%.
- VII. Tarchała Grzegorz (60%), Marcin Wolkiewicz (40%), *Performance of the stator winding fault diagnosis in sensorless induction motor drive*, Energies, vol. 12, nr 8, s. 1507, 2019, www.doi.org/10.3390/en12081507, IF=2,676, punkty MNiSW=25.
Mój wkład w powstanie niniejszej pracy polegał na opracowaniu koncepcji artykułu, wyborze sygnałów diagnostycznych, współudziale w badaniach eksperymentalnych, przygotowaniu rysunków w zakresie sterowania i estymacji prędkości, weryfikacji otrzymanych wyników badań, współredakcji artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 60%.
- VIII. Orłowska-Kowalska Teresa (20%), Korzonek Mateusz (40%), Tarchała Grzegorz (40%), *Stability analysis of selected speed estimators for induction motor drive in regenerating mode: a comparative study*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, nr 10, s. 7721-7730, 2017, www.doi.org/10.1109/TIE.2017.2698374, IF=7,050, punkty MNiSW=50.
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na ocenie rozwiązań i otrzymanych wyników, współudziale w wykonaniu badań eksperymentalnych i opracowaniu wyników, współredakcji tekstu. Mój udział procentowy szacuję na 40%.
- IX. Korzonek Mateusz (50%), Tarchała Grzegorz (30%), Orłowska-Kowalska Teresa (20%), *A review on MRAS-type speed estimators for reliable and efficient induction motor drives*, ISA Transactions, wczesny dostęp, 2019, www.doi.org/10.1016/j.isatra.2019.03.022, IF=3,370, punkty MNiSW=40.
Mój wkład polegał na współudziale przy przeglądzie i krytycznej analizie literatury dotyczącej estymatorów typu MRAS, współudziale przy opracowaniu części teoretycznej oraz redakcji tekstu artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 30%.
- X. Korzonek Mateusz (50%), Orłowska-Kowalska Teresa (20%), Tarchała Grzegorz (30%), *Discrete realization of MRAS CC estimator of induction motor speed using analogue emulation*, 24th International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Amalfi, Włochy, s. 913-918, 20-22 czerwca 2018, www.doi.org/10.1109/SPEEDAM.2018.8445412, punkty MNiSW=15.
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na udziale w opracowaniu modeli matematycznych i symulacyjnych, na ocenie otrzymanych rezultatów, nadzorze nad badaniami. Mój udział procentowy szacuję na 30%.

Publikacje wchodzące w skład cyklu [I-X] zestawilem w Tabeli 1. Połowa publikacji wchodzących w skład tematycznego cyklu wskazanego do oceny została opublikowana w renomowanych czasopismach znajdujących się na liście A Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego [IV, VI-IX], prace te są jednocześnie indeksowane w bazie ISI Web of Science. Wśród wymienionych publikacji, większość charakteryzuje się nie tylko wysoką liczbą punktów MNiSW, ale także wysokim wskaźnikiem oddziaływania (*Impact Factor, IF*).

Sumaryczny *Impact Factor* wszystkich publikacji z cyklu (zgodny z datą publikacji) wynosi 20,448, natomiast z uwzględnieniem udziału procentowego 11,197. Łączna liczba punktów publikacji wg listy MNiSW wynosi 245, natomiast z uwzględnieniem udziału procentowego 141,5.

Trzy prace napisałem samodzielnie, a pozostałe prace zostały przygotowane w zespołach badawczych (dwu- i trzyosobowych). W przypadku prac współautorskich, mój udział w powstaniu publikacji wynosi co najmniej 30%. Mój średni udział procentowy w przygotowaniu publikacji wchodzących w skład cyklu wynosi 64%.

Tabela 1. Wskaźniki bibliometryczne publikacji wchodzących w skład cyklu

	Nazwa czasopisma/konferencji	Impact Factor	Punktacja MNiSW	Udział wnioskodawcy	Rok publikacji
I.	Power Electronics and Drives	---	6	100%	2017
II.	26th IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)	---	15	60%	2017
III.	18th IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)	---	15	100%	2018
IV.	Automatika	0,302	15	40%	2013
V.	Przegląd Elektrotechniczny	---	14	100%	2016
VI.	IEEE Transactions on Industrial Electronics	7,050	50	80%	2018
VII.	Energies	2,676	25	60%	2019
VIII.	IEEE Transactions on Industrial Electronics	7,050	50	40%	2017
IX.	ISA Transactions	3,370	40	30%	2019
X.	24th International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)	---	15	30%	2018

C. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

C.1 Cel naukowy i zakres badań

Silnik indukcyjny, którego sterowanie jest przedmiotem badań od początku mojej pracy naukowej, jest bez wątpienia ciągle najchętniej stosowanym w przemyśle przetwornikiem elektromechanicznym. Pomimo wielu lat badań dotyczących układów napędowych z tymi

silnikami, wiele problemów pozostaje nadal nierozwiązanych lub wymaga dodatkowych prac badawczych i poszukiwania nowych rozwiązań. Świadczy o tym duża liczba ciągle powstających na ten temat publikacji (wg bazy Web of Science: 478 publikacji zawierających w tytule wyrażenie *induction motor* w 2018 r., 672 w 2017 r., 726 w 2016 r., 597 w 2015 r.).

Jednym z zagadnień, które są ciągle aktualne, jest odporne sterowanie i estymacja zmiennych stanu w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi, które to zagadnienia są przedmiotem przedstawionego przeze mnie do oceny cyklu publikacji.

Cykl publikacji przytoczony powyżej dotyczy prac badawczych prowadzonych przeze mnie po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych. Część z nich stanowi naturalną kontynuację badań, które prowadziłem w ramach studiów doktoranckich i podczas przygotowywania rozprawy doktorskiej [I, IV]. Jednakże w ramach mojej pracy badawczej zajmowałem się także tematyką wpisującą się w nurt współcześnie rozwijanych zagadnień, takich jak: układy odporne na uszkodzenia [II, VII], układy sterowania dyskretnego [III], czy zagadnienia dotyczące stabilności wybranych estymatorów prędkości w zakresie pracy generatorowej [V, VI, VIII-X]. Poza analizą układów estymacji ślizgowej [V, VI] rozpatrywałem również inne rodzaje estymatorów prędkości silnika, bazujące na liniowym mechanizmie adaptacji prędkości z regulatorem proporcjonalno-całkującym PI [VIII-X].

Moja tematyka badawcza dotyczyła między innymi zagadnień sterowania silnikiem indukcyjnym odpornym na uszkodzenia układów zasilających [II]. Literatura naukowa z tego zakresu jest bardzo obszerna i obejmuje różnorodne zagadnienia, zarówno pod względem zastosowanych modyfikacji układów zasilających (falowników), jak i metod sterowania stosowanych przed i po wystąpieniu uszkodzenia. Część moich prac badawczych dotyczyła również układów detekcji uszkodzeń [VII].

Układy sterowania ślizgowego nie były szeroko stosowane w układach odpornych na uszkodzenia silników indukcyjnych. Rozważane były jedynie układy sterowania ślizgowego odporne na awarie czujnika prędkości lub uszkodzenia uzwojeń stojana i wirnika. Układy klasycznego sterowania ślizgowego idealnie nadają się do sterowania przekształtników energoelektronicznych, gdyż ich sygnał sterujący przyjmuje tylko dwie wartości (ze względu na funkcję znaku). Pomimo tego, nie były one stosowane w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi, odpornych na uszkodzenia falowników napięcia.

W trakcie moich badań zajmowałem się również układami estymacji prędkości silnika indukcyjnego wykorzystującymi teorię ruchu ślizgowego, odpornymi na zmiany parametrów i uszkodzenia elementów silnika indukcyjnego. Układy te powodują jednak znaczne, wysokoczęstotliwościowe oscylacje estymowanych zmiennych, w tym prędkości, co powoduje, że sygnał niskoczęstotliwościowy musi zostać odzyskany za pomocą filtru dolnoprzepustowego. Wiele z prac nad układami estymacji ślizgowej dotyczyło prób ograniczenia wspomnianych oscylacji (stosowano układy ślizgowe drugiego rzędu, układy adaptacyjne, układy ze zmiennymi wzmocnieniami, etc.). Jednym z rozwiązań, które także można zastosować w tym celu, jest rozłożenie sygnału estymowanego na dwie części: ekwiwalentną (ciągłą) i nieciągłą. Według mojej wiedzy tylko jedna publikacja dotyczyła takiego właśnie rozwiązania dla silników indukcyjnych, jednak bazowała na dwóch tzw. modelach strumienia wirnika: prądowym i napięciowym. Szczególnie wykorzystanie

drugiego z nich jest niekorzystne w projektowaniu estymatorów (m.in. ze względu na dużą zależność estymatora od wartości rezystancji stojana i sposobu wyznaczania napięcia stojana oraz ze względu na bezpośrednie całkowanie offsetu z czujników pomiarowych).

Pomimo wykorzystania w prawie każdym przypadku funkcji Lapunowa do projektowania mechanizmów adaptacji w układach estymacji ślizgowej, brak jest w znacznej większości przypadków dokładnej analizy stabilności pełnego modelu estymatora (modelu matematycznego uzupełnionego o mechanizm adaptacji prędkości), szczególnie, że wykorzystanie funkcji znaku obniża rząd estymatora względem rzędu obiektu. Jedyne w dwóch przypadkach taka analiza miała miejsce: w jednym z nich zostało udowodnione, że estymator jest stabilny w przypadku pracy regeneracyjnej, a w drugim została udowodniona jego niestabilność w pewnym zakresie pracy w tym trybie. W literaturze brakuje również analizy odporności układów estymacji nie tylko na zmiany parametrów, ale także na pojawiające się uszkodzenia silnika.

Dużo większa uwaga naukowców zwrócona została na analizę stabilności układów estymacji prędkości z regulatorami liniowymi PI. Ze względu na dużą popularność estymatora AFO (ang. Adaptive Full-order Observer), większość powstających rozwiązań dotyczyło właśnie tego estymatora. Zaproponowano dwa główne podejścia umożliwiające stabilizację tego estymatora prędkości SI w trybie pracy regeneracyjnej: odpowiedni dobór parametrów macierzy wzmocnień obserwatora oraz modyfikację położenia wektora błędu estymacji prądu stojana względem wektora strumienia wirnika w mechanizmie adaptacji prędkości. W obu przypadkach mechanizm poprawy stabilności musi zostać wyłączony jeśli napęd przejdzie z pracy generatorowej do silnikowej. Natomiast niewiele prac istniało dla innych estymatorów prędkości typu MRAS (ang. Model Reference Adaptive System], jak choćby dla estymatora z modelem odniesienia MRAS^{CC} o strukturze podobnej do estymatora AFO, ale o znacznie większym zakresie niestabilności w zakresie pracy generatorowej. Celowość prac nad poprawą stabilności estymatora MRAS^{CC} jest uzasadniona między innymi jego lepszą odpornością na zmiany parametrów silnika w stosunku do AFO.

W związku z powyższą analizą literatury, celem naukowym moich badań po obronie rozprawy doktorskiej było:

- Opracowanie i analiza nowych układów sterowania silnika indukcyjnego odpornych na zmiany parametrów układu napędowego i uszkodzenia przekształtnika zasilającego – **osiągnięcie I**,
- Opracowanie i analiza nowych rozwiązań estymatorów prędkości dla silnika indukcyjnego – **osiągnięcie II**, w szczególności:
 - Opracowanie nowych rozwiązań w zakresie projektowania estymatorów odpornych na zmiany parametrów silnika indukcyjnego – **osiągnięcie II.1**,
 - Analiza porównawcza istniejących rozwiązań i opracowanie nowych koncepcji w zakresie stabilności wybranych estymatorów prędkości silnika indukcyjnego w zakresie pracy generatorowej – **osiągnięcie II.2**.

Powyższe cele naukowe wraz ze sposobem ich osiągnięcia opisałem szczegółowo w kolejnym punkcie autoreferatu.

C.2 Omówienie osiągnięć naukowych

Cykl publikacji powiązanych tematycznie obejmuje 10 pozycji literaturowych, z których 5 opublikowanych zostało w czasopismach indeksowanych na liście *Journal Citation Reports* [IV, VI-IX], w tym w renomowanych czasopismach o wysokim *Impact Factor*, takich jak *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [VI], [VIII], czy *ISA Transactions* [IX]. Część publikacji w cyklu przedstawiona została podczas międzynarodowych konferencji tematycznych [II, III, X]. Ponadto, dwie z publikacji wchodzących w skład cyklu zostały opublikowane w czasopismach krajowych [I, V]. Elementem wiążącym publikacje z cyklu jest obiekt sterowania, jakim jest silnik indukcyjny. W związku z tym wszystkie publikacje znajdujące się w cyklu dotyczą wybranych problemów sterowania oraz estymacji zmiennych stanu napędów elektrycznych z silnikami indukcyjnymi. Dodatkowo, jedna z nich [VII] łączy moje doświadczenia dotyczące prac nad zagadnieniami z cyklu głównego oraz badania metod diagnostyki wybranych uszkodzeń silników indukcyjnych, opisane w rozdziale 6, zawierającym opis mojego dodatkowego osiągnięcia naukowo-badawczego.

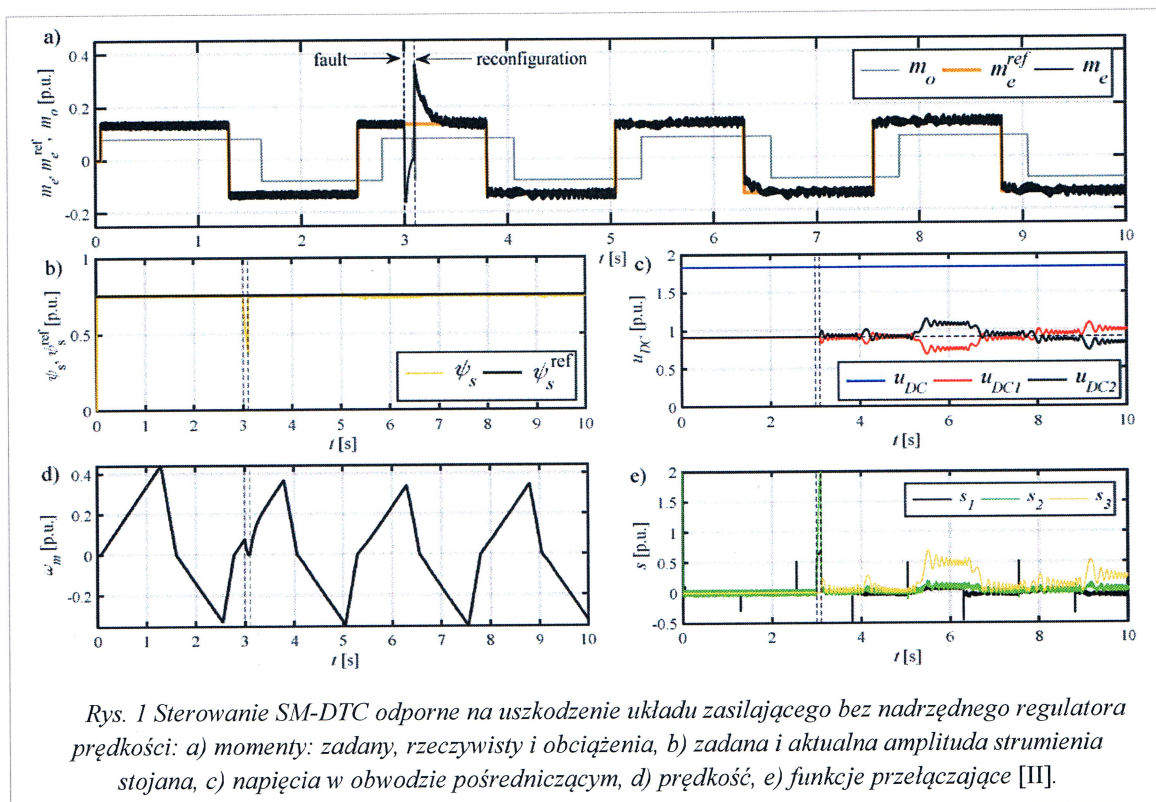
Opracowanie i analiza nowych układów sterowania silnika indukcyjnego odpornych na zmiany parametrów układu napędowego i uszkodzenia przekształtnika zasilającego – osiągnięcie I

Jednym z zagadnień, którym zajmowałem się w trakcie moich badań w dziedzinie odpornych układów sterowania było opracowanie i badanie układów sterowania ślizgowego prędkością kątową silników indukcyjnych. Badania te stanowią naturalne rozwinięcie prac realizowanych w trakcie moich studiów doktoranckich. I tak w publikacji jedno-autorskiej [I], przedstawiłem wyniki badań układu sterowania ślizgowego prędkością silnika indukcyjnego z tzw. zmienną w czasie prostą przełączającą. W większości przypadków znanych z literatury dotyczącej sterowania napędami elektrycznymi [1], [2], prosta ta jest stacjonarna i definiuje dynamikę przebiegu sterowanej zmiennej stanu. Niestety, proces osiągania prostej przełączającej jest niekontrolowany i może się różnić w zależności od parametrów układu, ograniczeń, aktualnego punktu pracy, itd. Co istotne, proces ten powtarza się przy każdorazowej zmianie wartości zadanej. Dlatego też w [I] przedstawiłem wyniki badań układu sterowania, w którym prosta przełączająca zmienia się w sposób równoległy (od położenia początkowego, zawierającego aktualny punkt pracy do położenia ostatecznego, zawierającego docelowy punkt pracy) i równomierny w czasie. Sterowanie prędkością odbywa się w strukturze kaskadowej, tzn. regulator prędkości definiuje wartość zadaną momentu, a moment silnika sterowany jest poprzez wewnętrzny regulator. W publikacji [I] wykazałem, że zastosowanie zmiennej w czasie prostej przełączającej pozwala na osiągnięcie odporności układu sterowania, w sensie uzyskiwania jednakowych przebiegów prędkości w czasie, niezależnie od wartości momentu obciążenia, czy stałej mechanicznej całego napędu. Opiswane zagadnienia zilustrowałem zarówno przy wykorzystaniu wyników badań symulacyjnych, jak i eksperymentalnych otrzymanych dla silnika o mocy 3 kW.

Układy napędowe z silnikami prądu przemiennego odporne na uszkodzenia czujników pomiarowych i przekształtników zasilających stanowią jedno z intensywniej rozwijanych zagadnień w ostatnich latach, tzw. Fault Tolerant Control (FTC) [3], [4]. Inspirując się tą tematyką, zaproponowałem wykorzystanie metody sterowania ślizgowego w układzie

odpornym na uszkodzenia falownika napięcia, zasilającego silnik indukcyjny [II]. W swoich rozważaniach założyłem, że falownik napięcia zasilający silnik indukcyjny będzie wyposażony w trzy dodatkowe triaki, umożliwiające w przypadku awarii podłączenie każdej z faz silnika do punktu neutralnego baterii kondensatorów. W przypadku awarii któregośkolwiek z tranzystorów, odpowiadająca mu gałąź falownika jest wyłączana, a odpowiednia faza silnika podłączana jest do punktu neutralnego. W układzie takim niezbędny jest więc układ wykrywania i lokalizacji wystąpienia awarii, co nie było jednak przedmiotem moich badań w publikacji [II]. Oczywiście jest, że w takim przypadku model matematyczny falownika napięcia zmienia się, jednocześnie model samego silnika pozostaje bez zmian.

W celu bezwłocznego sterowania momentem elektromagnetycznym silnika zarówno przed, jak i po rekonfiguracji falownika, zaproponowałem wykorzystanie bezpośredniego sterowania ślizgowego momentem SM-DTC (ang. Sliding Mode Direct Torque Control). Cechą charakterystyczną tego sterowania jest to, że bazuje ono jednocześnie na informacji o modelu matematycznym silnika, jak i na informacji o modelu falownika – a dokładniej wykorzystuje macierz przejścia pomiędzy sygnałami sterującymi łącznikami falownika, a napięciami silnika. W związku z tym, ten sam algorytm sterowania może zostać zastosowany przed i po rekonfiguracji, jeśli dokonana zostanie zmiana użytej macierzy sterowania falownikiem oraz zamianie ulegnie trzecia z funkcji przełączających, zdefiniowanych dla układu napędowego. W publikacji [II] moim autorskim rozwiązaniem było również zaproponowanie nowej funkcji przełączającej mającej na celu stabilizację napięć kondensatorów falownika. Funkcja ta jest niezbędna, aby nie dopuścić do rozładowania jednego z kondensatorów, co mogłoby spowodować utratę możliwości sterowania całym układem napędowym.



Na Rys. 1 przedstawiłem przykład działania układu odpornego na uszkodzenia przekształtnika zasilającego silnik indukcyjny. Jak widać na rysunku, w około 3 sekundzie następuje awaria, która nie jest wykrywana natychmiastowo, a mimo to układ odzyskuje zdolność do poprawnego działania. Ze względu na mniejsze dostępne napięcie w nowej konfiguracji falownika napięcia, silnik nie jest w stanie wytworzyć momentu znamionowego, stąd mniejsza wartość momentu na Rys. 1. Zarówno przed, jak i po rekonfiguracji, moment silnika podąża za wartością zadaną prawie natychmiast (Rys. 1a), a amplituda strumienia stojana stabilizowana jest na wartości znamionowej (Rys. 1b). Napięcia kondensatorów falownika po rekonfiguracji oscylują wokół połowy napięcia zasilającego falownik (Rys. 1c). Układ pracuje w trybie momentowym, więc charakter przebiegu prędkości silnika (Rys. 1d) wynika z aktualnej wartości momentu napędowego i momentu obciążenia. Funkcje przełączające przyjmują wartość zerową przed rekonfiguracją, natomiast po rekonfiguracji funkcje te, ze względu na utrudnione warunki pracy, oscylują wokół wartości pożądaných.

Praktycznie wszystkie współczesne układy sterowania realizowane są przy wykorzystaniu mikroprocesorów, a modele matematyczne układów sterowania oraz estymatorów podlegają dyskretyzacji lub są od początku projektowane w sposób dyskretny. Zagadnienia dotyczące cyfrowej realizacji układów sterowania, jak i estymacji zmiennych stanu są przedmiotem badań w ramach projektu OPUS 9 pt. *Dyskretne ślizgowe sterowanie i estymacja zmiennych stanu w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi*, finansowanym przez Narodowe Centrum Nauki, którego jestem głównym wykonawcą (kierownik projektu: prof. dr hab. inż. Teresa Orłowska-Kowalska). Badania prowadzone w ramach projektu pozwoliły między innymi na opracowanie publikacji [III], przedstawionej przeze mnie podczas konferencji *IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference*. W cytowanej publikacji zaproponowałem zastosowanie jednej z odmian ślizgowego sterowania dyskretnego w celu sterowania momentem i/lub składowymi wektora prądu stojana. Układ sterowania projektowany jest w sposób dyskretny, tzn. bazuje na modelu matematycznym silnika indukcyjnego, który zapisany jest w postaci dyskretniej. Jedynie równanie estymacji prądu stojana zostało aproksymowane równaniem Eulera, ze względu na brak możliwości zapisania go bezpośrednio w sposób zdyskretyzowany.

Zaproponowany przeze mnie oryginalny układ sterowania dyskretnego umożliwia sterowanie składowymi wektora prądu w wirującym synchronicznie układzie współrzędnych. W sposób automatyczny składowe te są ograniczane, aby nie przekraczać maksymalnej dopuszczalnej wartości prądów fazowych silnika. Traktując sterowanie wspomnianymi składowymi jako sterowanie wewnętrzne, można dokonać syntezy zewnętrznego sterowania momentem elektromagnetycznym oraz amplitudą strumienia wirnika. W zaproponowanym algorytmie sterowania celowo został wykorzystany strumień skojarzony z uzwojeniem wirnika, aby zlinearyzować obiekt sterowania i uniezależnić się od momentu krytycznego silnika, występującego w sytuacji stabilizowania amplitudy strumienia stojana (co ma miejsce w większości klasycznych układów bezpośredniego sterowania momentem DTC).

W artykule tym przedstawiłem wyniki badań symulacyjnych badanego układu sterowania podczas sterowania momentem. Otrzymane przebiegi udowodniły poprawność przyjętego podejścia i doskonałe wyniki regulacji. W publikacji tej przedstawiłem także wpływ częstotliwości próbkowania na działanie badanego układu sterowania. Wraz z obniżającą się

częstotliwością próbkowania pogarszają się nieznacznie warunki odtwarzania sterowanych zmiennych stanu: momentu silnika i składowych wektora prądu. Wiąże się to ze wspomnianym wyżej zastosowanym przybliżeniem równania prądu stojana. W związku z tym pogarsza się także jakość sterowania. Pomimo tego, układ nie traci stabilności, a regulowane sygnały podążają za sygnałami referencyjnymi z bardzo dobrą dynamiką i dokładnością.

Opracowanie i analiza nowych rozwiązań estymatorów prędkości dla silnika indukcyjnego – osiągnięcie II

Znaczna większość współczesnych układów sterowania połowo-zorientowanego (ang. Field Oriented Control), czy metod bezpośredniego sterowania momentem (ang. Direct Torque Control) silnika indukcyjnego wymaga znajomości momentu elektromagnetycznego i/lub zmiennych stanu silnika: składowych wektorów strumienia stojana, strumienia wirnika (lub ich amplitudy i położenia kąтового), składowych wektora prądu stojana w układzie współrzędnych wirującym z prędkością synchroniczną (składowe te są obliczane za pomocą estymowanej wartości kąta położenia wektora strumienia skojarzonego z uzwojeniem wirnika) oraz prędkości, jeśli układ napędowy ma działać w układzie bez pomiaru prędkości (w układzie bezczujnikowym, ang. *sensorless* lub *encoderless*). Jednakże, żaden ze wspomnianych układów sterowania, nawet najbardziej odporny na różnego rodzaju zakłócenia parametryczne bądź sygnałowe nie będzie mógł pracować poprawnie jeśli estymacja zmiennych stanu nie będzie prawidłowa, szczególnie, gdy estymator ten straci stabilność podczas pracy.

Wspomniana estymacja prędkości kątowej silnika pozwala wyeliminować enkoder inkrementalny lub inny układ do pomiaru prędkości, co w konsekwencji prowadzi do: redukcji liczby przewodów, zmniejszenia rozmiaru napędu, obniżenia ceny, zwiększenia niezawodności całego układu. Nawet jeśli estymator prędkości nie jest wykorzystany w celu utworzenia napędu bezczujnikowego, to może zostać zastosowany jako układ redundantny, na wypadek, gdyby czujnik prędkości uległ uszkodzeniu. Tak więc estymatory prędkości mogą pracować zarówno w tzw. pętli otwartej, gdy ich sygnały wyjściowe nie są wykorzystywane w układzie sterowania oraz w tzw. pętli zamkniętej, gdy sygnały wyjściowe są sygnałami sprzężeń zwrotnych układu sterowania.

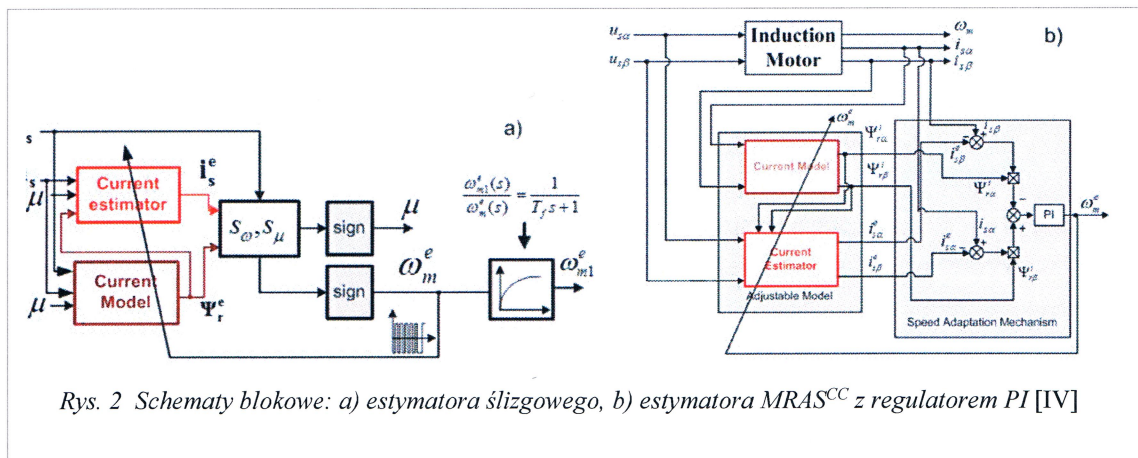
Estymacja zmiennych stanu i momentu elektromagnetycznego silnika indukcyjnego jest więc ważnym i ciągle rozwijanym zagadnieniem badawczym. Świadczą o tym powstające nowatorskie rozwiązania oraz metody mające na celu udoskonalenie już istniejących rozwiązań [5, 6]. Z drugiej jednak strony, prawie wszystkie nowe przemienniki częstotliwości pojawiające się w sprzedaży, posiadają opcję sterowania bezczujnikowego. Wymagają one niezawodnych, odpornych na zmiany parametrów estymatorów prędkości, pracujących w szerokim zakresie częstotliwości, zarówno w zakresie prędkości bardzo małych, jak i dużych, w tym w zakresie osłabiania pola (prędkości większe niż prędkość znamionowa), a także w trybie pracy silnikowej, jak i generatorowej. Według mojego doświadczenia przemysłowe przemienniki częstotliwości, pracujące w trybie pracy bezczujnikowej, często są zawodne dla małych wartości prędkości i w zakresie pracy ze zwrotem energii. W związku z tym, kolejnym celem moich badań związanych z odpornymi i niezawodnymi układami

sterowania silnikami indukcyjnymi było opracowanie nowych rozwiązań w zakresie estymatorów prędkości silników indukcyjnych.

Opracowanie nowych rozwiązań w zakresie projektowania estymatorów odpornych na zmiany parametrów silnika indukcyjnego – osiągnięcie II.1

W praktycznie każdym artykule przeglądowym, w którym porównywano różne metody odtwarzania prędkości kątowej silnika indukcyjnego [7-11] (estymatory typu MRAS, filtr Kalmana, rozszerzony estymator Luenbergera), estymatory ślizgowe uważane były za najbardziej efektywne. Cechują się one między innymi: najlepszą odpornością na zmiany (lub błędną identyfikację) parametrów silnika, redukcją rzędu układu, prostą implementacją czy koniecznością doboru niewielkiej liczby wzmacnień estymatora (często jednego). Zalety te skłoniły mnie do zainteresowania się zastosowaniami techniki ruchu ślizgowego w estymacji zmiennych stanu silnika indukcyjnego zarówno podczas studiów doktoranckich, jak i w okresie późniejszym.

Porównawcze wyniki badań klasycznego estymatora prędkości ze ślizgowym i liniowym mechanizmem adaptacji zostały opublikowane niedługo po obronie mojej rozprawy doktorskiej w [IV]. Wyniki przedstawione w tej publikacji dotyczyły porównania dwóch estymatorów prędkości – MRAS^{CC} z regulatorem PI i obserwatora ślizgowego o strukturze podobnej do MRAS^{CC}, jednak ze zmodyfikowanym mechanizmem adaptacji, wykorzystującym funkcję znaku. Schematy blokowe obu rozwiązań przedstawiłem na Rys. 2. Oba estymatory bazują na estymacji prądu stojana (ang. *current estimator*) oraz tzw. symulatorze prądowym strumienia wirnika (bazującym na równaniach obwodu wirnika, ang. *current model*). Ponadto, oba rozwiązania wykorzystują tę samą funkcję błędu (nazywaną funkcją przełączającą w przypadku estymatora ślizgowego), będącą sygnałem wejściowym mechanizmu adaptacji, liniowego (PI) lub ślizgowego. Dodatkowo, estymator ślizgowy rozszerzony został o tzw. zmienną pomocniczą, która w dalszych pracach, jak zostało udowodnione, pozwoliła osiągnąć pełną stabilność estymatora ślizgowego w zakresie pracy silnikowej i generatorowej. Wyniki przedstawione w [IV] dotyczyły silnika trakcyjnego o mocy 50 kW, pracującego w układzie bezpośredniego sterowania momentem z modulatorem wektorowym DTC-SVM (ang. Direct Torque Control – Space Vector Modulation). W artykule tym przedstawiono zarówno badania symulacyjne, jak



Rys. 2 Schematy blokowe: a) estymatora ślizgowego, b) estymatora MRAS^{CC} z regulatorem PI [IV]

i eksperymentalne obu estymatorów. Moim wkładem w tą publikację było opracowanie koncepcji, modeli matematycznych, implementacja estymatora ślizgowego na procesorze sygnałowym oraz analiza otrzymanych wyników dotyczących tego estymatora. Zostało udowodnione, że estymator ślizgowy może pracować poprawnie zarówno w zakresie małych, jak i bardzo wysokich prędkości, ponad dwukrotnie większych niż prędkość znamionowa (co ma często miejsce w napędach trakcyjnych).

Wykorzystanie funkcji znaku (*sign*) w mechanizmie adaptacji prędkości estymatorów z ruchem ślizgowym pozwala na redukcję rzędu estymatora, jednocześnie powoduje jednak indukowanie się znacznych oscylacji w estymowanej prędkości, zwanych z języka angielskiego *chatteringiem*. Taki wysokoczęstotliwościowy sygnał jest podawany na odpowiednie bloki składowe estymatora, mające na celu wyznaczenie strumienia stojana bądź wirnika, prądów w uzwojeniach stojana, sił elektromagnetycznych, itd. Oscylacje te przenoszą się na sygnały estymowane, a te z kolei za sprawą sprzężeń zwrotnych i regulatorów w układach sterowania, mogą się one przenieść na sygnały rzeczywiste silnika, powodując znaczne oscylacje momentu i w związku z tym wibracje silnika, sprzęgła i maszyny roboczej. Z drugiej jednak strony, oscylacyjny sygnał estymowanej prędkości, przed wykorzystaniem go jako sprzężenie zwrotne układu sterowania powinien zostać przefiltrowany odpowiednim filtrem dolnoprzepustowym. Efektywne filtrowanie mogłoby wyeliminować oscylacje powstające przy dużych wzmocnieniach estymatora, jednak najczęściej wprowadza ono jednocześnie duże opóźnienie estymacji w stanach dynamicznych. Opóźnienie to dla silnika większej mocy, np. 50 kW [IV], ze względu na jego dużą mechaniczną stałą czasową może zostać pominięte. W napędach o mniejszych stałych czasowych, szczególnie, jeśli estymator pracuje w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego, opóźnienie to może prowadzić nawet do niestabilności całego układu. W swoich poprzednich badaniach, w ramach studiów doktoranckich zajmowałem się różnymi metodami minimalizowania problemu *chatteringu*. Zaproponowałem między innymi metody adaptacji współczynnika wzmocnienia regulatora [12], pozwalające zastosować filtry o mniejszym opóźnieniu dynamicznym.

W związku z powyższą analizą, po ukończeniu studiów doktoranckich kontynuowałem badania nad ślizgowymi estymatorami prędkości, które zachowując swoje zalety, powodowały by znacznie mniejsze oscylacje sygnałów estymowanych. W związku ze swoimi wcześniejszymi doświadczeniami związanymi z układami sterowania ślizgowego i pomysłami istniejącymi już w literaturze tematu, zaproponowałem podczas konferencji Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym (SENE) w 2015 roku, nowe rozwiązanie rozszerzonego ślizgowego estymatora prędkości typu MRAS (ang. Model Reference Adaptive System). Tekst publikacji konferencyjnej jest tożsamy z późniejszą publikacją w Przeglądzie Elektrotechnicznym [V].

W rozwiązaniu tym (podobnie jak w układach sterowania, które badałem), zaproponowałem by sygnał estymowany (sterujący) składał się z dwóch części: ciągłej (ang. *equivalent, continuous*) oraz nieciągłej (ang. *discontinuous*). W momencie publikacji, wg mojej najlepszej wiedzy istniał tylko jeden przypadek wykorzystania takiego podziału sygnału estymowanego w zastosowaniu do silników indukcyjnych [13]. Zastosowany w [13] estymator składa się z: modelu odniesienia w postaci estymatora strumienia wirnika opartego

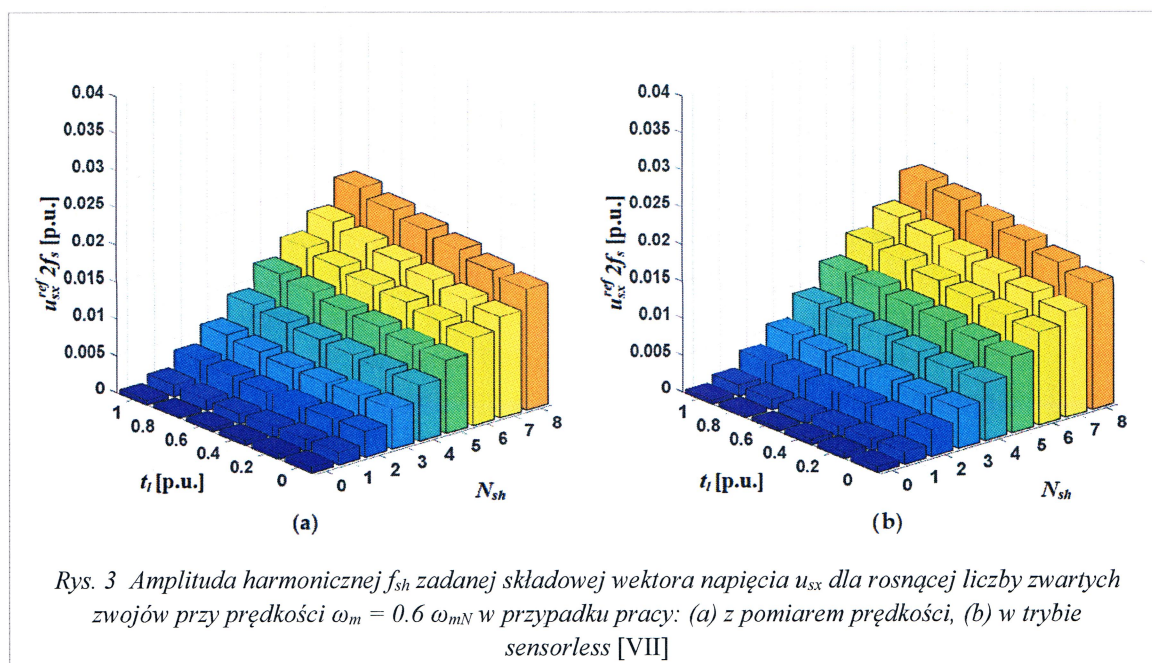
na modelu matematycznym obwodu stojana (tzw. model napięciowy, niezależny od prędkości) oraz z układu adaptacyjnego w postaci estymatora strumienia wirnika opartego na modelu obwodu wirnika (tzw. model prądowy). Nowością, którą zaproponowałem w [V] było wykorzystanie zmodyfikowanego połączenia modeli adaptacyjnego i referencyjnego, tj. modelu prądowego i estymatora prądu jako modeli adaptacyjnych oraz modelu referencyjnego w postaci samego silnika indukcyjnego (poprzez odniesienie modelu adaptacyjnego do mierzonego prądu stojana). Wspomniana modyfikacja bazowała na moich poprzednich doświadczeniach oraz wielu analizowanych publikacjach (jak choćby [14]), w których takie połączenie modeli adaptacyjnego i odniesienia (zarówno w zakresie estymatorów z regulatorami ciągłymi, jak i ślizgowymi) było znacznie bardziej korzystne. Jest ono: bardziej odporne na zmiany parametrów silnika, bardziej odporne na zły pomiar bądź niepoprawne wyznaczenie napięcia stojana (między innymi ze względu na zastosowany czas martwy pomiędzy załączeniami kolejnych tranzystorów w danej gałęzi falownika) i/lub konieczność wykorzystania pochodnych składowych wektora prądu stojana. Dodatkową zaletą jest to, że cały układ adaptacyjny odnosi się do mierzonych prądów, a nie do wyznaczanego w tzw. napięciowym modelu referencyjnym strumienia wirnika, wrażliwego między innymi na niepoprawne wyznaczenie rezystancji i napięcia stojana. Uwzględnienie części ciągłej w mechanizmie adaptacji prędkości, pozwoliło w [V] na osiągnięcie znacznie mniejszego poziomu oscylacji prędkości estymowanej w stosunku do rozwiązań klasycznych [14], bazujących tylko na części nieciągłej.

Znacznym rozszerzeniem rozwiązania opublikowanego w języku polskim i ilustrowanego tylko wynikami badań symulacyjnych [V] jest estymator ślizgowy opublikowany w renomowanym *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [VI]. Estymator ten bazuje również na podziale sygnału estymowanego na dwie składowe, tj. składową ciągłą i nieciągłą, wynikające z rozłożenia pochodnej przyjętej funkcji Lapunowa na szereg elementów. Jedną z różnic [VI] w stosunku do [V] jest rozszerzenie wektora sygnałów estymowanych o dodatkową zmienną pomocniczą. Ponadto, w artykule tym zamieszczono także wyniki badań eksperymentalnych otrzymane na stanowisku badawczym z silnikiem indukcyjnym o mocy 1,5 kW. Estymator przetestowany został zarówno w pętli otwartej, jak i zamkniętej.

Dodatkowa zmienna wprowadzona w modelu miała na celu między innymi zwiększenie niewrażliwości układu estymacji na zmiany parametrów silnika lub ich błędną identyfikację, podobnie jak to miało miejsce w [IV]. Analizując równania matematyczne estymatora można zauważyć, że dodatkowa zmienna koryguje częściowo wartość odwrotności stałej czasowej wirnika – dlatego też w artykule [VI] przedstawiłem wpływ zmian parametrów wirnika (jednocześnie rezystancji uzwojenia wirnika i indukcyjności rozproszenia wirnika). Dodatkowa zmienna nieznacznie poprawia dokładność estymacji strumienia wirnika, choć nie ma praktycznie wpływu na jakość estymacji prędkości wirnika. Widać jednocześnie, że parametry wirnika nie mają wpływu na pracę estymatora, który zaproponowałem, jeśli moment obciążenia jest zerowy lub bliski zeru.

Jak udowodniłem w [VI] zaproponowany estymator EqSM-MRAS^{CC} jest częściowo odporny na zmiany parametrów silnika. Jednakże, bazując na swoich dodatkowych doświadczeniach naukowych dotyczących układów diagnostycznych silnika indukcyjnego, postanowiłem zweryfikować odporność zaproponowanego estymatora ślizgowego

w przypadku pojawienia się wybranej awarii silnika, jaką jest zwarcie fazowe kilku zwojów uzwojenia stojana. Wyniki tej analizy zostały opublikowane w czasopiśmie *Energies* [VII]. Publikacja ta łączy cykl powiązanych tematycznie publikacji, przedstawiony powyżej i pozostałe osiągnięcie naukowe, które opisałem w punkcie 6. W artykule [VII] dokonałem zarówno weryfikacji możliwości estymacji prędkości silnika w przypadku awarii silnika, jak i sprawdzenia, czy możliwa jest diagnostyka napędu pracującego w polowo-zorientowanej bezczujnikowej strukturze sterowania DFOC (ang. Direct Field Oriented Control). Zwarcie zwojowe w jednej z faz silnika powoduje, że zmieniają się jej parametry obwodowe (głównie rezystancja), co sprawia, że trójfazowy obiekt sterowania jakim jest silnik indukcyjny staje się niesymetryczny. Jak udowodniono w publikacji [VII], estymator jest praktycznie odporny na początkową fazę uszkodzenia uzwojenia stojana, jaką jest zwarcie kilku zwojów – błąd estymacji prędkości jest pomijalny. Odporność estymatora ślizgowego na wspomniane uszkodzenie może być też traktowana pośrednio jako odporność na zmiany rezystancji stojana. W celu zdiagnozowania opisanego uszkodzenia zaproponowałem wykorzystanie czterech sygnałów z wewnętrznej struktury układu sterowania, mianowicie czterech zadanych sygnałów generowanych na wyjściach odpowiednich regulatorów PI: składowej wektora prądu stojana odpowiedzialnej za generowanie strumienia wirnika (wyjście regulatora amplitudy strumienia wirnika), składowej wektora prądu stojana odpowiedzialnej za generowanie momentu elektromagnetycznego (wyjście regulatora prędkości kątownego wirnika) oraz dwóch składowych wektora napięcia (wyjścia regulatorów składowych wektora prądu w układzie polowo zorientowanym). Zaproponowaliśmy w [VII], żeby sygnałami diagnostycznymi były amplitudy drugich krotności harmonicznych podstawowych (związanych z częstotliwością zasilania) wspomnianych czterech sygnałów (w sygnałach fazowych układów niesymetrycznych pojawia się harmoniczna o trzeciej krotności harmonicznej podstawowej, która po przekształceniach Clarke i Park’a przyjmuje częstotliwość podwójnej harmonicznej podstawowej). Za pomocą wykresów przedstawiliśmy



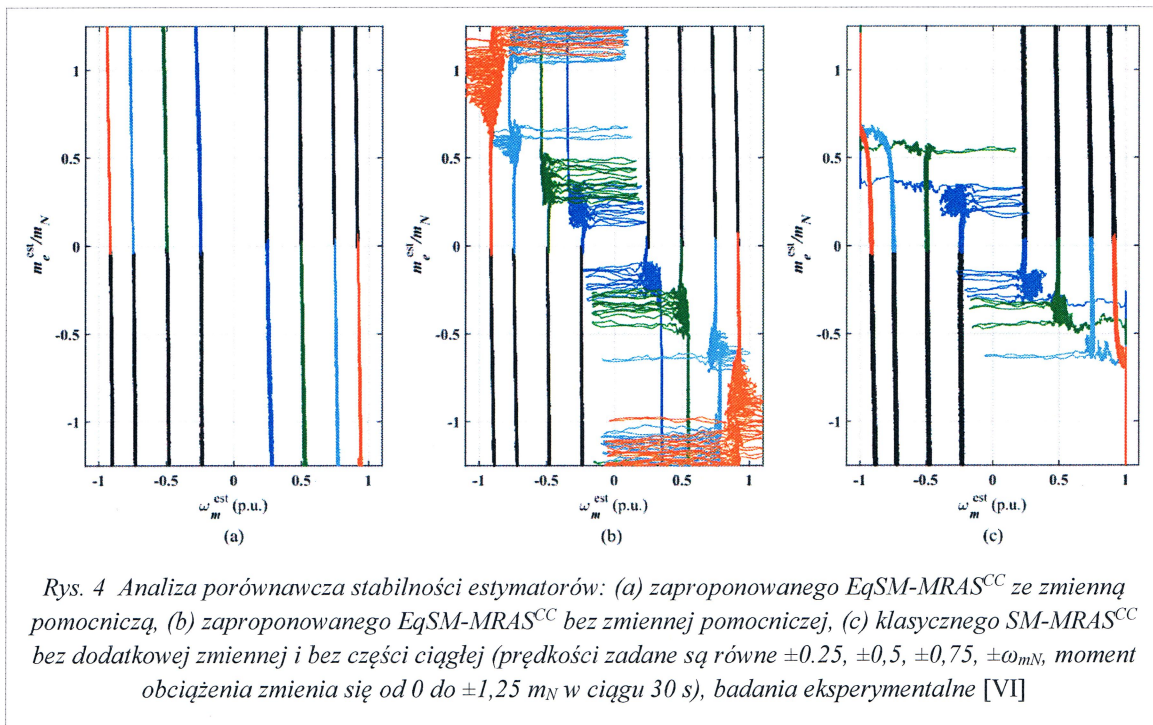
porównanie procesu diagnostycznego zarówno w strukturze bezczujnikowej, jak i podczas pracy z czujnikiem prędkości. Przedstawiliśmy także dokładną analizę wpływu: prędkości kątowej, momentu obciążenia, rezystancji w pętli zwarciowej oraz zmian parametrów regulatorów na sygnały diagnostyczne.

Przykład wpływu momentu obciążenia i liczby zwartych zwojów na wartość jednego z zaproponowanych wskaźników diagnostycznych (amplituda częstotliwości uszkodzeniowej składowej rzeczywistej zadanego wektora napięcia stojana) przedstawiłem na Rys. 3. Widać wyraźnie, że poziom momentu obciążenia nieznacznie wpływa na wartość wskaźnika uszkodzenia. Z drugiej jednak strony wskaźnik ten rośnie znacząco wraz ze wzrostem uszkodzenia (amplituda harmonicznej uszkodzeniowej rośnie kilkanaście/kilkadziesiąt razy w stosunku do przypadku nieuszkodzonego silnika), co pozwala uznać go za wartościowy symptom awarii. W omawianym artykule [VII] pokazaliśmy, że najlepszym wskaźnikiem uszkodzenia jest harmoniczna uszkodzeniowa składowej wektora napięcia stojana odpowiedzialnej za wytwarzanie strumienia wirnika (jak na Rys. 3) – jest ona praktycznie niezależna od przyjętych wartości parametrów regulatorów struktury DFOC.

Analiza porównawcza istniejących rozwiązań i opracowanie nowych koncepcji w zakresie stabilności wybranych estymatorów prędkości silnika indukcyjnego w zakresie pracy generatorowej – osiągnięcie II.2.

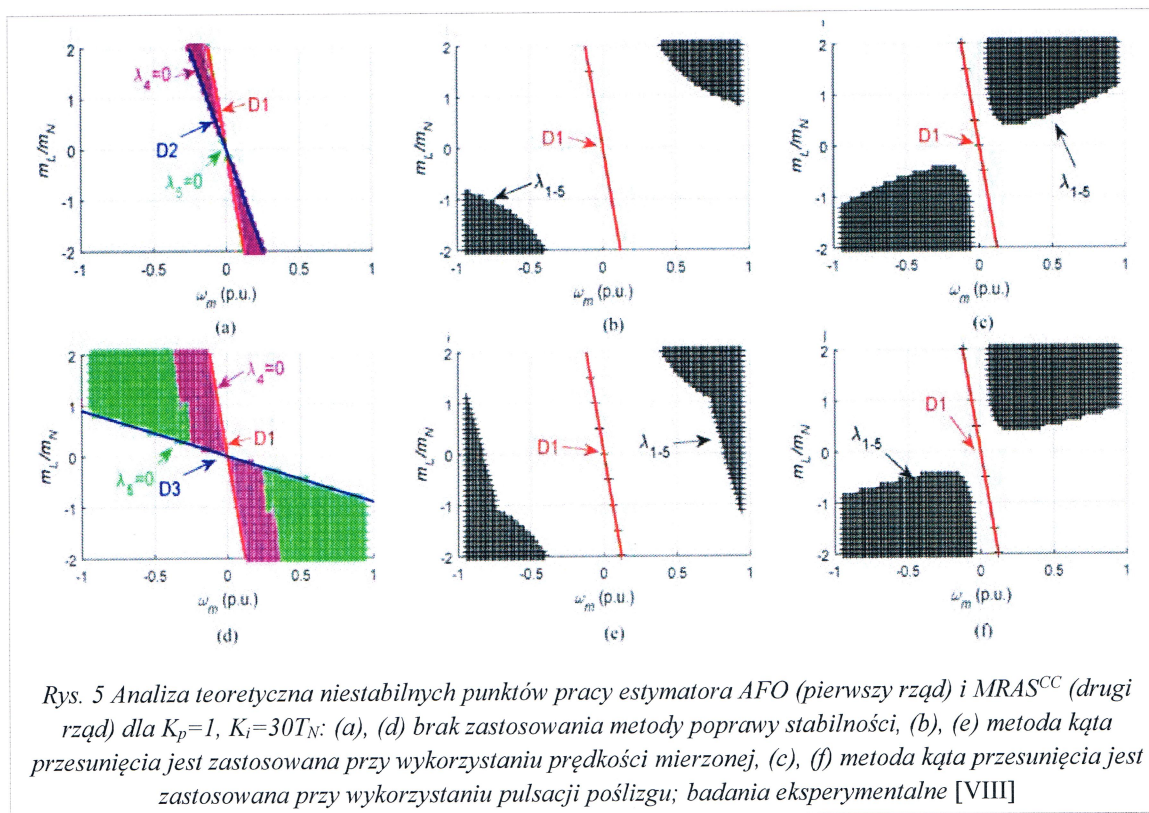
Pomimo wykorzystania prawie w każdym estymatorze z ruchem ślizgowym funkcji Lapunowa w celu spełnienia warunków stabilności asymptotycznej na etapie projektowania i weryfikacji estymatora, dokładna analiza stabilności estymatorów ślizgowych w szerokim zakresie zmian prędkości i momentu obciążenia jest niezwykle rzadko prezentowana w literaturze. Według mojej wiedzy praca takich estymatorów w zakresie pracy silnikowej i generatorowej zweryfikowana została jedynie w dwóch publikacjach, tj. [15], [16]. W jednej z nich [15] zostało udowodnione, że estymator jest stabilny w przypadku pracy regeneracyjnej, a w drugiej [16] została zaznaczona niestabilność estymatora w pewnym zakresie pracy w tym trybie.

Dlatego też w pracy [VI] dokonałem dokładnej analizy stabilności estymatora w obu trybach pracy: napędowym i generatorowym, zarówno w sposób teoretyczny, jak i przy wykorzystaniu badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Grupę otrzymanych trajektorii typu prędkość/moment w przypadku pracy w pętli otwartej zamieszczam tutaj jako przykład na Rys. 4. W związku z tym, że dla każdej pojedynczej trajektorii prędkość rzeczywista była stała, a zmieniał się stopniowo moment (w zakresie od 0% do 150% wartości znamionowej), trajektorie na Rys. 4 powinny być wertykalnymi liniami prostymi. Widać wyraźnie, że tylko rozwiązanie zaproponowane przeze mnie w [VI] jest stabilne w każdych warunkach (także w drugiej i czwartej ćwiartce układu współrzędnych prędkość/moment; Rys. 4a). Zarówno rozwiązanie z mojej poprzedniej pracy [V] (Rys. 4b), jak i rozwiązanie klasyczne bez dodatkowej zmiennej (Rys. 4c) jest niestabilne w zakresie pracy generatorowej. Widać także, że podział sygnału estymowanego na dwie części znacząco zmniejszył (przy tych samych zastosowanych filtrach dolnoprzepustowych) oscylacje w przebiegach estymowanej prędkości (wąskie linie na Rys. 4a i Rys. 4b) w porównaniu do rozwiązania klasycznego estymatora ślizgowego (grube linie na Rys. 4c).



Moje zainteresowanie dokładną analizą stabilności estymatorów ślizgowych wynika między innymi z prac w zakresie stabilności estymatorów prędkości z regulatorami liniowymi prowadzonych w zespole badawczym: prof. dr hab. inż. Teresa Orłowska-Kowalska, dr inż. Grzegorz Tarchała oraz mgr inż. Mateusz Korzonek.

Badania stabilności estymatorów i metod poprawy ich stabilności skupiają się głównie na estymatorach typu MRAS, chociaż w ramach badań porównawczych przeanalizowaliśmy także inne estymatory, w tym znany z literatury obserwator adaptacyjny pełnego rzędu (AFO). Porównanie zakresów stabilności dwóch badanych estymatorów prędkości, obu z identycznym mechanizmem adaptacji prędkości, opartym na błędzie estymacji składowych wektora prądu stojana, tj. MRAS^{CC} i AFO opublikowaliśmy w czasopiśmie *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [VIII]. Pomimo niewielkiej różnicy pomiędzy modelami obu estymatorów (mierzony – MRAS^{CC} lub estymowany – AFO, wektor prądu stojana w estymatorze strumienia wirnika) różnica w zakresach stabilności estymatorów jest bardzo istotna. W artykule [VIII] dokonaliśmy krytycznej analizy istniejących rozwiązań poprawy stabilności obu estymatorów i w dalszej pracy skupiliśmy się na, wg nas, najbardziej efektywnym rozwiązaniu, w którym wprowadza się dodatkowy kąt obrotu wektora błędu estymacji prądu stojana względem wektora estymowanego strumienia wirnika. Modyfikacja ta została po raz pierwszy zastosowana w estymatorze MRAS^{CC} właśnie w omawianym artykule. Przedstawiliśmy także krok po kroku etapy dokładnej analizy stabilności obu estymatorów, wyraźnie zaznaczając różnice pomiędzy badanymi estymatorami (AFO, MRAS^{CC}). Różnica ta, choć niewielka (mierzony prąd w modelu prądowym strumienia w MRAS^{CC}, estymowany prąd w AFO) powoduje istotną różnicę w zakresach stabilności obu estymatorów.



Pomimo tego, że mechanizm adaptacji estymatorów obliczony jest z warunków stabilności asymptotycznej Lapunowa, w celu weryfikacji stabilności adaptacyjnego estymatora prędkości, niezbędne jest rozszerzenie modelu estymatora o mechanizm adaptacji i linearyzacja rozszerzonego wektora błędu estymacji w konkretnym punkcie pracy. Następnie niezbędna jest weryfikacja numeryczna punkt po punkcie całego zakresu pracy (w naszych badaniach było to 200 punktów prędkości, 400 punktów dla momentu, czyli łącznie 80000 przeanalizowanych punktów pracy). Przykładowe wyniki wspomnianej analizy numerycznej zostały przedstawione na Rys. 5 dla: klasycznych AFO i MRAS (Rys. 5a,d), z zastosowaniem wspomnianej modyfikacji mechanizmu adaptacji i założeniem pomiaru prędkości silnika (co nie może być spełnione w układach typu *speed-sensorless*) (Rys. 5b,e) oraz przy założeniu wykorzystania obliczanej na bieżąco w układzie sterowania pulsacji poślizgu, co wyjaśniono dokładnie w [VIII] (Rys. 5c,f). Badania symulacyjne i eksperymentalne potwierdziły słuszność przeprowadzonej analizy teoretycznej i numerycznej.

Poza oceną rozwiązań i otrzymanych wyników, współdziałem w wykonaniu badań eksperymentalnych i opracowaniu wyników, za swój największy wkład w powstanie tej pracy uważam zaproponowanie postaci uogólnionego modelu matematycznego estymatorów AFO i MRAS^{CC}, co umożliwiło przejrzysty zapis nie tylko samego modelu matematycznego, ale również poszczególnych kroków analizy stabilności i wyznaczenia zakresów stabilnej pracy obu estymatorów.

Doświadczenia zdobyte w trakcie wielu lat pracy nad różnorodnymi estymatorami prędkości i metodami poprawy ich stabilności, pozwoliły zespołowi badawczemu,

wspomnianemu powyżej przygotować artykuł przeglądowy opublikowany w *ISA Transactions* (Elsevier) dotyczący porównania istniejących w chwili obecnej w literaturze estymatorów typu MRAS, wykorzystujących liniowy mechanizm adaptacji prędkości z regulatorem PI, pod kątem ich stabilności i wrażliwości na zakłócenia parametryczne [IX]. Przedstawione i przeanalizowane zostały dokładnie następujące estymatory:

- MRAS^F bazujący na dwóch modelach strumienia wirnika (modele wykorzystując równania obwodowe uzwojeń stojana i wirnika, indeks górny F – ang. Flux) [17], [18],
- MRAS^{RP} bazujący na wyrażeniach określających moc bierną (indeks górny RP – ang. Reactive Power) [19],
- MRAS^{EMF} bazujący na równaniach opisujących siłę elektromotoryczną (indeks górny EMF – ang. ElectroMotive Force) [20],
- MRAS^{CC} [14],
- MRAS^{CV}, wykorzystujący model bazujący na równaniu obwodu stojana (w równaniu pojawia się napięcie stojana, stąd indeks górny V – ang. Voltage) do estymacji strumienia wirnika [21],
- AFO (zaliczany przez niektórych autorów do grupy metod adaptacyjnych z modelem odniesienia MRAS ze względu na odniesienie układu adaptacyjnego do mierzonego prądu stojana, jak w MRAS^{CC} – sam silnik indukcyjny stanowi „model” odniesienia) [22], oraz:
- grupa stosunkowo nowych estymatorów P-,Q-,X-,Y-MRAS bazujących na, odpowiednio: mocy czynnej (P), biernej (Q) oraz dwóch wirtualnych sygnałach X i Y [23].

Opisane estymatory zostały przedstawione na tle innych estymatorów typu MRAS, w tym ślizgowych oraz wykorzystujących elementy sztucznej inteligencji czy logikę rozmytą. Przeanalizowano krytycznie modele matematyczne poszczególnych estymatorów, sposoby otrzymania mechanizmu adaptacji, dokładną stabilność wybranych estymatorów i metody poprawy stabilności rozwiązań, które ich wymagają. Podobieństwa i różnice estymatorów zostały zilustrowane zarówno w postaci schematów blokowych, jak i zebrane w postaci tabelarycznej. Przedstawiliśmy również szeroką analizę odporności estymatorów na zmiany parametrów schematu zastępczego silnika indukcyjnego. Wnioski płynące z porównania zostały przedstawione dokładnie w [IX]. Poza współudziałem w opracowaniu części teoretycznej tego artykułu za swój najistotniejszy wkład uważam współudział w krytycznej analizie literatury z zakresu estymatorów typu MRAS, która obejmuje ponad 200 pozycji. Przy czym w artykule [IX] wymieniono tylko najważniejsze z nich, wnoszące istotny wkład w rozwój tej tematyki (75 prac).

Podobnie jak w przypadku układów sterowania, dyskretna wersja estymatora prędkości była przedmiotem badań zespołu badawczego w ramach projektu OPUS 9, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki, pt. *Dyskretne ślizgowe sterowanie i estymacja zmiennych stanu w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi*. Wyniki badań dotyczące dyskretnego estymatora MRAS^{CC} przedstawiliśmy w publikacji konferencyjnej [X]. W publikacji tej zaprezentowaliśmy wyniki badań dotyczące dyskretyzacji równań modelu matematycznego estymatora za pomocą dwóch metod Eulera (prostokątów w przód i prostokątów w tył) oraz metody Tustina (transformata biliniowa). Jak pokazaliśmy w [X], zagadnienia dyskretyzacji estymatorów są szczególnie ważne w przypadku dużych prędkości

kątowych silnika – sygnały składowych strumieni, prądu i napięcia stojana zmieniają się wtedy z wysoką częstotliwością. Przedstawiliśmy także zakresy stabilności estymatora w formie dyskretnej w zależności od przyjętego układu współrzędnych (stacjonarny bądź wirujący z pulsacją synchroniczną) oraz od wielkości kroku próbkowania. Przedstawione wyniki pokazują, że najkorzystniejszą metodą implementacji cyfrowej równań estymatora jest zdecydowanie metoda Tustina, choć jednocześnie najbardziej skomplikowaną obliczeniowo. W tej pracy mój główny wkład sprowadzał się do współpracy przy opracowaniu modeli matematycznych i symulacyjnych.

C3. Podsumowanie i przyszłe badania

Przedstawiony powyżej cykl publikacji dotyczy powiązanych tematycznie, zróżnicowanych zagadnień skoncentrowanych wokół sterowanych wektorowo układów napędowych z silnikiem indukcyjnym, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień projektowania i stabilności układów sterowania i estymatorów prędkości kątowej. W swoich badaniach skupiłem się na układach odpornych na:

- uszkodzenia układu napędowego, zarówno w zakresie układów sterowania (układ sterowania ślizgowego momentem silnika odporny na uszkodzenie układu zasilającego), jak i w zakresie układów estymacji zmiennych stanu (estymator ślizgowy odporny na uszkodzenie uzwojenia stojana silnika indukcyjnego);
- zmiany parametrów obiektu, również w zakresie układów sterowania (układ sterowania odporny na zmiany stałej czasowej układu napędowego), jak i w zakresie estymacji zmiennych stanu (estymatory ślizgowe);

Podsumowując niniejsze opracowanie, do najważniejszych swoich osiągnięć po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych chciałbym zaliczyć:

- Opracowanie układu ślizgowego sterowania momentem elektromagnetycznym silnika indukcyjnego, odpornego na uszkodzenie tranzystorów falownika zasilającego [II]. Zaproponowana przeze mnie funkcja przełączająca w efektywny sposób umożliwiła utrzymanie napięć kondensatorów członu pośredniego na bezpiecznym poziomie;
- Opracowanie układu dyskretnego ślizgowego sterowania momentem silnika indukcyjnego, uwzględniającego cyfrową naturę współczesnych układów mikroprocesorowych [III];
- Zaproponowanie nowego ślizgowego estymatora prędkości kątowej silnika indukcyjnego, o dwuczłonowym mechanizmie adaptacyjnym, złożonym z sygnału ciągłego i nieciągłego. Pozwoliło to na znaczne zmniejszenie oscylacji sygnału estymowanej prędkości silnika indukcyjnego [V];
- Rozszerzenie wcześniej zaproponowanego estymatora ślizgowego o dodatkową zmienną, pozwalające na osiągnięcie stabilności estymatora w obydwu trybach pracy silnika: napędowym i generatorowym [VI];
- Opracowanie bezczujnikowego układu sterowania połowo-zorientowanego DFOC z estymatorem ślizgowym, umożliwiającego diagnostykę uszkodzeń uzwojenia stojana [VII]. Udowodniło to także, że estymator ten jest nie tylko odporny na zmiany parametrów silnika, ale również na początkowe stadium uszkodzenia uzwojenia stojana;

- Współdziałal w pracach mających na celu analizę porównawczą stabilności estymatorów prędkości z regulatorem liniowym w zakresie pracy generatorowej i opracowanie nowych rozwiązań w tym temacie [VIII, IX].

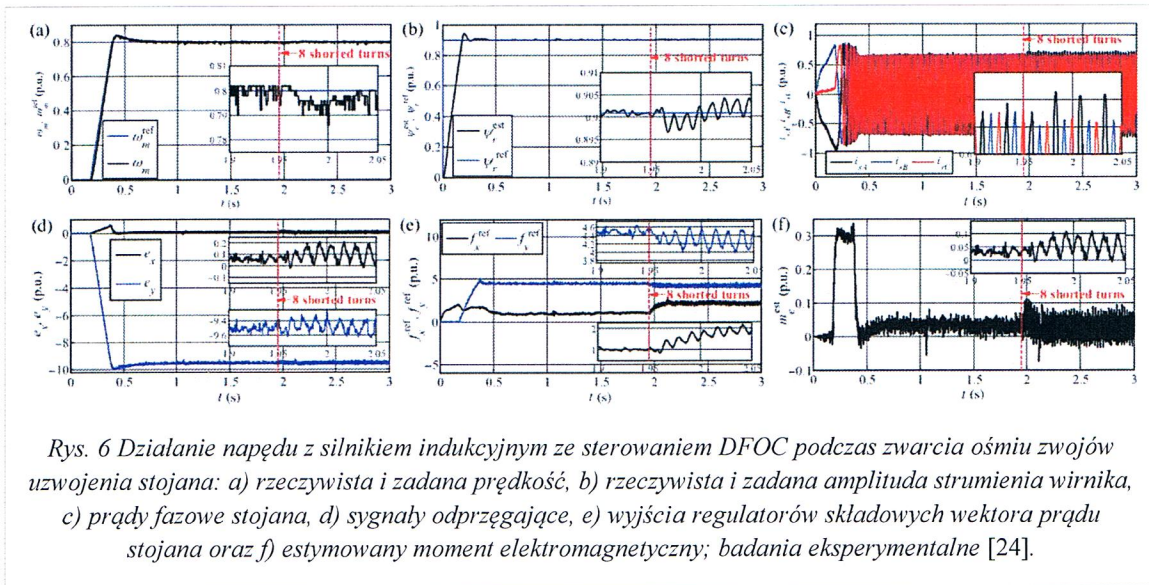
Wiele z zagadnień przedstawionych powyżej może być przedmiotem dalszych prac badawczych. Prowadzę lub będę w przyszłości prowadzić badania dotyczące między innymi:

- nowych układów dyskretnego sterowania ślizgowego zmiennymi stanu silnika indukcyjnego, zarówno momentu, prędkości, jak i położenia wału. Prace będą uwzględniały także szczegółową weryfikację eksperymentalną wspomnianych układów sterowania;
- nowych metod zapewnienia stabilności estymatorów prędkości typu MRAS dla silnika indukcyjnego w zakresie pracy generatorowej. Trwające aktualnie prace (część z nich zgłoszona do publikacji w *IEEE Transactions on Industrial Electronics* i *IEEE Transactions on Industrial Informatics*) dotyczą mojego autorskiego pomysłu wykorzystania dodatkowej zmiennej stanu w zakresie estymatorów liniowych (AFO i MRAS^{CC}). Użycie takiego rozwiązania pozwala na osiągnięcie stabilności estymatora bez konieczności przełączania mechanizmu poprawy stabilności pomiędzy pracą silnikową a generatorową, jak ma to miejsce w przypadku istniejących metod;
- nowych metod diagnostycznych, zarówno dla silnika indukcyjnego, jak i silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (PMSM). Prace te będą prowadzone między innymi w ramach trwającego aktualnie projektu OPUS 14 pt. *Hybrydowe metody detekcji uszkodzeń silników synchronicznych z magnesami trwałymi w napędach elektrycznych ze sterowaniem wektorowym przy wykorzystaniu obliczeń analitycznych i neuronowych* finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki, w ramach którego jestem członkiem zespołu badawczego. W trakcie badań planuję skupić się na wyspecjalizowanych metodach diagnostycznych stojana i wirnika, wykorzystujących sygnały wewnętrzne struktury sterowania wektorowego, dla których nie jest wymagana czasochłonna (i obciążona wieloma uwarunkowaniami) analiza FFT, mających zastosowanie w napędach elektrycznych podlegających częstym zmianom i nawrotom prędkości silnika oraz zmianom momentu obciążenia.

6. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych.

Diagnostyka uszkodzeń silnika indukcyjnego pracującego w zamkniętej pętli sterowania polowo-zorientowanego – osiągnięcie dodatkowe

Po ukończeniu studiów doktorskich znaczną część mojej pracy poświęciłem, poza badaniami odpowiadającymi tematyce cyklu publikacji opisanego powyżej, pracom nad układami diagnostyki silnika indukcyjnego pracującego w zamkniętej pętli sterowania polowo-zorientowanego. Moja główna uwaga badawcza skupiała się na metodach diagnostyki uszkodzeń uzwojeń stojana silnika, mianowicie diagnostyki zwarć zwojowych w ramach jednej fazy silnika. We wszystkich opublikowanych wynikach badań byłem odpowiedzialny za przygotowanie układów sterowania, ich analizę pod kątem możliwości zastosowania wybranych metod diagnostycznych oraz implementację algorytmów na stanowisku eksperymentalnym. Uczestniczyłem także w opracowaniu i doborze sygnałów oraz metod



diagnostycznych, weryfikacji i opracowaniu graficznym otrzymanych wyników oraz przygotowaniu tekstu publikacji.

Diagnostyka uszkodzeń uzwojeń stojana silnika pracującego w układzie sterowania DFOC została przedstawiona między innymi w prestiżowym *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [24]. Założono, że w strukturze sterowania występuje układ odprzegający tory sterowania prędkością i strumieniem, a sygnały odprzegające oraz sygnały będące wyjściami regulatorów składowych wektora prądu stojana zostały zaproponowane jako efektywne sygnały diagnostyczne. Przeanalizowana została metoda diagnostyczna bazująca na analizie spektralnej prądów fazowych (MCSA) oraz zaproponowana została metoda bazująca na analizie FFT powyżej wspomnianych sygnałów diagnostycznych. Na Rys. 6 przedstawiłem przygotowane przeze mnie wyniki pomiarów przebiegów z układu sterowania. Wyraźnie widać, między innymi na Rys. 6b, 6d, 6e, 6f, oscylacje pojawiające się w przebiegach wewnętrznych zmiennych stanu struktury sterowania po pojawieniu się uszkodzenia uzwojenia stojana. Częstotliwość tych oscylacji odpowiada częstotliwości podwójnej harmonicznej podstawowej sygnałów fazowych silnika (prądów, napięć zasilających uzwojenie). Wspomniane wskaźniki (symptomy) pozwalają w efektywny sposób zdiagnozować pojawiające się uszkodzenie, nawet w początkowej jego fazie, co zostało udowodnione w [24] między innymi za pomocą przebiegów on-line wskaźników diagnostycznych. Ich amplituda rośnie kilkanaście/kilkadziesiąt razy w stosunku do stanu pracy bez uszkodzenia.

Porównanie działania układu sterowania polowo-zorientowanego DFOC i skalarnego bez sprzężeń zwrotnych przedstawiono w [25]. W obu przypadkach do analizy sygnałów diagnostycznych zastosowana została metoda składowych symetrycznych. Wyniki porównawcze dla dwóch układów sterowania wektorowego: DFOC i DTC-SVM opublikowaliśmy w [26]. Wykorzystaliśmy zarówno metodę składowych symetrycznych, jak i analizę spektralną sygnałów pochodzących z wewnętrznej struktury układów sterowania. Porównanie wyników otrzymanych dla obu metod sterowania w jednakowych warunkach

pracy pokazuje, że układ DTC-SVM jest o wiele bardziej odporny na powstające uszkodzenie stojana. Innymi słowy, diagnostyka w takim układzie jest trudniejsza i możliwa dopiero dla większej liczby zwartych zwojów.

Poza badaniem metod diagnostyki stojana, przeanalizowaliśmy również możliwość diagnostyki wirnika silnika pracującego w zamkniętej pętli sterowania wektorowego [27]. W przypadku obu uszkodzeń, stojana i wirnika wykorzystana została analiza FFT sygnałów diagnostycznych ze struktury wewnętrznej sterowania DFOC. Udowodniliśmy, że w przebiegach zaproponowanych sygnałów w obu przypadkach pojawiają się częstotliwości uszkodzeniowe (odpowiadające amplitudom harmonicznym charakterystycznym dla poszczególnych uszkodzeń) o amplitudach znacznie większych niż w przypadku silnika nieuszkodzonego. Jako autorzy publikacji konferencyjnej [27] zostaliśmy zaproszeni do rozszerzenia swoich badań i opublikowania wyników w *IEEE Transactions on Industrial Applications*.

Bibliografia

- [1] V. I. Utkin, "Sliding mode control design principles and applications to electric drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 23-36, Feb. 1993.
- [2] C. Lascu, I. Boldea, F. Blaabjerg, "Direct torque control of sensorless induction motor drives: A sliding-mode approach", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 2, pp. 582-590, Mar-Apr 2004.
- [3] B. A. Welchko, T. A. Lipo, T. M. Jahns, S. E. Schulz, "Fault tolerant three-phase AC motor drive topologies: a comparison of features, cost, and limitations", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1108-1116, 2004.
- [4] W. Zhang, D. Xu, P. N. Enjeti, H. Li, J. T. Hawke, H. S. Krishnamoorthy, "Survey on fault-tolerant techniques for power electronic converters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 12, pp. 6319-6331, 2014.
- [5] J. H. Chen, J. Huang, Y. Sun, "Resistances and Speed Estimation in Sensorless Induction Motor Drives Using a Model With Known Regressors", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 4, pp. 2659-2667, Apr 2019.
- [6] S. Das, R. Kumar, A. Pal, "MRAS-Based Speed Estimation of Induction Motor Drive Utilizing Machines' d- and q-Circuit Impedances", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 6, pp. 4286-4295, Jun 2019.
- [7] F. J. Lin, R. J. Wai, R. H. Kuo, D. C. Liu, "A comparative study of sliding mode and model reference adaptive speed observers for induction motor drive", *Electric Power Systems Research*, vol. 44, no. 3, pp. 163-174, Mar. 1998.
- [8] F. Chen, M. W. Dunnigan, "Comparative study of a Sliding-Mode Observer and Kalman filters for full state estimation in an induction machine", *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 149, no. 1, pp. 53-64, Jan. 2002.
- [9] Y. Zhang, Z. Zhao, T. Lu, L. Yuan, W. Xu, J. Zhu, "A comparative study of Luenberger Observer, Sliding Mode Observer and Extended Kalman Filter for sensorless vector control of induction motor drives," in *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, San Jose, USA, 2009, pp. 2466-2473.
- [10] M. M. Khater, M. S. Zaky, H. Yasin, S. S. Shokralla, A. Ei-Sabbe, "A comparative study of sliding mode and Model Reference Adaptive Speed observers for induction motor drives," in *Proc. 11th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, El-Minia, Egypt, 2006, pp. 434-440.
- [11] Z. Sutnar, Z. Peroutka, M. Rodič, "Comparison of Sliding Mode Observer and Extended Kalman Filter for Sensorless DTC-Controlled Induction Motor Drive," in *Proc. 14th*

- International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC)*, Ohrid, Macedonia, 2010, pp. 55-62.
- [12] G. Tarchała, "Influence of the sign function approximation form on performance of the sliding-mode speed observer for induction motor drive," in *Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Gdańsk, Poland, 2011, pp. 1397-1402.
- [13] S. M. Gadoue, D. Giaouris, J. W. Finch, "MRAS Sensorless Vector Control of an Induction Motor Using New Sliding-Mode and Fuzzy-Logic Adaptation Mechanisms", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 2, pp. 394-402, June 2010.
- [14] T. Orłowska-Kowalska, M. Dybkowski, "Stator-Current-Based MRAS Estimator for a Wide Range Speed-Sensorless Induction-Motor Drive", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 4, pp. 1296-1308, Apr. 2010.
- [15] T. Hamajima, M. Hasegawa, S. Doki, S. Okuma, "Sensorless Vector Control of Induction Motor Stabilized at the Whole Region with Speed and Stator Resistance Identification based on Augmented Error", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 155, no. 1, pp. 52-63, Aug. 2006.
- [16] Z. Yan, C. X. Jin, V. I. Utkin, "Sensorless sliding-mode control of induction motors", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 6, pp. 1286-1297, Dec. 2000.
- [17] S. Tamai, H. Sugimoto, M. Yano, "Speed sensorless vector control of induction motor with model reference adaptive system," in *Proc. IEEE-IAS Annual Meeting*, 1987, pp. 189-195.
- [18] C. Schauder, "Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction-Motors without Rotational Transducers", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 5, pp. 1054-1061, Sep./Oct. 1992.
- [19] F.-Z. Peng, T. Fukao, J.-S. Lai, "Low-speed performance of robust speed identification using instantaneous reactive power for tachless vector control of induction motors," in *Proc. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1994, pp. 509-514.
- [20] F. Z. Peng, T. Fukao, "Robust speed identification for speed-sensorless vector control of induction motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, no. 5, pp. 1234-1240, Sep-Oct 1994.
- [21] D. Sobczuk, "Application of ANN for control of PWM inverter fed induction motor drives," Ph.D. Thesis, The Institute of Control and Industrial Electronics, 1999.
- [22] H. Kubota, K. Matsuse, T. Nakano, "DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, no. 2, pp. 344-348, Aug. 1993.
- [23] V. Verma, C. Chakraborty, "New series of MRAS for speed estimation of vector controlled induction motor drive," in *40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, 2014, pp. 755-761.
- [24] M. Wolkiewicz, G. Tarchała, T. Orłowska-Kowalska, C. T. Kowalski, "Online Stator Interturn Short Circuits Monitoring in the DFOC Induction-Motor Drive", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 4, pp. 2517-2528, 2016.
- [25] M. Wolkiewicz, G. Tarchała, C. T. Kowalski, "Stator windings condition diagnosis of voltage inverter-fed induction motor in open and closed-loop control structures", *Archives of Electrical Engineering*, vol. 64, no. 1, pp. 67-79, MAR 2015 2015.
- [26] M. Wolkiewicz, G. Tarchała, C. T. Kowalski, T. Orłowska-Kowalska, "Stator Faults Monitoring and Detection in Vector Controlled Induction Motor Drives—Comparative Study," in *Advanced Control of Electrical Drives and Power Electronic Converters*, J. Kabziński, Ed., ed: Springer, 2017, pp. 169-191.
- [27] M. Wolkiewicz, G. Tarchała, T. Orłowska-Kowalska, "Diagnosis of stator and rotor faults of an induction motor in closed-loop control structure," in *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Amalfi, Italy, 2018, pp. 196-201.