

dr inż. Piotr Serkies  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Elektryczny  
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych  
ul. Smoluchowskiego 19  
50-372 Wrocław

Wrocław, 26.04.2019

OBSZAR NAUK TECHNICZNYCH

**Załącznik nr 2a**

Do wniosku z dnia 25.04.2019 r. o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego w dziedzinie Nauk Technicznych w dyscyplinie Elektrotechnika

**Autoreferat w języku polskim przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych**



Podpis Wnioskodawcy

## AUTOREFERAT

### 1. Imiona i nazwisko

Piotr Józef Serkies

### 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

- **Stopień doktora Nauk Technicznych** (*Rozprawa obroniona z wyróżnieniem*) w dyscyplinie Elektrotechnika, Politechnika Wrocławska, Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych.

Tytuł: „Zastosowanie sterowania predykcyjnego w układzie napędowym z połączeniem sprężystym”

Promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Szabat,

Recenzenci: dr hab. inż. Jacek Kabziński, prof. PŁ,

dr hab. inż. Roman Muszyński, prof. PP

Publiczna obrona rozprawy: 10.07.2013

- **Dyplom ukończenia studiów magisterskich**, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny

Kierunek Automatyka i Robotyka, Specjalność: Automatykacja Maszyn, Pojazdów i Urządzeń

Temat pracy magisterskiej: „Diagnostyka agregatów pompowych w oczyszczalniach i przepompowniach ścieków”

Promotor: prof. dr hab. inż. Czesław Kowalski

### 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 01.12.2013 – obecnie – zatrudnienie na stanowisku adiunkta, Instytut/Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Wydział Elektryczny, Politechnika Wrocławska.
- 1.10.2012 – 31.11.2013 – zatrudnienie na stanowisku asystenta, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Wydział Elektryczny, Politechnika Wrocławska.

### 4. Pełnione Funkcje

- 01.03.2018 – obecnie – prodziekan ds. studenckich i promocji, Wydział Elektryczny, Politechnika Wrocławska

**5. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016r. poz882 ze zm. W Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):**

**a) Tytuł osiągnięcia Naukowego:**

Podstawę wniosku habilitacyjnego stanowi osiągnięcie przedstawione w cyklu publikacji powiązanych tematycznie, które zatytułowano:

**„Zaawansowane metody sterowania i estymacji zmiennych stanu elektrycznego układu napędowego z połączeniem sprężystym”**

**b) Wykaz publikacji zaliczanych do cyklu**

- [1] **Wróbel Karol (20%), Serkies Piotr J (80%)**: Wykorzystanie sterowania predykcyjnego z modelem w przestrzeni stanu w napędzie indukcyjnym z połączeniem sprężystym, Przegląd Elektrotechniczny. 2014, R. 90, nr 11, s. 189-192,  
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: zaproponowaniu i opracowaniu metody predykcyjnej (bazującej na metodzie MPC) regulacji strumienia wirnika i prędkości obciążenia napędu z połączeniem sprężystym i silnikiem indukcyjnym w strukturze bezpośredniej (bazkaskadowej), opracowaniu modeli symulacyjnych oraz przygotowaniu regulatora w wersji of-line, redakcji pracy.*  
**Mój udział procentowy szacuję na 80%.**
- [2] **Wróbel Karol (30%), Serkies Piotr J (70%)**: Redukcja złożoności regulatora predykcyjnego w układzie dwumasowym z silnikiem indukcyjnym. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, 2014, nr 34, s. 206-215.  
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: zaproponowaniu algorytmu sterowania, określeniu algorytmów redukcji złożoności, określeniu sposobu badania złożoności obliczeniowej, krytycznej ocenie wyników i redakcji części pracy.*  
**Mój udział procentowy szacuję na 70%.**
- [3] **Serkies Piotr J (80%), Szabat Krzysztof (20%)**: Predictive control of the two-mass drive with an induction motor for a wide speed range, 2018 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Budapest, Hungary, 26-30 September 2018.  
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji przestrajanego regulatora predykcyjnego, opracowaniu modelu symulacyjnego oraz oprogramowania eksperymentalnego, przeprowadzeniu badań i oceny wyników, opracowałem również wstępną wersję pracy.*  
**Mój udział procentowy szacuję na 80%.**

- [4] **Serkies Piotr J (70%), Szabat Krzysztof (30%)**: Predictive position control of a two-mass system with an induction motor in a wide range of speed changes W: Advanced control of electrical drives and power electronic converters / ed. by Jacek Kabziński. Cham : Springer, cop. 2017. s. 53-74,  
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji przestrajanego predykcyjnego regulatora pozycji napędu dwumasowego z silnikiem indukcyjnym, opracowaniu modelu symulacyjnego oraz oprogramowania eksperymentalnego, przeprowadzeniu badań i oceny wyników, opracowałem również wstępną wersję pracy.*  
**Mój udział procentowy szacuję na 70%.**
- [5] **Serkies Piotr J (80%), Szabat Krzysztof (20%)**: Predictive speed control with fuzzy compensation of a two-mass drive with friction, Compel. 2017, vol. 36, nr 1, s. 62-77,  
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji przestrajanego predykcyjnego regulatora prędkości napędu z połączeniem sprężystym, który pracuje w obszarze prędkości ultraniskich z wykorzystaniem elementów zbiorów rozmytych, opracowaniu modelu symulacyjnego i oprogramowania eksperymentalnego, opracowaniu wyników.*  
**Mój udział procentowy szacuję na 80%.**
- [6] **Serkies Piotr J (100%)**: A novel predictive fuzzy adaptive controller for a two-mass drive system, Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. 2018, vol. 66, nr 1, s. 37-47,  
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji regulatora bazującego na miękkim przełączaniu (z wykorzystaniem zbiorów rozmytych) między strukturami predykcyjnymi obliczonymi dla różnych wartości zmiennego parametru. Wykonałem również wszystkie badania symulacyjne oraz eksperymentalne, dokonałem krytycznej analizy wyników i przygotowałem tekst pracy.*  
**Mój udział procentowy szacuję na 100%.**
- [7] **Serkies Piotr J (80%), Szabat Krzysztof (10%), Dodds Stephen (10%)**: Piotr J. Serkies, Sterowanie napędem dwumasowym bazujące na metodzie FDC z ograniczeniami zmiennych stanu. Przegląd Elektrotechniczny. 2013, R. 89, nr 12, s. 60-63.  
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji kaskadowej struktury regulatora prędkości napędu z połączeniem sprężystym bazującej na metodzie Forced Dynamic Control, opracowaniu modeli symulacyjnych i eksperymentalnych, wykonaniu badań eksperymentalnych.*  
**Mój udział procentowy szacuję na 80%.**
- [8] **Serkies Piotr J (70%), Szabat Krzysztof (30%)**: Effectively Damping of the Torsional Vibrations of the Drive System with Elastic Joint Based on the Forced Dynamic Control Algorithms, Journal of Vibration and Control, 2019, vol xx, Przyjęte do druku

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji badań porównawczych obu struktur, opracowaniu modeli symulacyjnych i eksperymentalnych, wykonaniu badań oraz redakcji pracy.*

***Mój udział procentowy szacuję na 70%.***

- [9] **Serkies Piotr J (100%)**: Comparison of the control methods of electrical drives with an elastic coupling allowing to limit the torsional torque amplitude, *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*. 2017, vol. 19, nr 2, s. 203-210

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji badań porównawczych opracowanych struktur, wykonaniu badań symulacyjnych i eksperymentalnych, krytycznej ocenie uzyskanych wyników oraz redakcji tekstu pracy.*

***Mój udział procentowy szacuję na 100%.***

- [10] **Serkies Piotr J (50%), Szabat Krzysztof (50%)**: Zastosowanie obserwatorów z ruchomym oknem MHE do estymacji zmiennych stanu napędu z połączeniem sprężystym, *Przegląd Elektrotechniczny*. 2015, R. 91, nr 2, s. 175-178.

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu struktury obserwatora z ruchomym oknem, opracowaniu modeli symulacyjnych, wykonaniu badań symulacyjnych, przygotowaniu tekstu artykułu.*

***Mój udział procentowy szacuję na 50%.***

- [11] **Serkies Piotr J (50%), Szabat Krzysztof (50%)**: Application of moving horizon observer for state estimation in drive system with elastic coupling, 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) USB Proceedings, Seville, Spain, 17-19 March, 2015. Piscataway, NJ : IEEE, cop. 2015. s. 629-633,

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji obserwatora z ruchomym oknem dla napędu z połączeniem sprężystym, przygotowaniu jego struktury oraz wykonaniu badań symulacyjnych.*

***Mój udział procentowy szacuję na 50%.***

- [12] **Serkies Piotr J. (100%)**: The estimation of the state variables of the drive system with elastic joint using Moving Horizon Estimation (MHE), *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. 2019, vol. (praca przyjęta do druku)

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji obserwatora, wykonaniu części symulacyjnej oraz przygotowaniu modelu eksperymentalnego i wykonanie badań eksperymentalnych. Byłem również redaktorem tekstu.*

***Mój udział procentowy szacuję na 100%.***

Tab. 1. Analiza wskazanych pozycji jednolitego cyklu publikacji

Nr pub.	Nazwa czasopisma/konferencji	Punkty wg MNiSW	Impact Factor	Wkład wnioskodawcy	Rok publikacji
[1]	Przegląd Elektrotechniczny	14	0	80 %	2014
[2]	Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Nr 70	6	0	70%	2014
[3]	IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)	15 (Web of Science)	---	80 %	2018
[4]	Rozdział w monografii: Advanced control of electrical drives and power electronic converters, Springer	0	---	70 %	2017
[5]	Compel	15	0,534	80 %	2017
[6]	Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences	25	1,361	100 %	2018
[7]	Przegląd Elektrotechniczny	14	0	80 %	2013
[8]	Journal of Vibration and Control	25	2,197	70 %	2019
[9]	Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability	25	1,383	100 %	2017
[10]	Przegląd Elektrotechniczny	14	0	50%	2015
[11]	IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)	15 (Web of Science)	---	50 %	2015
[12]	Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences	25	1,361	100 %	2019

Tab. 2. Podstawowe wskaźniki bibliograficzne kandydata

Sumaryczny Impact Factor Cyklu publikacji	<b>6,84</b>
Sumaryczny Impact Factor Cyklu publikacji z uwzględnieniem udziału procentowego	<b>6,07</b>
Sumaryczny Impact Factor Wszystkich publikacji po doktoracie	<b>13,34</b>
Suma punktów MNiSW Cyklu publikacji	<b>193</b>
Suma punktów MNiSW Cyklu publikacji z uwzględnieniem udziału procentowego	<b>156,2</b>
Suma cytowań według bazy Web of Science Core Collection bez autocytowań	<b>72</b>
H index według bazy Web of Science Core Collection	<b>3</b>
Suma cytowań według bazy Scopus bez autocytowań	<b>77</b>
H index według bazy Scopus	<b>5</b>
Suma cytowań według bazy Publish or Perish bez autocytowań	<b>124</b>
H index według bazy Publish or Perish	<b>8</b>

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

### **Motywacja i cel naukowy**

Wraz z rozwojem energoelektroniki, silników elektrycznych i techniki mikroprocesorowej od układów napędowych zaczęto wymagać coraz większej dynamiki przy równoczesnym zwiększeniu właściwości. Te wymagania zaczęły powodować, że pomijane zjawiska takie jak: skończona sztywność połączeń mechanicznych zaczęły odgrywać istotną rolę w projektowaniu napędu.

Na przestrzeni ostatnich 20 lat można zauważyć trend związany z wykorzystaniem zaawansowanych układów regulacji do sterowania napędem z połączeniem sprężystym. Pierwotnie drgania rozpatrywane były w ciężkich napędach przemysłowych takich jak walcarki czy napędy maszyn papierniczych. W urządzeniach tych, z racji dużych momentów bezwładności, częstotliwości rezonansowe układu były stosunkowo małe co powodowało, że sterowniki miały odpowiednio dużo czasu na wyznaczenie sygnału zadanego i jego osiągnięcie przez silnik napędowy. W przypadku układów o wyższych częstotliwościach rezonansowych ( $f_r > 100$  Hz) zaczęto stosować filtry cyfrowe do tłumienia drgań. Takie podejście jest obecnie najczęściej stosowanym w układzie o wysokiej częstotliwości rezonansowej. W części rozwiązań komercyjnych, jak na przykład serwonapędach firmy *B&R*, istnieje fabryczny algorytm oparty na czterech filtrach różnego typu. Pozwala to wytłumić różne częstotliwości rezonansowe oraz można dostroić strukturę sterowania z uwzględnieniem sprężystości połączenia mechanicznego. Innym producentem, który w swoich narzędziach inżynierskich daje możliwość zastosowania specjalnej struktury sterowania uwzględniającej sprężystość jest firma *MOOG*. Podejście to jednak, choć skuteczne w układach o wysokiej częstotliwości, w przypadku gdy w napędzie drgania mają kilka czy kilkanaście Herców powoduje znaczące pogorszenie dynamiki. W tej grupie napędów dalej kluczowe do uzyskania dobrych właściwości dynamicznych jest zastosowanie specjalnych struktur sterowania. W pierwszej kolejności stosowano modyfikację nastaw regulatorów, bądź wprowadzano dodatkowe sprzężenia od wybranych zmiennych stanu. Pozwalało to na poprawę właściwości dynamicznych jednak w układach tych pojawia się problem związany z wprowadzaniem ograniczeń sygnału sterującego, jak również zmiennych stanu napędu. W przypadku wprowadzenia ograniczenia na sygnał sterujący (zazwyczaj zadany moment elektromagnetyczny) w układzie pojawia się nieliniowość, która powoduje, że uzyskana przez odpowiedni dobór nastaw dynamika, może być rozpatrywana wyłącznie w przypadku małych zmian błędu regulacji (tak, aby sygnał zadany nie wchodził w ograniczenie). Kolejnym rozwinięciem są metody bazujące na sterowaniu rozmytym, ślizgowym, adaptacyjnym. Metody te pozwalają na uzyskanie bardzo dobrych właściwości dynamicznych, jednak ich główną wadą jest brak możliwości ograniczenia wewnętrznych zmiennych stanu napędu. Drugą istotną wadą jest małe rozpowszechnienie tych metod w przemyśle. Problemem tym zajmuje się wiele ośrodków badawczych na świecie.



Problemem tłumienia drgań skrętnych zajmuje się wiele ośrodków badawczych na świecie. Dla mnie najbardziej inspirujące prace pochodziły z ośrodków japońskich (zespoły profesorów Y. Hori, K. S. Katsury). W Polsce tematyka ta była/jest podejmowana przez pracowników wielu szkół wyższych. Pierwotne prace były prowadzone na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (zespoły profesorów L. Szklarskiego i M. Tondosa). Kolejne ośrodki akademickie posiadające znaczący wkład w niniejszą tematykę to: Politechnika Poznańska (zespoły profesorów: dr hab. inż. Stefan Brock, prof. PP., dr hab. inż. Tomasz Pajchrowski, Muszyński Zawirski), Politechnika Śląska (zespół profesora Kazimierza Gierlotki), czy w zakresie zaawansowanych metod sterowania napędami elektrycznymi: Politechnika Warszawska (prof. dr hab. inż. Lech Grzesiak), Politechnika Białostocka (prof. dr hab. inż. Andrzej Sikorski).

Klasyczna struktura napędowa składa się z kaskadowo połączonych układów: wewnętrznego, związanego z regulacją momentu elektromagnetycznego, oraz zewnętrznego regulatora prędkości/położenia. Podejście to jest słuszne jeśli część podrzędna ma możliwość uzyskania zadanego momentu elektromagnetycznego w krótkim czasie. Jeśli czas ten nie może być pominięty wówczas należy albo uwzględnić opóźnienie generacji momentu w regulatorze nadrzędnym, albo zastosować struktury bezpośrednie. Struktury te nie mają wydzielonej pętli sterowania momentem co powoduje, że dynamika zmian momentu elektromagnetycznego jest włączona w główny obwód regulacji. W układzie takim problemem staje się nałożenie ograniczeń na wewnętrzne zmienne stanu. W takim przypadku uzasadnione jest zastosowanie sterowania predykcyjnego z ograniczeniami.

Sterowanie predykcyjne choć charakteryzuje się dużymi możliwościami i bardzo dobrymi właściwościami dynamicznymi posiada istotną wadę jaką jest złożoność obliczeniowa. Dodatkowo wraz ze zwiększeniem długości horyzontów predykcji wyjść i sterowań złożoność ta znacząco się zwiększa. W przypadku wykorzystania sterowania predykcyjnego z nieliniowym modelem, a do opisu niektórych zjawisk jak np. tarcie taki model trzeba wykorzystać, złożoność ta wzrasta jeszcze bardziej. Problem sterowania predykcyjnego z uwzględnieniem np. zmian parametrów modelu również prowadzi do znaczącego wzrostu złożoności obliczeniowej związanego z potrzebą przeliczania całego modelu i predyktora (zwiększa się złożoność związana z estymacją).

Problematyka nieliniowych zmian wielkości w układzie sterowania przenosi się również z części elektromagnetycznej. W tym przypadku zastosowanie klasycznej struktury kaskadowej z wydzielonymi układami regulacji momentu i prędkości/położenia jest niewskazane. Przykładem takim jest sytuacja gdy napęd ma pracować w obszarze prędkości większych od znamionowych. W tym obszarze dostępny moment elektromagnetyczny zmienia się wraz z prędkością, a dodatkowo występuje moment krytyczny (w układach polowych o orientacji wektora prądu stojana na strumień stojana). W takich strukturach należałoby zastosować rozszerzony nieliniowy model, który uwzględniłby dostępny moment elektromagnetyczny.

Zagadnieniem, które towarzyszy sterowaniu napędami z połączeniem sprężystym, jest problematyka związana z ograniczeniem amplitudy momentu skrętnego. W klasycznych

strukturach sterowania mamy możliwość ograniczenia tylko momentu zadanego. W takim przypadku, przy dynamicznych zmianach wartości zadanej, moment skrętny może przybierać wartości większe od ograniczonej wartości zadanej. Problem ten jest szczególnie widoczny w przypadku napędów, w których moment bezwładności maszyny roboczej jest większy od momentu bezwładności silnika napędowego. W czasie rozruchu w układzie dochodzi do cyklicznych oscylacji momentu skrętnego co przekłada się na trwałość elementów mechanicznych i trwałość konstrukcji. Podobne zjawisko może mieć miejsce w przypadku dużych zmian momentu obciążenia. Aby temu przeciwdziałać, istnieją dwie możliwości: albo ograniczenie dynamiki sygnału zadanego, albo wprowadzenie dynamicznych ograniczeń (między innymi sterowanie predykcyjne).

Zaawansowane struktury sterowania do swojej pracy wymagają informacji o pełnym wektorze stanu napędu często rozszerzonego o moment obciążenia. Problem estymacji tych zmiennych stanu jest zagadnieniem szeroko rozpowszechnionym w literaturze. Można znaleźć prace opisujące wykorzystanie różnych metod takich jak: obserwator Luenbergera (klasyczny, jak również z modyfikacjami), Filtr Kalmana (liniowy, nieliniowy, adaptacyjny, z modyfikacjami), sieci neuronowe i neuronowo-rozmyte. Można również znaleźć rozwiązania opisujące zastosowanie obserwatorów rozszerzonych dla napędów nieliniowych (np. z luzem czy tarciami). Jedną z zaawansowanych metod estymacji zmiennych stanu jest zastosowanie estymatora z ruchomym oknem. Estymator ten został opracowany w latach 90 ubiegłego wieku i zakłada, że w oknie czasowym minimalizowana jest różnica pomiędzy wyjściami mierzonymi i estymowanymi. Zastosowanie przesuwanego okna pozwala na minimalizację chwilowych zakłóceń. Zastosowanie tego typu estymatorów w układach z połączeniem sprzężystym nie było stosowane.

Z uwagi na zastany stan rozwiązań w zakresie zaawansowanych metod sterowania i estymacji zmiennych stanu napędu z połączeniem sprzężystym w roku 2014 postawiłem sobie trzy główne cele:

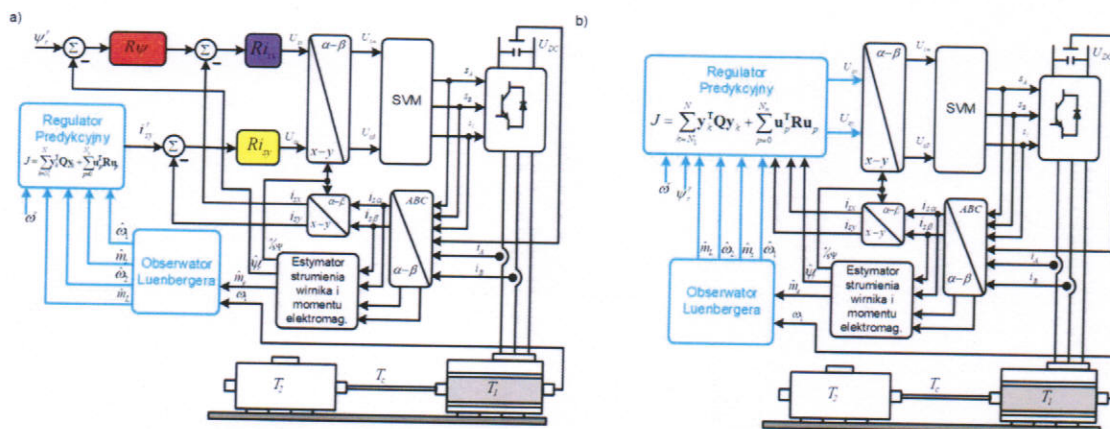
- CI. Opracowanie metod pozwalających na wykorzystanie sterowania predykcyjnego z liniowym modelem i optymalizacją w układach napędowych o właściwościach nieliniowych lub o zmiennych parametrach.**
- CII. Opracowanie algorytmu pozwalającego na wprowadzenie ograniczeń zmiennych stanu napędu z połączeniem sprzężystym w sterowaniu FDC.**
- CIII. Opracowanie estymatora, bazującego na algorytmie Moving Horizont Estimation (MHE), do estymacji zmiennych stanu napędu z połączeniem sprzężystym, który będzie można zastosować w czasie rzeczywistym.**

Niniejsze opracowanie zawiera oryginalne osiągnięcia w zakresie badań, które prowadziłem po uzyskaniu stopnia doktora w dyscyplinie naukowej elektrotechnika w specjalności automatyka napędu elektrycznego. Przedstawiony zbiór cyklu publikacji naukowych powiązanych tematycznie obejmuje wyniki badań z zakresu zastosowania sterowania predykcyjnego i Force Dynamic Control, jak również metod bazujących na

liniowym estymatorze z ruchomym oknem do sterowania i estymacji zmiennych stanu napędu z połączeniem sprzężystym jakie opracowałem po uzyskaniu stopnia doktora i które nie były prezentowane w rozprawie doktorskiej.

**Opracowanie metod pozwalających na wykorzystanie sterowania predykcyjnego z liniowym modelem i optymalizacją w układach napędowych o właściwościach nieliniowych lub o zmiennych parametrach.**

W klasycznej strukturze sterowania silnikiem indukcyjnym, bazującej na układzie polowo zorientowanym z falownikiem napięcia, występują kaskadowo połączone w dwóch torach cztery regulatory (najczęściej typu PI). Dobór parametrów takiej struktury (włączając w to ograniczenia) może powodować pewne komplikacje związane ze zjawiskiem wind-up'u i doбором poziomu ograniczeń. Dodatkowo wadą takiej struktury jest opóźnienie reakcji na moment obciążenia związany z koniecznością „przejścia” błędu przez kolejne stopnie kaskady. W przypadku napędu z połączeniem sprzężystym w miejsce klasycznego regulatora PI prędkości należało wprowadzić pożądany układ tłumiący drgania (np. predykcyjny). Przykład takiej struktury przedstawiono na rys. 5.1a. Powstawał wówczas układ, który pozwalał na tłumienie drgań skrętnych, jednak charakteryzował się dużą ilością parametrów do strojenia (parametry regulatora predykcyjnego i parametry pozostałych regulatorów). W pracy [1] zaproponowałem, aby połączyć predykcyjny regulator prędkości napędu z połączeniem sprzężystym ze strukturą polowo zorientowaną. Powstały układ zaprezentowany został na rys. 5.1b.

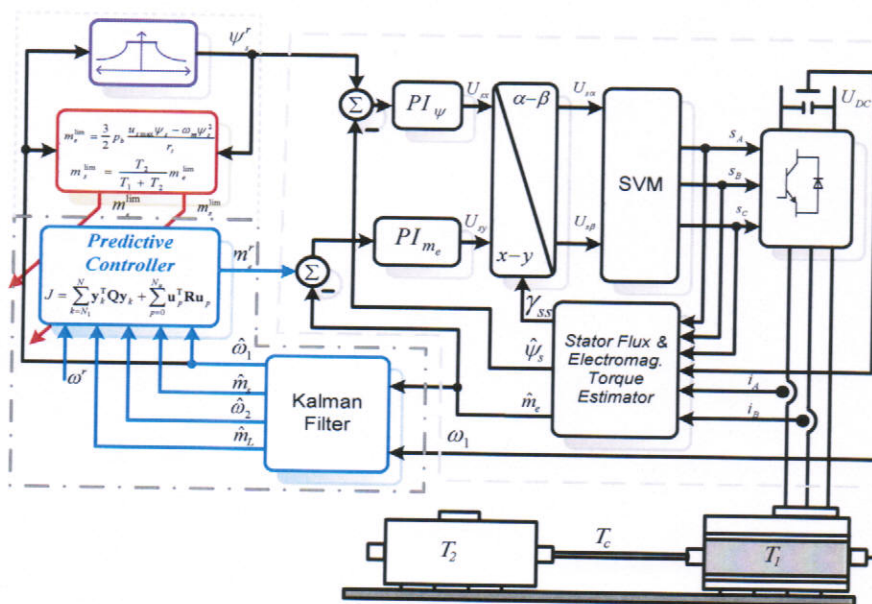


Rys. 5.1. Klasyczna struktura DFOC (a) i proponowana modyfikacja (b).

Ponieważ przy orientacji wektora prądu na strumień wirnika uzyskujemy linearyzację równań (przy założeniu pracy ze stałym strumieniem wirnika) możliwe jest wykorzystanie liniowego modelu obiektu. Uzyskano wówczas strukturę, w której nie występuje problem doboru nastaw kilku regulatorów. Dodatkowo nie ma zjawisk związanych z win-up'em regulatorów PI występujących w klasycznej strukturze. Ponieważ opracowany układ jest klasy „regulator stanu” to uzyskujemy właściwości szybkiej eliminacji wpływu momentu obciążenia. Pomimo wymienionych zalet struktura ta charakteryzuje się dużą złożonością obliczeniową. Kolejnym krokiem w projektowaniu opisywanej struktury była próba

ograniczenia jej złożoności obliczeniowej. W tym celu wykorzystano różne metody związane ze sposobem przeszukiwania obszarów obliczonego off-line regulatora. Wyniki tej redukcji przedstawiono w pracy [2]. Jak widać, wykorzystując klasyczne metody łączenia obszarów z tym samym prawem sterowania w rozpatrywanej pracy uzyskano redukcję złożoności na poziomie 45% (z 1212 obszarów do 671). Pomimo tak dużej redukcji w chwili powstania tej pracy systemy mikroprocesorowe wykorzystywane w Katedrze Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych nie były w stanie w czasie 0.1 ms obliczyć sterowania. Jednak uważam, że układ ten jest perspektywiczny do zastosowań praktycznych w przypadku zastosowania matryc programowalnych FPGA i przetwarzania równoległego.

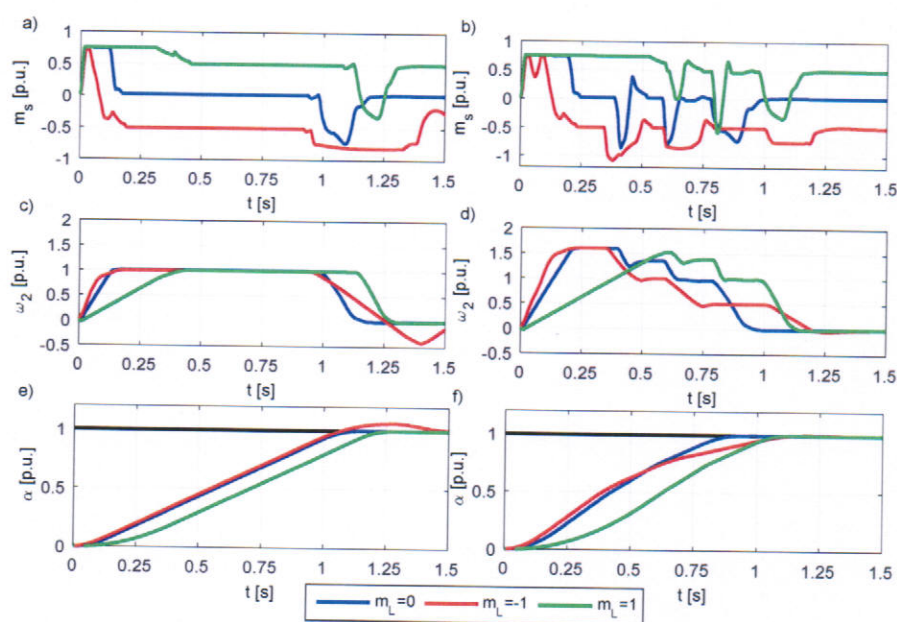
Drugim zagadnieniem jakie podjąłem w obszarze pracy napędów z silnikami indukcyjnymi i sprzężystym połączeniem był problem sterowania prędkością i położeniem wału maszyny roboczej w obszarze osłabiania pola. W przypadku wykorzystania struktur bazujących na orientacji wektora prądu na strumień stojana (np. metoda DTC-SVM) mamy do czynienia z występowaniem momentu krytycznego po przekroczeniu którego silnik „utyka”. Aby temu zapobiec należy ograniczyć moment elektromagnetyczny. Problem ten zależny jest jednak od aktualnej prędkości i odgórne ograniczenie momentu elektromagnetycznego będzie ograniczało również dynamikę. Z przytoczonych powodów opracowałem strukturę pozwalającą w czasie rzeczywistym estymować dostępny moment elektromagnetyczny i na tej podstawie przestraszać ograniczenia regulatora predykcyjnego (Rys. 5.2.) [3].



Rys. 5.2. Struktura sterowania prędkością napędu indukcyjnego z połączeniem sprzężystym i dynamicznie zmieniającymi ograniczeniami

Z wyników przedstawionych w rozpatrywanej pracy widać, że opracowana struktura działa poprawnie. W przypadku dynamicznego przestraszania ograniczeń momentu elektromagnetycznego i skrętnego możliwe jest uzyskanie pełnej dynamiki bez konieczności oddolnego jej ograniczenia, lub stosowania dodatkowych ramp.

Podobny problem, choć bardziej rozwinięty występuje w układzie pozycjonowania napędów z połączeniem sprężystym [4]. Tu podobnie jak przy prędkości zastosowano przestrajanie ograniczeń momentu elektromagnetycznego w zależności od dostępnego napięcia i aktualnej wartości zadanego strumienia stojana. Dodatkowo analizując pracę układu okazało się, że w przypadku pracy napędu pod różnym momentem obciążenia oraz przy różnej wartości ograniczenia prędkości może pojawić się przeregulowanie położenia wału maszyny roboczej. Taka sytuacja w przypadku precyzyjnego sterowania pozycją jest niedopuszczalna. W związku z tym do klasycznego regulatora pozycji wprowadziłem dodatkowy człon, bazujący na logice rozmytej, który w zależności od błędu regulacji pozycji i estymowanego momentu obciążenia wystawia zadane ograniczenie prędkości. W ten sposób proponowana struktura automatycznie dobiera poziomy wszystkich ograniczeń. Przykłady uzyskanych przebiegów przedstawiono na rys. 5.3.

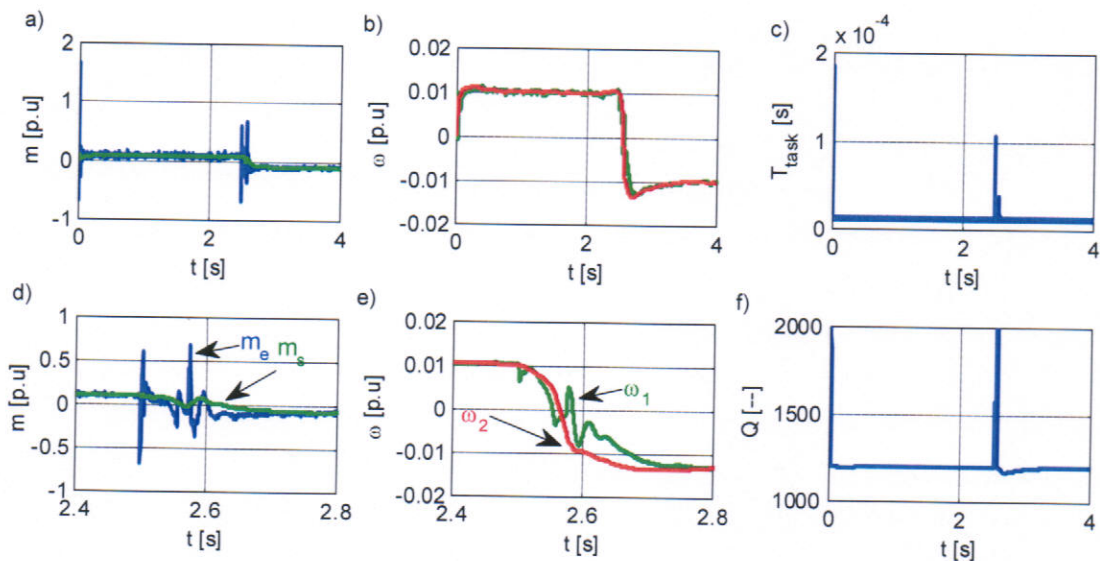


Rys. 5.3. Przebiegi w układzie bez (a,c,e) i z (b,d,f) rozmytym blokiem adaptacji dla różnych wartości momentu obciążenia: a,b) moment skrętny, c),d) prędkość obciążenia, e),f) położenie wału maszyny roboczej

Jak widać uzyskano kompensację przeregulowania przy jednoczesnym skróceniu czasu regulacji. W omawianej pracy przedstawiono również porównanie proponowanej struktury z klasyczną strukturą regulacji bazującą na kaskadowym połączeniu regulatorów PI i P. W tym przypadku również proponowany przeze mnie układ charakteryzuje się lepszymi właściwościami dynamicznymi i w przypadku bardzo małych wartości zadanych lepiej stabilizuje pozycję.

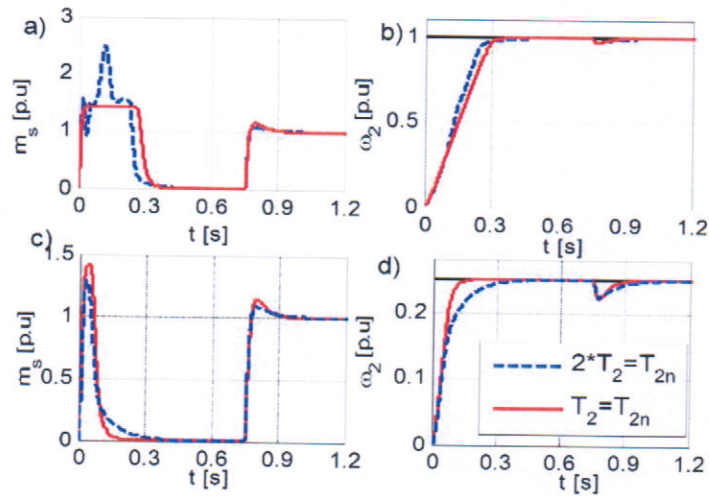
Wykorzystanie sterowania predykcyjnego z modelem w przestrzeni stanu wiąże się z koniecznością zastosowania liniowego modelu napędu. Takie podejście w wielu przypadkach jest uzasadnione, jednak gdy chcemy sterować prędkością w obszarze ultraniskim gdzie decydujące znaczenie ma nieliniowa część charakterystyki tarcia wówczas konieczne staje się poszukiwanie alternatywnych rozwiązań. Po przeanalizowaniu różnych koncepcji sterowania predykcyjnego z modelem nieliniowym, czy modelem odcinkowo liniowym doszedłem do wniosku, że zastosowanie tych rozwiązań na obecnym etapie

rozwoju układów mikroprocesorowych nie będzie mogło być zastosowane w praktyce (przy typowym kroku obliczeniowym na poziomie 1 ms). Rozwiązanie problemu sterowania napędem z połączeniem sprężystym i nieliniowym tarciem zaproponowałem w pracy [5]. Zaproponowałem aby zastosować model liniowy i dodatkowo zmieniać wartości wagowe na takie wartości aby jak najszybciej „przebić” obszar tarcia suchego. Zastosowanie tak dużych wartości wag  $Q$  przy normalnej pracy napędu powodowałoby powstawanie dużego przeregulowania i silnych oscylacji. Uzyskane wyniki pokazują, że podejście takie daje bardzo dobre rezultaty i powoduje, że napęd działa poprawnie, bez oscylacji, czy błędów ustalonych. Przykładowe wyniki eksperymentalne dla 1% prędkości znamionowej przedstawiono na rys. 5.4. Jak widać uzyskane wyniki potwierdzają skuteczność zaproponowanej metody.



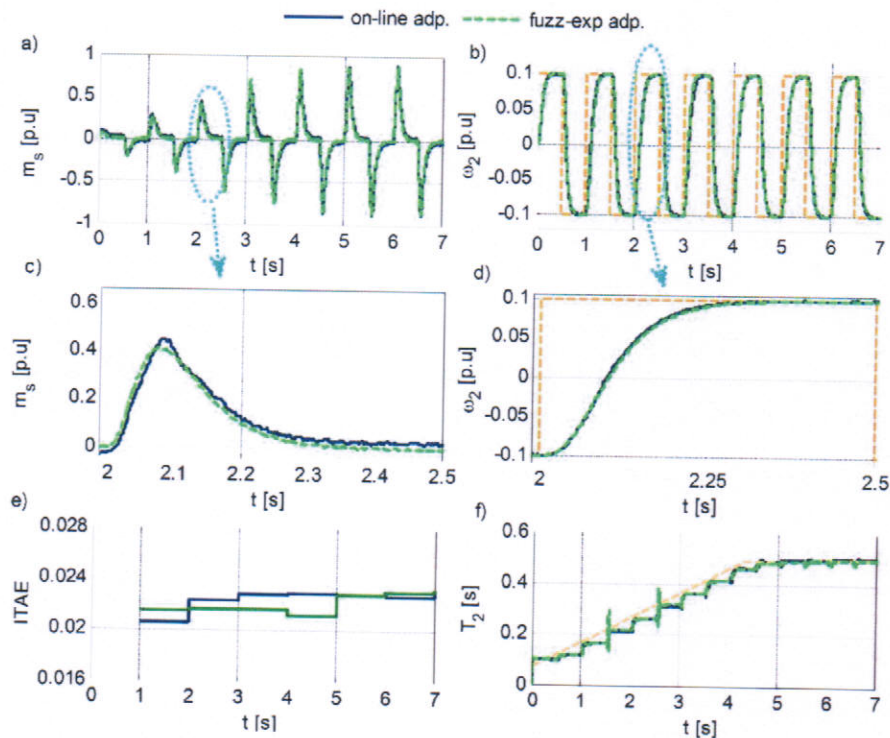
Rys. 5.4. Przebiegi eksperymentalne dla prędkości zadanej  $\omega^{\text{ref}}=0.01$ : a),d) moment elektromagnetyczny, b), e) prędkości, c) czas obliczeń regulatora, f) wartość elementów macierzy  $Q$

Podobny problem dotyczy wykorzystania sterowania predykcyjnego w napędzie o zmiennych parametrach. Na rys. 5.5. przedstawiono przebiegi prędkości i momentu skrętnego w układzie o znamionowym i zwiększonym momencie bezwładności. Pominięcie tych zmian w modelu może prowadzić do występowania w układzie dużych uderów momentu skrętnego, co może prowadzić do uszkodzenia napędu, natomiast przy pracy z mniejszymi prędkościami zadanymi prowadzi do pogorszenia dynamiki. W takim układzie jeśli zmianę parametrów możemy opisać, można wykorzystać modele zmienne w czasie, jednak jeśli w układzie zmiany parametrów nie mogą być określone analitycznie to potrzebujemy układu adaptacyjnego, który na podstawie estymowanej wartości będzie przestrajał układ [6]. W układzie takim czas potrzebny na wyznaczenie sterowania drastycznie wzrasta. Jest to związane po pierwsze z potrzebą zastosowania rozwiązania on-line, a po drugie w każdym kroku obliczeń potrzebujemy przestroić model i predyktor. W związku z tym w pracy [6] zaproponowałem układ obliczany off-line (z wykorzystaniem programowania wieloparametrycznego), w którym sterowanie obliczane jest dodatkowo z wykorzystaniem systemu rozmytego typu TSK. Uzyskuje się dzięki temu redukcję czasu obliczeń oraz zapewnia bezpieczeństwo napędu.



Rys. 5.5. Przebiegi momentu skrętnego (a,c) i prędkości obciążenia (b,d) w układzie o znamionowym i zwiększonym momencie bezwładności: a),b) dla znamionowej prędkości zadanej, c),d) małej prędkości zadanej

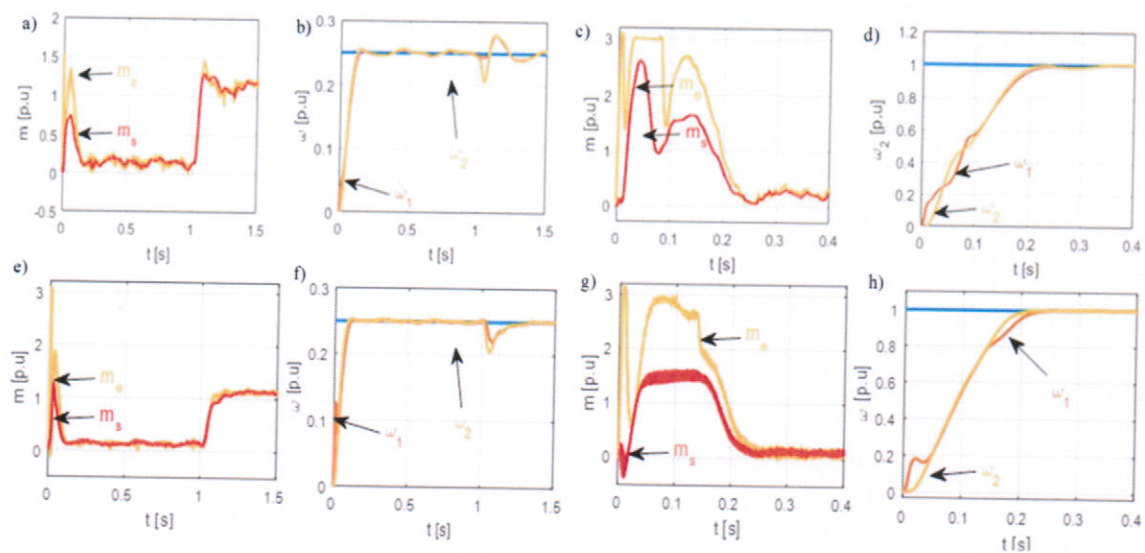
Na rys. 5.6. przedstawiono porównanie przebiegów dla regulatora obliczanego on-line z adaptacją parametru i proponowanym rozwiązaniem. Jak widać wartości zmiennych stanu pokrywają się dla obu rozwiązań, a wypadkowa wartość kryterium IAE jest praktycznie na jednakowym poziomie.



Rys. 5.6. Porównanie działania proponowanego i klasycznego algorytmu adaptacyjnego: a),c) moment skrętny, b),d) prędkość obciążenia, e) wartość wskaźnika ITAE, f) estymowana mechaniczna stała czasowa.

### Opracowanie algorytmu pozwalającego na wprowadzenie ograniczeń zmiennych stanu napędu z połączeniem sprężystym.

Problematyka ograniczenia amplitudy momentu skrętnego w układach napędowych o niskiej częstotliwości rezonansowej jest istotna ze względu na bezpieczną i długotrwałą eksploatację napędu. Z przeglądu literatury wynikało, że tylko zastosowanie sterowania predykcyjnego daje możliwość kontroli nad momentem skrętnym w praktycznej aplikacji (pewne prace z zakresu sterowania momentem skrętnym były realizowane na początku lat dziewięćdziesiątych przez prof. Gierlotkę z Politechniki Śląskiej). Skłoniło mnie to do poszukiwania innych metod sterowania, które pozwoliłyby na kontrolę momentu skrętnego. Do tego celu zaproponowałem wykorzystanie sterowania opartego na prawie Forced Dynamic Control. Metoda ta pozwala na wyprowadzenie prawa sterowania, które będzie równocześnie kompensować zera i bieguny transmitancji układu zamkniętego. Aby umożliwić kontrolę nad momentem skrętnym wprowadziłem modyfikację polegającą na wydzieleniu wewnętrznej pętli jego regulacji [7]. Uzyskałem w ten sposób strukturę, która pozwala na szybkie sterowanie momentem i prędkością napędu z połączeniem sprężystym. Kolejno aby wykazać jej właściwości porównana ona została do klasycznej struktury sterowania prędkością bazującą na metodzie FDC [8] oraz do regulatora predykcyjnego i klasycznego regulatora PI [9]. W [8] przedstawiono również wpływ dodania ograniczeń, które w teorii sterowania FDC nie występują. Uzyskane wyniki jednoznacznie pokazują, że zastosowane podejście daje bardzo dobre właściwości ograniczenia amplitudy momentu skrętnego i pozwala na zachowanie dużej dynamiki (Rys. 5.7).

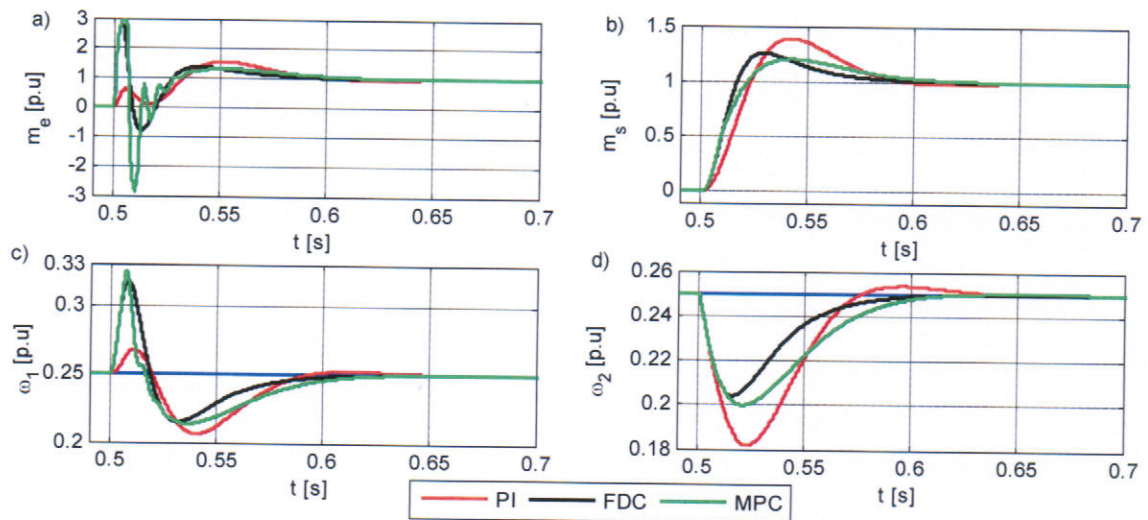


Rys. 5.7. Przebiegi momentu elektromagnetycznego i skrętnego (a,c,e,g), prędkości silnika i obciążenia (b,d,f,h) dla małej (a,b,e,f) i znamionowej prędkości zadanej (c,d,g,h), gdzie: a),b),c),d) klasyczny regulator FDC, e),f),g),h) proponowana struktura

Podobnie w przypadku porównania proponowanego algorytmu do klasycznego regulatora PI oraz regulatora predykcyjnego uzyskano bardzo dobre właściwości dynamiczne i kontrolę nad amplitudą momentu skrętnego. Dodatkowo proponowane rozwiązanie pozwala na najszybszą reakcję na przyłożony moment obciążenia (Rys. 5.8). W pracy [9] przeprowadzono również badania w szerokim zakresie zmian parametrów mechanicznych



(stałej czasowej sprężystości i mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej). Z przeprowadzonej analizy wynika, że regulator predykcyjny charakteryzuje się najlepszą odpornością na niedokładność wyznaczenia parametrów, czy ich zmian.



Rys. 5.8. Porównanie działania opisywanych struktur na przyłożenie momentu obciążenia: a) moment elektromagnetyczny, b) moment skrętny, c) prędkość silnika napędowego, d) prędkość obciążenia.

**Opracowanie estymatora, bazującego na algorytmie Moving Horizon Estimation (MHE), do estymacji zmiennych stanu napędu z połączeniem sprężystym, który będzie można zastosować w czasie rzeczywistym.**

W przypadku wykorzystania zaawansowanych metod sterowania niezbędna jest informacja o pełnym wektorze stanu rozszerzonym dodatkowo o moment obciążenia. Jakość estymacji ma kluczowe znaczenie na działanie układu regulacji. Bazując na bardzo dobrych właściwościach regulatora z ruchomym oknem (regulator predykcyjny) postanowiłem zająć się zastosowaniem estymatorów z ruchomym oknem. W tej metodzie estymacji wykorzystuje się nie tylko aktualny pomiar, ale również próbki historyczne zawierające się w oknie o znanej długości. W ten sposób uzyskuje się minimalizację wpływu zakłóceń o rozkładzie niestandardowym. Technika ta została zaproponowana na początku lat 90 i pierwotnie stosowana była do obiektów o silnie nieliniowej charakterystyce bądź w przypadku trudności z wyznaczeniem pełnego modelu obiektu. Jej główną wadą jest duża złożoność obliczeniowa, co powodowało, że w obszarze napędu elektrycznego pierwsze prace opisujące jej zastosowanie zaczęły się pojawiać na początku lat dwutysięcznych. Jednak do estymacji zmiennych stanu napędu z połączeniem sprężystym nie była wykorzystywana. Pierwszą taką aplikację stanowiła praca [10] i [11]. W pracach tych opisałem koncepcję wykorzystania tej metody w napędzie z połączeniem sprężystym oraz przedstawiłem wyniki symulacyjne [10] i wstępne wyniki bazujące na próbkach eksperymentalnych [11]. Z zaprezentowanych rezultatów widać możliwość zastosowania estymatora z ruchomym oknem do wyznaczenia wartości zmiennych stanu napędu z

połączeniem sprzężystym. W rozpatrywanych pracach zastosowano liniowe podejście, które można przedstawić jako minimalizację funkcji celu postaci:

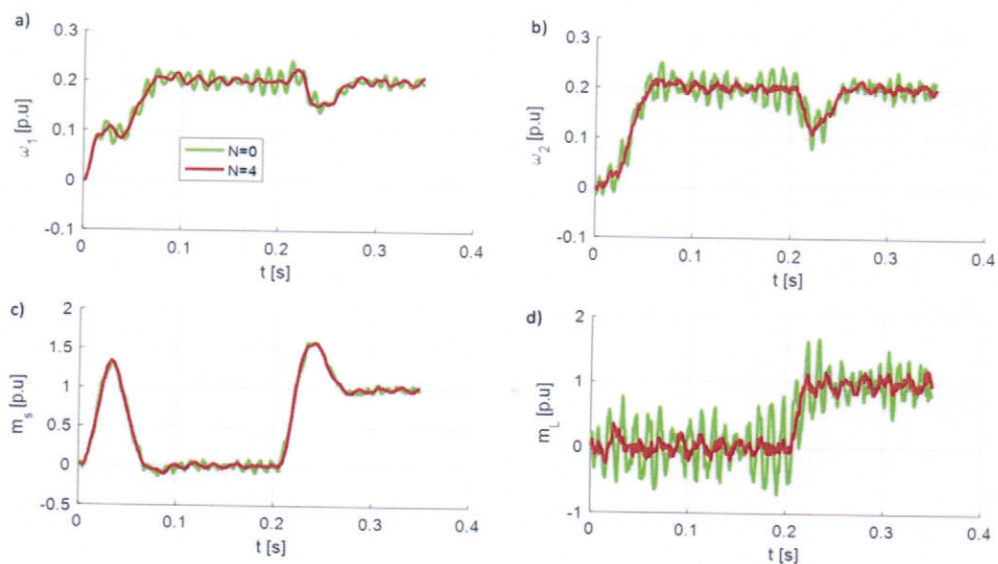
$$\min J(\hat{\mathbf{x}}_{t-N,t}, \bar{\mathbf{x}}_{t-N,t}, \mathbf{I}_t) = \|\mathbf{W}(\mathbf{y}_{t-N,t} - \hat{\mathbf{y}}_{t-N,t})\| + \alpha \|\hat{\mathbf{x}}_{t-N,t} - \bar{\mathbf{x}}_{t-N,t}\|$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{i+1,t} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{i,t} + \mathbf{B}\mathbf{u}_i + \mathbf{L}(\mathbf{y}_{i,t} - \hat{\mathbf{y}}_{i,t}), \quad i = t-N, \dots, t-1$$

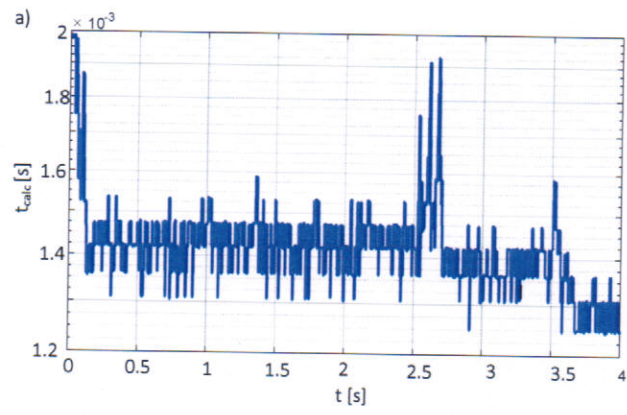
$$\mathbf{y}_{i,t} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_{i,t}, \quad i = t-N, \dots, t$$

Ponieważ minimalizowana funkcja celu zapisana jest w oknie czasowym, uzyskuje się bieżącą adaptację do danych pomiarowych oraz redukcję wpływu zakłóceń. W pracy [12] przedstawiono wyniki wpływu długości okna na jakość estymacji oraz wyniki eksperymentalne. Na rys. 5.9. przedstawiono wpływ wykorzystania okna na jakość estymacji zmiennych stanu w układzie z regulatorem stanu (sprzężenia zwrotne od obserwatora). Z prezentowanych wyników widać, że wydłużenie okna czasowego znacząco wpływa na redukcję szumów pomiarowych i pozwala na poprawną pracę struktury zamkniętej.

W związku z faktem, że podczas wyznaczania estymaty należy zminimalizować funkcję celu  $J$  estymator potrzebuje znacznie dłuższego czasu. Przy wykorzystaniu algorytmu Hooke & Jeeves'a, oraz implementacji całego algorytmu na karcie DS1103, czas potrzebny na wyznaczenie wektora stanu oscyluje w granicach 1.3 do 2 ms. Przykładowy przebieg czasu obliczeń estymatora przedstawiono na rys. 5.10. Napęd pracował w cyklu:  $t=0$  s rozruch,  $t=0.5$  s przyłożenie znamionowego momentu obciążenia na czas 0.75 s, w czasie  $t=2$  s nawrót. W związku z powyższym problematyka związana z zastosowanym algorytmem minimalizacji funkcji celu jest kluczowa do poprawnej pracy estymatora i dalsze prace będą się na tym skupiały.



Rys. 5.9. Przebiegi zmiennych stanu w układzie zamkniętym z estymatorem MHE przy różnej długości okna czasowego: a) prędkość silnika napędowego, b) prędkość obciążenia, c) moment skrętny, d) moment obciążenia



Rys. 5.10. Przebieg czasu obliczeń estymatora MHE

## Podsumowanie

Celem prowadzonych przez habilitanta badań było opracowanie i przebadanie metod pozwalających na efektywne sterowanie zmiennymi stanu napędu z połączeniem sprężystym. Opracowano dwie grupy metod: pierwsza grupa pozwala na wykorzystanie sterowania predykcyjnego z liniowym modelem i optymalizacją w układzie napędowym o właściwościach nieliniowych lub o zmiennych parametrach, druga grupa pozwalała na wprowadzenie ograniczeń wewnętrznych zmiennych stanu napędu. Ponieważ wszystkie zaawansowane metody sterowania napędem z połączeniem sprężystym wymagają pełnej informacji o wektorze stanu napędu, opracowano estymator bazujący na algorytmie Moving Horizon Estimation (MHE), który został uruchomiony w czasie rzeczywistym.

W obszarze opracowania metod pozwalających na wykorzystanie sterowania predykcyjnego z liniowym modelem i optymalizacją w układach napędowych o właściwościach nieliniowych lub o zmiennych parametrach do najważniejszych osiągnięć habilitant zalicza wymienione poniżej rezultaty badań:

- Opracowanie struktur pozwalających na sterowanie prędkością napędu indukcyjnego bez struktury kaskadowej w układzie polowo-zorientowanym. Opracowana metoda pozwala na ograniczenie amplitudy prądu stojana i bezpośrednie sterowanie prędkością napędu indukcyjnego z połączeniem sprężystym [1]. Zaproponowane przeze mnie rozwiązanie cechuje się uproszczeniem struktury (jeden regulator zamiast czterech). Pozwala również na efektywne wprowadzanie ograniczeń bez konieczności wykorzystywania struktury kaskadowej.
- Opracowanie predykcyjnego regulatora prędkości napędu indukcyjnego pozwalającego na pracę w obszarze stałego momentu i mocy. Opracowana przeze mnie struktura współpracuje z podrzędnym układem DTC-SVM i pozwala na uwzględnienie dostępnego napięcia oraz momentu krytycznego przy pracy w obszarze prędkości nadsynchronicznych [3].
- Opracowanie struktury sterowania pozycją indukcyjnego napędu z połączeniem sprężystym, który pracować może w obszarze stałego momentu i mocy. Opracowany układ pozwala na kompensację wpływu momentu obciążenia oraz wpływu pracy w obszarze stałej mocy, przez co uzyskuje się zapewnienie braku przeregulowania na regulowanej zmiennej stanu (pozycja wału maszyny roboczej) [4].
- Zaproponowanie autorskiej metody strojenia predykcyjnego regulatora prędkości napędu dwumasowego pozwalającego na pracę w obszarze nieliniowego tarcia. Zaproponowana przeze mnie metoda pozwala na efektywne sterowanie ultra-niską prędkością napędu z połączeniem sprężystym (poniżej 1% prędkości znamionowej), jak również dla prędkości znamionowych [5].
- Zaproponowanie metody rozmytego łączenia obszarów predykcyjnego regulatora obliczanego off-line dla napędu o zmiennych parametrach. Zaproponowana metoda pozwala na znaczącą redukcję złożoności obliczeniowej algorytmu predykcyjnego przy praktycznie bezstratnej jakości sterowania względem algorytmu obliczanego on-line z adaptacją modelu [6].

W obszarze opracowania algorytmów pozwalających na wprowadzenie ograniczeń zmiennych stanu napędu z połączeniem sprzężystym do najważniejszych osiągnięć można zaliczyć:

- Opracowałem efektywną i prostą obliczeniowo metodę sterowania napędem z połączeniem sprzężystym pozwalającą na wprowadzenie ograniczenia amplitudy momentu skrętnego. Metoda ta bazuje na sterowaniu z wymuszeniem dynamiki (Forced Dynamic Control) [7],[9].
- Wykonałem krytyczną analizę porównawczą opracowanego układu sterowania z algorytmem predykcyjnym oraz z regulatorem PI z dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi. Przeprowadziłem wszechstronne badania symulacyjne oraz eksperymentalne, z których wynika, że proponowany algorytm posiada bardzo dobre właściwości. Wyniki tych prac przedstawiono w [8].
- Przeprowadziłem krytyczną ocenę porównawczą opracowanej struktury z klasycznym regulatorem bazującym na prawie FDC. Z przeprowadzonych badań wynika, że w przypadku uwzględnienia ograniczenia momentu elektromagnetycznego oraz skończonej jakości estymacji pochodnych momentu obciążenia (pełna struktura FDC wymaga informacji o momencie obciążenia i jego dwóch pochodnych) proponowana struktura ma lepsze właściwości dynamiczne [9].

W obszarze opracowania estymatora bazującego na algorytmie Moving Horizon Estimation (MHE) do estymacji wektora stanu oraz momentu obciążenia napędu z połączeniem sprzężystym, który będzie można zastosować w czasie rzeczywistym do najważniejszych osiągnięć można zaliczyć:

- Opracowałem koncepcję wykorzystania estymatorów z ruchomym oknem w napędzie elektrycznym z połączeniem sprzężystym. Przeprowadziłem testy wpływu jego poszczególnych parametrów na jakość pracy [10] – [12].
- Przeprowadziłem weryfikację eksperymentalną obserwatora z ruchomym oknem. Opracowany układ pozwala na redukcję wpływu szumu pomiarowego [12].
- Przeprowadziłem analizę odpornościową obserwatora MHE układu dwumasowego przy zmianach wybranych parametrów mechanicznych napędu i współczynników skalujących obserwatora [12].

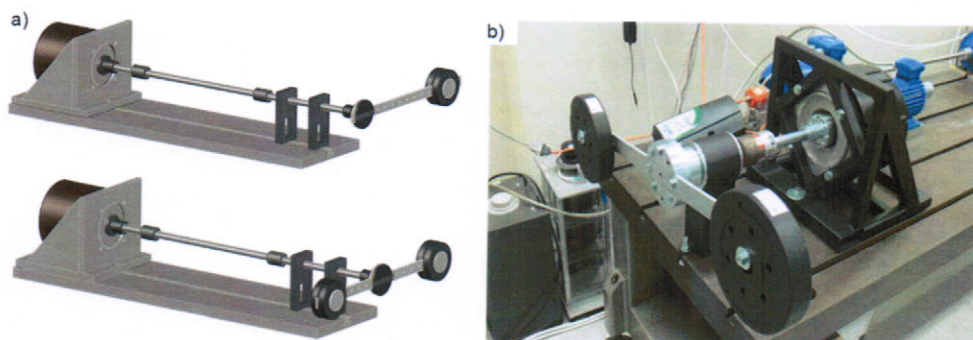
Obecnie prowadzone są dalsze prace związane z zastosowaniem obserwatorów typu MHE w napędzie elektrycznym z połączeniem sprzężystym. Również prowadzone są prace związane z różnymi metodami sterowania napędami elektrycznymi przy zmiennym momencie obciążenia, szczególnie z uwzględnieniem jego wpływu przy pozycjonowaniu napędu. Rozwijane są również metody sterowania i estymacji odporne na uszkodzenia wybranych elementów napędu (czujniki, elementy mechaniczne i wykonawcze).

## 6. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Równoległe do prowadzonych prac wchodzących do cyklu publikacji habilitant prowadził inne badania, które zostaną krótko scharakteryzowane poniżej.

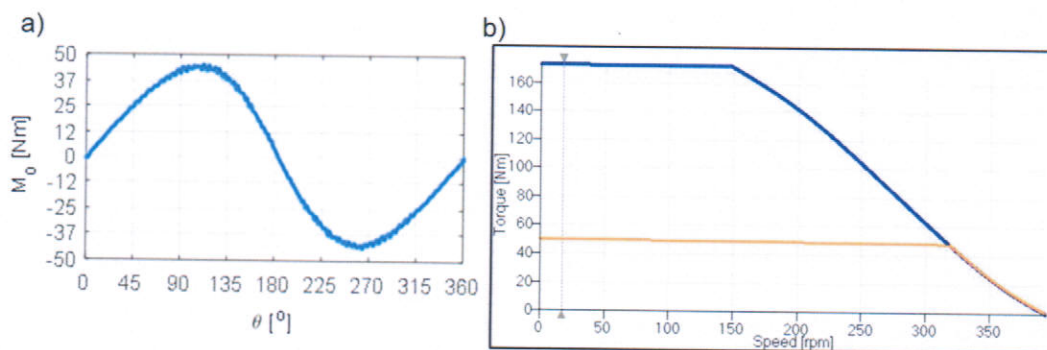
### 6.1. Opracowanie konstrukcji stanowiska z momentowym silnikiem PMSM.

Poglądowy rysunek części mechanicznej przedstawiono na rys. 1 [D1]. Konstrukcja części obciążającej pozwala na zmianę momentu bezwładności poprzez dołożenie dodatkowych obciążników oraz poprzez zmianę długości ramienia, co przekłada się również na zmianę momentu obciążenia. W przypadku niesymetrycznego obciążenia, gdy ramię będzie ustawione równoległe do powierzchni ziemi, silnik napędowy będzie obciążony znamionowym momentem mechanicznym (48 Nm). Niesymetryczne obciążenie będzie mogło być wykorzystane do testowania algorytmów pozycjonowania. Aby umożliwić testowanie algorytmów sterowania prędkością będzie można wykorzystać obciążenie symetryczne (rys. 6.1b.). Przy takim obciążeniu można również wpływać na moment bezwładności poprzez dodanie lub zabranie dodatkowych mas w zakresie od  $J = 0,13 \text{ kgm}^2$  do  $J = 3,6 \text{ kgm}^2$ . Konstrukcja stanowiska umożliwi wymianę wałów napędowych o różnej średnicy. W modelu bazowym przyjęto, że wszystkie wały mają tę samą średnicę (25 mm).



Rys. 6.1. Widok stanowiska badawczego: a) model z niesymetrycznym i symetrycznym ramieniem, b) widok gotowego stanowiska z krótkim wałem.

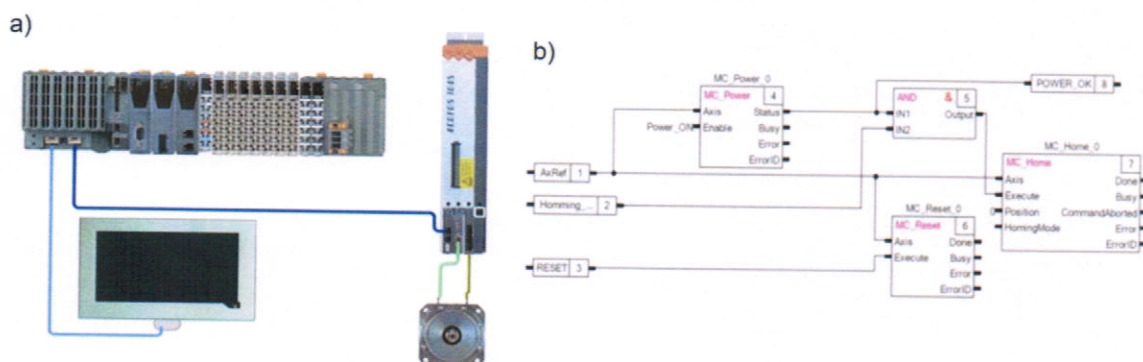
Na rys. 6.2a przedstawiono pomiar momentu obciążenia na wale silnika przy niesymetrycznym obciążeniu. W układzie zastosowano silnik momentowy typu 8TLA93 firmy B&R. Silnik ten rozwija prędkość znamionową 31,4 rad/s i charakteryzuje się znamionowym momentem obrotowym na poziomie 48Nm. Dodatkowo moment startowy przekracza 170 Nm i może być utrzymany do około połowy (15,4 obr/min) prędkości znamionowej. Charakterystykę mechaniczną przedstawiono na rys.6.2b



Rys. 6.2. Charakterystyka momentu obciążenia w funkcji kąta obrotu wału (a), oraz charakterystyka mechaniczna silnika napędowego (b).

Powyższe parametry zapewniają bardzo dużą dynamikę całej konstrukcji. Do sterowania pracą układu wykorzystano połączenie serwofalownika (*ACOPOS*), który za pomocą Ethernetu przemysłowego (*POWERLINK*) komunikuje się ze sterownikiem PLC. Rozpatrywaną strukturę przedstawiono na rys. 6.3.a. Sieć *POWERLINK* pozwala na komunikację sterownika z falownikiem z czasem cyklu do 0.4 ms. W prezentowanym rozwiązaniu, z racji dużej ilości przesyłanych danych czas cyklu został wydłużony do 0.8 ms.

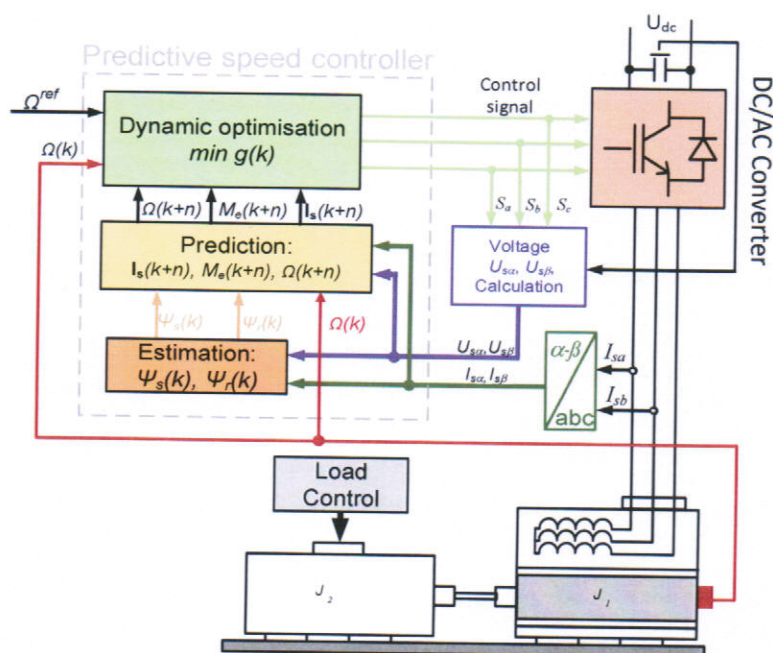
Program sterujący podzielony został na trzy części. Pierwsza zawiera podstawowe bloki związane z obsługą serwonapędów i bazuje na bibliotece Motion Control. Zastosowano tu takie bloki jak sterowanie jednostką mocy, pomiary: momentu prędkości i pozycji, obsługa błędów i sterowanie momentem napędu. Druga część związana jest z szybkim prototypowaniem układów regulacji. Bazuje ona na wykorzystaniu toolbox'u: *Automation Target for Simulink*. Toolbox ten pozwala na automatyczne generowanie kodu z simulinka i implementację go w Automation Studio (narzędzie do programowania sterowników *X20* firmy *B&R*). Takie połączenie pozwala na prowadzenie wszechstronnych badań nad różnymi algorytmami sterowania. Trzecia część umieszczona jest w tasku o najniższym priorytecie i odpowiada za obsługę wizualizacji. Wizualizacja pozwala na podgląd chwilowych wartości zmiennych stanu napędu (moment, prędkość, położenie), oraz załączenie układu, obsługę trybu i parametrów zadanych. Na rys. 6.3b. przedstawiono fragment programu odpowiedzialny za sterowanie jednostką mocy, procedurę startową (*Homming*) i reset błędów.



Rys. 6.3.b. Struktura układu sterowania opracowanym stanowiskiem.

### 6.2. Sterowanie napędem elektrycznym z silnikiem indukcyjnym bazujące na algorytmie predykcyjnym ze skończonym zbiorem rozwiązań.

W związku z prowadzonymi pracami nad wykorzystaniem sterowania predykcyjnego do sterowania napędem z silnikiem indukcyjnym wraz z doktorantem, którego byłem promotorem pomocniczym, zająłem się tematyką sterowania predykcyjnego układów przekształtnikowych bazujących na modelu ze skończoną ilością stanów (Finiteset model predictive control). W ramach prac zaproponowałem wykorzystanie tego rodzaju sterowania do bezpośredniej regulacji prędkości silnika indukcyjnego [D2]. W rozwiązaniu tym na podstawie bezpośredniej predykcji zmian prędkości silnika dokonuje się odpowiedniego przełączenia kluczy przekształtnika. Na rys. 6.4. przedstawiono strukturę sterowania. Struktura ta posiada bardzo dobre właściwości dynamiczne, szczególnie w przypadku reakcji na przyłożony moment obciążenia.

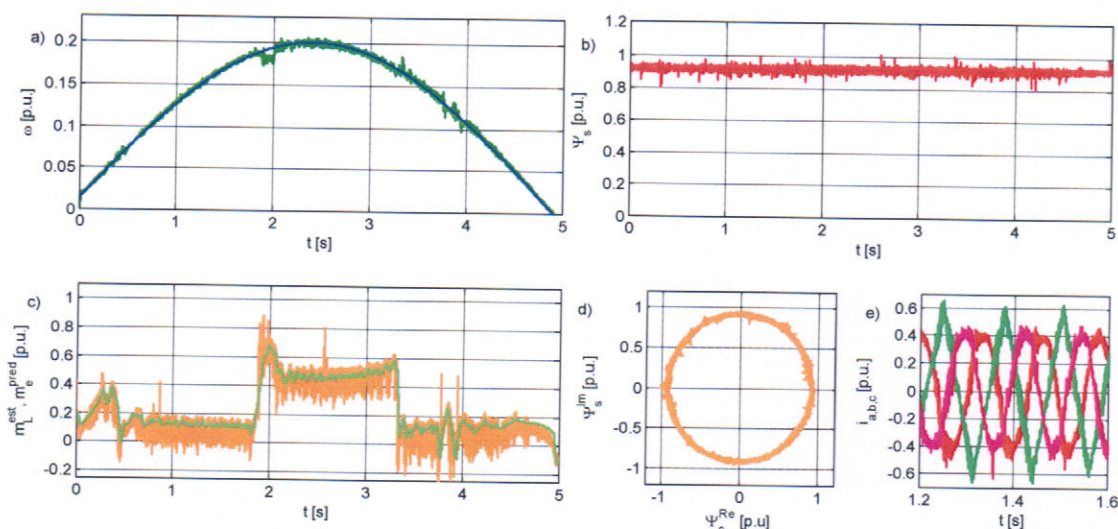


Rys. 6.4. Struktura sterowania z predykcyjnym regulatorem prędkości silnika indukcyjnego o skończonym zbiorze rozwiązań.

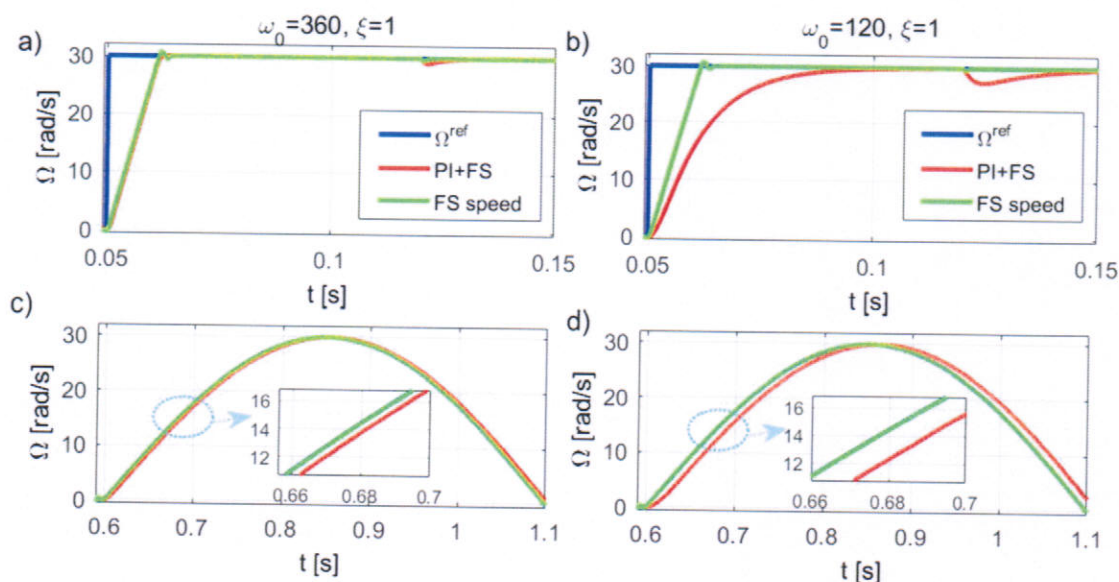
Rys. 6.5. przedstawia przykładowe przebiegi w badaniach eksperymentalnych. Prędkość zadana zmieniała się sinusoidalnie z zadaną amplitudą 30 rad/s. Jak widać prędkość jest wiernie śledzona, a uchyb związany z przyłożonym momentem obciążenia jest szybko niwelowany. Również strumień stojana jest dobrze stabilizowany. Zaproponowana struktura była rozwijana przez doktoranta. Przeprowadzono również porównanie pracy klasycznej struktury kaskadowej z podrzędnym predykcyjnym regulatorem momentu bazującym na algorytmie Finiteset MPC i nadrzędnym regulatorem PI (struktura najczęściej występująca w literaturze) oraz proponowanym bezpośrednim algorytmie Finiteset Speed MPC. Wyniki zostały przedstawione na rys. 6.6. Regulator PI nastrojono zgodnie z kryterium rozłożenia biegunów. Oba układy miały identyczne ograniczenia. Do rozważań przyjęto pulsację odniesienia  $\omega_0 = 120$  rad/s i taką aby dynamiki obu układów się pokryły ( $\omega_0 = 360$  rad/s). Z zaprezentowanych wyników widać, że regulator bezkaskadowy znacznie szybciej reaguje na przyłożony moment obciążenia dla obu rozpatrywanych pulsacji odniesienia (rys. 6.6



a,b). Podobnie w przypadku sygnału zmiennego proponowana struktura śledzi sygnał zadany bez opóźnień (rys. 6.6. c,d).



Rys. 6.5. Przebiegi: a) prędkości, b),d) strumienia stojana, c) momentów, e) prądów fazowych w układzie z predycyjnym regulatorem prędkości bazującym o skończonym zbiorze rozwiązań

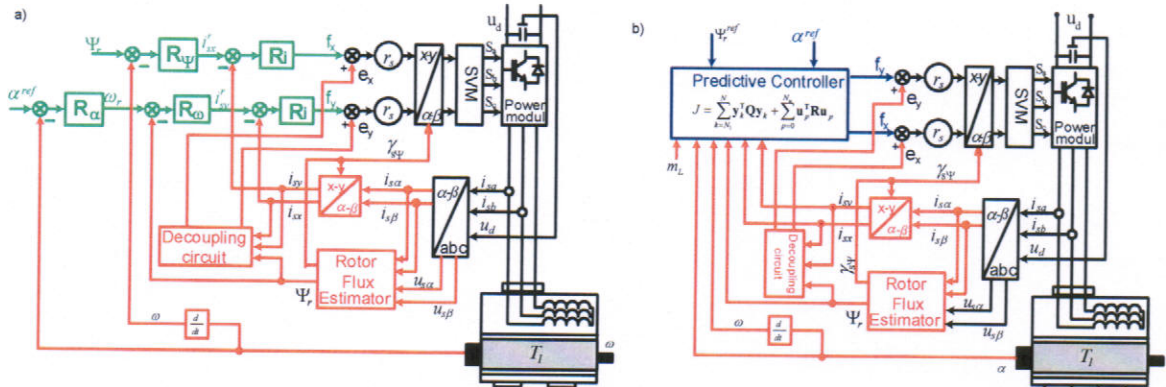


Rys. 6.6. Porównanie działania regulatora bezkaskadowego ze skończonym z biorem rozwiązań i układu kaskadowego przy różnych wartościach pulsacji odniesienia:  $\omega_0=360$  rad/s (a,c), oraz  $\omega_0=120$  rad/s (b,d) dla: a),b) skokowej wartości zadanej, c),d) sinusoidalnej wartości zadanej

### 6.3. Opracowanie predycyjnego regulatora prędkości/pozycji z długim horyzontem predykcji wyjść dla napędu z silnikiem indukcyjnym (sterowanie prędkością i położeniem)

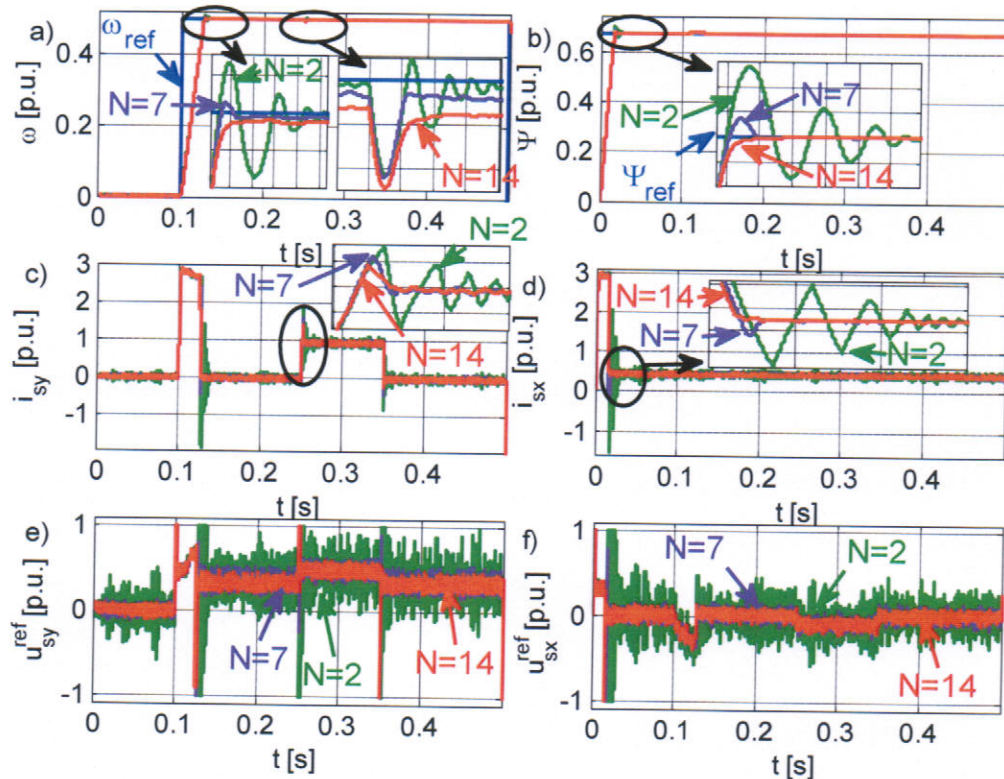
Podczas realizacji projektu NCN zaproponowano układ bezkaskadowego regulatora prędkości napędu z silnikiem indukcyjnym, w którym wykorzystano model połowo zorientowany silnika indukcyjnego. Uzyskane wyniki dla regulatora prędkości przedstawiono w pracach [D3], [D4], natomiast dla regulatora pozycji w pracy [5]. Zaproponowana metoda pozwala na zastąpienie czterech regulatorów (dla prędkości) i

pięciu (dla pozycji) typu PI jednym regulatorem predykcijnym. Na rys. 6.7a przedstawiono porównanie klasycznej struktury pozycjonowania napędu indukcyjnego, natomiast na rys. 6.7b przedstawiono proponowaną strukturę.



Rys. 6.7. klasyczna struktura FOC pozycjonowania napędu indukcyjnego (a), proponowana struktura predykcyjna (b)

Na rys. 6.8. przedstawiono przykładowe wyniki wpływu horyzontu predykcji wyjść na jakość pracy regulatora prędkości. Jak widać zwiększenie tego parametru wpływa pozytywnie na jakość pracy regulatora.



Rys. 6.8. Wpływ długości horyzontu predykcji wyjść na przebiegi: a),b) prędkości, c) składowej y prądu stojana, d) składowej x prądu stojana, e) składowej y napięcia stojana, f) składowej x napięcia stojana

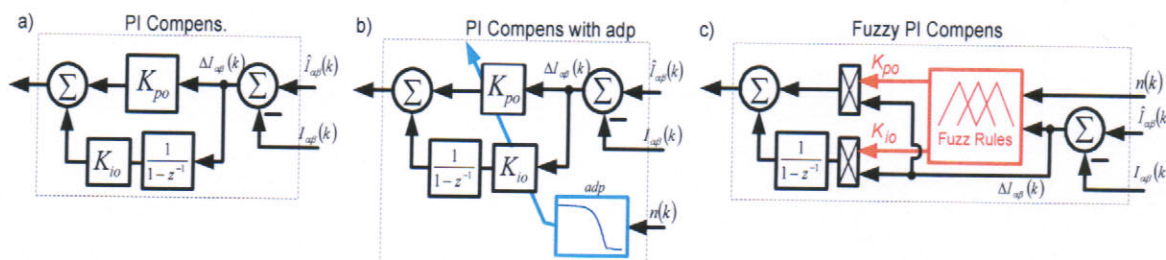
#### 6.4. Zagadnienia redukcji złożoności regulatorów predykcyjnych w napędzie elektrycznym

Ponieważ rozpatrywane układy predykcyjne charakteryzują się dużą złożonością obliczeniową, jednym z zagadnień jakich się podjąłem była ocena różnych metody redukcji złożoności predykcyjnych algorytmów. Metody te są stosowane dla regulatorów obliczanych off-line i dzielą się na dwie grupy. Pierwsza dotyczy stworzenia specjalnych drzew przeszukiwania zbiorów rozwiązań, a druga pozwala na łączenie obszarów (w przestrzeni stanu) o tym samym prawie sterowania. Metody te rozważano dla redukcji złożoności regulatora predykcyjnego dla napędu jednomasowego z silnikiem indukcyjnym [D6],[D7],[D8]. Rozważono metody bezstratne tzn. podczas redukcji obszarów wartość minimalizowanej funkcji celu nie ulega zmianie. Do grupy tej należą: łączenie obszarów o tym samym prawie sterowania, drzewo binarnego przeszukiwania obszarów i połączenie obu tych metod. Z prezentowanych prac wynika, że stosowanie tych metod jest wskazane, bo powoduje zmniejszenie złożoności obliczeniowej regulatora obliczanego w czasie rzeczywistym.

#### 6.5. Zagadnienia odtwarzania zmiennych stanu w napędzie z silnikiem PMSM

W ramach realizacji wstępnych prac we współpracy z ABB Polska powstał temat nieliniowego predykcyjnego obserwatora prądów silnika z magnesami trwałymi. Wyniki tych prac przedstawiono w pracy [D9]. Opracowałem predykcyjny obserwator prądów stojana z adaptacją mechanizmu korekcji od mierzonego prądu. Proponowane rozwiązania kompensatorów przedstawiono na rys. 6.9.

Pierwsze rozwiązanie (6.9 a) zakłada klasyczny liniowy kompensator typu PI, drugie (6.9 b) uwzględnia przestrajanie zmiennych stanu w zależności od aktualnej prędkości, natomiast trzecie (6.9 c) wykorzystuje rozmytą bazę reguł związaną z prędkością silnika i aktualnym prądem.



Rys. 6.6. Proponowane rozwiązania kompensatorów w układzie obserwatora: a) podstawowy kompensator PI, b) kompensator PI z adaptacją wzmocnień, c) rozmyty kompensator PI.

Wykorzystanie nieliniowych funkcji zmian współczynników wzmocnień pozwala na zwiększenie dokładności śledzenia predykowanego prądu w porównaniu do klasycznej struktury. W związku z zakończeniem współpracy z ABB, projekt ten został wstrzymany i czeka na praktyczną weryfikację wyników.

#### 6.6. Wykaz opublikowanych prac naukowych dotyczących pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych omówionych w punkcie 6

[D1] **Piotr J. Serkies:** Stanowisko laboratoryjne do badania napędów z silnikiem momentowym i złożoną strukturą mechaniczną. W: Konferencja Naukowa WD 2016: Lubelskie Dni Nauki i

- Biznesu : New Technologies & Their Applications. Innovation Strategy, Lublin, 11-13 czerwca 2016. Lublin : Wyższa Szkoła Przedsiębiorczości i Administracji, cop. 2016. s. 177-178, SBN: 978-83-60617-45-8
- [D2] **Krzysztof Szabat, Piotr J. Serkies, Karol Wróbel**: Finite set model predictive speed control of induction motor. 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe): September 11-14, 2017, Warsaw, Poland: IEEE, 2017. s. 1-6. ISBN: 978-90-75815-26-9; 978-90-75815-27-6  
<https://doi.org/10.23919/EPE17ECCEEurope.2017.8099404>
- [D3] **Piotr J. Serkies, Karol Wróbel, Krzysztof Szabat**: Application of the long horizon model predictive control to an induction motor drive. W: 17th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics, EDPE 2013: 6th joint Croatian-Slovak Conference, October 2-4, 2013, Dubrovnik, Croatia 2013: s. 172-177, ISBN: 978-953-56937-8-9, ISSN 1339-3944.
- [D4] **Karol Wróbel, Krzysztof Szabat, Piotr J. Serkies**, Long horizon Model Predictive Control of induction motor drive, Archives Of Electrical Engineering, przyjęte do druku
- [D5] **Karol Wróbel, Piotr J. Serkies**: Predykcyjny regulator położenia wału w napędzie z silnikiem indukcyjnym. Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering. 2015, nr 83, s. 169-176: 1897-0737. Conference on Computer Application in Electrical Engineering, Poznan, April 20-21, 2015. Computer Applications in Electrical Engineering 2015.  
[http://www.iee.put.poznan.pl/wydawnictwa/wydawnictwaFiles//2015/15\\_Academic%20Journals%20Poznan%20University%20of%20Technology\\_83/!169\\_19\\_Wr%c3%b3bel.pdf](http://www.iee.put.poznan.pl/wydawnictwa/wydawnictwaFiles//2015/15_Academic%20Journals%20Poznan%20University%20of%20Technology_83/!169_19_Wr%c3%b3bel.pdf)
- [D6] **Karol Wróbel, Piotr J. Serkies**: Metody ograniczania złożoności obliczeniowej regulatorów predykcyjnych w napędach z silnikami indukcyjnymi. Przegląd Elektrotechniczny. 2015, R. 91, nr 2, s. 187-191, ISSN: 0033-2097  
<http://dx.doi.org/10.15199/48.2015.02.42>
- [D7] **Karol Wróbel, Piotr J. Serkies**: Ograniczenie złożoności obliczeniowej predykcyjnego regulatora położenia wału w napędzie z silnikiem indukcyjnym. Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering. 2015, nr 83, s. 177-185, ISSN: 1897-0737  
[http://www.iee.put.poznan.pl/wydawnictwa/wydawnictwaFiles//2015/15\\_Academic%20Journals%20Poznan%20University%20of%20Technology\\_83/!177\\_20\\_Wr%c3%b3bel.pdf](http://www.iee.put.poznan.pl/wydawnictwa/wydawnictwaFiles//2015/15_Academic%20Journals%20Poznan%20University%20of%20Technology_83/!177_20_Wr%c3%b3bel.pdf)
- [D8] **Karol Wróbel, Piotr J. Serkies, Krzysztof Szabat**: Methods of reducing the computational complexity of predictive controller with induction motors W: 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 9-12 June 2015, Sydney, Australia. 2015. s. 1060-1063, ISBN: 978-1-4799-4403-3  
<http://dx.doi.org/10.1109/PEDS.2015.7203556>
- [D9] **Radosław Nalepa, Piotr J. Serkies, Krzysztof M. Drózd, Krzysztof Szabat**: Nieliniowy predykcyjny obserwator prądów dla silników elektrycznych z magnesami trwałymi. Przegląd Elektrotechniczny. 2013, R. 89, nr 9, s. 263-266, ISSN: 0033-2097  
Lokalizacja elektroniczna: [http://pe.org.pl/abstract\\_pl.php?nid=7940](http://pe.org.pl/abstract_pl.php?nid=7940)

## 7. Podsumowanie

Aktywność naukowa obejmuje oprócz badań również działania popularyzujące naukę oraz dotyczące dydaktyki. Poniżej zestawiono najważniejsze efekty podejmowanych działań.

- Artykuły opublikowane w czasopismach z bazy JCR: **7** (3 prace przyjęte do druku).
- Publikacje w recenzowanych krajowych i zagranicznych czasopismach spoza listy JCR: **17**
- Opublikowane rozdziały w monografiach anglojęzycznych: **2**
- Opublikowane/ wygłoszone referaty na konferencjach krajowych i międzynarodowych: **13/8**
- Sumaryczny Impact Factor zgodnie z rokiem opublikowania: **13,34**
- Suma punktów MNiSW przyznanych za publikacje po uzyskaniu stopnia doktora (zgodnie z rokiem wydania): **482**
- Liczba cytowań bez autocytowań według Web of Science Core Collection: **72**
- Index Hirsza według bazy Web of Science Core Collection: **3**
- Suma cytowań według bazy Scopus bez autocytowań: **77**
- H index według bazy Scopus: **5**
- Suma cytowań według bazy Google scholar bez autocytowań: **124**
- H index według bazy Publish or Perish: **8**
- Kierowanie krajowymi projektami badawczymi lub udział w takich projektach: **4**
- Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową: **7**
- Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych: **3**
- Aktywny udział w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych: **2** oraz recenzowanie referatów: **8**
- Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism: **1**
- Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych: **1**
- Osiągnięcia w zakresie popularyzacji nauki: **4** (wydziałowy koordynator ds. Dolnośląskiego Festiwalu Nauki, prowadzenie zajęć z uczniami w ramach Wydziałowych Dni Młodego Elektryka)
- Opieka naukowa nad studentami i lekarzami w toku specjalizacji: **44** projekty i prace inżynierskie oraz magisterskie na pięciu kierunkach studiów
- Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze promotora pomocniczego: **1** (przewód zakończony nadaniem stopnia w 2017 roku)
- Udział w zespołach eksperckich i konkursowych: **6**
- Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych: **26**.



Podpis Wnioskodawcy