Toruń, 04.06.2018 r.

Dr inż. Tomasz Tarczewski
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Katedra Automatyki i Systemów Pomiarowych
Ul. Grudziądzka 5
87-100 Toruń

Załącznik nr 2A

do wniosku z dnia 04.06.2018 r.

o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

w dziedzinie Nauk Technicznych w dyscyplinie Automatyka i Robotyka

Autoreferat w języku polskim przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych

Tomasz Tarczewski

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko

Tomasz Tarczewski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

- **Stopień doktora nauk technicznych** w dyscyplinie Automatyka i Robotyka, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, tytuł rozprawy: *„Sterowanie serwonapędu z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych ze sprzężeniem od stanu i estymowanego momentu oporowego"*, promotor prof. dr hab. inż. Lech M. Grzesiak, Politechnika Warszawska, recenzenci: prof. dr hab. inż. Teresa Orłowska – Kowalska, Politechnika Wrocławska, prof. dr hab. inż. Marian Kaźmierkowski, Politechnika Warszawska, 10.03.2010 r., doktorat z wyróżnieniem.
- **Dyplom ukończenia studiów magisterskich**, Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny, kierunek Automatyka i Robotyka, specjalność Automatyka, tytuł pracy: *„Metoda iteracyjnego strojenia w zastosowaniu do doboru nastaw regulatorów PID"*, promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Królikowski, rok 2005.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 01.09.2017 – obecnie – zatrudnienie na stanowisku adiunkta, Wydział Fizyki Astronomii i Informatyki Stosowanej, Katedra Automatyki i Systemów Pomiarowych, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu.
- 01.10.2010 – 31.08.2017 – zatrudnienie na stanowisku adiunkta, Wydział Fizyki Astronomii i Informatyki Stosowanej, Instytut Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu.
- 01.10.2009 – 30.09.2010 – zatrudnienie na stanowisku asystenta, Wydział Fizyki Astronomii i Informatyki Stosowanej, Instytut Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu.

4. Wskazanie osiągniecia 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. 2016 r. poz. 882 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:

„Sterowanie bazujące na sprzężeniu od wektora stanu - z predykcją ograniczeń i autostrojeniem - w napędach z silnikiem PMSM i przekształtnikach energoelektronicznych DC-DC"

b) Wykaz publikacji zaliczonych do cyklu

I. Tomasz Tarczewski (90%), Lech M. Grzesiak (10%), "An Application of Novel Nature-Inspired Optimization Algorithms to Auto-Tuning State Feedback Speed Controller for PMSM," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 54, no. 3, pp. 2913-2925, 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2805300, **IF 2,937** (z 2016)
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: zastosowaniu dwóch inspirowanych przyrodą algorytmów optymalizacyjnych z ograniczeniami do autostrojenia bazującego na sprzężeniu od wektora stanu regulatora prędkości silnika PMSM, opracowaniu oprogramowania wspierającego proces automatycznego projektowania regulatora, przygotowaniu modelu, zaplanowaniu i przeprowadzeniu porównawczych badań symulacyjnych i eksperymentalnych, interpretacji wyników badań oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy **szacuję na 90%**.*

II. Tomasz Tarczewski (70%), Michał Skiwski (10%), Łukasz. J. Niewiara (10%), Lech. M. Grzesiak (10%), "High-performance PMSM servo-drive with constrained state feedback position controller," *BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES - TECHNICAL SCIENCES*, vol. 66, no. 1, pp. 49-58, 2018, doi: 10.24425/119058, **IF 1,156** (z 2016)
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: zaproponowaniu i opracowaniu metody predykcji ograniczeń zmiennych stanu serwonapędu z silnikiem PMSM i z regulatorem bazującym na sprzężeniu od wektora stanu, opracowaniu modelu i koncepcji regulatora, zaplanowaniu i wykonaniu badań symulacyjnych, zaplanowaniu badań eksperymentalnych, interpretacji wyników badań oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy **szacuję na 70%**.*

III. Tomasz Tarczewski (70%), Łukasz J. Niewiara (10%), Michał Skiwski (10%), Lech M. Grzesiak (10%), "Gain-scheduled constrained state feedback control of DC–DC buck power converter," *IET POWER ELECTRONICS*, vol. 11, iss. 4, pp. 735-743, 2018, doi: 10.1049/iet-pel.2017.0370, **IF 3,547** (z 2016)
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: zaproponowaniu i opracowaniu metody predykcji ograniczeń zmiennej stanu przekształtnika DC-DC z przestrajanym regulatorem bazującym na sprzężeniu od wektora stanu, opracowaniu modelu i koncepcji regulatora o zmiennych współczynnikach wzmocnień, zaplanowaniu i wykonaniu badań symulacyjnych, zaplanowaniu badań eksperymentalnych, interpretacji wyników oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy **szacuję na 70%**.*

IV. Tomasz Tarczewski (70%), Michał Skiwski (15%), Lech M. Grzesiak (10%), Marek Zieliński (5%), "Sterowanie bazujące na sprzężeniu od wektora zmiennych stanu z ograniczeniami serwonapędem z silnikiem PMSM," *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, vol. 94, no. 3, pp. 99-105, 2018, doi: 10.15199/48.2018.03.19
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: zaproponowaniu i opracowaniu koncepcji regulatora bazującego na sprzężeniu od wektora stanu z predykcją ograniczeń i

sprzężeniem w przód dla serwonapędu z silnikiem PMSM, zastosowaniu inspirowanego przyrodą algorytmu optymalizacyjnego z ograniczeniami do autostrojenia regulatora, opracowaniu oprogramowania wspierającego proces projektowania regulatora, przygotowaniu modelu, zaplanowaniu i przeprowadzeniu badań symulacyjnych, zaplanowaniu badań eksperymentalnych, interpretacji wyników oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy ***szacuję na 70%.***

V. Tomasz Tarczewski (70%), Michał Skiwski (20%), Lech M. Grzesiak (10%), "Constrained non-stationary state feedback speed control of PMSM," *19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*, pp. P.1-P.10, 2017, doi: 10.23919/EPE17ECCEEurope.2017.8099054
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: zaproponowaniu i opracowaniu koncepcji niestacjonarnego regulatora ze sprzężeniem od wektora stanu i z predykcją ograniczeń dla silnika PMSM, opracowaniu modelu, zaplanowaniu i wykonaniu badań symulacyjnych, zaplanowaniu badań eksperymentalnych, interpretacji wyników badań oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy ***szacuję na 70%****.*

VI. Tomasz Tarczewski (90%), Lech M. Grzesiak (10%), "Artificial bee colony based auto-tuning of PMSM state feedback speed controller," *IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC 2016)*, pp. 1155-1160, 2016, doi: 10.1109/EPEPEMC.2016.7752158
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: zastosowaniu inspirowanego przyrodą algorytmu optymalizacyjnego z ograniczeniami do autostrojenia bazującego na sprzężeniu od wektora stanu regulatora prędkości silnika PMSM, opracowaniu oprogramowania wspierającego proces projektowania regulatora, przygotowaniu modelu, zaplanowaniu i przeprowadzeniu badań symulacyjnych i eksperymentalnych, interpretacji wyników badań oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy ***szacuję na 90%.***

VII. Tomasz Tarczewski (70%), Łukasz J. Niewiara (20%), Lech M. Grzesiak (10%), "Constrained state feedback control of DC-DC power converter based on model predictive approach," *4th International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA 2016)*, pp. 1-6, 2016, doi: 10.1109/EFEA.2016.7748814
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: zaproponowaniu i opracowaniu koncepcji regulatora bazującego na sprzężeniu od wektora stanu z predykcją ograniczeń dla przekształtnika DC-DC, opracowaniu modelu, zaplanowaniu i wykonaniu badań symulacyjnych, interpretacji wyników oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy ***szacuję na 70%.***

VIII. Tomasz Tarczewski (70%), Łukasz J. Niewiara (20%), Lech M. Grzesiak (10%), "Application of artificial bee colony algorithm to auto-tuning of state feedback controller for DC-DC power converter," *POWER ELECTRONICS AND DRIVES*, vol. 1 (36), no. 2, pp. 83-96, 2016, doi: 10.5277/PED160205

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: zastosowaniu inspirowanego przyrodą algorytmu optymalizacyjnego z ograniczeniami do autostrojenia bazującego na sprzężeniu od wektora stanu regulatora przekształtnika energoelektronicznego DC-DC, przygotowaniu oprogramowania wspierającego proces automatycznego projektowania regulatora, przygotowaniu modelu, zaplanowaniu i przeprowadzeniu badań symulacyjnych z uwzględnieniem procedury autostrojenia, interpretacji wyników oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy ***szacuję na 70%.***

IX. Tomasz Tarczewski (90%), Lech M. Grzesiak (10%), "Constrained State Feedback Speed Control of PMSM Based on Model Predictive Approach," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 63, no. 6, pp. 3867-3875, 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2497302, **IF 7,168**

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: zaproponowaniu i opracowaniu koncepcji regulatora bazującego na sprzężeniu od wektora stanu z predykcją ograniczeń dla silnika PMSM, opracowaniu modelu, zaplanowaniu i przeprowadzeniu badań symulacyjnych i eksperymentalnych, interpretacji wyników oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy ***szacuję na 90%.***

X. Tomasz Tarczewski (90%), Lech M. Grzesiak (10%), "Application of artificial bee colony algorithm to auto-tuning of linear-quadratic regulator for PMSM position control," *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, vol. 92, no. 6, pp. 57-62, 2016, doi: 10.15199/48.2016.06.11

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: zastosowaniu inspirowanego przyrodą algorytmu optymalizacyjnego z ograniczeniami do autostrojenia bazującego na sprzężeniu od wektora stanu regulatora wielkości mechanicznych serwonapędu z silnikiem PMSM, przygotowaniu oprogramowania wspierającego proces projektowania regulatora, przygotowaniu modelu, zaplanowaniu i przeprowadzeniu badań symulacyjnych oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy ***szacuję na 90%.***

Wyniki badań prezentowałem w czasopismach indeksowanych według JCR, zamieszczonych na liście ministerialnej oraz na znaczących konferencjach międzynarodowych i krajowych. W Tab. 1 zebrano informacje dotyczące cyklu publikacji stanowiącego podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego. Sumaryczny współczynnik Impact Factor (zgodny z datą publikacji) jest równy **14,8**, a z uwzględnieniem udziału procentowego **12,4**. Sumaryczna liczba punktów wg Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego jest równa **199**, a z uwzględnieniem udziału procentowego jest równa **162,1**.

Na podstawie opracowania Biblioteki Uniwersyteckiej UMK w Toruniu z 21.05.2018, sumaryczna liczba cytowań bez autocytowań wszystkich publikacji według bazy Web of Science Core Collection to **34**, według bazy Scopus to **45**, natomiast według bazy Google Scholar to **80**. Wskaźnik Hirscha (H-index) habilitanta według bazy Web of Science lub Scopus jest równy **5**, natomiast według bazy Google Scholar jest równy **7**.

Tarczewski

Tab. 1. Analiza wskazanych pozycji jednolitego cyklu publikacji

Nr publikacji	Nazwa czasopisma/konferencji	Punktacja wg ministerialnego wykazu czasopism	Impact Factor	Wkład wnioskodawcy	Rok publikacji
I	IEEE Transactions on Industry Applications	35	2,937 (2016)	90%	2018
II	Bulletin of the Polish Academy of Sciences - Technical Sciences	20	1,156 (2016)	70%	2018
III	IET Power Electronics	15	3,547 (2016)	70%	2018
IV	Przegląd Elektrotechniczny	14	nie dotyczy	70%	2018
V	19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)	15 (Web of Science)	nie dotyczy	70%	2017
VI	IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC 2016)	15 (Web of Science)	nie dotyczy	90%	2016
VII	4th International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA 2016)	15 (Web of Science)	nie dotyczy	70%	2016
VIII	Power Electronics and Drives	6	nie dotyczy	70%	2016
IX	IEEE Transactions on Industrial Electronics	50	7,168	90%	2016
X	Przegląd Elektrotechniczny	14	nie dotyczy	90%	2016

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

Motywacja i cel naukowy

Zarówno w zakresie automatyki napędu elektrycznego jak i sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi, stopień złożoności obiektu regulacji oraz wymagania dotyczące jakości regulacji powodują, że zazwyczaj konieczna jest regulacja kilku zmiennych stanu. Często stosowanym podejściem jest zastosowanie kaskadowej struktury regulacji złożonej z połączonych szeregowo układów regulacji (najczęściej regulatorów typu PID), z których każdy jest odpowiedzialny za regulację wybranej zmiennej stanu. Do zalet omawianej struktury zaliczyć należy: możliwość sekwencyjnej syntezy regulatorów (tj. od pętli wewnętrznej do zewnętrznej) oraz łatwość nakładania ograniczeń na poszczególne zmienne stanu. Pierwsza z zalet implikuje relatywnie prostą syntezę poszczególnych pętli

regulacji i umożliwia, m.in. w zakresie napędu elektrycznego, zastosowanie analitycznych metod wyznaczania współczynników wzmocnień regulatorów. Druga z wymienionych cech wynika z budowy kaskadowej struktury regulacji, w której wartość referencyjna podrzędnej pętli regulacji jest wyznaczana w pętli nadrzędnej, co umożliwia utrzymywanie wybranych zmiennych stanu w zakresach gwarantujących poprawne i bezpieczne działanie sterowanego obiektu. Podstawową wadą kaskadowej struktury regulacji jest negatywny wpływ podrzędnej pętli regulacji na dynamikę pętli nadrzędnej, co ma negatywny wpływ na kompensację niemierzalnych zakłóceń. Brak połączonych szeregowo pętli regulacji jest cechą charakterystyczną sterowania bazującego na sprzężeniu od wektora stanu (*ang.* State Feedback Control – SFC), które w swej podstawowej, liniowej (tj. pozbawionej ograniczeń) wersji było przedmiotem badań habilitanta podczas realizacji pracy doktorskiej. Otrzymane rezultaty, jak również wyniki prac badawczych uzyskiwane przez inne zespoły, m.in. zespół dra hab. inż. Bartłomieja Ufnalskiego (ISEP PW), zespół dra hab. inż. Krzysztofa Szabata (KMNiPE PWr), jednoznacznie wskazywały na możliwość stosowania omawianej struktury sterowania w napędzie elektrycznym i w układach przekształtnikowych. Jednocześnie uwidaczniały się dwie podstawowe wady, które zdaniem habilitanta znacząco obniżały możliwości wykorzystania rozważanej struktury na szeroką skalę. Po pierwsze, brak połączonych szeregowo pętli regulacji w sterowaniu bazującym na sprzężeniu od wektora stanu uniemożliwia nakładanie na poszczególne zmienne stanu ograniczeń gwarantujących poprawną i bezpieczną pracę obiektu regulacji. Sytuacja ta jest szczególnie istotna, gdy amplituda sygnału referencyjnego może ulegać zmianie, co ma m.in. miejsce w przypadku sterowania serwonapędem elektrycznym, implikując, w przypadku zastosowania regulatora liniowego, proporcjonalne zmiany poszczególnych zmiennych stanu [IV]. Jedną z aktualnie rozwijanych w obszarze napędów elektrycznych i układów przekształtnikowych metod sterowania umożliwiających uwzględnienie ograniczeń zmiennych stanu jest sterowanie predykcyjne z modelem (*ang.* Model Predictive Control – MPC). Podstawowa wersja MPC wymaga wyznaczenia optymalnego, dla rozpatrywanego horyzontu sterowania, sygnału sterującego. Implikuje to relatywnie dużą złożoność obliczeniową i ogranicza stosowanie MPC do procesów wolnozmiennych i wyposażonych w sterowniki mikroprocesorowe o dużej mocy obliczeniowej. W obszarze sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi, ze względu na dyskretną naturę rozpatrywanych urządzeń i ograniczoną liczbę stanów jakie mogą przyjmować łączniki energoelektroniczne, stosowane jest sterowanie predykcyjne ze skończonym zbiorem sterowań (*ang.* Finite Control Set – FS-MPC). Relatywnie mała złożoność obliczeniowa FS-MPC stanowi niewątpliwie jej zaletę, natomiast zastosowania ograniczają się do prostych struktur regulacji (np. kształtowanie składowych wektora przestrzennego prądu falownika 3-fazowego o topologii mostkowej). Po drugie, kompaktowa struktura regulatora bazującego na sprzężeniu od wektora stanu wymusza, niezależnie od liczby zmiennych stanu, konieczność jednoczesnego wyznaczenia wszystkich współczynników wzmocnień regulatora, co nierzadko jest zadaniem nietrywialnym. Stosowane podczas manualnej syntezy SFC metody bazują na optymalizacji liniowo-kwadratowej lub na lokowaniu biegunów i wymagają wyznaczenia metodą prób i błędów szeregu parametrów

(wartości macierzy wagowych lub położenia biegunów na płaszczyźnie zmiennej zespolonej). Zadanie to, szczególnie w przypadku układów regulacji o dużej liczbie zmiennych stanu, jest czasochłonne i często wymaga wiedzy eksperckiej. Alternatywę dla ręcznego wyznaczania współczynników wzmocnień SFC stanowią inspirowane przyrodą algorytmy optymalizacyjne, np. optymalizacja rojem cząstek (*ang.* Particle Swarm Optimization – PSO), algorytmy genetyczne (*ang.* Genetic Algorithms – GA), jednak większość proponowanych rozwiązań nie uwzględnia ograniczeń zmiennych stanu na etapie autostrojenia regulatora oraz charakteryzuje się relatywnie dużą liczbą parametrów kontrolnych determinujących przebieg procesu optymalizacyjnego.

Z uwagi na zastany stan rozwiązań w zakresie sterowania bazującego na sprzężeniu od wektora stanu habilitant w 2013 roku postawił sobie dwa, istotne jego zdaniem cele naukowe:

- **opracowanie metody nakładania ograniczeń na wybrane zmienne stanu w układzie regulacji z regulatorem bazującym na sprzężeniu od wektora stanu, której złożoność obliczeniowa umożliwi zastosowanie w układach przekształtnikowych o relatywnie wysokiej częstotliwości przełączeń ($f_{PWM} \geq 16$ kHz) i relatywnie krótkim okresie próbkowania ($T_s \leq 62{,}5$ µs) determinującym czas dysponowany na wykonanie algorytmu regulacji,**
- **opracowanie metody automatycznego strojenia regulatorów bazujących na sprzężeniu od wektora stanu uwzględniającej w procesie autostrojenia konieczność utrzymywania wybranych zmiennych stanu w założonych zakresach, charakteryzującej się relatywnie małą liczbą parametrów dobieranych metodą prób i błędów oraz dobrą zbieżnością.**

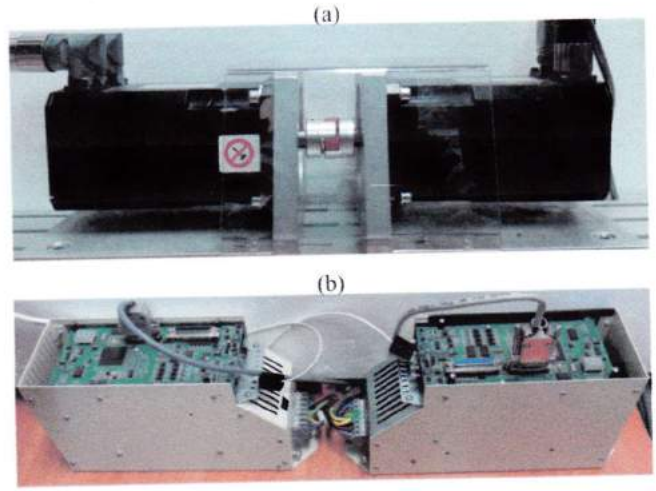
Niniejsze opracowanie zawiera wybrane oryginalne osiągnięcia w zakresie badań, które habilitant prowadził po uzyskaniu stopnia doktora w dyscyplinie naukowej automatyka i robotyka. Przedstawiony zbiór cyklu publikacji naukowych powiązanych tematycznie obejmuje wyniki badań z zakresu zastosowania sterowania bazującego na sprzężeniu od wektora stanu z predykcją ograniczeń i autostrojeniem dla napędów elektrycznych z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych (ang. Permanent Magnet Synchronous Motor – PMSM) oraz przekształtników energoelektronicznych DC-DC. Eksperymentalna weryfikacja opracowanych rozwiązań dotyczyła napędów elektrycznych i układów przekształtnikowych, jednak zaproponowane metody, zarówno w zakresie wprowadzania w oparciu o dyskretny predykcyjny model obiektu ograniczeń do struktur regulacji z regulatorem SFC jak również w obszarze zastosowania inspirowanego przyrodą algorytmu optymalizacyjnego sztucznej kolonii pszczół (*ang.* Artificial Bee Colony – ABC) do automatycznego wyznaczania współczynników wzmocnień regulatora, mogą być rozważane w kontekście aplikacji bazującego na sprzężeniu od wektora stanu sterowania innymi złożonymi obiektami. Wniosek ten wynika z uniwersalnej metodyki projektowania rozpatrywanych regulatorów, zaproponowanego oryginalnego wprowadzania ograniczeń *„a posteriori"* w oparciu o model obiektu regulacji, a także przystosowaniu algorytmu

optymalizacyjnego do autostrojenia regulatora w oparciu o uniwersalne, całkowe wskaźniki jakości stosowane w wielu obszarach regulacji automatycznej.

Opis stanowisk laboratoryjnych

Wyniki badań eksperymentalnych prezentowane w pracach habilitanta wymienionych w punkcie 4.b zostały wykonane na trzech stanowiskach laboratoryjnych.

[A] Stanowisko laboratoryjne z serwonapędami PMSM o mocy 0,6 kW i komercyjnymi falownikami wektorowymi z mikroprocesorami TMS320F2812 (Texas Instruments) umożliwiającymi swobodne programowanie (Rys. 1).



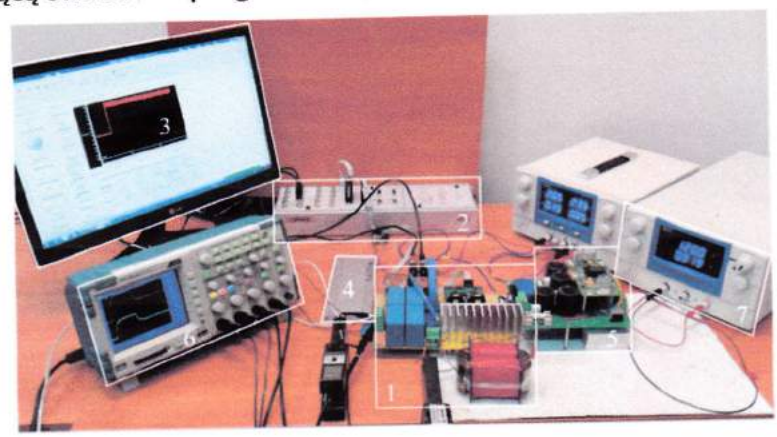
Rys. 1. Stanowisko laboratoryjne wyposażone w: a) 2 serwonapędy PMSM, b) komercyjne falowniki wektorowe.

Omawiane stanowisko przeznaczone jest do badania właściwości autorskich algorytmów regulacji przeznaczonych dla napędu z silnikiem PMSM. Umożliwia pracę obu napędów w trybie regulacji położenia kątowego, prędkości kątowej oraz momentu. Napędy wyposażone są w czujniki pomiarowe prądów fazowych oraz rezolwery mierzące położenia kątowe. Zadawanie sygnałów referencyjnych oraz akwizycja sygnałów mierzonych jest realizowana przy pomocy komputera klasy PC poprzez interfejs szeregowy. Podstawowe parametry napędu z silnikiem PMSM przedstawiono w Tabeli 2. Na stanowisku wykonano badania opisane w pracach [I, VI, IX].

Tabela 2. Wybrane parametry napędu z silnikiem PMSM 0,6 kW

Parametr	Wartość	Jednostka
Moc znamionowa	628	W
Prąd znamionowy	3	A
Prędkość znamionowa	366	rad/s
Stała momentu	0,35	Nm/A
Liczba par biegunów	3	
Moment bezwładności	2×10^{-4}	kgm^2
Napięcie DC	190	V
Częstotliwość przełączeń	16	kHz

[B] Stanowisko laboratoryjne z przekształtnikiem DC-DC obniżającym napięcie i kartą dSpace 1104 umożliwiającą swobodne programowanie (Rys. 2).



Rys. 2. Stanowisko laboratoryjne z przekształtnikiem DC-DC obniżającym napięcie: 1 – przekształtnik DC-DC, 2 – interfejs karty dSpace 1104, 3 – aplikacja sterująca, 4 – obciążenie, 5 – obwód DC, 6 – oscyloskop, 7 – źródło DC.

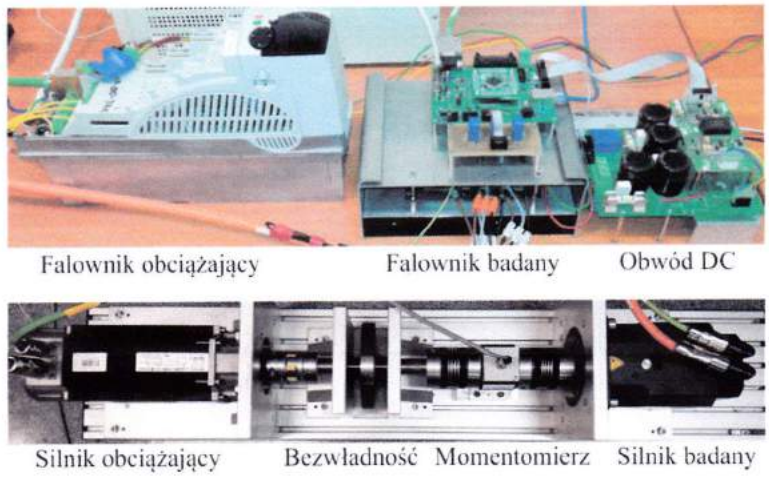
Prezentowane stanowisko przeznaczone jest do syntezy i analizy algorytmów regulacji przeznaczonych dla przekształtnika DC-DC o topologii półmostkowej z elementami półprzewodnikowymi wykonanymi z węglika krzemu (tj. tranzystorami SiC MOSFET C2M0080120D oraz diodami Schottky'ego C4D10120A). Zostało ono wyposażone w czujniki pomiarowe prądu i napięcia oraz w przekaźniki umożliwiające skokowe zmiany obciążenia. Algorytmy regulacji są implementowane na karcie pomiarowo-kontrolnej dSpace 1104. Podstawowe parametry przekształtnika DC-DC przedstawiono w Tabeli 3. Na stanowisku wykonano badania opisane w pracach [III, VII, VIII].

Tabela 3. Wybrane parametry przekształtnika DC-DC.

Parametr	Wartość	Jednostka
Moc znamionowa	600	W
Prąd znamionowy	5	A
Napięcie znamionowe	120	V
Indukcyjność	2×10^{-3}	H
Rezystancja	0,15	Ω
Pojemność	30×10^{-6}	F
Częstotliwość przełączeń*	36	kHz

* uzależniona od złożoności obliczeniowej algorytmu regulacji

[C] Stanowisko laboratoryjne z serwonapędem PMSM o mocy 1,7 kW i prototypowym falownikiem napięcia z tranzystorami SiC MOSFET i mikroprocesorem STM32F407VGT6 z rdzeniem ARM Cortex-M4 (STMicroelectronic) umożliwiającym swobodne programowanie oraz z serwonapędem PMSM o mocy 3,3 kW i komercyjnym falownikiem napięcia (Rys. 3).



Rys. 3. Stanowisko laboratoryjne wyposażone w 2 serwonapędy PMSM.

Omawiane stanowisko przeznaczone jest do badania właściwości autorskich algorytmów regulacji przeznaczonych dla napędu z silnikiem PMSM. Umożliwia ono pracę obu napędów w trybie regulacji położenia kątowego, prędkości kątowej oraz momentu. Napęd badany wyposażony jest w czujniki pomiarowe prądów fazowych oraz enkoder z interfejsem Hiperface mierzący położenie kątowe. Falownik wyposażono w elementy półprzewodnikowe z węglika krzemu (moduł mocy SiC MOSFET CCS020M12CM2). Algorytmy regulacji są implementowane w mikroprocesorze STM32F407VGT6 z rdzeniem ARM Cortex-M4. Jako obciążenie stosowany jest komercyjny napęd Unidrive SP1405 firmy Control Techniques. Zadawanie sygnałów referencyjnych oraz akwizycja sygnałów mierzonych jest realizowana przy pomocy komputera klasy PC poprzez interfejs Ethernet. Podstawowe parametry napędu z silnikiem PMSM przedstawiono w Tabeli 4. Na stanowisku wykonano badania opisane w publikacjach [II, IV, V].

Tabela 4. Wybrane parametry prototypowego napędu z PMSM

Parametr	Wartość	Jednostka
Moc znamionowa	1,73	kW
Prąd znamionowy	5,8	A
Stała momentu	1,14	Nm/A
Liczba par biegunów	3	
Moment bezwładności	$8{,}62\times10^{-3}$	kgm^2
Napięcie DC	200	V
Częstotliwość przełączeń*	48	kHz

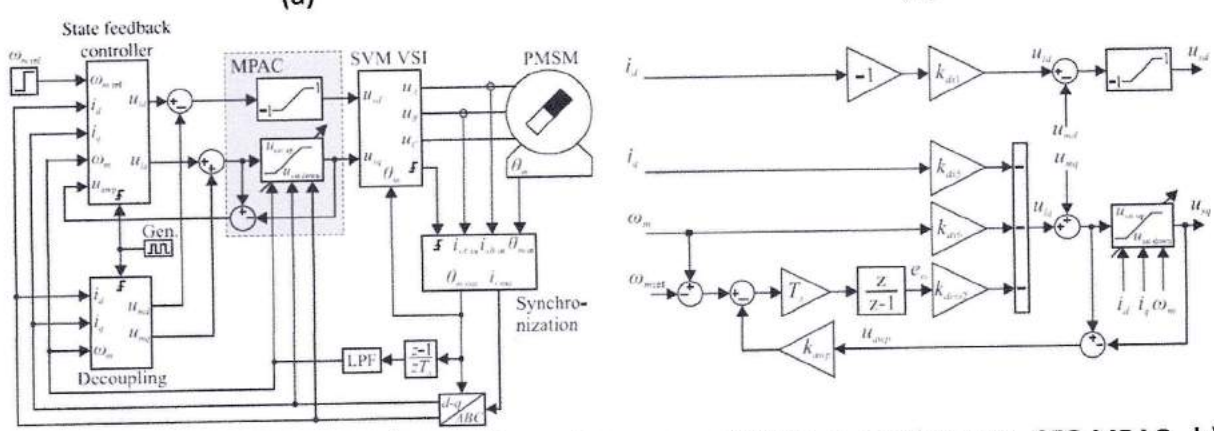
* uzależniona od złożoności obliczeniowej algorytmu regulacji

Stanowiska [B] oraz [C] zostały zaprojektowane, zbudowane, oprogramowane i uruchomione przez zespół złożony z habilitanta oraz dwóch doktorantów, którymi habilitant opiekuje się naukowo. Środki niezbędne do powstania stanowisk pochodziły z działalności statutowej Instytutu Fizyki UMK w Toruniu przeznaczonej na rozwój młodej kadry naukowej.

Bazujące na sprzężeniu od wektora stanu regulatory z predykcją ograniczeń

Opracowane algorytmy regulacji są w pełni autorskimi pomysłami i zgodnie z posiadaną przez habilitanta wiedzą podobne rozwiązania nie były wcześniej prezentowane w literaturze dotyczącej sterowania ze sprzężeniem od wektora stanu z ograniczeniami. Jako punkt wyjścia w procesie wprowadzania *„a posteriori"* ograniczeń wybranych zmiennych stanu do układu regulacji z regulatorem bazującym na sprzężeniu od wektora stanu przyjęto hipotezę, iż na podstawie równań różniczkowych opisujących model obiektu i stosowanych w formie równania stanu w procesie projektowania regulatora można wyznaczyć dyskretne, predykcyjne równania, pozwalające na kształtowanie sygnału wyjściowego liniowego regulatora SFC w sposób zapewniający utrzymywanie wybranej zmiennej (lub zmiennych) stanu w dopuszczalnym zakresie (lub zakresach). Ze względu na zastosowanie predykcyjnych równań modelu do wprowadzenia ograniczeń, zaproponowaną metodę nazwano MPAC od „Model Predictive Approach to Constraint introduction" [IX]. W przypadku wprowadzenia ograniczenia na składową *q* wektora przestrzennego prądu stojana silnika PMSM, dyskretne równania predykcyjne wyznaczono korzystając z równania napięciowego dla osi *q* [IX]. Postać dyskretna tego równania umożliwia bowiem wyznaczenie wartości napięcia, dla której prąd w kolejnej dyskretnej chwili czasu nie przekroczy przyjętej wartości, przy założeniu, że jego aktualna wartość oraz wartość siły elektromotorycznej są znane. Schemat blokowy napędu z silnikiem PMSM i regulatorem prędkości z predykcją ograniczeń przedstawiono na Rys. 4.a, natomiast strukturę regulatora SFC-MPAC zamieszczono na Rys. 4.b. Ze względu na zastosowanie strategii sterowania PMSM z zerową składową *d* wektora przestrzennego prądu zdecydowano się na wprowadzenie MPAC tylko w torze *q* sterowania. Przedstawiony na Rys. 4.b regulator został wyposażony w model wewnętrzny sygnału referencyjnego odpowiedzialny za eliminowanie uchybu ustalonego prędkości kątowej. Na omawianym schemacie zamieszczono jedynie niezerowe współczynniki wzmocnień regulatora SFC-MPAC. Występowanie w regulatorze członu całkującego oraz predykcji ograniczeń implikowało konieczność wprowadzenia do struktury toru anti-windup.

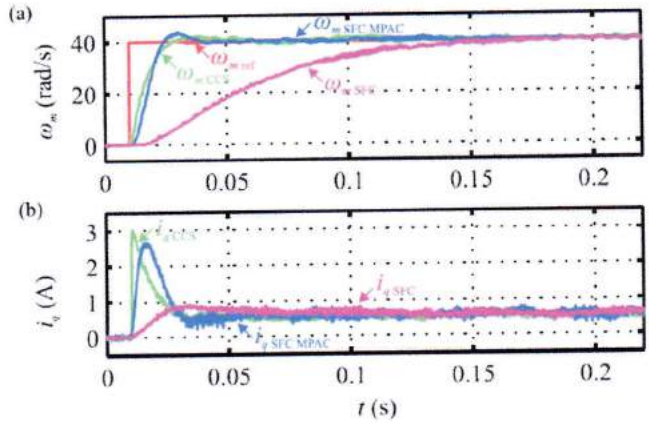
(a) (b)



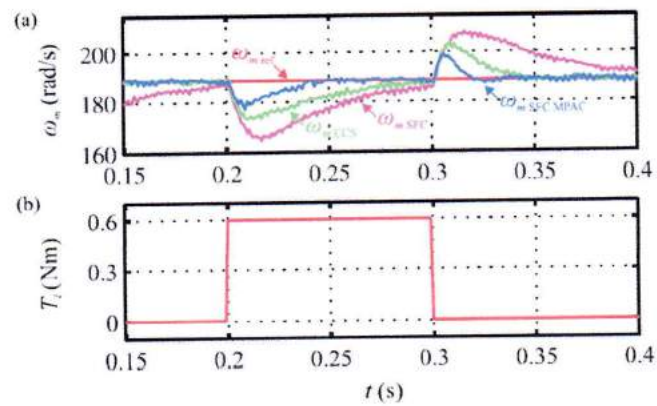
Rys. 4. Schemat blokowy: a) napędu wektorowego PMSM z regulatorem SFC-MPAC, b) regulatora prędkości SFC-MPAC [IX].

Rezultaty badań eksperymentalnych zaproponowanej struktury regulacji wykonane na stanowisku [A] i przedstawione w [IX] wskazują na lepsze właściwości dynamiczne w

porównaniu do regulatora SFC bez ograniczeń (Rys. 5) oraz na lepszą kompensację momentu obciążenia w porównaniu do klasycznej, kaskadowej struktury regulacji z regulatorami PI (Rys. 6). Zaletą opracowanego algorytmu regulacji jest również jego niewielka złożoność obliczeniowa.



Rys. 5. Odpowiedź na skokową zmianę prędkości zadanej napędu PMSM z: SFC – regulatorem bez ograniczeń, SFC-MPAC – regulatorem z predykcją ograniczeń, CCS – kaskadową strukturą regulacji [IX].



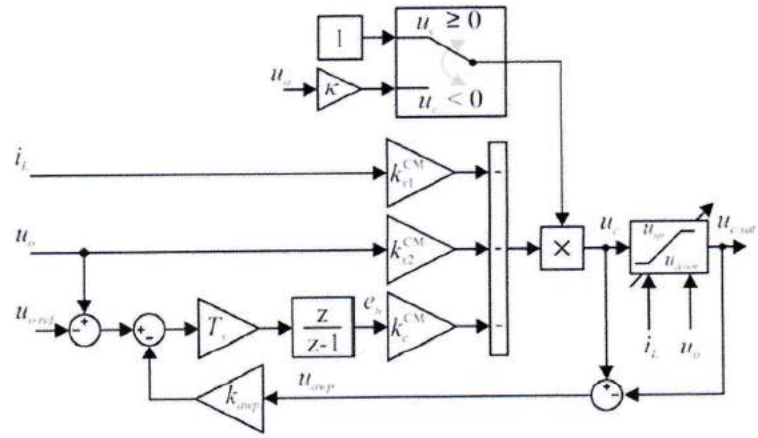
Rys. 6. Odpowiedź na skokowe zmiany momentu obciążenia napędu PMSM z: SFC – regulatorem bez ograniczeń, SFC-MPAC – regulatorem z predykcją ograniczeń, CCS – kaskadową strukturą regulacji [IX].

Zaproponowana metoda wprowadzania ograniczeń do układu regulacji z regulatorem SFC została zaadaptowana do utrzymywania amplitudy prądu dławika w żądanym zakresie przy jednoczesnym kształtowaniu napięcia wyjściowego przekształtnika energoelektronicznego DC-DC obniżającego napięcie [III, VII]. Zaprezentowana w [VII] struktura regulacji SFC-MPAC została wyposażona w sprzężenie w przód (*ang.* feedforward) od sygnału referencyjnego i niemierzalnego zakłócenia w celu uzyskania lepszych właściwości dynamicznych i zerowego uchybu ustalonego bez modelu wewnętrznego sygnału referencyjnego. Możliwość analitycznego wyznaczenia współczynników wzmocnienia dla toru *feedforward* na podstawie modelu obiektu w przestrzeni zmiennych stanu jest jedną z zalet sterowania bazującego na sprzężeniu od wektora stanu. W rozważanym przypadku celowo zrezygnowano z toru całkującego w strukturze regulatora,

zastępując go sprzężeniem w przód. Zabieg ten umożliwił wyeliminowanie ze struktury regulacji toru anti-windup. Estymatę niemierzalnej wartości prądu obciążenia przekształtnika wyznaczono przy pomocy zaprojektowanego na potrzeby badań obserwatora Luenbergera. Badania eksperymentalne wykonane na opracowanym w zespole habilitanta prototypowym przekształtniku DC-DC typu buck z łącznikami półprzewodnikowymi SiC MOSFET [B] potwierdziły skuteczność zaproponowanej metody predykcji ograniczeń dla regulatora SFC a także relatywnie małą złożoność obliczeniową, która umożliwiła przeprowadzenie badań dla częstotliwości przełączeń wynoszącej f_{PWM} = 32 kHz. Opracowany algorytm regulacji, dzięki zastosowaniu predykcji ograniczeń, wpłynął na ponad 3-krotne skrócenie czasu narastania napięcia wyjściowego przekształtnika w porównaniu do liniowego regulatora bazującego na sprzężeniu od wektora stanu. Rozwinięciem zaprezentowanej w [VII] koncepcji jest opracowany na potrzeby sterowania napięciem wyjściowym przekształtnika DC-DC typu buck pracującego w asynchronicznym trybie pracy regulator napięcia SFC-MPAC z przestrajanymi na bieżąco współczynnikami wzmocnień oraz z predykcją ograniczeń [III]. Doświadczenie habilitanta w zakresie projektowania regulatorów SFC o zmiennych współczynnikach wzmocnień a także analiza właściwości obiektu regulacji [B] wynikających z dwóch dozwolonych trybów pracy przekształtnika (tj. trybu ładowania i rozładowania kondensatora wyjściowego) oraz z możliwości niezależnego sterowania tranzystorami mocy, umożliwiły opracowanie relatywnie nieskomplikowanego algorytmu przestrajania współczynników wzmocnień uzależnionego od trybu pracy przekształtnika oraz od aktualnej wartości napięcia wyjściowego. Jednocześnie zmodyfikowano metodę wprowadzania ograniczeń do układu regulacji uwzględniając w jednym z równań predykcyjnych niestacjonarny współczynnik wzmocnienia przekształtnika skorelowany z wartością napięcia wyjściowego. W rezultacie opracowano algorytm sterowania zapewniający:

- poprawę właściwości dynamicznych, ze szczególnym uwzględnieniem czasu rozładowania kondensatora wyjściowego,
- dużo lepszą kompensację niemierzalnego prądu obciążenia, w porównaniu do kaskadowej struktury regulacji,
- utrzymywanie amplitudy prądu dławika w dopuszczalnym zakresie niezależnie od trybu pracy przekształtnika.

Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły również możliwość poprawnej pracy zaproponowanego algorytmu regulacji z nieciągłym prądem dławika (*ang.* discontinuous conduction mode – DCM), mimo iż rozpatrywany tryb pracy nie został uwzględniony podczas syntezy regulatora. Schemat blokowy zaproponowanego dyskretnego regulatora ze sprzężeniem od wektora stanu z przestrajanymi współczynnikami wzmocnień i predykcją ograniczeń (gain-scheduled SFC-MPAC) przedstawiono na Rys. 7 a szczegółowo omówiono w [III].



Rys. 7. Schemat blokowy regulatora napięcia z przestrajanymi na bieżąco współczynnikami wzmocnień (gain-scheduled SFC-MPAC) [III].

Habilitant przeprowadził również badania opracowanej metody predykcji ograniczeń MPAC pod kątem zastosowania w układzie regulacji prędkości silnika PMSM z regulatorem SFC o przestrajanych na bieżąco współczynnikach wzmocnień. W omawianym rozwiązaniu, w procesie syntezy regulatora, zastosowany został nieliniowy i niestacjonarny model napędu elektrycznego (tj. silnik + przekształtnik). Zrezygnowano z linearyzacji, która może wprowadzać dodatkowe niepewności skutkujące pogorszeniem jakości regulacji. Współczynniki wzmocnień opracowanego regulatora uzależniono od punktu pracy silnika determinowanego przez aktualną wartość prędkości kątowej. Rezultaty badań przedstawione w [V] wykazały możliwość zastosowania zaproponowanej metody predykcji ograniczeń do utrzymywania składowej q wektora przestrzennego prądu stojana w żądanym zakresie w układzie regulacji z regulatorem SFC o przestrajanych na bieżąco współczynnikach wzmocnień. Relatywnie niewielka złożoność obliczeniowa przygotowanego algorytmu regulacji umożliwiła jego implementację w opracowanym w zespole habilitanta prototypowym falowniku [C] i przeprowadzenie szeregu badań eksperymentalnych z częstotliwością przełączeń f_{PWM} = 33,(3) kHz i odpowiadającym jej okresem próbkowania T_s = 30 µs. Zilustrowano w ten sposób praktyczność algorytmu regulatora o przestrajanych na bieżąco współczynnikach oraz metody predykcji ograniczeń pod kątem mocy obliczeniowych oferowanych przez typowe mikroprocesory stosowane w komercyjnych napędach. Otrzymane wyniki, zdaniem habilitanta, jednoznacznie wskazują na potencjał aplikacyjny opracowanej metody sterowania.

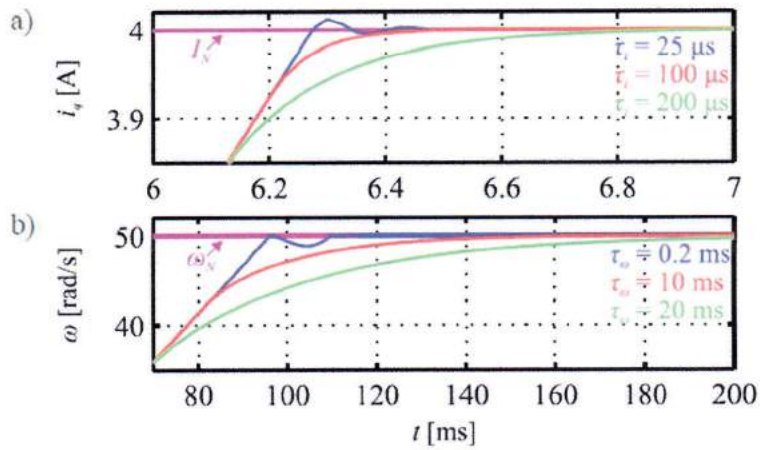
W trakcie prowadzonych prac badawczych habilitant rozważył również możliwość zastosowania opracowanej metody predykcji ograniczeń do utrzymywania w żądanych zakresach wybranych zmiennych stanu istotnych dla poprawnego działania serwonapędu z silnikiem PMSM i regulatorem bazującym na sprzężeniu od wektora stanu. W pracy [IV] przedstawiona została kaskadowa struktura regulacji z regulatorami PI składowych wektora przestrzennego prądu stojana oraz z bazującym na sprzężeniu od wektora stanu regulatorem wielkości mechanicznych serwonapędu. W celu uzyskania zadowalającej kompensacji niemierzalnego zakłócenia regulator SFC wyposażono w sprzężenie w przód od estymowanego momentu obciążenia. W zaproponowanej strukturze regulacji konieczne jest

utrzymywanie w dopuszczalnym zakresie prędkości kątowej silnika, która jest jednocześnie „wewnętrzną" zmienną stanu w układzie regulacji z regulatorem SFC. Wynika to z braku sygnału zadanego prędkości kątowej w rozpatrywanym regulatorze i implikuje konieczność zastosowania *„a posteriori"* predykcji ograniczenia. Do zrealizowania przedstawionego zadania habilitant zastosował dyskretne predykcyjne zależności wyznaczone z równania równowagi mechanicznej, które ograniczają sygnał wyjściowy regulatora SFC (tj. wartość zadaną składowej q wektora przestrzennego prądu stojana) w sposób zapewniający utrzymywanie amplitudy prędkości kątowej w zadanym zakresie. W proponowanym rozwiązaniu uwzględniona została dynamika podrzędnej pętli regulacji prądu poprzez empiryczny dobór wartości okresu próbkowania niezbędnego do otrzymania dyskretnych zależności predykcyjnych z równania równowagi mechanicznej. Omawiany okres próbkowania można traktować jako ekwiwalent horyzontu predykcji stosowanego w sterowaniu MPC. Na podstawie przeprowadzonych badań określono wpływ okresu próbkowania na działanie metody predykcji ograniczeń i podano warunki brzegowe. Ze względu na zastosowanie kaskadowego połączenia między regulatorem wielkości mechanicznych (SFC) oraz regulatorami składowych wektora przestrzennego prądu stojana (PI) zagadnienie ograniczania składowej q wektora przestrzennego prądu zrealizowano w sposób klasyczny, przy użyciu funkcji saturacji. Szereg badań eksperymentalnych wykonanych na stanowisku laboratoryjnym [C] potwierdził poprawne działanie serwonapędu, skuteczność predykcji ograniczeń oraz możliwość zastosowania opracowanej metody sterowania w rozwiązaniach komercyjnych. Niewielka złożoność obliczeniowa przygotowanego algorytmu umożliwiła uzyskanie okresu przełączeń na poziomie T_s = 20,8(3) µs odpowiadającego częstotliwości przełączeń f_{PWM} = 48 kHz. Pozytywne wyniki badań dotyczące predykcji ograniczeń w serwonapędzie elektrycznym skłoniły habilitanta do opracowania metody umożliwiającej limitowanie większej liczby zmiennych stanu złożonego układu regulacji. Efektem podjętych prac badawczych jest zaproponowana w [II] metoda nakładania *„a posteriori"* ograniczeń na prędkość kątową i składową q wektora przestrzennego prądu stojana serwonapędu z silnikiem PMSM i kompleksowym regulatorem położenia bazującym na sprzężeniu od wektora stanu. W opracowanej metodzie utrzymywanie dwóch zmiennych stanu w przyjętych przedziałach wymaga zastosowania następującej sekwencyjnej procedury obliczeniowej:

- na podstawie zależności predykcyjnych otrzymanych z równania równowagi mechanicznej wyznaczane są graniczne wartości składowej q wektora przestrzennego zapewniające dopuszczalną prędkość kątową serwonapędu,
- w oparciu o formuły predykcyjne otrzymane z równania napięciowego dla osi q silnika PMSM obliczane są graniczne wartości składowej q wektora przestrzennego sygnału sterującego gwarantujące dozwoloną wartość składowej q wektora przestrzennego prądu,
- sygnały sterujące ograniczane są do zakresu zapewniającego liniowy zakres pracy modulatora PWM.

Tolu

Przeprowadzone badania ukazały konieczność zastosowania różnych okresów dyskretyzacji do wyznaczenia dyskretnych równań predykcyjnych na podstawie modelu obiektu. Przyjęta empirycznie wartość okresu dyskretyzacji determinuje trajektorię z jaką ograniczana zmienna stanu osiąga wartość graniczną. Omawiany wpływ okresu dyskretyzacji τ_i na trajektorię składowej q wektora przestrzennego prądu stojana przedstawiono na Rys. 8.a, natomiast przebieg trajektorii prędkości kątowej silnika dla kilku wartości okresu dyskretyzacji τ_ω zamieszczono na Rys. 8.b.



Rys. 8. Procedura wyznaczania okresów dyskretyzacji dla równań predykcyjnych: a) odpowiedzi symulacyjne składowej q wektora przestrzennego prądu dla różnych wartości τ_i, b) odpowiedzi symulacyjne prędkości kątowej dla różnych wartości τ_ω [II].

Zaproponowane przez habilitanta rozwiązanie umożliwia skuteczne utrzymywanie dwóch zmiennych stanu w żądanych przedziałach, dzięki czemu możliwe stało się uzyskanie wysokiej jakości sterowania serwonapędu z regulatorem SFC-MPAC. Przedstawione w [II] wyniki badań eksperymentalnych wykazały dużo lepszą kompensację momentu obciążenia układu regulacji z kompleksowym regulatorem ze sprzężeniem od wektora stanu i predykcją ograniczeń w porównaniu do powszechnie stosowanej, kaskadowej struktury regulacji. Warto podkreślić, że złożoność obliczeniowa opracowanej metody jest nieznacznie większa od struktury kaskadowej: całkowity czas wykonania opracowanego algorytmu wynosi 9,76 µs, podczas gdy dla struktury kaskadowej wynosi on 9,33 µs.

Otrzymane rezultaty, zdaniem habilitanta, jednoznacznie potwierdzają możliwość zastosowania zaproponowanej metody predykcji ograniczeń do limitowania wybranych zmiennych stanu układu regulacji z regulatorem bazującym na sprzężeniu od wektora stanu. Kompleksowa analiza dotyczy: struktur regulacji zarówno o stałych jak i o zmienianych na bieżąco współczynnikach wzmocnień, stosowania dyskretnych równań predykcyjnych o stałych i o zależnych od parametru współczynnikach, limitowania jednej i wielu zmiennych stanu układu regulacji, testów przeprowadzonych na różnych obiektach regulacji. Zaproponowana metoda sterowania może być stosowana w układach regulacji o relatywnie krótkim czasie dysponowanym na wykonanie algorytmu sterowania, a w przypadku napędów elektrycznych i przekształtników energoelektronicznych z nowoczesnymi łącznikami półprzewodnikowymi umożliwia zastosowanie wysokich częstotliwości przełączeń

(f_{PWM} > 20 kHz) zapewniających efektywną pracę urządzeń oraz niską zawartość wyższych harmonicznych w prądach wyjściowych.

Optymalne strojenie regulatorów przy użyciu algorytmu optymalizacyjnego sztucznej kolonii pszczół

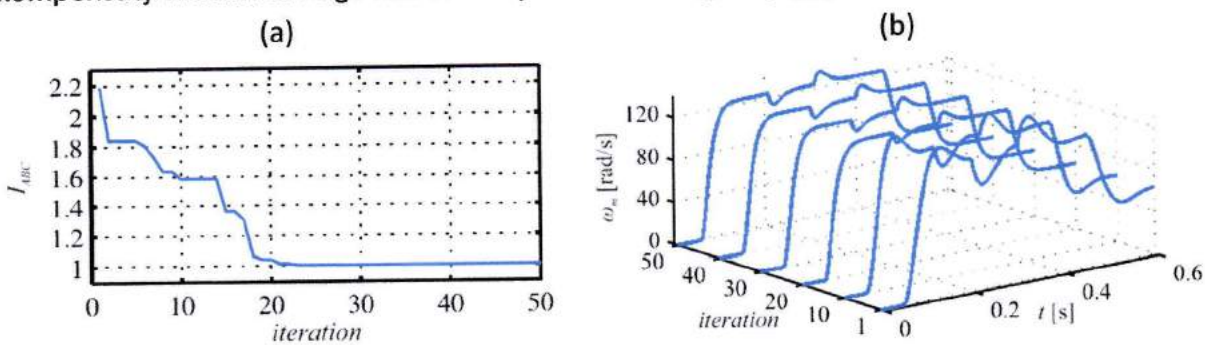
Równolegle do prac badawczych dotyczących predykcji ograniczeń dla układów regulacji z regulatorem bazującym na sprzężeniu od wektora stanu habilitant prowadził badania, których celem było opracowanie automatycznej metody doboru nastaw regulatora SFC. Istota problemu polegała na zaadaptowaniu jednego z algorytmów optymalizacji bezgradientowej (np. metoda roju cząstek, algorytm genetyczny) do automatycznego wyznaczania współczynników wzmocnień w sposób zapewniający:

- uproszczenie procedury strojenia (np. poprzez zredukowanie liczby parametrów dobieranych metodą empiryczną),
- ograniczanie wybranych zmiennych stanu podczas autostrojenia ze względu na aplikacyjny charakter zagadnienia implikujący możliwość implementacji regulatorów na stanowiskach badawczych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy dostępnych źródeł, habilitant podjął decyzję o zastosowaniu algorytmu optymalizacyjnego sztucznej kolonii pszczół (ang. Artificial Bee Colony – ABC). Decyzja wynikała z wykazanej przez twórcę algorytmu, prof. Dervisa Karabogę, lepszej zbieżności oraz mniejszej złożoności obliczeniowej w porównaniu z powszechnie stosowanymi algorytmami PSO i GA a także z możliwości uwzględnienia ograniczeń podczas optymalizacji. W celu zredukowania liczby parametrów dobieranych w procesie autostrojenia oraz zastąpienia współczynników mających niejasny wpływ na przebieg procedury intuicyjnymi, habilitant, wzorując się na rozwiązaniu zaproponowanym przez dra hab. inż. Bartłomieja Ufnalskiego (ISEP PW), wprowadził nadrzędny wskaźnik jakości do wskaźnika stosowanego w algorytmie optymalizacji liniowo-kwadratowej (LQR). Omawiane podejście zostało wykorzystane w procesie autostrojenia bazujących na sprzężeniu od wektora stanu regulatorów wielkości mechanicznych dwóch serwonapędów z silnikami PMSM [X]. Wyniki badań symulacyjnych wykazały możliwość zastosowania omawianej metody do autostrojenia regulatorów SFC w oparciu o nadrzędny wskaźnik jakości ITAE. W celu uzyskania nastaw regulatora gwarantujących utrzymywanie, dla określonej amplitudy sygnału referencyjnego i momentu obciążenia, prędkości kątowej oraz składowej q wektora przestrzennego prądu stojana w dopuszczalnych zakresach, habilitant zaadaptował metodę Deba do selekcji rozwiązań. Wybór wynikał z dużej efektywności metody selekcji oraz z braku parametrów wymagających zdefiniowania.

Rozwinięciem prac dotyczących automatycznej metody doboru nastaw regulatora SFC bazującej na algorytmie ABC były badania obejmujące strojenie regulatorów prędkości dla silnika PMSM o stałych [VI] oraz o przestrajanych na bieżąco [V] współczynnikach wzmocnień a także regulatora napięcia dla przekształtnika DC-DC typu buck [VIII]. Habilitant wyznaczył sobie cel polegający na opracowaniu metodyki automatycznego strojenia regulatorów SFC uwzględniającej praktyczne aspekty związane ze sterowaniem układami

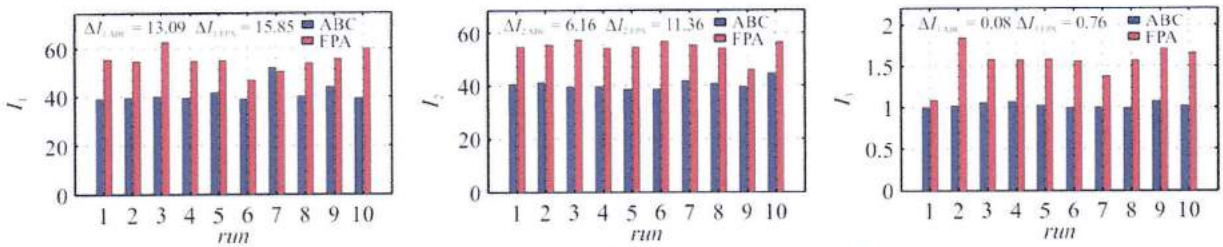
napędowymi i przekształtnikami energoelektronicznymi (tj. występowanie wyższych harmonicznych w sygnałach sterujących i mierzonych, obecność niemierzalnych zakłóceń). W ramach prac badawczych zaproponowane zostały złożone funkcje celu umożliwiające uzyskanie założonych właściwości układu regulacji. W procesie autostrojenia regulatorów SFC prędkości dla silnika PMSM stosowane funkcje celu gwarantowały: sterowanie z zerową składową *d* wektora przestrzennego prądu, zerowy uchyb ustalony prędkości kątowej oraz relatywnie gładki przebieg składowej *q* wektora przestrzennego sygnału sterującego istotny z punktu widzenia aplikacji regulatora w układzie rzeczywistym [V, VI]. Składnik odpowiedzialny za relatywnie gładki przebieg sygnału sterującego został również uwzględniony w funkcji celu stosowanej podczas autostrojenia regulatora SFC napięcia dla przekształtnika DC-DC typu buck [VIII]. W celu zapewnienia kompensacji niemierzalnych zakłóceń (tj. momentu obciążenia w przypadku napędu z PMSM oraz prądu obciążenia w przypadku przekształtnika DC-DC) w procesach autostrojenia zastosowano odpowiednio przygotowane zbiory sygnałów uwzględniające m.in. skokowe zmiany zakłóceń. Przykładowy przebieg funkcji celu zarejestrowany podczas autostrojenia regulatora prędkości silnika PMSM przedstawiono na Rys. 9.a, natomiast Rys. 9.b obrazuje ewolucję przebiegu prędkości kątowej podczas autostrojenia w odpowiedzi na skokowe zmiany prędkości zadanej. Widoczne w przedziale czasu $t \in [200; 300]$ ms fluktuacje prędkości kątowej są spowodowane skokowymi zmianami momentu obciążenia wprowadzonymi w celu uzyskania kompensacji niemierzalnego zakłócenia przez układ regulacji [VI].



Rys. 9. Ewolucja: a) funkcji celu, b) przebiegu prędkości kątowej silnika zarejestrowana podczas autostrojenia regulatora SFC [VI].

W kolejnym etapie prac badawczych wykonane zostały badania porównawcze metody ABC oraz algorytmu optymalizacyjnego wzorowanego na procesie zapylania kwiatów (*ang*. Flower Pollination Algorithm – FPA) w zastosowaniu do autostrojenia regulatora SFC prędkości dla silnika PMSM [I]. Wybór FPA wynikał z wykazanej przez twórcę algorytmu, prof. Xin-She Yanga, lepszej zbieżności oraz mniejszej złożoności obliczeniowej w porównaniu z powszechnie stosowanymi algorytmami PSO i GA a także z ograniczonej do dwóch liczbie ustalanych przez użytkownika parametrów. Wzorując się na rozwiązaniach zastosowanych w algorytmie ABC, habilitant zaadaptował metodę Deba zapewniającą prowadzenie procesu autostrojenia z uwzględnieniem ograniczeń nakładanych na wybrane zmienne stanu napędu. Zastosowanie FPA do autostrojenia regulatora SFC jest w pełni autorskim pomysłem i zgodnie z posiadaną przez habilitanta wiedzą podobne rozwiązania

nie były wcześniej prezentowane w literaturze dotyczącej automatyki napędu elektrycznego. W badaniach porównawczych położono nacisk na powtarzalność procesu autostrojenia oraz uniwersalność algorytmów analizowaną poprzez zastosowanie różnych funkcji celu. Przykładowe porównanie wartości końcowych trzech funkcji celu zarejestrowane dla obu analizowanych algorytmów optymalizacyjnych (tj. ABC i FPA) w 10-ciu niezależnych próbach przedstawiono na Rys. 10. Na podstawie uzyskanych wyników zarekomendowano algorytm ABC do autostrojenia regulatora SFC prędkości dla silnika PMSM. Wyniki badań oraz wyciągnięte z nich wnioski zostały szczegółowo omówione w [I].



Rys. 10. Wartości końcowe trzech funkcji celu zarejestrowane dla algorytmów optymalizacyjnych ABC i FPA w 10-ciu niezależnych próbach [I].

Rezultatem prowadzonych prac są gotowe procedury strojenia regulatorów SFC przy użyciu algorytmów ABC i FPA obejmujące: przygotowanie funkcji celu, dobór parametrów algorytmu optymalizacyjnego oraz przygotowanie przebiegów referencyjnych. Habilitant opracował komplet skryptów dla środowiska Matlab/Simulink uzupełnionego pakietem Plecs umożliwiających strojenie metodami ABC oraz FPA regulatorów SFC dla napędów elektrycznych i przekształtników energoelektronicznych. Zdaniem habilitanta bazujące na inspirowanych przyrodą algorytmach optymalizacyjnych strojenie regulatorów SFC uwzględniające ograniczenia i zakłócenia występujące w sygnałach ma duży potencjał praktyczny, ponieważ umożliwia stosowanie struktur regulacji, dla których nie istnieją jeszcze analityczne metody wyznaczania nastaw. W ramach prac badawczych realizowanych przez doktoranta znajdującego się pod opieką habilitanta opracowywany jest adaptacyjny regulator SFC z predykcją ograniczeń dla napędu z silnikiem PMSM o zmiennych parametrach.

Podsumowanie

Celem prowadzonych przez habilitanta badań było opracowanie bazujących na sprzężeniu od wektora stanu struktur regulacji z predykcją ograniczeń i autostrojeniem, które zostały zastosowane w napędach elektrycznych z silnikami PMSM oraz w przekształtniku DC-DC obniżającym napięcie. Założeniem prac było wyeliminowanie dwóch podstawowych wad sterowania bazującego na sprzężeniu od wektora stanu, tj. braku ograniczeń „wewnętrznych" zmiennych stanu oraz relatywnie skomplikowanego procesu strojenia, które zdaniem habilitanta znacząco obniżały możliwości wykorzystania rozważanej struktury na szeroką skalę. Wprowadzenie ograniczeń do omawianej struktury regulacji zostało zrealizowane przy użyciu dyskretnych predykcyjnych modeli obiektu. Zaproponowana predykcja ograniczeń jest wprowadzana *„a posteriori"* do układu regulacji z wstępnie zaprojektowanym regulatorem liniowym, co zapewnia relatywnie małą złożoność

obliczeniową. Uproszczenie procedury strojenia regulatorów SFC zostało zrealizowane poprzez zastosowanie inspirowanego przyrodą algorytmu optymalizacyjnego sztucznej kolonii pszczół do automatycznego wyznaczania współczynników wzmocnień regulatora. Opracowano procedury strojenia regulatorów uwzględniające: dobór parametrów algorytmu optymalizacyjnego, przygotowanie funkcji celu oraz przebiegów referencyjnych. Otrzymane rezultaty wpisują się do dwóch obszarów związanych z teorią sterowania: bazujących na sprzężeniu od wektora stanu regulatorów z ograniczeniami oraz inspirowanych przyrodą metod automatycznego strojenia regulatorów.

W obszarze bazujących na sprzężeniu od wektora stanu regulatorów z predykcją ograniczeń do najważniejszych osiągnięć habilitant zalicza wymienione poniżej rezultaty badań.

- *Opracowanie efektywnej metody wprowadzania ograniczenia „wewnętrznej" zmiennej stanu do układu sterowania z bazującym na sprzężeniu od wektora stanu regulatorem liniowym.* Korzystając z dyskretnych predykcyjnych równań opisujących model obiektu regulacji opracowano metodę predykcji ograniczeń. Habilitant zaimplementował oraz przetestował w badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych układ regulacji prędkości silnika PMSM z regulatorem SFC i predykcją ograniczeń. Wykazano, że opracowana metoda umożliwia utrzymywanie wybranej zmiennej stanu w żądanym przedziale [IX].
- *Analiza możliwości zastosowania metody MPAC w układach regulacji z nieliniowymi regulatorami SFC o współczynnikach wzmocnień przestrajanych na bieżąco.* W trakcie prac zmodyfikowano metodę wprowadzania ograniczeń do układu regulacji poprzez zastosowanie równania predykcyjnego z niestacjonarnym parametrem skorelowanym z wartością zmiennej stanu [III]. Wykazano możliwość zastosowania metody predykcji ograniczeń w układach regulacji z regulatorami o przestrajanych na bieżąco współczynnikach wzmocnień [III, V].
- *Rozwinięcie metody predykcji ograniczeń polegające na możliwości limitowania większej liczby zmiennych stanu złożonego układu regulacji z regulatorem bazującym na sprzężeniu od wektora stanu.* Opracowano sekwencyjną procedurę wykorzystującą równania predykcyjne do nakładania ograniczeń na większą liczbę zmiennych stanu. Habilitant przeanalizował wpływ wartości okresu dyskretyzacji równań różniczkowych stosowanych w predykcji ograniczeń na trajektorie limitowanych zmiennych stanu [II].
- *Uzyskanie poprawy jakości sterowania po zastosowaniu regulatorów bazujących na sprzężeniu od wektora stanu z predykcją ograniczeń.* Habilitant, w badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych, porównywał właściwości dynamiczne (m.in. czasy narastania, pasmo przenoszenia, kompensacja niemierzalnego zakłócenia) zaproponowanej struktury regulacji z predykcją ograniczeń, struktury regulacji z regulatorem bazującym na sprzężeniu od wektora stanu bez ograniczeń oraz

kaskadowej struktury regulacji z regulatorami PI. Uzyskanym efektem jest znacząca poprawa właściwości dynamicznych [II, III, IV, VII, IX].

- *Analiza złożoności obliczeniowej opracowanej metody predykcji ograniczeń.* Habilitant, w badaniach eksperymentalnych wykonanych na stanowiskach badawczych wyposażonych w przekształtniki (tj. falownik oraz przekształtnik DC-DC) z wysokosprawnymi łącznikami półprzewodnikowymi z węglika krzemu, wykazał możliwość zastosowania sterowania bazującego na sprzężeniu od wektora stanu z predykcją ograniczeń w układach charakteryzujących się wysoką częstotliwością przełączeń ($f_{PWM} \geq 22$ kHz) oraz relatywnie krótkim czasem dysponowanym na wykonanie algorytmu ($T = T_s/2 = 22{,}5$ µs) [II – V, VII]. Uzyskano strukturę regulacji, która nie wymaga znaczącej mocy obliczeniowej i może być implementowana w typowych mikroprocesorach stosowanych w komercyjnych napędach i przekształtnikach energoelektronicznych.

W zakresie zastosowania inspirowanego przyrodą algorytmu sztucznej kolonii pszczół do automatycznego strojenia regulatorów bazujących na sprzężeniu od wektora stanu do oryginalnych autorskich osiągnięć habilitant zalicza wymienione poniżej zagadnienia.

- *Zaadaptowanie algorytmu optymalizacyjnego sztucznej kolonii pszczół do automatycznego wyznaczania wartości macierzy wagowych stosowanych w procesie wyznaczania współczynników wzmocnień regulatora liniowo-kwadratowego.* Habilitant zaproponował metodykę automatycznego strojenia nastaw regulatora uwzględniającą utrzymywanie wybranych zmiennych stanu w żądanych zakresach oraz minimalizującą przyjętą całkową funkcję celu. Uzyskano regulator SFC utrzymujący dla ustalonej amplitudy sygnału referencyjnego wybrane zmienne stanu i sygnał sterujący w dozwolonych zakresach. Skuteczność zastosowanej metody potwierdzono w procesie automatycznego strojenia regulatora SFC dla serwonapędu z silnikiem PMSM [IV, X].
- *Uwzględnienie w procesie automatycznego strojenia praktycznych aspektów związanych ze sterowaniem napędami wektorowymi i przekształtnikami energoelektronicznymi.* Habilitant zastosował złożone funkcje celu oraz odpowiednio przygotowane zbiory sygnałów, co umożliwiło uzyskanie pożądanych właściwości układów regulacji. W rezultacie otrzymano regulatory SFC spełniające wymogi istotne w układach rzeczywistych [V, VI, VIII].
- *Przeprowadzenie badań porównawczych dwóch inspirowanych przyrodą algorytmów optymalizacyjnych z ograniczeniami zastosowanych do automatycznego strojenia regulatora SFC prędkości silnika PMSM.* Habilitant zaadaptował drugi algorytm optymalizacyjny wzorowany na zapylaniu kwiatów do autostrojenia regulatora bazującego na sprzężeniu od wektora stanu. Wykazano lepszą zbieżność oraz większą powtarzalność algorytmu sztucznej kolonii pszczół w procesie autostrojenia, a także zidentyfikowano właściwości algorytmu ABC odpowiedzialne za jego przewagę nad algorytmem FPA w rozważanym przypadku [I].

Należy podkreślić, że przedstawione w [I - IX] prace badawcze obejmowały procedury syntezy i analizy opracowanych algorytmów z uwzględnieniem badań symulacyjnych, implementacji sprzętowej oraz weryfikacji w badaniach wykonanych na stanowiskach laboratoryjnych. Badania eksperymentalne dotyczące sterowania przekształtnikiem energoelektronicznym DC-DC wykonano z wykorzystaniem karty dSpace 1104 [B], natomiast badania w zakresie sterowania napędami elektrycznymi prowadzono na dwóch stanowiskach laboratoryjnych wyposażonych odpowiednio w procesor sygnałowy TMS320F2812 [A] oraz w mikroprocesor STM32F407VGT6 z rdzeniem ARM Cortex-M4 [C].

Aktualne prace habilitanta koncentrują się wokół dwóch zagadnień związanych ze sterowaniem napędami elektrycznymi i przekształtnikami energoelektronicznymi. Pierwszy obszar obejmuje praktyczną implementację sterowania predykcyjnego w układach o relatywnie krótkiej stałej czasowej oraz wysokiej częstotliwości przełączeń. Drugi nurt związany jest opracowaniem sterowania adaptacyjnego dla napędu z silnikiem PMSM o zmiennej bezwładności. Planowane jest zastosowanie regulatora ze sprzężeniem od wektora stanu i z predykcją ograniczeń wykorzystującego prawo adaptacji bazujące na algorytmie sztucznej kolonii pszczół. Wyniki badań symulacyjnych uzyskane przez doktoranta, którym opiekuje się habilitant wskazują na potencjał proponowanego rozwiązania w zakresie odporności na zmiany parametrów napędu.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

Habilitant równolegle do prac obejmujących autorską metodę predykcji ograniczeń dla układów z regulatorem bazującym na sprzężeniu od wektora stanu oraz zastosowanie inspirowanego przyrodą algorytmu optymalizacyjnego sztucznej kolonii pszczół do autostrojenia regulatora zajmował się zagadnieniami, które poniżej zostały tematycznie uszeregowane i krótko scharakteryzowane. Przedstawione badania nie zaliczają się do osiągnięcia naukowego stanowiącego podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego. Z tego względu nie zostały one załączone do dokumentacji a habilitant zdecydował się na przedstawienie poniżej wybranych wyników. Podpunkt e) niniejszego opracowania zawiera listę dodatkowych publikacji, w których znajdują się szczegółowe informacje dotyczące opisywanych badań.

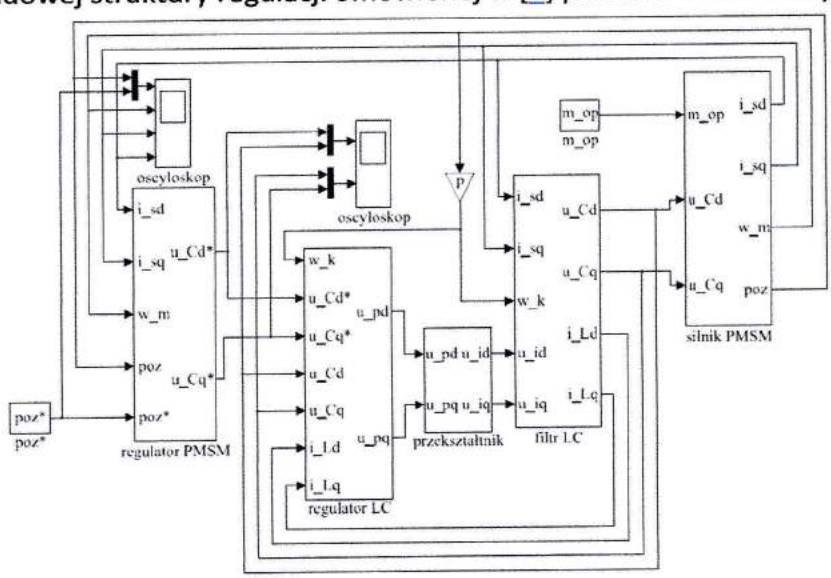
a) Sterowanie falownikiem 3-poziomowym o sinusoidalnym napięciu wyjściowym zasilającym silnik PMSM

Habilitant będąc kierownikiem projektu badawczego nr N N514 663640 (nr umowy 6636/B/T02/2011/40) pt. „Przekształtnik złożony (back-to-back converter) o topologii 3-poziomowej i sinusoidalnym napięciu wyjściowym stosowany w napędzie z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych" realizowanego w latach 2011 – 2013 prowadził badania mające na celu opracowanie autorskich struktur regulacji. Złożony charakter obiektu implikował konieczność uwzględnienia wielu wymagań odnoszących się zarówno do właściwości silnika PMSM (m.in. zapewnienie żądanych właściwości dynamicznych, eliminowanie uchybu ustalonego, kompensacja zakłócenia, sterowanie z zerową składową *d* wektora przestrzennego prądu) jak i falownika 3-poziomowego z wyjściowym filtrem LC

(m.in. kształtowanie sinusoidalnego napięcia zasilającego silnik w szerokim zakresie częstotliwości, kompensacja skokowych zmian prądu obciążenia). Opracowane podczas realizacji projektu struktury regulacji, ze względu na przyjętą topologię, podzielić można na dwie podstawowe grupy:

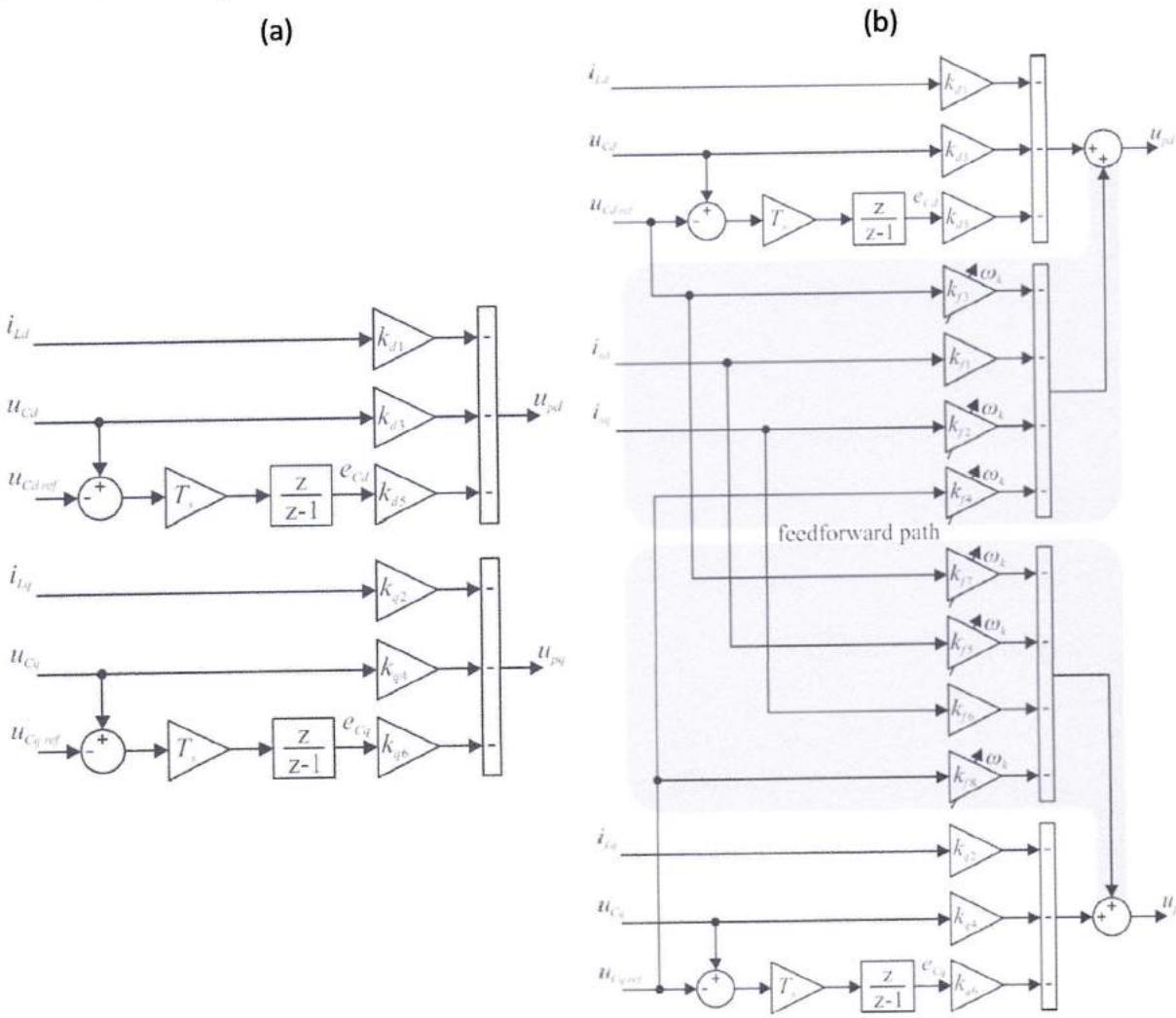
- struktura kaskadowa, w której regulatory nadrzędne (typu PI lub bazujące na sprzężeniu od wektora stanu – SFC) odpowiedzialne są sterowanie silnikiem PMSM, natomiast regulatory podrzędne (bazujące na sprzężeniu od wektora stanu – SFC) kształtują napięcie wyjściowe falownika z filtrem LC,
- struktura kompleksowa, w której jeden, złożony regulator bazujący na sprzężeniu od wektora stanu realizuje zadania związane ze sterowaniem silnikiem PMSM oraz z kształtowaniem napięcia wyjściowego falownika z filtrem LC.

Opublikowane w [1] wyniki prac badawczych nad kaskadową strukturą regulacji wyposażoną w dwa regulatory SFC wykazały możliwość zastosowania kaskadowego połączenia regulatorów w napędzie z silnikiem PMSM zasilanym z falownika kształtującego sinusoidalne napięcie wyjściowe. Założenia odnoszące się do kształtowania sinusoidalnego napięcia wyjściowego falownika z filtrem LC w szerokim zakresie częstotliwości oraz do sterowania położeniem serwonapędu PMSM [1] zostały spełnione. Ze względu na nieliniowy charakter modelu falownika z filtrem LC, habilitant zdecydował się na zaprojektowanie regulatora napięcia z przestrajanymi na bieżąco współczynnikami wzmocnień, co umożliwiło wyeliminowanie procedury linearyzacji z procesu syntezy regulatora. Na podstawie przeprowadzonej analizy, w celu zmniejszenia złożoności obliczeniowej, wyeliminowano z regulatora napięcia współczynniki o pomijalnie małym wpływie na przebieg procesu regulacji. W trakcie prac nad kaskadową strukturą regulacji wykazano również, że możliwe jest pominięcie wewnętrznej pętli regulacji odpowiedzialnej za kształtowanie napięcia sinusoidalnego podczas syntezy układu regulacji przeznaczonego dla silnika PMSM. Schemat blokowy kaskadowej struktury regulacji omówionej w [1] przedstawiono na Rys. 11.



Rys. 11. Kaskadowa struktura regulacji serwonapędu z silnikiem PMSM zasilanym z falownika wyposażonego w filtr LC [1].

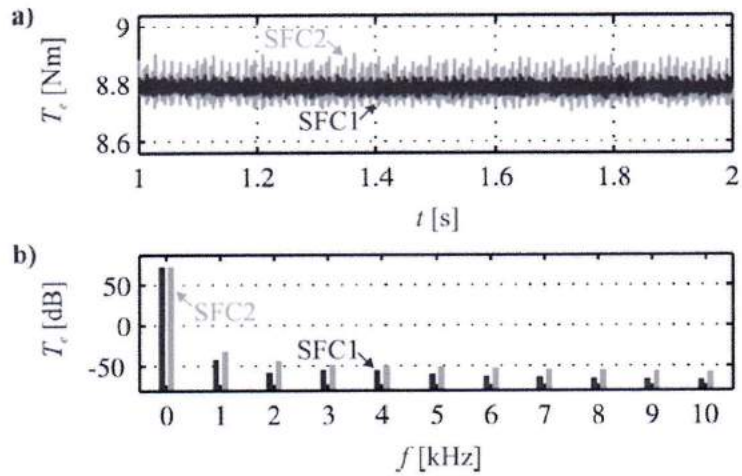
Drugi wariant opracowanej struktury kaskadowej zawiera w pętli nadrzędnej (odpowiedzialnej za sterowanie silnikiem PMSM) regulatory typu PI, natomiast w pętli podrzędnej regulator SFC [4, 6]. Podczas prac nad regulatorem SFC odpowiedzialnym za kształtowanie napięcia wyjściowego falownika z filtrem LC habilitant przeanalizował wpływ dodatkowego sprzężenia wprzód od sygnałów zadanych (składowe wektora przestrzennego napięć wyjściowych filtra LC) oraz od zakłócenia (składowe wektora przestrzennego prądu silnika) na tętnienia momentu elektromagnetycznego silnika. Analizowane były dwie struktury regulacji, których proces projektowania został szczegółowo omówiony w [6], natomiast schematy blokowe, uwzględniające tylko niezerowe współczynniki wzmocnień, przedstawiono odpowiednio na Rys. 12.a oraz 12.b.



Rys. 12. Schematy blokowe bazujących na sprzężeniu od wektora stanu regulatorów odpowiedzialnych za kształtowanie napięcia wyjściowego falownika z filtrem LC: a) podstawowa, b) rozbudowana o sprzężenie w przód z przestrajanymi na bieżąco współczynnikami wzmocnień [6].

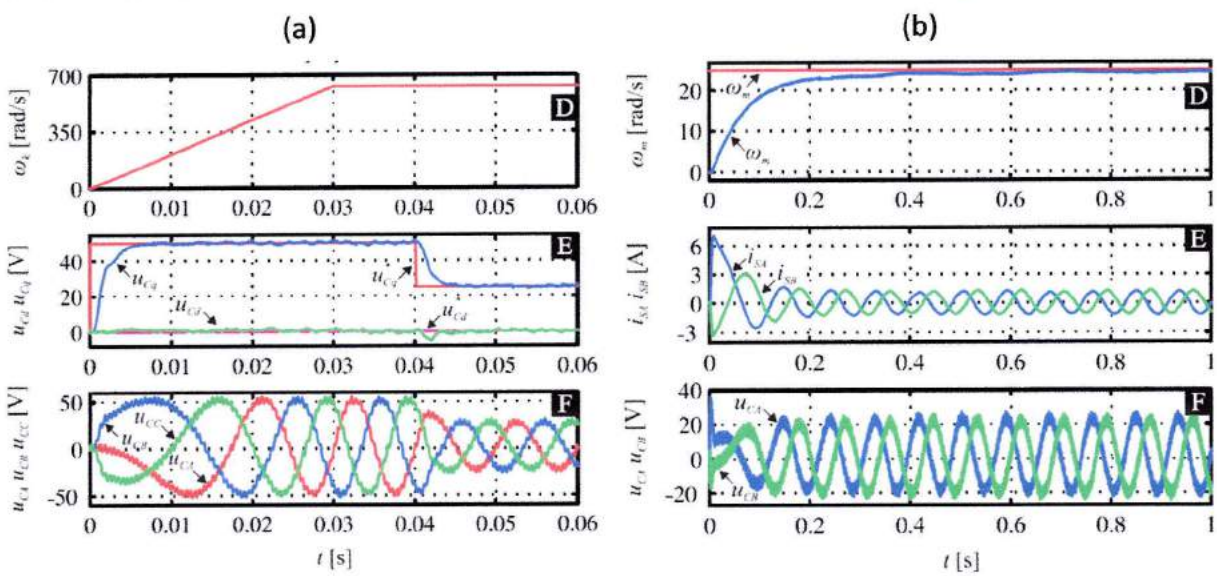
Przeprowadzona dla opracowanych struktur regulacji analiza tętnień momentu elektromagnetycznego silnika PMSM wykazała lepsze tłumienie tętnień w przypadku zastosowania struktury podstawowej, przedstawionej na Rys. 12.a. Wyznaczone wartości

współczynnika tętnień momentu (ang. Torque Ripple Factor – *TRF*) są prawie 3 razy mniejsze w porównaniu ze strukturą wyposażoną w sprzężenie w przód. Jest to spowodowane występowaniem w strukturze podstawowej większych wartości współczynników wzmocnień odpowiedzialnych za eliminowanie uchybu ustalonego składowych wektora przestrzennego napięcia wyjściowego, co zostało omówione w [6]. Przebiegi symulacyjne momentu elektromagnetycznego oraz jego widmo zarejestrowane dla obu rozpatrywanych struktur zamieszczono na Rys. 13.



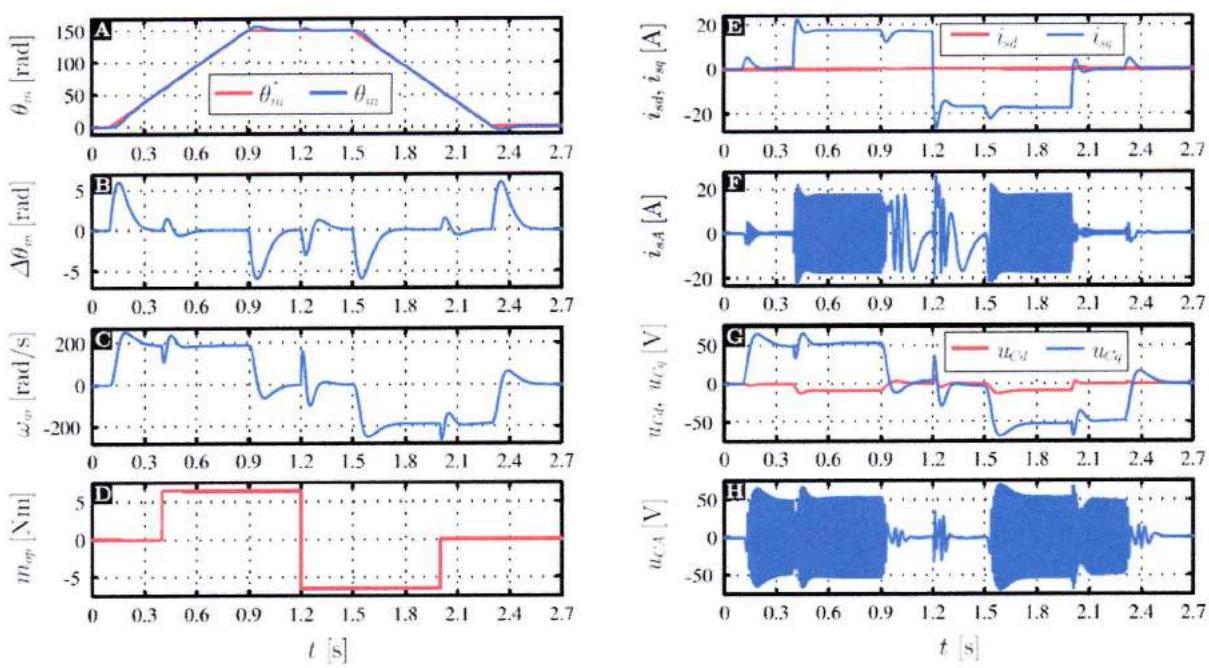
Rys. 13. Przebiegi symulacyjne: a) czasowe oraz b) widmo częstotliwościowe momentu elektromagnetycznego silnika PMSM zarejestrowane dla dwóch regulatorów SFC [6].

Zamieszczone w publikacjach [4, 6] wyniki badań eksperymentalnych potwierdziły możliwość zastosowania opracowanych struktur regulacji w napędzie z silnikiem PMSM zasilanym z kształtującego napięcie sinusoidalne falownika 3-poziomowego. Na Rys. 14.a zamieszczono przebiegi eksperymentalne uzyskane dla opracowanego układu regulacji napięcia, natomiast na Rys. 14.b zaprezentowano przebiegi eksperymentalne układu regulacji prędkości (regulatory PI) silnika PMSM zasilanego z falownika napięcia w filtrem LC [4].



Rys. 14. Przebiegi eksperymentalne zarejestrowane dla: a) układu regulacji napięcia falownika z filtrem LC, b) układu regulacji prędkości silnika PMSM [4].

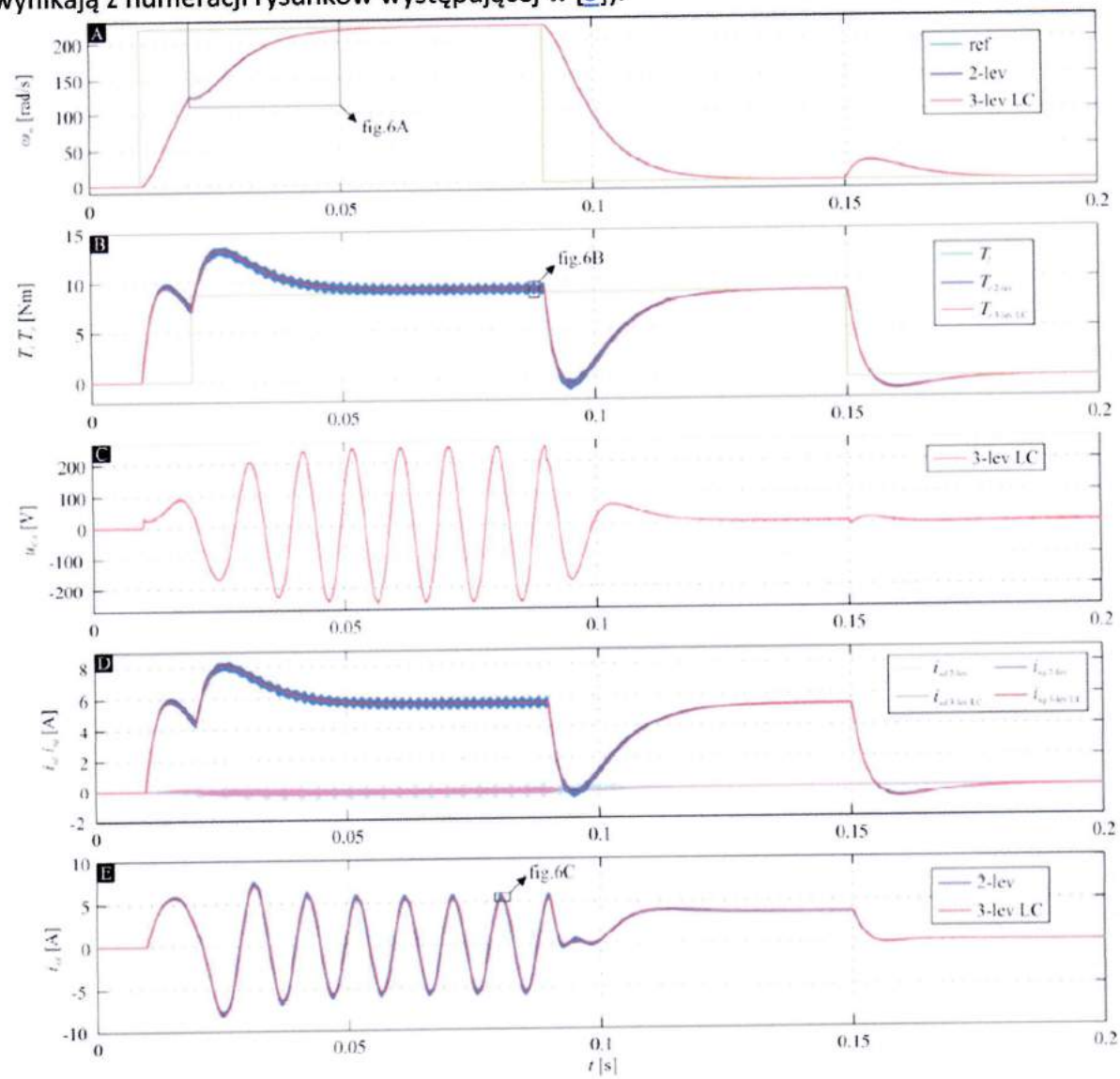
Podczas realizacji projektu badawczego habilitant opracował również kompleksową strukturę sterowania silnikiem PMSM zasilanym z falownika napięcia o sinusoidalnym napięciu wyjściowym. W strukturze zastosowano jeden regulator bazujący na sprzężeniu od wektora stanu do jednoczesnego kształtowania sinusoidalnego napięcia i sterowania prędkością lub położeniem kątowym silnika PMSM. W pracy [2] wykazano możliwość zastosowania kompleksowego regulatora SFC do sterowania serwonapędem z silnikiem PMSM zasilanym z falownika 3-poziomowego z filtrem LC. Spełnienie wymagań dotyczących właściwości statycznych i dynamicznych implikowało konieczność zastosowania regulatora o 24 współczynnikach wzmocnień, z których 7 wymagało przestrajania na bieżąco ze względu na wyeliminowanie linearyzacji z procedury syntezy. Przeprowadzona analiza wykazała możliwość aproksymowania przestrajanych współczynników wzmocnień liniowymi funkcjami, w których parametrem jest prędkość synchroniczna. Jak wykazano w [2], opracowany układ regulacji charakteryzuje się również odpornością na zmiany indukcyjności filtra LC. Przykładowe przebiegi symulacyjne obrazujące pracę serwonapędu i szczegółowo omówione w [2] przedstawiono na Rys. 15. Rys. 15.b obrazuje sprowadzanie do zera uchybu położenia kątowego w odpowiedzi na liniowe zmiany położenia zadanego (Rys. 15.a) oraz skokowe zmiany momentu obciążenia (Rys. 15.d). Regulator zapewnia zerową wartość składowej *d* wektora przestrzennego prądu stojana (Rys. 15.e) oraz sinusoidalne przebiegi prądów fazowych (Rys. 15.f) i napięć międzyfazowych (Rys. 15.h) w szerokim zakresie prędkości kątowej silnika (Rys. 15.c).



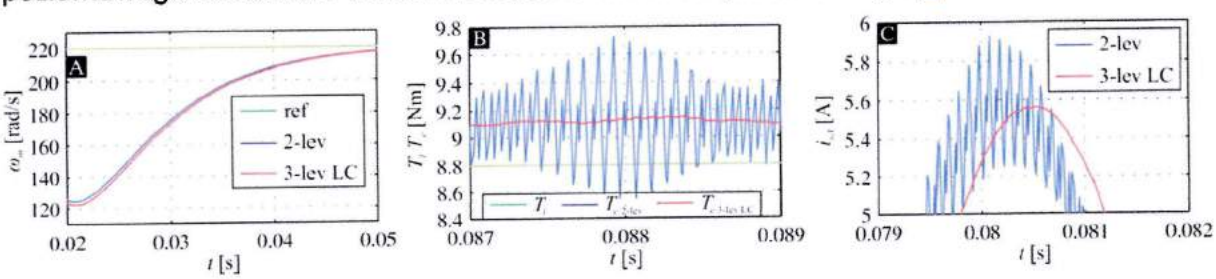
Rys. 15. Przebiegi symulacyjne obrazujące pracę serwonapędu z silnikiem PMSM zasilanym z falownika kształtującego sinusoidalne napięcie wyjściowe [2].

Korzystając z kompleksowej struktury regulacji z regulatorem SFC habilitant przeprowadził badania redukcji tętnień momentu elektromagnetycznego silnika PMSM zasilanego z 3-poziomowego falownika z filtrem LC oraz z klasycznego 2-poziomowego falownika napięcia [3]. Otrzymane wyniki symulacyjne obrazują poprawne działanie napędu

z silnikiem PMSM (Rys. 16). Powiększone fragmenty przebiegów wskazujące na nieznaczne pogorszenie dynamiki napędu spowodowane zastosowaniem dodatkowego filtra LC oraz znaczne zredukowanie pulsacji momentu elektromagnetycznego oraz pulsacji prądów fazowych zamieszczono na Rys. 17 (ich oznaczenia: fig.6A, fig.6B oraz fig.6C na Rys. 16 wynikają z numeracji rysunków występującej w [3]).

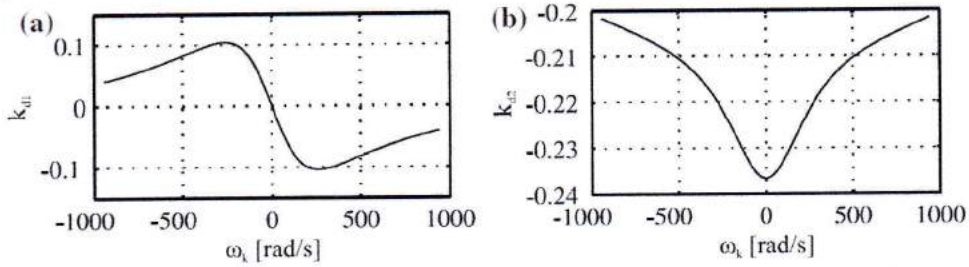


Rys. 16. Przebiegi symulacyjne obrazujące pracę napędu z silnikiem PMSM zasilanym z 3-poziomowego falownika z filtrem LC oraz z falownika 2-poziomowego [3].



Rys. 17. Powiększone fragmenty: A - prędkości kątowej, B – momentu elektromagnetycznego i momentu obciążenia, C – prądu fazowego silnika zarejestrowane przy zasilaniu PMSM z 2-poziomowego falownika napięcia oraz 3-poziomowego falownika napięcia z filtrem LC [3].

Habilitant przeprowadził również analizę właściwości dynamicznych kompleksowej struktury regulacji po zastosowaniu sprzężenia w przód od estymowanego momentu obciążenia. Ze względu na rezygnację z linearyzacji podczas syntezy regulatora SFC, otrzymane na podstawie modelu szczątkowego współczynniki wzmocnień w przód mają nieliniowy charakter i są zależne od prędkości synchronicznej (Rys. 18).



Rys. 18. Wartości współczynników sprzężenia w przód kompleksowego regulatora SFC [5].

Ze względu na nieliniowy charakter współczynników sprzężenia w przód, habilitant opracował neuronowy aproksymator bazujący na jednokierunkowej sztucznej sieci neuronowej. Dzięki zastosowaniu zmodyfikowanej struktury kompleksowego regulatora z neuronowym aproksymatorem właściwości dynamiczne (tj. kompensacja niemierzalnego momentu obciążenia) napędu z silnikiem PMSM zasilanym z przekształtnika 3-poziomowego z filtrem LC uległy poprawie [5].

b) Sterowanie silnikiem PMSM zasilanym z falownika o regulowanej wartości obwodu pośredniczącego

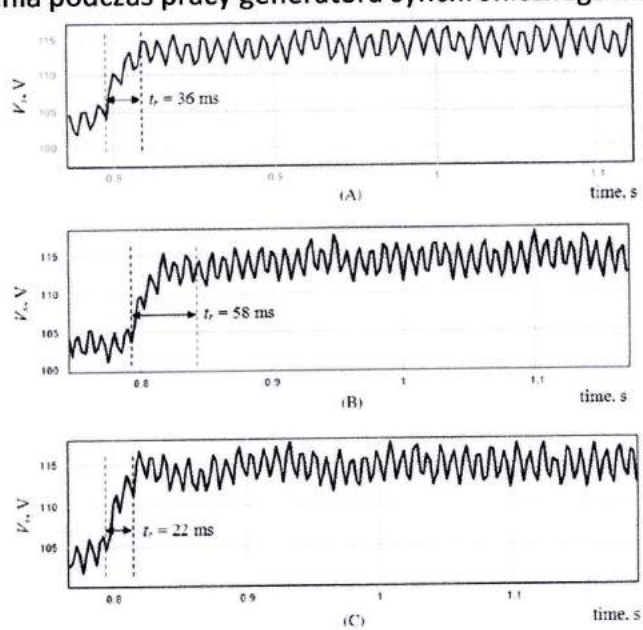
Habilitant zajmował się również tematyką redukcji tętnień momentu elektromagnetycznego silnika PMSM powstających w wyniku kształtowania napięcia metodą modulacji szerokości impulsów. Prace były prowadzone w zespole, w którym za zagadnienia naukowo-badawcze w dużym stopniu odpowiadał doktorant znajdujący się pod opieką merytoryczną habilitanta. Habilitant był natomiast odpowiedzialny za opracowanie koncepcji układu (topologii przekształtnika złożonego, struktury algorytmów sterowania), nadzorowanie prac doktoranta oraz redagowanie publikacji naukowych. Poniżej wymieniono najbardziej istotne zdaniem habilitanta rezultaty prac:

- opracowanie topologii przekształtnika złożonego (przekształtnik DC-DC + falownik napięcia) umożliwiającego płynną regulację napięcia obwodu pośredniczego [7];
- opracowanie algorytmów sterowania prędkością silnika PMSM uwzględniających zmieniającą się wartość napięcia obwodu pośredniczącego; ze względu na złożony charakter obiektu regulacji oraz zależne od punktu pracy determinowanego przez aktualną prędkość kątową i wartość napięcia obwodu DC parametry modelu opracowano przestrajane regulatory bazujące na sprzężeniu od wektora stanu; aproksymację nieliniowych zależności zrealizowano przy pomocy sztucznych sieci neuronowych; przeprowadzono badania dotyczące zastosowania jednowymiarowych [8] oraz dwuwymiarowych [9] aproksymatorów neuronowych;
- opracowanie, skonstruowanie, oprogramowanie i uruchomienie przekształtnika złożonego dedykowanego do sterowania silnikiem PMSM;

Wyniki prac badawczych potwierdzają możliwość redukcji tętnień momentu elektromagnetycznego silnika PMSM spowodowanych prostokątną falą napięcia zasilającego poprzez zastosowanie złożonego przekształtnika energoelektronicznego oraz opracowanych algorytmów sterowania [8]. Tematyka prac jest, zdaniem habilitanta, istotna ze względu na wskazywany w publikacjach naukowych negatywny wpływ tętnień momentu na żywotność silnika oraz na emisję hałasu akustycznego i wibracji.

c) Odporne sterowanie ze sprzężeniem wprzód wzbudzeniem generatora synchronicznego

Prezentowane rozwiązanie jest efektem nawiązanej przez habilitanta w 2016 roku współpracy naukowej z zespołem dra Djordje Stojica (Electrical Institute Nikola Tesla, Belgrad, Serbia). Celem prowadzonych prac było opracowanie sterowania wzbudzeniem generatora synchronicznego charakteryzującego się odpornością na zmiany wybranych parametrów systemu. W publikacji [10] przedstawiono autorski sposób wyznaczenia współczynnika sprzężenia w przód dla układu regulacji napięcia wzbudzenia z regulatorem typu PI. W zaproponowanym rozwiązaniu sprzężenie w przód bazuje na kompensacji spadku napięcia na rezystancji wirnika. Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie zaproponowanego sprzężenia w przód zwiększa odporność omawianego układu regulacji w porównaniu z układem regulacji bez sprzężenia w przód oraz z układem regulacji posiadającym sprzężenie w przód bazujące na kompensacji składowej *d* wektora przestrzennego prądu obciążenia. Na Rys. 19 przedstawiono przebiegi zarejestrowane dla 3 regulatorów wzbudzenia podczas pracy generatora synchronicznego z obciążeniem *RL* [10].



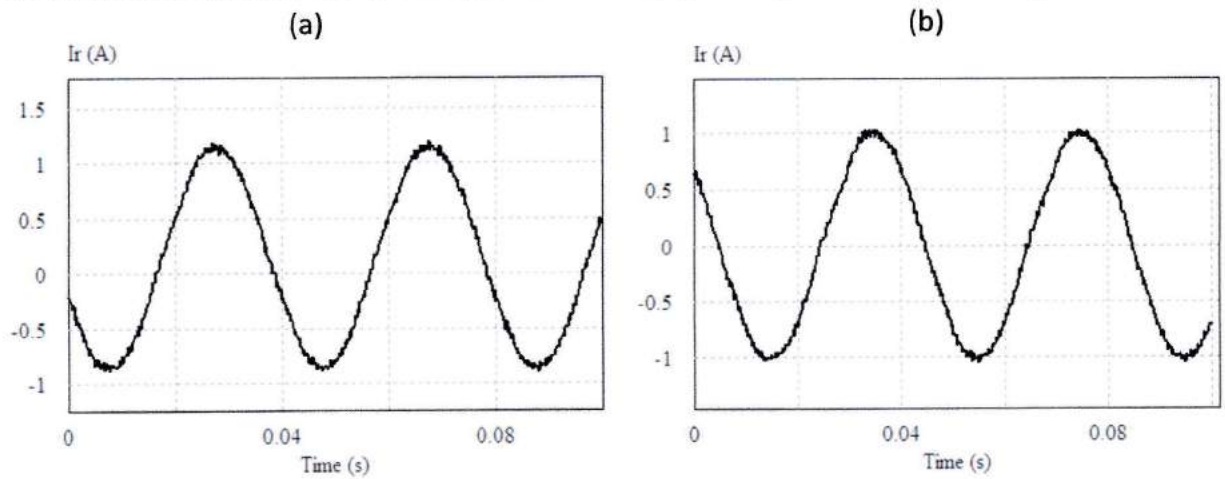
Rys. 19. Odpowiedzi skokowe układu regulacji wzbudzenia obciążonego generatora z: a) regulatorem PI bez sprzężenia zwrotnego, b) regulatorem PI ze sprzężeniem wprzód od prądu obciążenia, c) regulatorem PI ze sprzężeniem wprzód od prądu wirnika [10].

Przedstawione przebiegi ilustrują właściwości dynamiczne analizowanych struktur regulacji. Widoczne na Rys. 19.a i 19.b wydłużenie czasu narastania napięcia z pierwotnych 18 ms

wskazuje na dużo gorszą odporność struktur regulacji w porównaniu do zaproponowanego rozwiązania (Rys. 19.c).

d) Regulator proporcjonalno-całkujący z członem rezonansowym pracujący w stacjonarnym prostokątnym układzie współrzędnych

Prezentowane rozwiązanie jest efektem nawiązanej przez habilitanta w 2016 roku współpracy naukowej z zespołem dra Djordje Stojica (Electrical Institute Nikola Tesla, Belgrad, Serbia). Celem prac badawczych było opracowanie regulatora proporcjonalno-całkującego z członem rezonansowym (*ang.* proportional-integral-resonant – PIR) kształtującego sinusoidalny prąd 3-fazowego obciążenia *RLE* oraz umożliwiającego kompensację zakłóceń wprowadzanych do układu przez nieliniowe obciążenie. Dodatkowe założenia dotyczące syntezy regulatora obejmowały zredukowanie do niezbędnego minimum liczby strojonych parametrów oraz opracowanie procedury doboru nastaw. W publikacji [11] przedstawiono zmodyfikowaną strukturę regulatora PIR. Zastosowanie toru całkującego w strukturze regulatora zapewniło kompensację zakłóceń stałych, natomiast dodatkowe sprzężenie zwrotne pełniące rolę „aktywnej rezystancji" umożliwiło kompensowanie zakłóceń wysokoczęstotliwościowych. W celu uproszczenia procedury strojenia regulatora zaproponowano metodę, w której nastawy wyznaczane są na podstawie stałej czasowej obciążenia oraz przyjętych wartości zapasu fazy i częstotliwości odcięcia. Zamieszczone w pracy [11] wyniki badań eksperymentalnych wskazują na poprawne działanie opracowanej struktury regulacji. Na Rys. 20 zamieszczono przykładowe przebiegi prądu fazowego silnika indukcyjnego zarejestrowane w stanie ustalonym, po wprowadzeniu do układu stałego zakłócenia, dla regulatorów PR (Rys. 20.a) oraz PIR (Rys. 20.b).



Rys. 20. Prąd fazowy silnika indukcyjnego dla ω_e = 50 rad/s, zablokowanego wału oraz zakłócenia stałego V_r = 10 V dla: a) regulatora PR, b) regulatora PIR [11].

Widoczny na Rys. 20.a offset prądu został skutecznie wyeliminowany poprzez zastosowanie członu całkującego. Zaproponowane rozwiązanie może znaleźć zastosowanie m.in. w napędach AC oraz zasilaczach awaryjnych. Algorytmy sterowania z regulatorami rezonansowymi są nadal rozwijane przez międzynarodowy zespół badawczy, w którego skład wchodzi habilitant. Aktualnie przygotowywana jest publikacja, w której przedstawiono zmodyfikowaną strukturę regulatora multirezonansowego wraz z procedurą doboru nastaw.

e) Wykaz opublikowanych prac naukowych dotyczących pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych omówionych w punkcie 5.

[1] T. Tarczewski, L.M. Grzesiak, „Sterowanie od stanu serwonapędem z silnikiem PMSM zasilanym z przekształtnika o sinusoidalnym napięciu wyjściowym", *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 88 NR 4b/2012, pp. 252–258, 2012. Punktacja MNiSW: 15 (załączony do listy MNiSW w wykazie A, uwzględniony w bazie WoS, jednak nie wyznaczono **IF**).

[2] T. Tarczewski, L.M. Grzesiak, „State feedback control of the PMSM servo-drive with sinusoidal voltage source inverter", *15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC 2012)*, pp. DS2a.6-1-DS2a.6-6, 2012. Punktacja MNiSW: 10 (Web of Science).

[3] T. Tarczewski, L.M. Grzesiak, „PMSM fed by 3-level NPC sinusoidal inverter with discrete state feedback controller", *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'13 ECCE Europe)*, pp. P.1–P.9, 2013.

[4] T. Tarczewski, L.M. Grzesiak, A. Wawrzak, K. Karwowski, K. Erwiński, „Układ laboratoryjny napędu z silnikiem PMSM sterowanym z kształtującego napięcie ciągłe 3-poziomowego falownika napięcia typu NPC", *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 90 NR 6/2014, pp. 231–238, 2014. Punktacja MNiSW: 10.

[5] L.M. Grzesiak, T. Tarczewski, „State Feedback Control with ANN Based Load Torque Feedforward for PMSM Fed by 3-level NPC Inverter with Sinusoidal Output Voltage Waveform", rozdział w książce: *Lecture Notes in Electrical Engineering*: 325, pp. 73-90, 2015, Springer-Verlag. Punktacja MNiSW: 15.

[6] T. Tarczewski, L.M. Grzesiak, A. Wawrzak, K. Karwowski, K. Erwiński, „A state-space approach for NPC type 3-level sine wave inverter used in FOC PMSM drive", *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, vol. 62, no. 3, pp. 439-448, 2014. Punktacja MNiSW: 25, **IF: 0,914**.

[7] Ł.J. Niewiara, T. Tarczewski, L.M. Grzesiak, „Trójfazowy mostkowy falownik napięcia o regulowanym napięciu obwodu pośredniczącego", *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 90 NR 6/2014, pp. 109–114, 2014. Punktacja MNiSW: 10.

[8] T. Tarczewski, Ł.J. Niewiara, L.M. Grzesiak, „Torque ripple minimization for PMSM using voltage matching circuit and neural network based adaptive state feedback control", *16th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe)*, pp. P.1–P.10, 2014. Punktacja MNiSW: 10 (Web of Science).

[9] Ł.J. Niewiara, T. Tarczewski, L.M. Grzesiak, „Application of artificial neural network state feedback controller to torque ripple minimization of PMSM", *11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*, pp. 363-369, 2014.

[10] D. Stojic, T. Tarczewski, D. Joksimovic, N. Milojcic, Z. Janda, Z. Zoran, „Robust synchronous generator excitation based on novel feedforward control", *International*

Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 27, no. 9, pp. 1-11, 2017. Punktacja MNiSW: 25, **IF: 1,085**.

[11] D. Stojic, T. Tarczewski, I. Klasnic, „Proportional-integral-resonant AC current controller", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 81-88, 2017. Punktacja MNiSW: 15, **IF: 0,595**.

6. Podsumowanie

Aktywność naukowa habilitanta obejmuje, oprócz badań naukowych, działania popularyzujące naukę oraz dotyczące dydaktyki. Poniżej przedstawione zostały efekty podejmowanych przez habilitanta działań.

- Artykuły opublikowane w czasopismach indeksowanych w bazie Journal Citation Report (JCR): **9**.
- Publikacje w recenzowanych czasopismach krajowych lub zagranicznych innych, niż indeksowane w bazie Journal Citation Report (JCR): **18**.
- Sumaryczny Impact Factor publikacji naukowych według listy Journal Citation Report (JCR) po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych: **17,842**.
- Sumaryczna liczba przyznanych punktów na rok publikacji określonych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego: **524**.
- Całkowita liczba cytowań publikacji na podstawie bazy Web of Science Core Collection (z autocytowaniami/bez autocytowań): **52/34**.
- Indeks Hirscha według bazy Web of Science Core Collection: **5**.
- Całkowita liczba cytowań publikacji na podstawie bazy Scopus (z autocytowaniami/bez autocytowań): **99/45**.
- Indeks Hirscha według bazy Scopus: **5**.
- Całkowita liczba cytowań publikacji na podstawie bazy Google Scholar (z autocytowaniami/bez autocytowań): **145/80**.
- Indeks Hirscha według bazy Scopus: **7**.
- Kierowanie krajowymi projektami badawczymi lub udział w takich projektach: **1**.
- Krajowe nagrody za działalność naukową: **2**.
- Prezentowanie referatów na międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych (**11**) oraz liczba referatów opublikowanych w materiałach konferencyjnych (**17**).
- Udział komitetach naukowych lub programowych międzynarodowych konferencji naukowych: **3**.
- Członkostwo w międzynarodowych organizacjach i towarzystwach naukowych: **1**.
- Staże w zagranicznych ośrodkach naukowych: **1**.
- Recenzowanie artykułów zgłoszonych do czasopism indeksowanych w bazie Journal Citation Report (JCR):
    - IEEE Transactions on Industrial Electronics: **24**.
    - Compel: **8**.
    - IEEE Transactions on Industrial Informatics: **6**.

  - IEEE Transactions on Mechatronics: **4**.
  - IET Power Electronics: **3**.
  - IEEE Transactions on Power Electronics: **3**.
- Recenzowanie referatów zgłoszonych na międzynarodowe konferencje naukowe: CybConf 2015, EPE ECCE – Europe w latach 2015 – 2018, ICINCO w latach 2016 – 2018: **44**
- Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze promotora pomocniczego: **1**.
- Popularyzacja nauki w ramach Toruńskiego Festiwalu Nauki i Sztuki: **7**.
- Opieka naukowa nad studentami: **32** inż.
- Opieka naukowa nad studentami zagranicznymi realizującymi trzymiesięczne staże w ramach programu Erasmus/Erasmus+: **8**.

Tomasz Tarczewski

Podpis wnioskodawcy