

TOMASZ PAJCHROWSKI
POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY

ZAŁĄCZNIK NR 2

Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych



AUTOREFERAT

1. Imię i Nazwisko

Tomasz Pajchrowski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe, z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytuł rozprawy doktorskiej

magister inżynier elektryk, Politechnika Poznańska, 1999.

Doktor nauk technicznych. Dziedzina: *nauki techniczne*. Dyscyplina: *Automatyka i Robotyka*. Specjalność: *Automatyka Napędu Elektrycznego*. Tytuł nadany uchwałą Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej w dniu 18.10.2005 na podstawie rozprawy doktorskiej pt. „*Odporne sterowanie serwonapędem z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych*”, Politechnika Poznańska, 2005.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Od 01.02.2000 do 31.08.2002 zatrudniony w wymiarze pełnego etatu na stanowisku asystenta w Instytucie Elektrotechniki Przemysłowej na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej.

Od 01.09.2002 do 31.01.2006 zatrudniony w wymiarze pełnego etatu na stanowisku asystenta w Instytucie Automatyki i Inżynierii Informatycznej na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej.

Od 01.02.2006 zatrudniony w wymiarze pełnego etatu na stanowisku adiunkta w Instytucie Automatyki i Inżynierii Informatycznej na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr. 65, poz. 595 ze zm.) wraz z nowelizacją ustawy z dnia 11 Lipca 2014 r:

a) Tytuł osiągnięcia naukowego

Cykl publikacji powiązanych tematycznie pt. „Sterowanie napędem z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych z wykorzystaniem metod inteligencji obliczeniowej w warunkach zmian parametrów mechanicznych układu” – cykl zawiera łącznie 14 publikacji.

b) Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

Prace wspólne

1. **Pajchrowski T.**, Zawirski K., Nowopolski K., *Neural Speed Controller Trained On-Line by Means of Modified RPROP Algorithm*, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Volume:11, Issue: 2, April 2015, p. 560 – 568, ISSN 1551-3203.
Punkty MNiSW(2014)=50 (Lista A MNiSW z 2014); IF(2013)=8,785; IF (5-letni)=6,874.
2. **Pajchrowski T.**, Zawirski K., Nowopolski K., *Application of Adaptive Neural Controller for Drive with Elastic Shaft and Variable Moment of Inertia*, 17th Conference on Power Electronics and Applications, EPE'15-ECCE Europe, Geneva, Switzerland, 8-10 September, 2015, ISBN: 9789075815238 and CFP15850-USB.
3. **Pajchrowski T.**, Janiszewski D., *Control Of Multi-Mass System By On-Line Trained Neural Network Based On Kalman Filter*, 17th Conference on Power Electronics and Applications, EPE'15-ECCE Europe, Geneva, Switzerland, 8-10 September, 2015, ISBN: 9789075815238 and CFP15850-USB.
4. **Pajchrowski T.**, Kogut W., *Adaptacyjne sterowanie neuronowym regulatorem prędkości dla napędu bezpośredniego z silnikiem PMSM*, XII Krajowa Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, SENE 2015, ISBN: 978-83-7283-697-7, materiały na płycie CD.
5. Deskur J., **Pajchrowski T.**, Zawirski K., *Speed Controller for a Drive With Complex Mechanical Structure And Variable Parameters*”, Proceedings of 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, PEMC'2014, 21-24 September 2014, Antalya/Turkey, p. 762 – 767.
Punkty MNiSW=10, konferencja indeksowana na liście WoS.
6. **Pajchrowski T.**, Zawirski, K., *Application of artificial neural network for adaptive speed control of PMSM drive with variable parameters*, COMPEL, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronics Engineering, Vol. 32, No. 4, 2013, ISSN 0332-1649.
Punkty MNiSW(2013)=15, (Lista A MNiSW z 2013r.); IF(2013)=0,440; IF(5-letni)=0,364.
7. **Pajchrowski T.**, Pankowski A., *Optymalizacja parametrów regulatora prędkości w układzie napędowym z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych*, Proc. of the XVI Scientific Conference Computer Applications in Electrical Engineering, ZKwE'2011,

Prace samodzielne

8. **Pajchrowski T.:** *Application of an Internal Model Speed Control for PMSM with variable mechanical parameters*, Proceedings of 2015 IEE 2nd International Conference on Cybernetics CYBCONF, Gdynia, Poland, 24-26 June 2015, paper on pen drive, ISBN 978-1-4799-8321-6.
Punkty MNiSW=10, konferencja indeksowana na liście WoS.
9. **Pajchrowski T.:** *The direct drive with variable moment of inertia in the structure of the reference model*, 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, PEMC, 21-24 Sept. 2014 Antalya, Turkey, pp. 831-836.
Punkty MNiSW=10, konferencja indeksowana na liście WoS.
10. **Pajchrowski T.:** *Application of Artificial Neural Network for Speed Control of Servodrive with Variable Parameters*, 10th International Conference on Mechatronics, 07-09 Oct 2013, Brno, Czech Republic, ISBN 978-3-319-02293-2.
Punkty MNiSW=10, konferencja indeksowana na liście WoS.
11. **Pajchrowski T.:** *Adaptive Neural Speed Controller for Servodrive Trained Online*, 18th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2013, Miedzyzdroje 2013, Poland, ISBN 978-1-4673-5507-0.
Punkty MNiSW=10, konferencja indeksowana na liście WoS.
12. **Pajchrowski T.:** *Robust control of PMSM system using the structure of MFC*, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 30, nr. 3, s. 979-995, 2011.
Punkty MNiSW(2012)=15 (Lista A MNiSW z 2012r.); IF(2011)=0,301; IF(5-letni)=0,311.
13. **Pajchrowski T.:** *Zastosowanie sieci neuronowej do poprawy nierównomierności prędkości obrotowej silnika momentowego*, X Krajowa Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE 2011, Łódź, 16-18 listopada 2011.
14. **Pajchrowski T.:** *Kompensacja tętnień momentu w napędzie bezpośrednim z silnikiem PMSM*, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, Vol. 72, pp. 93-100, Poznań 2012, ISSN 1897-0737.
Punkty MNiSW(2013)=4 (Lista B MNiSW z 2013r.)

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

Wprowadzenie

Przedstawiony zbiór cyklu publikacji naukowych powiązanych tematycznie obejmuje wyniki badań z zakresu zastosowania metod inteligencji obliczeniowych, zwłaszcza sztucznych sieci neuronowych do sterowania prędkością obrotową napędu bezpośredniego

z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych w warunkach zmian mechanicznych parametrów układu napędzanego.

Napęd bezpośredni to takie rozwiązanie konstrukcyjne w którym silnik elektryczny bezpośrednio jest połączony z maszyną roboczą bez przekładni mechanicznej. Od takiego silnika wymagana jest specjalna konstrukcja, która umożliwi pracę układu napędowego z małymi prędkościami obrotowymi, z reguły nieprzekraczającymi 100 obr./min, a często znacznie niższymi. Wzrost wymagań przemysłowych obserwowany od wielu lat, wymaga stosowania coraz to bardziej precyzyjnych rozwiązań, zwłaszcza w przemysłowych napędach robotów, maszynach technologicznych na przykład papierniczych, zwijarek czy innych serwonapędach. Brak przekładni mechanicznej wprowadza wiele zalet, takich jak: wyeliminowanie luzów wprowadzanych przez przekładnię, co poprawia dokładność statyczną pracy i poprawia właściwości dynamiczne napędu, zwiększa sprawność układu napędowego (wyeliminowanie strat mechanicznych w przekładni) i niezawodność (mniejsza liczba elementów mechanicznych). Wymienione zalety napędów bezpośrednich wymagają jednak stosowania odpowiednich algorytmów regulacji w układzie sterowania. W napędzie bezpośrednim moment bezwładności maszyny roboczej jest wielokrotnie wyższy niż moment własny silnika, dlatego duże zmiany momentu bezwładności tej maszyny mają wpływ na warunki pracy układu napędowego (w napędzie klasycznym z przekładnią moment bezwładności przeliczony na stronę silnika ma wartość podobną). W wielu układach napędowych moment bezwładności zależy od kąta położenia wału układu napędzanego. Dlatego zachodzi potrzeba zaprojektowania układu regulacji prędkości lub położenia wykazującego cechy odporności i adaptacyjności na zmiany parametrów mechanicznych obiektu o dobrych właściwościach dynamicznych. Zaproponowanie odpowiednich algorytmów sterowania, odpowiedniego typu regulatora czy struktury układu regulacji, który zapewni uzyskanie przez napęd elektryczny dobrej dynamiki i wysokiej precyzji sterowania jest zadaniem trudnym, którym zajmuje się wiele ośrodków naukowych oraz przemysłowych na świecie. W wielu tych pracach projektanci często odwołują się metod inteligencji maszynowej (ang. *Computational Intelligence* lub *Soft-Computing*). W syntezie tych układów regulacji zastosowanie znalazły zwłaszcza takie metody jak: logika rozmyta (ang. *Fuzzy Logic*), sztuczne sieci neuronowe (ang. *Artificial Neural Networks - ANN*) oraz algorytmy genetyczne i ewolucyjne (ang. *Genetic Algorithms, Evolutionary Algorithms*). W celu zapewnienia poprawnej jakości pracy układu napędowego w warunkach zmian mechanicznych parametrów napędu szeroko stosuje się regulatory odporne lub adaptacyjne, bardzo często z wykorzystaniem metod inteligencji obliczeniowej. Dla napędów w warunkach zmian mechanicznych parametrów obiektu sterowanie odporne i adaptacyjne to dwie różne metody syntezy układu regulacji. Sterowanie odporne, którym habilitant zajął się w pierwszym okresie działalności naukowej i których wyniki zostały przedstawione w rozprawie doktorskiej, polega na takim doborze regulatora (prędkości lub położenia) o stałych parametrach, aby układ zamknięty charakteryzował się podobnymi właściwościami dla wszystkich wariantów zmian paramentów. Natomiast w układzie adaptacyjnym parametry regulatora są tak modyfikowane, aby w czasie pracy układu najlepiej dopasować się do zmian parametrów obiektu.

Celem naukowym badań omówionych w cyklu publikacji powiązanych tematycznie było opracowanie skutecznych algorytmów i struktur układu sterowania dla wolnoobrotowego napędu bezpośredniego z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych z zachowaniem dobrych właściwości dynamicznych i wysokiej precyzji pozycjonowania. Istotnym zagadnieniem było opracowanie takiego regulatora i struktury układu regulacji w warunkach zmian parametrów mechanicznych obiektu, aby układ napędowy mimo tych zmian, charakteryzował się podobnymi właściwościami dynamicznymi lub dopasował się do nich z zachowaniem dobrej dynamiki.

Celem osiągnięcia naukowego habilitanta było opracowanie nowych metod sterowania układami elektromechanicznymi o złożonej, wielomasowej i zmiennej strukturze mechanizmu napędzanego przy wysoko postawionych wymaganiach co do precyzji i właściwości dynamicznych sterowania.

Osiągnięcie celu głównego wymagało zrealizowania następujących zadań:

- identyfikacji i opracowania modelu symulacyjnego napędu bezpośredniego z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych,
- opracowania koncepcji układu sterowania z wykorzystaniem regulatora neuronowego, czyli wybór odpowiedniej struktury sztucznej sieci neuronowej, utworzenie skutecznego algorytmu uczenia *ANN* w trybie *online* a także *offline*, oraz określenie najkorzystniejszej struktury regulacyjnej prędkości, a także położenia kąтового,
- weryfikacji symulacyjnej i laboratoryjnej zaproponowanej koncepcji sterowania na stanowisku badawczym.

Należy podkreślić, że wybór struktury oraz stabilnego algorytmu uczenia *ANN* w trybie *online* na obiekcie rzeczywistym jest złożonym zadaniem, słabo opracowanym teoretycznie, dlatego w badaniach habilitanta kierowano się często decyzjami popartymi subiektywną oceną działania układu, tzw. wiedzą ekspercką, tworzoną na podstawie wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

Opis stanowisk laboratoryjnych

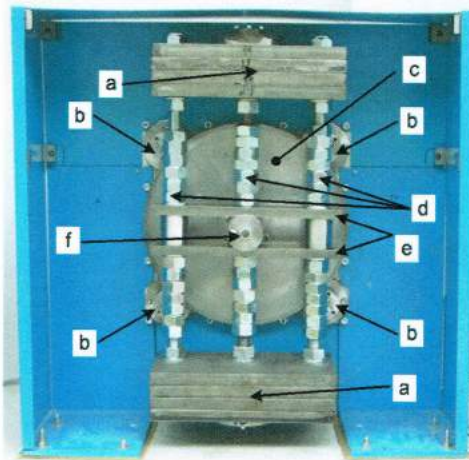
Badania laboratoryjne prezentowane w pracach autora wniosku zostały wykonane na stanowiskach zbudowanych w ramach realizacji następujących programów badawczych:

[C1] Zawirski K., *Precyzyjne sterowanie napędem bezpośrednim o zmiennej, wielomasowej strukturze mechanicznej*, realizacja: lata 2010-2012, projekt finansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki nr 1466/B/T02/2010/38.

[C2] Zawirski K., *Odporne sterowanie precyzyjnym napędem bezpośrednim z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych*. realizacja: lata 2002-2004, projekt badawczy finansowany z Komitetu Badań Naukowych nr 8T10A 07521.

[C3] Muszyński R., *Sterowanie dla napędu z połączeniem sprzężystym*. realizacja: lata 2005-2007, projekt badawczy finansowany z Komitetu Badań Naukowych nr 8T10A 02628.

W ramach dwóch pierwszych projektów [C1, C2] zbudowane zostało stanowisko laboratoryjne do badania właściwości napędu bezpośredniego o dużej dynamice i wysokiej precyzji pozycjonowania z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych. Obiektem badań na tym stanowisku jest wolnoobrotowy silnik synchroniczny o wzbudzeniu od magnesów trwałych z uzwojeniem trójfazowym 24-biegunowym, sterowanym wektorowo za pomocą tranzystorowego falownika *PWM* (ang. *Pulse-Width Modulation*). W ramach projektu [C2] został zbudowany mechanizm roboczy, gdzie do wału silnika zostały zamocowane metalowe ramiona, do których to zostały przymocowane metalowe płyty służące do dyskretnej zmiany momentu bezwładności i grawitacyjnego momentu bezwładności (rys. 1). Na rys.1 przedstawiono widok przedniej części zestawu, w której skład wchodzi:



Rys. 1. Widok czołowy części mechanicznej

- a) płyty umożliwiające zmianę momentu bezwładności,
- b) hamulec tarczowy – docisk, cztery identyczne elementy rozmieszczone co 90° mechanicznych,
- c) hamulec tarczowy – tarcza oporowa,
- d) pręty gwintowane umożliwiające zamocowanie zmiennej ilości płyt (a),
- e) płyty wzmacniające,
- f) oś mechaniczna.

Zmiana parametrów mechanicznych obiektu jest możliwa poprzez zmianę liczby zamontowanych płyt obciążających. Dzięki różnej ich kombinacji można zmieniać moment bezwładności i moment oporowy. Habilitant badał zakres zmienności momentu bezwładności w zakresie od $J_{min} = 0.75 \div 1.57 \text{ kgm}^2$ do $J_{max} = 5.80 \text{ kgm}^2$. W pracach symulacyjnych habilitanta obwód regulacji momentu elektromagnetycznego został zastąpiony jako szeregowo połączenie stałej momentu silnika ($k_T = 17.5 \text{ Nm/A}$) i opóźnienia transportowego ($T_\mu = 1.5 \text{ ms}$). Identyfikacja układu mechanicznego wykazała, że jest to układ wielomasowy o złożonej charakterystyce rezonansowej [C2]. Na podstawie identyfikacji został opracowany

model matematyczny układu mechanicznego dla różnych konfiguracji płyt, gdzie uwzględniono tylko dominujące mody rezonansowe. W Tab. 1, przedstawione zostały konfiguracje płyt i odpowiadające tym zestawom parametry, z których habilitant korzystał w swoich pracach (f_{ar} , f_r – częstotliwość antyrezonansowa i rezonansowa, ξ_{ar} , ξ_r – tłumienie antyrezonansowe i rezonansowe).

Tabela 1. Parametry rezonansowe układu mechanicznego [C2]

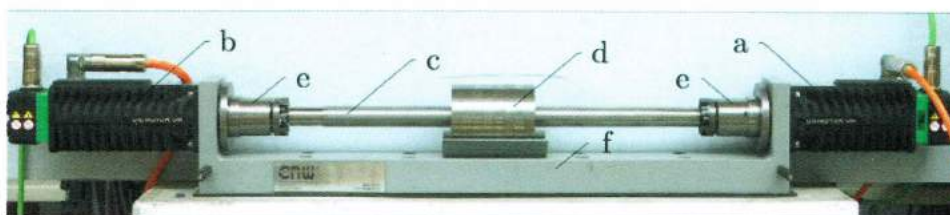
Konfiguracja	J [kgm ²]	f_{ar} [Hz]	$\xi_{ar} \cdot 10^{-4}$	f_r [Hz]	$\xi_r \cdot 10^{-4}$
0 płyt	0,75	66	10	106	90
		153	5	250	100
2 płyty	1,57	35	50	38	200
		65	5	253	500
8 płyt	5,81	38	10	256	90
		283	5	292	500

Podczas projektowania układu sterowania uwzględniono charakter wielomasowy układu napędowego. W literaturze zaprezentowanych jest wiele metod kompensacji rezonansów mechanicznych wpływających na jakość działania napędu. Jedną z nich polega na usztywnieniu konstrukcji mechanicznej, aby przesunąć częstotliwości rezonansowe poza pasmo przenoszenia układu. Drugą metodą jest stosowanie filtrów w pętli regulacji. Filtr taki jest umieszczony pomiędzy blokiem wytwarzającym sygnał sprzężenia zwrotnego a wejściem regulatora prędkości lub na wyjściu regulatora prędkości. Trzecią metodą często stosowaną w napędach przemysłowych jest ograniczenie pasma przenoszenia pętli regulacji prędkości, ale metoda ta zdecydowanie pogarsza właściwości dynamiczne napędu. Czwarta z metod polega na wprowadzeniu dodatkowych sprzężeń zwrotnych od zmiennych stanu układu. W badanym stanowisku zdecydowano się na drugą metodę, tj. zastosowanie filtra włączonego pomiędzy sygnał sprzężenia prędkości obrotowej a wejściem regulatora prędkości. Szczegóły kompensacji wpływu złożonej konstrukcji mechanicznej zostały przedstawione w pracach [2, 5, C2].

W ramach projektu [C1] zostało zbudowane stanowisko oparte o ten sam silnik, ale inną maszyną roboczą. Część mechaniczna została tak skonstruowana, aby można było zmieniać moment bezwładności i moment oporowy w funkcji położenia wału silnika [Brock S., Pajchrowski T., Łuczak D. - **patent nr P.397792**]. Identyfikacja układu mechanicznego wykazała, że jest to również układ wielomasowy o złożonej charakterystyce rezonansowej [C1]. Przy projektowaniu układu sterowania dla tego stanowiska uwzględniono wpływ ograniczonej sztywności układu napędowego i zdecydowano się na zastosowanie filtra włączonego pomiędzy sygnał sprzężenia prędkości obrotowej a wejście regulatora prędkości. Dodatkowe szczegóły zostały przedstawione w pracy [C1]. Z punktu widzenia badań prowadzonych przez habilitanta, istotne parametry układu napędowego zostały przedstawione m.in. w pracach [4, 8, 9].

Autor wniosku prowadził również badania na stanowisku zrealizowanym w ramach projektu [C3]. W ramach tego projektu zostało opracowane i wykonane stanowisko

laboratoryjne przedstawione na rys. 2. Obiektem badań jest wysokoobrotowy silnik synchroniczny o wzbudzeniu od magnesów trwałych z uzwojeniem trójfazowym 6-biegunowym, sterowanym wektorowo za pomocą tranzystorowego falownika *PWM*. Część energoelektroniczna została zaprojektowana w podobny sposób jak w opisanych stanowiskach [C1, C2]. Jeden z silników sterowany jest za pomocą badanych algorytmów sterowania, drugi pełni rolę sterowanego obciążenia. Stanowisko laboratoryjne zostało tak zaprojektowane, aby można było zmieniać w szerokim zakresie parametry układu mechanicznego, tj. stosunek $R=J_L/J_M$ momentów bezwładności po stronie obciążenia (J_L) i po stronie silnika (J_M), współczynnik sprężystości wału, co wpływa ma częstotliwość rezonansową *NTF* i antyrezonansową *ARF* układu napędowego. Badania laboratoryjne wykazały, że zaszła potrzeba uwzględnienia dokładniejszego modelu mechanicznego napędu niż model dwumasowy i zdecydowano się na model trójmasowy bez dodatkowych filtrów. Dane badanych silników *PMSM* zostały zaprezentowane w Tab 2. Dodatkowe szczegóły stanowiska przedstawiono w [C3], a zakres badań habilitanta w pracy [3].



Rys. 2. Konstrukcja mechaniczna (a, b –silniki, c – elastyczny wał, d – pierścienie, e – sprężęła, f – podstawa)

Tabela 2. Dane silnika PMSM [C3]

Parametry	Jednostka	Wartość
Moment bezwładności silnika	kg·cm ²	2,5
Stała momentu	Nm/A	1,6
Stała napięciowa	V/1000rpm	98
Moment znamionowy	Nm	3,6
Prędkość znamionowa	rpm	3000
Indukcyjność	mH	45

Omówienie celu naukowego

W pierwszym okresie działalności naukowej, której wyniki przedstawiono w rozprawie doktorskiej, badania dotyczyły sterowania odpornego silnikiem synchronicznym o wzbudzeniu od magnesów trwałych z wykorzystaniem metod inteligencji obliczeniowej. W pracach tych zostały wykorzystane metody logiki rozmytej, sztuczne sieci neuronowe i układy neuronowo-rozmyte. W rozprawie zaprojektowano nieliniowy regulator proporcjonalno-całkowy, wykorzystujący metody inteligencji obliczeniowej, który cechował się odpornością na zmiany wybranych parametrów napędu. Zaproponowana metoda projektowania pozwala uzyskać odporność regulacji prędkości i położenia, polegającą na

podobnym zachowaniu się wskaźników jakości regulacji dla zadanego zakresu zmian. W wyniku przeprowadzonych prac badawczych opracowano oryginalną metodę syntezy nieliniowego regulatora prędkości *PI* dla silnika synchronicznego o magnesach trwałych stojonego *offline*. Proces projektowania składa się z dwóch etapów: kształtowania powierzchni sterowania i odpowiednim doborze nastaw regulatora wg oryginalnego wskaźnika jakości. Dla zaproponowanej metody przeprowadzono liczne testy symulacyjne układu regulacji prędkości obrotowej i położenia kąтового. W celu weryfikacji poprawności i oceny skuteczności zaproponowanych rozwiązań dokonano weryfikacji na stanowisku laboratoryjnym. Badania zakończyły się wnikliwą analizą właściwości zaprojektowanych regulatorów odpornych w jednopętlowej strukturze sterowania przy wykorzystaniu autorskiego całkowego wskaźnika jakości.

W takich układach napędowych jak: napędy ramion robota, napędy mechanizmu posuwu obrabiarek, napędy zwijarek czy maszyn papierniczych, parametrem najczęściej zmienianym jest moment bezwładności, który powoduje zmiany parametrów mechanicznych układu (rezonansów i antyrezonansów mechanicznych), co znacznie komplikuje ich tłumienie i precyzyjne sterowanie. Dlatego zachodzi potrzeba zaprojektowania układu regulacji prędkości lub położenia wykazującego cechy adaptacyjności na zmiany parametrów mechanicznych obiektu o dobrych właściwościach dynamicznych. Z tego powodu obszarem zainteresowań habilitanta po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych było zdecydowane rozwinięcie i poszerzenie zakresu prac. Celem badań było opracowanie skutecznych algorytmów sterowania w czasie rzeczywistym i opracowania struktur układu regulacji dla obiektu o złożonej strukturze mechanicznej. Istotnym zagadnieniem było opracowanie takiego regulatora i struktury układu regulacji w warunkach zmian parametrów mechanicznych obiektu, aby układ napędowy mimo tych zmian, charakteryzował się podobnymi właściwościami dynamicznymi lub dopasował się do nich z zachowaniem dobrej dynamiki. Aby zapewnić dobre właściwości dynamiczne i statyczne jakości sterowania napędem elektrycznym, habilitant poszukiwał odpornych, a przede wszystkim adaptacyjnych algorytmów regulacji z wykorzystaniem metod inteligencji obliczeniowych, zwłaszcza sztucznych sieci neuronowych.

Głównym celem naukowym podjętym przez habilitanta w ramach cyklu publikacji naukowych powiązanych tematycznie było opracowanie neuronowego regulatora prędkości, który uczony jest w czasie rzeczywistym (*online*), dla obiektów przedstawionych w punktach [C1, C2, C3]. Istotnym zagadnieniem części prac było opracowanie takiej struktury regulatora i struktury regulacji, aby układ dopasował się *online* do zmian parametrów mechanicznych obiektu i charakteryzował się podobnymi właściwościami oraz dobrą dynamiką. W ramach cyklu publikacji naukowych stanowiących główne osiągnięcie autora wniosku przedstawiono wyniki badań obejmujących opracowanie teoretyczne i weryfikację:

- A. struktury i algorytmu uczenia *online* regulatora neuronowego prędkości dla napędu o zmiennym momencie bezwładności ze sztywnym [1, 2, 4, 5, 6] i sprężystym połączeniem silnika z mechanizmem napędzanym [3],

- B. ocenę efektów implementacji opracowanego algorytmu uczenia *online* regulatora neuronowego prędkości w strukturze regulacyjnej *MFC* (ang. *Model Following Control*), *MRAC* (ang. *Model Reference Adaptive Control*) [9] i *IMC* (ang. *Internal Model Control*) [8] dla napędu o zmiennym momencie bezwładności w funkcji kąta położenia wału układu napędzanego,
- C. struktury regulacji położenia kąтового z opracowanym neuronowym regulatorem prędkości uczonym *online* [10, 11],
- D. optymalizacji nastaw parametrów różnych typów regulatorów takich jak: *PI*, *PID*, *PD-I*, *IP*, *IP-D* działających w strukturach o jednym stopniu swobody, z predyktorem *Smitha* i strukturze *MFC* [7],
- E. struktury odpornego układu sterowania z rozmytym regulatorem prędkości typu *PD-I* o stałych nastawach w strukturze regulacyjnej *MFC* dla napędu o zmiennym momencie bezwładności [12],
- F. koncepcji kompensacji tętnień prędkości obrotowej silnika synchronicznego o magnesach trwałych, wywołanym pasożytniczym momentem zaczepowym, tętniącym momentem elektromagnetycznym oraz błędami pomiarowymi prądu i prędkości za pomocą sztucznych sieci neuronowych uczonych *offline* [13, 14].

Ad. [A]

W pracach [1 - 4] przedstawiono finalną koncepcję neuronowego regulatora prędkości, poprawianą i doskonaloną w kolejnych cyklach badawczych, oraz wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych prowadzonych przez habilitanta, które pokazują proces modyfikacji struktury i algorytmu uczenia w czasie rzeczywistym dla napędu z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych. W pracach tych została zaprezentowana koncepcja adaptacyjnego regulatora prędkości z wykorzystaniem jednokierunkowych sieci neuronowych. Przyjęta konfiguracja odpowiada regulatorowi typu *PD* o dwóch stopniach swobody (*2DOF*) [1 - 4]. Na podstawie przeprowadzonych badań strukturę uzupełniono o człon całkujący w celu zapewnienia astatyzmu układu i połączono równolegle z blokiem *ANN*, co doprowadziło do ostatecznej postaci regulatora przedstawionego w pracach [1 - 4]. Do czynników wpływających na właściwości sieci neuronowej należy określenie jej prawidłowej struktury, czyli ilości wejść, wyjść, jak i ilości neuronów w poszczególnych warstwach. Poszukiwanie optymalnej struktury sieci oznacza nie tylko dążenie do uniknięcia nadmiernej złożoności, ale także nadmiernego uproszczenia sieci, gdyż w przypadku skomplikowanego charakteru struktury, sieć może wykazywać tendencje do zbyt małego dopasowania swoich wag do prezentowanych zależności. Należy wspomnieć, że autor wniosku przebadał różne architektury sztucznej sieci neuronowej, gdzie wykorzystał techniki konstrukcyjne pozwalające budować sieć przyrostowo, polegające na rozbudowywaniu sieci tak długo, jak długo jej właściwości ulegają polepszeniu. Zaproponowana architektura okazała się optymalna dla rozważanych warunków pracy na badanych stanowiskach [1, C1, C2, C3].

Jedną z najbardziej popularnych metod uczenia *ANN* jest metoda wstecznej propagacji błędu. Metoda ta zaliczana jest do metod uczenia z nauczycielem, wymaga jednak znajomości zestawu zbioru uczącego, a sam algorytm wykorzystuje gradient funkcji celu, który

wyznaczany jest w kolejnych krokach. Obliczenie wartości wag regulatora w trybie *online* wymagało przyjęcia uczenia bez nauczyciela dla jednokierunkowej sieci neuronowej. Po przeprowadzeniu analizy teoretycznej, przeprowadzeniu wstępnych testów symulacyjnych i laboratoryjnych w celu przyspieszenia procesu nauki w czasie rzeczywistym wybrano szybki algorytm *RPROP* (ang. *Resilient backPROPagation*). Uzasadnienie jego wyboru i wprowadzonych modyfikacji algorytmu zostały dokładnie przedstawione między innymi w pracach [1 - 4], które stanowią podsumowanie badań prowadzonych przez habilitanta dotyczących adaptacyjnego regulatora neuronowego. W artykułach tych zaprezentowano strukturę regulatora, przedstawiono oraz uzasadniono symulacyjnie i eksperymentalnie wprowadzone autorskie modyfikacje algorytmu *RPROP*, które zapewniają stabilny proces uczenia w warunkach rzeczywistych sygnałów mierzonych sprzężenia zwrotnego i w obecności zakłóceń.

Proces modyfikacji struktury i algorytmu uczenia podstawowej wersji regulatora neuronowego składał się z wielu etapów i powstał na przestrzeni kilku lat w wyniku systematycznie prowadzonych badań teoretycznych i symulacyjnych oraz ich weryfikacji eksperymentalnej. Postępy etapów prac nad przystosowaniem algorytmu zostały dobrze przedstawione w pracach [1 - 6]. Pierwszy etap tego procesu został przedstawiony w publikacji [6].

Aby zweryfikować poprawność zaproponowanej koncepcji i oceny jej skuteczności działania przedmiotem badań w artykule [6] był zaproponowany neuronowy regulator prędkości uczony *online*. Praca ta przedstawia początkowe próby, koncepcje i założenia dotyczące metody uczenia czy wyboru struktury regulatora. W pracy tej zaprezentowano liczne testy symulacyjne i laboratoryjne na stanowisku opisanym w punkcie [C2].

Istotnym problemem podczas pierwszego uruchamiania napędu elektrycznego z neuronowym regulatorem adaptacyjnym są początkowe wartości wag sieci neuronowej. Czy mają być to wagi o wartościach równych zero, czy mają one być losowane – jest to sytuacja z jaką każdy projektant układów adaptacyjnych musi się spotkać. W pracy [6] został zobrazowany problem rozruchu napędu elektrycznego z silnikiem PMSM z wartościami wag wybranymi losowo lub wagami o wartościach zerowych. Każde uruchomienie w odpowiedzi na skok wartości zadanej z wagami losowymi lub zerowymi prowadzi podczas pierwszego procesu przejściowego do znacznego przeregulowania prędkości obrotowej. Zmiana nastaw regulatora neuronowego w wyniku procesu uczenia się w czasie rzeczywistym zmniejsza się uchyb regulacji prędkości, co w rezultacie prowadzi do uzyskania podobnych rezultatów z niewielkim przeregulowaniem prędkości w odpowiedzi na skok wartości zadanej w kolejnych procesach przejściowych. W pracy [6] habilitant zaproponował dwa różne rozwiązania w celu poprawy tego niekorzystnego procesu przejściowego podczas rozruchu.

Pierwszy sposób polega na wprowadzeniu filtra dolnoprzepustowego wartości zadanej (prefiltru), wówczas można zredukować przeregulowanie podczas pierwszego uruchomienia napędu [6]. Należy jednak zaznaczyć, że takie rozwiązanie zwiększa czas regulacji w odpowiedzi na skok wartości prędkości zadanej.

Drugie zaproponowane rozwiązanie przedstawione w pracy [6] polega na wywołaniu procesu przejściowego bez wymuszenia skoku wartości zadanej prędkości. Koncepcja zaproponowana przez habilitanta polega na wymuszeniu skokowej zmiany momentu obrotowego silnika, poprzez odpowiednią wartość prąduadanego w osi q , przy zadanej prędkości odniesienia równej zero. W tej sytuacji układ regulacji prędkości obrotowej stara się utrzymać prędkość równą zero a zmianę momentu obrotowego traktuje jak zakłócenie, które jest kompensowane. Pierwszy proces przejściowy umożliwia dobór początkowych wag ANN bez rozruchu silnika (dla zadanej prędkości referencyjnej równej zero), czyli w warunkach bezpiecznych przy nieruchomym mechanizmie napędzanym. Dzięki temu rozruch odbywa się w łagodny sposób, bez dużego przeregulowania, dlatego dobrym rozwiązaniem przy kolejnym uruchamianiu napędu jest zachowanie w pamięci układu sterowania raz dobrane wartości współczynników wag regulatora.

W ramach kolejnych badań symulacyjnych przeprowadzono specjalny test dla oceny właściwości regulacyjnych opracowanego regulatora. W pracy [6] porównano odpowiedź na skok momentu oporowego z regulatorem typu PI dobranego według kryterium symetrii z adaptacyjnym regulatorem neuronowym, którego wagi zostały wcześniej dostrojone dla dwóch przypadków: kiedy regulator jest uczony *online* i kiedy uczenie zostaje wstrzymane w czasie załączenia momentu oporowego przy niezmiennych parametrach układu mechanicznego. Testy wykazały, że uchyb dynamiczny prędkości oraz pole uchybu dla regulatora neuronowego uczonego *online* jest mniejsze w porównaniu z regulatorem PI o stałych parametrach. Ponadto, po zatrzymaniu procesu uczenia w sygnale odpowiedzi prędkości silnika na skok momentu oporowego pojawia się widoczny uchyb ustalony dla regulatora neuronowego. Należy podkreślić, że regulator neuronowy posiada cenną właściwość pozwalającą na dopasowanie swoich parametrów (samo-uczenia) nie tylko do zmian właściwości obiektu, ale także podczas procesów przejściowych wywołanych zmianami sygnału odniesienia i momentu oporowego, zmierzając do zminimalizowania uchybu regulacji prędkości.

Ponieważ w napędzie bezpośrednim moment bezwładności maszyny roboczej jest wielokrotnie wyższy niż moment własny silnika, dlatego duże zmiany momentu bezwładności obciążenia mają wpływ na warunki pracy układu napędowego (znaczna zmiana rezonansów i antyrezonansów mechanicznych). Dlatego zachodzi uzasadniona potrzeba sprawdzenia wpływu zmian momentu bezwładności na jakość regulacji prędkości z zaproponowanym regulatorem neuronowym. Na stanowisku [C2] można to zrobić dyskretnie zmieniając liczbę zamontowanych płyt przy kolejnym uruchomieniu układu. W związku z tym w pracy [6] zaprezentowano testy symulacyjne ciągłej zmiany momentu bezwładności w funkcji czasu na zachowanie się przebiegu prędkości obrotowej silnika. Weryfikacja symulacyjna potwierdziła, że układ napędowy jest stabilny i mało wrażliwy na ciągłą zmianę tego parametru mechanicznego.

Przeprowadzone liczne badania opisanej struktury regulatora neuronowego i wybranej metody uczenia na laboratoryjnym układzie fizycznym, wykazały potrzebę wprowadzenia do wzoru na zmianę stałej uczenia poprawki w formie strefy nieczułości Δs , gwarantującej w warunkach rzeczywistych sygnałów mierzonych sprzężenia zwrotnego, w obecności

zakłóceń, stabilny proces uczenia *online* [1, 2, 3, 6]. Jednak, poprzez zaproponowaną modyfikację, zawierającą wprowadzenie strefy nieczułości, którą szerzej opisano w pracach [2, 3] jedna z zalet algorytmu *RPROP* została wyeliminowana. W algorytmie przy rozważaniu niezerowej wartości strefy nieczułości Δs obliczanie wartości funkcji gradientu jest wymagane. W związku z tym komparator, który jest konieczny do określenia znaku funkcji błędu, oblicza także jego wartość. Ponieważ, na podstawie przeprowadzonych testów wartość Δs jest wybierana empirycznie, to pozwala na użycie w algorytmie tylko przybliżonych wartości gradientu. Równanie gradientu funkcji błędu neuronu wyjściowego dla przyjętej struktury sieci neuronowej oraz opis wprowadzonych założeń został przedstawiony w pracach [2, 3].

W celu zweryfikowania skuteczności przedstawionych rozwiązań i modyfikacji algorytmu *RPROP* przeprowadzono liczne badania laboratoryjne na stanowisku [C2]. Przede wszystkim zbadano wpływ szerokości strefy nieczułości Δs na skok momentu oporowego, które potwierdziły słuszność przyjętej koncepcji [1, 6]. Im większa wartość strefy nieczułości tym większy uchyb statyczny w odpowiedzi na skok momentu oporowego.

Dodatkowo w artykule [1] zaprezentowano wyniki badań dotyczących wpływu okresu aktualizacji wag regulatora neuronowego na odpowiedź prędkości kątowej pod wpływem skoku momentu oporowego. Jak należało się spodziewać, im dłuższy czas uaktualniania wag sieci neuronowej, to czas odpowiedzi i uchyb dynamiczny prędkości obrotowej wzrasta. W trakcie testowania algorytmu uczenia jednokierunkowej sieci neuronowej zbadano również wpływ zmian arbitralnie dobranych współczynników a i b , zaproponowanych przez autorów metody *RPROP* (Riedmiller M., Braun H.) (gdzie: a -współczynnik wzrostu, b -współczynnik zmniejszania aktualnej wartości stałej uczenia). Przeprowadzone próby wykazały, że przyjęte parametry zostały dobrane poprawnie, a ich zamiany wokół wybranych wartości wywołują znikomy wpływ na jakość regulacji prędkości obrotowej. Należy zauważyć, że zmiana współczynników a i b , w algorytmie *RPROP* nieznacznie wpływa na proces jakości regulacji prędkości, co nie oznacza jednak, że współczynniki te mogą być dobrane przypadkowo, co zaprezentowano w pracy [1]. Nieprawidłowy ich dobór może doprowadzić do niestabilnej pracy układu sterowania. Jak wykazano w publikacji [1], przyjęcie tych wartości na podstawie danych literaturowych jest jak najbardziej słuszne dla badanego układu regulacji.

Innym istotnym problemem jest określenie granic zmienności stałej uczenia (η_{max} , η_{min}). Liczne badania symulacyjne i eksperymentalne na stanowisku rzeczywistym wykazały, że w przypadku nieprawidłowego wyboru wartości tych parametrów, występują oscylacje w prędkości mierzonej, które często prowadzą do utraty stabilności układu, oraz wpływają na dynamikę napędu w odpowiedzi na skok momentu oporowego. Dlatego celowe są modyfikacje granicznych wartości współczynników uczenia, które habilitant zaproponował. Polegają one na uzależnieniu granicznej wartości współczynnika uczenia od uchybu regulacji prędkości obrotowej [1]. Dzięki tej modyfikacji znacznie zmniejszono oscylacje w sygnale prędkości obrotowej, oraz poprawiono dynamikę napędu na zakłócenie momentem oporowym.

Istotną cechą każdego regulatora procesu jest ograniczenie sygnału sterującego. W przypadku omawianego neuronowego regulatora prędkości jest to sygnał zadany prądu w osi q . Poddano weryfikacji laboratoryjnej sytuację dla której sygnał wyjściowy regulatora jest ograniczony a tym samym moment obrotowy silnika. Rozpatrzono dwa przypadki, dla których, jeśli stan ograniczenia zostanie osiągnięty, proces uczenia może być kontynuowany lub zatrzymany. W wyniku otrzymanych odpowiedzi na skok wartości zadanej można zaobserwować, że w przypadku zatrzymania procesu uczenia ANN , przeregulowanie sygnału prędkości jest mniejsze [1]. Dlatego habilitant przyjął rozwiązanie, aby w przypadku kiedy sygnał wyjściowy regulatora prędkości jest ograniczony, wyłączyć proces aktualizacji wag regulatora neuronowego.

Proces przetrenowania ANN (ang. overfitting) znany jest w literaturze. W celu uniknięcia przetrenowania konieczne jest zastosowanie dodatkowych środków zabezpieczających, które pozwalają stwierdzić, w którym momencie dalsze uczenie zaczyna prowadzić do pogorszenia jakości regulacji. W trakcie testów symulacyjnych i laboratoryjnych habilitant spotkał się z podobnym problemem. W związku z tym, że dane uczące neuronowy regulator prędkości napływają z każdym krokiem aktualizacji regulatora podczas jego pracy w czasie rzeczywistym, dlatego, aby nie dopuścić do przetrenowania ANN , zastosowano dodatkowy środek zapobiegawczy. Autor wniosku zaproponował wprowadzenie pewnej granicznej wartości błędu $e_x(k)$, dla której wagi sieci neuronowej poniżej tego błędu nie są aktualizowane, tzn. $|e_k(k)| < e_x(k)$ (proces uczenia jest zatrzymany). Trening jest kontynuowany, kiedy wartość aktualnego błędu prędkości $e_k(k)$ wzrośnie $|e_k(k)| > e_x(k)$. Aby zweryfikować poprawność zaproponowanej koncepcji przez habilitanta przeprowadzono badania symulacyjne i laboratoryjne przedstawione w pracy [2]. Potwierdziły one słuszność zaproponowanego rozwiązania, znanego w literaturze jako algorytm wczesnego stopu (ang. *early stopping*). Ma to jednak wpływ na błąd statyczny prędkości obrotowej układu regulacji, zwłaszcza po skoku momentu oporowego. Dlatego na podstawie przeprowadzonych badań przez habilitanta, uzupełniono podstawową strukturę regulatora neuronowego o człon całkujący w celu zapewnienia astatyzmu układu i połączono równolegle z blokiem ANN .

W pracach [2, 5] przedstawiono szeroko opis doboru filtra kompensującego wpływ wyższych harmonicznych prędkości wywołanych rezonansową strukturą mechaniczną. Na podstawie identyfikacji został opracowany model matematyczny układu mechanicznego dla różnych konfiguracji płyt, gdzie uwzględniono tylko dominujące mody rezonansowe. Pojedynczy mod rezonansowy można zapisać wyrażeniem:

$$G_{r,i} = \frac{s^2 + 2 \cdot \xi_{ar,i} \cdot \omega_{ar,i} + \omega_{ar,i}^2}{s^2 + 2 \cdot \xi_{r,i} \cdot \omega_{r,i} + \omega_{r,i}^2} \cdot \frac{\omega_{r,i}^2}{\omega_{ar,i}^2} \quad (1)$$

gdzie: $\omega_{ar,i}$ $\omega_{r,i}$ – odpowiednio pulsacja antyrezonansowa i rezonansowa dla i -ego bloku oraz $\xi_{ar,i}$ $\xi_{r,i}$ – tłumienie antyrezonansowe i rezonansowe.

Transmitancja modelu układu mechanicznego, jest opisana jako stosunek prędkości obrotowej $\omega_m(s)$ do momentu elektromechanicznego $T_e(s)$:

$$\frac{\omega_m(s)}{T_v(s)} = \frac{1}{J} \cdot \frac{1}{s} \cdot \prod_{i=1}^k G_{k,i} \quad (2)$$

gdzie k – liczba modów rezonansowych.

W Tab. 1, przedstawione zostały konfiguracje płyt i odpowiadające tym zestawom parametry, z których to habilitant korzystał w swoich badaniach na stanowisku [C2]. Zestawienie charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych i fazowych badanych wariantów przedstawiono w pracach [2, 5].

W przedstawionych pracach przez autora wniosku na stanowisku [C2] zdecydowano się na zastosowanie filtra włączonego pomiędzy sygnał sprzężenia prędkości obrotowej a wejście regulatora neuronowego. Zastosowanie filtra dolnoprzepustowego wprowadza zbyt duże opóźnienie w pętli sprzężenia prędkości na poziomie ok. 10ms, dlatego zrezygnowano z takiego rozwiązania. Zamiast tego zdecydowano się na użycie filtra bikwadratowego $G_{FBF}(s)$ czwartego rzędu o odwróconej charakterystyce systemu napędowego według zależności:

$$G_{FBF}(s) = \prod_{i=1}^2 \frac{s^2 + 2\xi_{r,i}\omega_{r,i}s + \omega_{r,i}^2}{s^2 + 2\xi_{ar,i}\omega_{ar,i}s + \omega_{ar,i}^2} \cdot \frac{\omega_{ar,i}^2}{\omega_{r,i}^2} \quad (3)$$

Wpływ zmian momentu bezwładności na wartość częstotliwości rezonansowych NTF i antyrezonansowych ARF , ich lokalizacji w widmie częstotliwości oraz szczegóły doboru filtra i kompensacji wpływu wielomasowego charakteru układu mechanicznego zostały przedstawione w pracach [2, 5, C2].

W artykule [2] zaprezentowano przebiegi czasowe procesu uczenia neuronowego regulatora prędkości uczonego *online* dla układu regulacji bez filtra kompensującego i z filtrem kompensującym dla minimalnego momentu bezwładności. Można zauważyć, że układ regulacji bez filtra jest niestabilny. Ponadto, porównano przebiegi prędkości na skok wartości zadanej i momentu oporowego dla dwóch skrajnych momentów bezwładności ($J_{max}/J_{min}=3.7$) dla nauczonego regulatora neuronowego. W Tab. 3 zestawiono wybrane wskaźniki jakości takie jak: czas odpowiedzi, czas regulacji po skoku wartości zadanej i momentu oporowego, błąd dynamiczny oraz kryteria całkowite: IAE i $ITAE$. Czasy odpowiedzi i regulacji w odpowiedzi na wartość zadaną prędkości po nauczaniu się regulatora dla skrajnych momentów bezwładności są podobne.

Tabela 3. Wskaźniki jakości dla regulatora neuronowego

Wskaźnik	Symbol i jednostka	J_{min}	J_{max}
Czas odpowiedzi (10%-90%)	t_r (ms)	56.4	59.5
Czas regulacji (5%)	t_s [ms]	97.4	94.2
Czas regulacji po skoku momentu oporowego (5%)	t_{ls} (ms)	109.3	68.4
Błąd dynamiczny po skoku momentu oporowego	$\Delta\omega$ (obr/s)	0.0096	0.0039
IAE po skoku momentu oporowego	obr	$0.514 \cdot 10^{-3}$	$0.201 \cdot 10^{-3}$
$ITAE$ po skoku momentu oporowego	obr·s	$38.6 \cdot 10^{-6}$	$18.8 \cdot 10^{-6}$

W artykule [1] habilitant zasugerował uzależnienie granicznej wartości stałej uczenia (η_{max} , η_{min}) od uchybu regulacji prędkości obrotowej. W pracy [2] zaproponowano wykorzystanie systemu rozmytego do określania tych współczynników. Autor wniosku porównał dwie różne bazy reguł i zaproponował kształt funkcji przynależności w celu określenia współczynników uczenia. Należy podkreślić, że przebadano inne bazy reguł oraz kształt funkcji przynależności, które zawierały większą liczbę zmiennych lingwistycznych, ale zaproponowana struktura okazała się nie tylko prosta, ale również skuteczna. W jednym przypadku baza reguł zależy tylko od wartości błędu regulacji, druga baza reguł dodatkowo została uzupełniona o zmianę wartości błędu regulacji prędkości. Przeprowadzone testy symulacyjne i laboratoryjne, zaprezentowane i opisane w pracy [2] zweryfikowały poprawność zaproponowanego rozwiązania i potwierdziły, że dodatkowa zmienna w bazie reguł uwzględniająca zmianę błędu regulacji prędkości, poprawia precyzję sterowania i dynamikę napędu elektrycznego, szczególnie w odpowiedzi na zakłócenie momentem oporowym.

W pracy [4] oprócz opracowanej koncepcji neuronowego regulatora prędkości, jego struktury i metody uczenia w czasie rzeczywistym, zaproponowano alternatywny i równie skuteczny sposób rozwiązania problemu przeuczania sieci neuronowej w porównaniu z [1, 2, 3], przy zachowaniu zalet algorytmu *RPROP*. Główny moduł uczący został uzupełniony o zewnętrzny układ nadzorujący proces nauki w czasie rzeczywistym. Wielkością wejściową jest aktualna wartość uchybu $e(k)$, a wielkością wyjściową układu nadzorującego jest aktualna wartość współczynnika uczenia. Wadą tego rozwiązania w porównaniu z wcześniej zaprezentowaną modyfikacją algorytmu *RPROP*, jest określenie większej liczby dodatkowych parametrów związanych z układem nadzorującym proces uczenia sieci neuronowej oraz uchyb statyczny w sygnale prędkości. Dlatego na podstawie przeprowadzonych badań przez habilitanta, również w tym alternatywnym rozwiązaniu należy uzupełnić podstawową strukturę regulatora neuronowego o człon całkujący, w celu zapewnienia astatyzmu układu i połączyć równolegle z blokiem *ANN*. Ponadto w pracy [4] zaprezentowano również porównanie algorytmu uczenia *RPROP* z innymi wybranymi algorytmami trenowania sieci neuronowych, takimi jak: algorytm wstecznej propagacji *BP* (ang. *BackPropagation*), momentowa metoda wstecznej propagacji błędów *MBP* (ang. *Momentum BackPropagation*) i *Quickprop*. Wszystkie wymienione algorytmy zostały zaimplementowane na stanowisku laboratoryjnym opisanym w [C1]. Badania polegały na porównaniu wybranych algorytmów uczenia regulatora neuronowego dla dwóch skrajnych momentów bezwładności o stałej wartości J_{min} (1.0 kgm^2) i J_{max} (3.8 kgm^2), w odpowiedzi na skok sygnału wartości zadanej i skok momentu oporowego. Należy podkreślić poprawne działanie każdego z przetestowanych algorytmów. Wyraźne różnice można zaobserwować podczas procesów przejściowych, zwłaszcza na początku rozruchu oraz podczas załączenia momentu oporowego. Największą wartość przeregulowania podczas rozruchu można zaobserwować dla algorytmu *Quickprop*. Porównanie wskaźników jakości *ISE*, *ITSE*, uchybu dynamicznego, czasów odpowiedzi podczas rozruchu i skokowego załączenia momentu oporowego dla skrajnych momentów bezwładności, nie dyskwalifikuje, ani nie promuje w znaczący sposób żadnego z przetestowanych algorytmów. Należy jednak zwrócić uwagę, na dobre wskaźniki jakości regulacji przedstawione w pracy [4] dla algorytmu *RPROP* z zaproponowanymi

modyfikacjami przez habilitanta, co potwierdza słuszność wyboru tego algorytmu do uczenia *online ANN*. Dokładne wyniki testów laboratoryjnych i wnioski są opisane w pracy [4].

Porównanie odpornego regulatora prędkości *PI* z zaproponowanym przez habilitanta adaptacyjnym regulatorem neuronowym uczonym *online* oraz opis doboru filtra kompensującego niekorzystny wpływ układu o złożonej strukturze mechanicznej zaprezentowano w pracy [5]. W artykule tym została przedstawiona synteza projektowania odpornego regulatora prędkości typu *PI* dla układu wielomasowego i dwóch skrajnych momentów bezwładności J_{min} oraz J_{max} . Przedstawiono szeroko opis doboru filtra pomiarowego, rezonansowego i antyrezonansowego. Podczas projektowania układu regulacji prędkości uwzględniono złożony charakter struktury mechanicznej o ograniczonej sztywności. Opis doboru filtra włączonego pomiędzy sygnał sprzężenia prędkości obrotowej a wejście regulatora prędkości oraz kompensacji wpływu wielomasowego charakteru układu mechanicznego przedstawiono szczegółowo w pracach [2, 5, C2]. Jednym z celów pracy było porównanie wskaźników jakości regulacji prędkości obrotowej związanej z dynamiką napędu elektrycznego takich jak: czasu regulacji na skok prędkości zadanej i momentu oporowego dla analizowanych regulatorów z dodatkowym filtrem kompensującym w pętli regulacji prędkości dla dwóch skrajnych momentów bezwładności ($J_{max}/J_{min}=7.7$). Analiza porównawcza pozwala stwierdzić, że czasy regulacji w odpowiedzi na skok wartości zadanej i momentu oporowego dla neuronowego regulatora adaptacyjnego są podobne dla skrajnych momentów bezwładności i ponad trzy razy krótsze w porównaniu z regulatorem odpornym [5]. Ponadto wskaźnik jakości *ISE* dla regulatora neuronowego jest zdecydowanie mniejszy w porównaniu z odpornym regulatorem *PI*.

W pracach [2, 5] przedstawiono wyniki badań dla regulatora neuronowego z filtrem kompensującym wpływ złożonej struktury układu mechanicznego o skończonej sztywności, natomiast w pracy [3] habilitant podjął udaną próbę uruchomienia i testowania zaproponowanego regulatora neuronowego dla napędu wielomasowego bez filtra kompensującego. Tym razem przedmiotem analizy w pracy [3] był napęd z połączeniem sprzężystym z wysokoobrotowym silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych, z zastosowaniem opracowanego neuronowego regulatora prędkości uczonego *online* [1, 2]. Praca [3] zawiera znaczne rozszerzenie prowadzonych badań symulacyjnych. W wyniku wstępnych testów zaszła potrzeba opracowania dokładniejszego modelu mechanicznego napędu. Zastosowano strukturę trójmasową. Autor wniosku wykonał wstępne badania symulacyjne z dokładnym układem, które uwiaryściły dobre zachowanie się neuronowego regulatora prędkości uczonego *online* według założonej koncepcji. Dodatkowo w pracy wykorzystany został filtr Kalmana do estymacji niemierzalnych zmiennych stanu napędu sprzężystego. W artykule [3] habilitant wykonał badania na stanowisku laboratoryjnym opisanym w [C3], dla różnych zakresów zmian momentu bezwładności ($R=1\div 3,4$) ze stałą wartością sprzężystości wału łączącego oba silniki *PMSM*. Taka konfiguracja układu mechanicznego ma wpływ na wartość częstotliwości rezonansowej (badany zakres zmian: $NTF=29\div 36\text{Hz}$) i częstotliwości antyrezonansowej (badany zakres zmian: $ARF=14\div 26\text{Hz}$) połączenia sprzężystego. W pracy uzasadniono również wybór kryterium oceny jakości sterowania ($t\cdot ARF$) z adaptacyjnym regulatorem neuronowym odwołując się do cytowanej

literatury. W analizowanym artykule przedstawiono parametry różnych struktur układu mechanicznego i wstępne badania dla wybranej konfiguracji. Następnie zaprezentowano testy laboratoryjne, które polegały na analizie odpowiedzi prędkości obrotowej na skok wartości zadanej i momentu oporowego dla różnych wartości częstotliwości rezonansowych i antyrezonansowych. Należy wspomnieć, że testowany regulator neuronowy uczony był tylko i wyłącznie na podstawie uchybu prędkości silnika, bez żadnych dodatkowych sprzężeń od zmiennych stanu układu. Dodatkowe sygnały sprzężenia zwrotnego wykorzystywane w procesie regulacji poprawiają dynamikę w odpowiedzi na skok wartości zadanej i lepiej tłumią zakłócenia na skok momentu oporowego (analiza literatury pozwala stwierdzić, że jest to poziom ok. $(1.2 \div 2.5) t \cdot ARF$). Wadą dodatkowych sprzężeń od stanu układu jest znaczne skomplikowanie układu regulacji. W artykule [3] autor wniosku przedstawił zadawalające rezultaty czasów odpowiedzi na skok wartości zadanej i zakłócenia momentem oporowym dla regulatora neuronowego bez dodatkowych sprzężeń zwrotnych od zmiennych stanu na poziomie $(1.4 \div 1.5) t \cdot ARF$, co potwierdza słuszność przyjętej koncepcji struktury regulatora i zmodyfikowanej metody uczenia wg. algorytmu *RPROP*.

Ad. [B]

W odróżnieniu od poprzednich prac, w ramach kolejnych, systematycznie prowadzonych badań, autor wniosku dokonał oceny efektów implementacji opracowanego algorytmu uczenia *online* neuronowego regulatora prędkości w strukturze regulacyjnej *MFC*, *MRAC* [9] i *IMC* [8] z układem napędzanym o innych parametrach mechanicznych. Habilitant przeprowadził liczne badania symulacyjne i eksperymentalne na stanowisku laboratoryjnym opisanym w punkcie [C1]. W pracach [B] opisano szczegółowo opracowany model symulacyjny jak i rzeczywisty. Zasadniczą zmianą w porównaniu z opisanymi pracami w punkcie [A] jest inny układ mechanizmu napędzanego za pomocą silnika synchronicznego o magnesach trwałych. W przypadku prac [B] jest to mechanizm z symultanicznie zmieniającym się momentem bezwładności i momentem oporowym w funkcji kąta położenia wału silnika. Identyfikacja układu mechanicznego wykazała, że jest to złożony układ mechaniczny [C1]. Na podstawie identyfikacji został opracowany model matematyczny układu opisany w pracach [B, C1]. Przy projektowaniu układu sterowania dla tego stanowiska uwzględniono złożony charakter mechanicznego układu napędzanego i zdecydowano się na zastosowanie bikwadratowego filtra kompensującego czwartego rzędu włączonego pomiędzy sygnał sprzężenia prędkości obrotowej a wejście regulatora prędkości w analogiczny sposób jak na stanowisku opisanym w [C2]. Charakterystyka filtra została dobrana metodą prób i błędów jako rozwiązanie kompromisowe dla zmiennych wartości momentu bezwładności. Szczegóły doboru filtra i kompensacji wpływu wielomasowego charakteru układu mechanicznego zostały przedstawione w pracy [C1].

Analizę porównawczą badań symulacyjnych oraz weryfikację laboratoryjną z neuronowym regulatorem prędkości uczonym *online* dla układu jednopętlowego (ang. *WRM – without reference model*), układu dwupętlowego w strukturze *MFC* (ang. *Model Following Control*) oraz układu *MRAC* (ang. *model reference adaptive controller*) zaprezentowano w publikacji [9]. Celem pracy było porównanie i ocena właściwości regulacyjnych układu regulacji

prędkości obrotowej na zmianę parametrów mechanicznych układu napędowego w funkcji kąta położenia wału takich jak: moment bezwładności i moment obciążenia. W publikacji [9] opisano założenia symulacyjnego układu napędowego, zaprezentowano strukturę układu *WRM*, *MRAC* i *MFC*, opisano model zmiennego momentu bezwładności i momentu oporowego w funkcji kąta położenia wału silnika, zaprezentowano strukturę neuronowego regulatora prędkości (*WRM*, *MRAC*) i korekcyjnego (*MFC*) oraz metodę uczenia *ANN* według zmodyfikowanego algorytmu *RPROP*. Badania symulacyjne polegały na wymuszaniu procesów przejściowych wywołanych zmianą prędkości zadanej dla dwóch różnych wartości momentu bezwładności (J_{min} i J_{max}), oraz podczas symultanicznych zmian momentu bezwładności i momentu obciążenia w funkcji kąta wału silnika. Porównano wskaźnik *ISE* dla każdego okresu przejściowego prędkości obrotowej. Dokładny opis wniosków jest umieszczony w artykule [9], ale można ogólnie stwierdzić, że układ *MFC* charakteryzował się najmniejszą wartością wskaźnika *ISE* podczas jednoczesnych zmian parametrów obiektu i zakłócenia momentem oporowym. W celu weryfikacji badań symulacyjnych przeprowadzono badania eksperymentalne trzech analizowanych struktur regulacji. Zobrazowano proces startu dla dwóch skrajnych momentów bezwładności – najmniejszym przeregulowaniem charakteryzował się układ *MFC*. W przypadku kiedy parametry modelu i procesu są takie same, wówczas dla struktury *MFC* sygnał prędkości charakteryzował niewielką wartością przeregulowania. Również podczas jednoczesnej zmiany momentu bezwładności i momentu oporowego w funkcji kąta położenia układu napędzanego struktura *MFC* z neuronowym regulatorem korekcyjnym charakteryzowała się najmniejszą wartością wskaźnika *ISE* oraz przeregulowaniem sygnału prędkości mierzonej.

Zmodyfikowana struktura *IMC* (ang. *Internal Model Control*) układu regulacji prędkości obrotowej z neuronowym modelem odwrotnym uczonym *online* dla napędu elektrycznego z silnikiem *PMSM* o zmiennych parametrach mechanicznych [C1] w funkcji położenia wału silnika została przedstawiona w artykule [8]. Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do sterowania ruchem napędu elektrycznego jest popularne i nadal wzrasta. W literaturze można spotkać wiele różnych rozwiązań z zastosowaniem *ANN* do sterowania napędem elektrycznym, np.: można aktualizować klasyczne nastawy regulatora *PI* w zależności od zmian parametrów obiektu, bardzo często stosowane są różne struktury układu regulacji z wykorzystaniem *ANN*, takie jak *MRAC*, *MFC*, *IMC* [8]. W wielu pracach do uczenia sieci neuronowych wykorzystywany jest algorytm wstecznej propagacji błędów. Znaczące ośrodki naukowe w kraju i na świecie poszukują nowych i lepszych rozwiązań oraz struktur regulacji w celu poprawy jakości sterowania. W wielu pracach, gdzie zastosowano strukturę *IMC* jest wykorzystywany neuronowy model odwrotny procesu uczony *offline* [8]. Wadą takiego rozwiązania jest problem z odpowiednim wyborem: danych uczących do trenowania sieci neuronowej i parametrów jej uczenia, opracowanie struktury neuronowego modelu odwrotnego. W przypadku zmian mechanicznych parametrów układu napędzanego nie można zapewnić prawidłowej jakości sterowania dla określonego zakresu tych zmian – w każdym punkcie pracy napędu należałoby przeprojektować układ, aby zapewnić dobre właściwości sterowania. Ponadto, w przypadku podstawowej wersji struktury *IMC*, odpowiedź na skok momentu obciążenia prowadzi do statycznego uchybu prędkości. W literaturze można się zapoznać z wieloma modyfikacjami wersji podstawowej *IMC*, które pracują w trybie *offline*.

W wielu zastosowaniach przemysłowych parametry mechaniczne napędu są zmienne, bardzo często w funkcji kąta położenia np. wału silnika. Dlatego w pracy [8] została zaproponowana przez habilitanta zmodyfikowana struktura *IMC* z neuronowym modelem odwrotnym uczonym *online* i porównana ze strukturą *WRM* [9]. W artykule [8] został przedstawiony model symulacyjny i założenia upraszczające struktury *WRM* oraz zaproponowanej struktury *IMC*, gdzie neuronowy model odwrotny uczony jest w czasie rzeczywistym. Po wielu testach symulacyjnych i laboratoryjnych habilitant zaproponował strukturę modelu odwrotnego z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej, która zapewniała najlepszą jakość sterowania prędkością obrotową dla tego obiektu regulacji. Do uczenia w czasie rzeczywistym został wykorzystany zmodyfikowany algorytm *RPROP* [1]. Autor wniosku przeprowadził liczne badania symulacyjne. We wstępnych testach zweryfikowano zachowanie się zmodyfikowanej struktury *IMC* i porównano to z układem *WRM* dla dwóch skrajnych momentów bezwładności oraz podczas symultanicznej zmiany parametrów mechanicznych i momentu oporowego w funkcji kąta położenia wału silnika. Różnice nie są znaczące, lecz zmodyfikowana struktura *IMC* charakteryzowała się mniejszą wartością wskaźnika *ISE* po nauczeniu się sieci neuronowej. Aby zweryfikować poprawność zastosowanej koncepcji przeprowadzono badania na stanowisku eksperymentalnym i stwierdzono, że zmodyfikowana struktura *IMC* z neuronowym modelem odwrotnym w odpowiedzi na skok momentu oporowego prawidłowo wytłumiła to zakłócenie, a porównanie przebiegu prędkości dla analizowanych struktur, wykazało mniejsze przeregulowanie dla zmodyfikowanego układu *IMC* podczas jednoczesnej zmiany momentu bezwładności i obciążenia w funkcji kąta położenia wału silnika.

Przeprowadzona ocena efektów implementacji opracowanego algorytmu uczenia neuronowego regulatora prędkości w czasie rzeczywistym pozwala stwierdzić, że dla analizowanego obiektu z jednoczesną zmianą momentu bezwładności i momentu oporowego, najmniejszą wartością wskaźnika *ISE* oraz przeregulowaniem w sygnale prędkości charakteryzowała się struktura regulacyjna *MFC* z neuronowym regulatorem uczonym *online*.

Ad. [C]

Dobre wyniki prac symulacyjnych podczas zmian momentu bezwładności w funkcji czasu [7], przyczyniły się do powstania pracy [11]. Zaprezentowano w niej problem regulacji położenia z symultaniczną zmianą momentu bezwładności i obciążenia w funkcji zmian kąta położenia wału silnika z neuronowym regulatorem prędkości uczonym *online*. Analiza wyników symulacyjnych pozwala stwierdzić, że wskaźnik *ISE* dla poszczególnych procesów przejściowych prędkości obrotowej jest mniejszy dla układu z prefiltrem wartości zadanej. Również podczas zmian momentu bezwładności i obciążenia w funkcji położenia wału silnika układ z prefiltrem charakteryzuje się mniejszą wartością wskaźnika *ISE*. W pracy zaprezentowano wyniki i wnioski z badań eksperymentalnych dla różnych okresów uczenia regulatora neuronowego T_a i różnych wartości wzmocnienia regulatora położenia. Mniejsza wartość czasu aktualizacji wag T_a wpływa na skrócenie czasu uczenia podczas rozruchu napędu, a wzrost wartości wzmocnienia regulatora położenia zwiększa właściwości dynamiczne pętli regulacji położenia.

W odróżnieniu od pracy [11] w artykule [10] zaprezentowano wyniki badań, w których porównano właściwości układu regulacji położenia z dwoma różnymi regulatorami prędkości: pierwszy o stałych parametrach z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej uczonej *offline* oraz drugi z neuronowym regulatorem prędkości uczonym *online* podczas jednoczesnych zmian momentu bezwładności i obciążenia w funkcji położenia wału silnika. W celu wykonania analizy porównawczej przeprowadzono liczne badania symulacyjne i eksperymentalne na stanowisku [C1]. Badania symulacyjne polegały na porównaniu odpowiedzi skokowych prędkości zadanej dla obu regulatorów podczas ciągłej zmiany momentu bezwładności i obciążenia w funkcji położenia wału. Układ regulacji z neuronowym regulatorem odpornym charakteryzował się prawie stałą wartością wskaźnika *ISE* oraz dłuższym czasem regulacji w porównaniu z regulatorem adaptacyjnym. Porównano również odpowiedzi prędkości na skok momentu oporowego dla dwóch skrajnych momentów bezwładności. Regulator uczony *online* charakteryzuje się mniejszą wartością wskaźnika *ISE* i czasem regulacji. Aby zweryfikować uzyskane wnioski przeprowadzono również badania laboratoryjne na stanowisku [C1]. Badane regulatory prędkości (odporny i adaptacyjny) były włączone kaskadowo w układ regulacji położenia z regulatorem proporcjonalnym typu *P*. Porównano wskaźnik *ISE* błędu prędkości dla analizowanych regulatorów podczas zmiany parametrów obiektu w funkcji kąta położenia wału silnika oraz odpowiedzi prędkości silnika na skok momentu oporowego. Wnioski z badań symulacyjnych zostały potwierdzone badaniami eksperymentalnymi. Mniejszą wartość wskaźnika *ISE* podczas zmian parametrów obiektu wykazywał układ z adaptacyjnym regulatorem neuronowym.

Przeprowadzona analiza symulacyjna i laboratoryjna pozwala stwierdzić, że prosta struktura układu regulacji położenia z nadrzędnym regulatorem typu *P* zapewnia dobre właściwości dynamiczne i precyzję sterowania podczas jednoczesnej zmiany parametrów mechanicznych układu napędzanego i momentu oporowego.

Ad. [D]

Znaczącym zagadnieniem syntezy regulatorów jest optymalizacja zamkniętego układu regulacji prędkości. W pracy [7] przedstawiono optymalizację parametrów różnych regulatorów takich jak: *PI*, *PID*, *PD-I*, *IP*, *IP-D* w różnych strukturach układu sterowania. Zostały przeanalizowane takie struktury jak: klasyczna zamknięta pętla regulacji o jednym stopniu swobody, z predyktorem *Smitha* i *MFC* (ang. *Model Following Control*). Celem badań habilitanta było porównanie zachowania się różnych struktur układu sterowania prędkości obrotowej z różnymi regulatorami, które były strojone według zdefiniowanego w pracy wskaźnika jakości *ISE*, za pomocą metody roju cząstek *PSO*. Przeprowadzono szerokie badania symulacyjne a uzyskane wyniki poddano wnikliwej analizie porównawczej. W przeprowadzonych badaniach uzyskano dobre nadążanie za wartością zadaną prędkości. W większości przypadków pojawiało się jednak przeregulowanie, charakterystyczne dla obranego wskaźnika jakości sterowania *ISE*. Przeregulowanie to można wyeliminować między innymi przez modyfikację tego wskaźnika, zaproponowaną przez habilitanta w pracy [12]. Zastosowana w pracy metoda roju cząstek do optymalizacji nastaw regulatorów, zapewniła szybki ich dobór w porównaniu z metodą algorytmów genetycznych, dlatego

została wykorzystana przez habilitanta w innych pracach do optymalizacji wybranych parametrów. Ponieważ w referacie ze względu na brak miejsca nie umieszczono wartości wskaźnika *ISE* oraz informacji o liczbie iteracji, dlatego podano to w Tab. 4.

Tabela 4. Wyniki jakościowe optymalizacji

Regulator	PI	PID	PDI	IP	IPD
Struktura klasyczna					
Liczba iteracji	12	11	12	11	10
Wartość wskaźnika jakości <i>ISE</i>	9,7e-7	8,7e-7	1,2e-6	1,0e-6	1,1e-6
Struktura z predyktorem Smitha					
Liczba iteracji	12	11	12	11	10
Wartość wskaźnika jakości <i>ISE</i>	1,2e-6	1,0e-6	1,4e-6	1,4e-6	1,3e-6
Struktura <i>MFC</i>					
Wartość wskaźnika jakości	11	12	11	12	11
Czas optymalizacji [s] <i>ISE</i>	1,0e-6	8,9e-7	9,7e-7	1,2e-6	1,2e-6

ad. [E]

Jednym z celów pracy badawczej habilitanta było opracowanie takiego regulatora i struktury regulacji prędkości kątowej dla obiektu o zmiennych parametrach mechanicznych, aby układ regulacji charakteryzował się podobnymi właściwościami dynamicznymi ze stałymi nastawami regulatora. Zostało to zaprezentowane w pracy [12], gdzie przedstawiono syntezę odpornego układu sterowania z rozmytym regulatorem prędkości typu *PD-I* o dwóch stopniach swobody dla serwonapędu z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych. Celem prac było opracowanie odpornego układu sterowania prędkością obrotową na zmiany momentu bezwładności podczas skokowej zmiany prędkości obrotowej i skoku momentu oporowego z wykorzystaniem dwupętlowej struktury *MFC* (ang. *Model Following Control*) i rozmytego regulatora prędkości. Parametry nieliniowego regulatora rozmytego optymalizowano metodą roju cząstek - *PSO* (ang. *Particle Swarm Optimization*) na podstawie zmodyfikowanego i uproszczonego wskaźnika jakości. Przeprowadzono szeroką analizę symulacyjną [12] w programie *Matlab-Simulink*. W celu weryfikacji poprawności syntezy odpornego układu regulacji przeprowadzono również badania na stanowisku laboratoryjnym, opisanym w [C1]. Badania polegały na testowaniu zachowania się prędkości obrotowej w odpowiedzi na skok prędkości zadanej, a następnie badano wpływ odpowiedzi prędkości obrotowej na skokową zmianę momentu oporowego dla skrajnych zakresów zmian momentu bezwładności. Przeprowadzone testy symulacyjne i laboratoryjne, zaprezentowane i opisane szczegółowo w pracy [12] zweryfikowały poprawność zaproponowanego rozwiązania i potwierdziły dobrą odporność zaproponowanej syntezy regulatora rozmytego w dwupętlowej strukturze *MFC*. Zaletą zastosowanej struktury *MFC* i opisanej metody strojenia układu jest to, że za pomocą regulatora modelu można kształtować odpowiedź na skok prędkości zadanej, natomiast nastawy parametrów regulatora korekcyjnego kształtują odpowiedź na skok momentu oporowego. W przedstawionych pracach habilitanta, zmodyfikowano wskaźnik jakości zmniejszając liczbę wag, w porównaniu z poprzednimi pracami autora wniosku. Znacząco, bo o około 50%, zmniejszyły się czasy regulacji

w porównaniu z układem jednopętlowym i pola uchybu podczas odpowiedzi na skok prędkości zadanej i momentu obciążania.

Ad. [F]

Do zalet napędów z silnikami *PMSM* należy zaliczyć brak komutatora, możliwość zmniejszenia strat energii w wirniku, dużą przeciążalność momentem obrotowym. Dzięki tym zaletom silniki te znalazły szerokie zastosowanie w przemyśle. Jednak badania nad wzrostem wymagań dotyczących pozycjonowania, dynamiki i powtarzalności trajektorii ruchu napędów bezpośrednich z silnikiem *PMSM*, uwypukliły pewne ich specyficzne cechy utrudniające precyzyjne sterowanie, które przedstawiono we wstępie autoreferatu. Dodatkowo do tych wad należy zaliczyć również tętnienia momentu elektromagnetycznego. Harmoniczne momentu elektromagnetycznego spowodowane są niesinusoidalnym rozkładem indukcji w szczelinie powietrznej (ang. *electromagnetic ripple torque*), momentem zaczepowym (ang. *cogging torque*), błędami pomiarowymi prądu i prędkości, dlatego mają kluczowy wpływ na współczynnik nierównomierności prędkości obrotowej [13, 14]. Ma to decydujące znaczenie w napędach o wysokiej precyzji sterowania, ponieważ pomimo małej amplitudy tętnień prędkości obrotowej, pogarsza to pracę układu. Dlatego w tych układach napędowych dąży się do uzyskania gładkiego momentu elektromagnetycznego, a tym samym zmniejszenia współczynnika nierównomierności prędkości obrotowej, tak aby poprawić równomierność ruchu serwonapędu. W pracach [13, 14] przedstawiono zagadnienie zmniejszenia tętnień prędkości obrotowej dla napędu bezpośredniego z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi. W artykułach przedstawiono przyczynę powstawania tętnień prędkości obrotowej, spowodowanych pasożytniczym momentem zaczepowym, pulsującym momentem elektromagnetycznym oraz błędami pomiarowymi prądu i prędkości. Niekorzystne zjawiska zostały skutecznie skompensowane za pomocą sztucznych sieci neuronowych uczonych *offline*. Przedstawione założenia zostały poddane wnikliwej analizie symulacyjnej [13], a w celu zweryfikowania skuteczności przedstawionej metody kompensacji przeprowadzono badania laboratoryjne [14] na stanowisku opisanym w [C1]. Podsumowując przeprowadzoną analizę symulacyjną i eksperymentalną można potwierdzić słuszność przyjętego założenia przez habilitanta, że za pomocą jednokierunkowej sieci neuronowej uczonej *offline*, zaproponowanej odpowiedniej strukturze *ANN* i przyjętej koncepcji pozyskiwania danych do jej uczenia można skutecznie kompensować moment tętniący, który staje się przyczyną wzrostu współczynnika nierównomierności prędkości obrotowej. Ma to ważne znaczenie dla układów precyzyjnego sterowania. Zaproponowane podejście do rozwiązania tego problemu, zwalnia projektanta od dokładnej identyfikacji parametrów układu napędowego, ponieważ na podstawie sygnałów: prądu zadanego, prądu mierzonego i aktualnego położenia wirnika, można skutecznie nauczyć jednokierunkową sieć neuronową odpowiedniego sygnału kompensującego.

Podsumowanie

Opisany powyżej cykl publikacji powiązanych tematycznie przedstawia analizę rozważań teoretycznych oraz badań symulacyjnych i doświadczalnych z wykorzystaniem metod inteligencji obliczeniowej dla napędu z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych. Celem naukowym badań wchodzących w skład osiągnięcia naukowego habilitanta było opracowanie skutecznego algorytmu uczenia i struktur układu sterowania dla precyzyjnego napędu bezpośredniego z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych z zachowaniem dobrych właściwości dynamicznych, mimo złożonej struktury mechanicznej. W pracach skupiono się nad zagadnieniem opracowania takiego regulatora, algorytmu uczenia i struktury układu regulacji w warunkach zmian parametrów mechanicznych obiektu, aby układ napędowy mimo tych zmian, charakteryzował się podobnymi właściwościami dynamicznymi lub dopasował się do nich z zachowaniem dobrej dynamiki w trybie *online* i *offline*. Aby zapewnić dobre właściwości dynamiczne i statyczne jakości sterowania napędem elektrycznym, habilitant poszukiwał odpornych, a przede wszystkim adaptacyjnych algorytmów regulacji z wykorzystaniem metod inteligencji obliczeniowych, zwłaszcza sztucznych sieci neuronowych.

Opierając się na badaniach symulacyjnych i laboratoryjnych zaproponowano strukturę neuronowego regulatora prędkości, opracowano zmodyfikowaną metodę uczenia opartą na algorytmie *RPROP*, wprowadzono dodatkowe rozwiązania do układu sterowania poprawiające jakość regulacji. Wykazano symulacyjnie i eksperymentalnie, że zaproponowany układ regulacji z neuronowym regulatorem prędkości uczonym *online* wraz z wprowadzonymi modyfikacjami poprawił jakość regulacji prędkości obrotowej, zachowuje się prawidłowo mimo zmian momentu bezwładności i momentu oporowego.

Należy podkreślić, że zaproponowana koncepcja regulatora neuronowego (uczonego *online*) posiada dwie cenne właściwości: automatyczne dostrajanie nastaw (wag *ANN*) do zmian parametrów obiektu, jak i również, samoczynne dobranie parametrów sieci neuronowej (wag) w procesie uczenia podczas przebiegów przejściowych wywołanych zmianami sygnału odniesienia i momentu obciążenia, zmierzając do zminimalizowania uchybu regulacji prędkości.

Przyjęta struktura regulatora i zmodyfikowany algorytm uczenia pozwala na wdrożenie go na dostępnych procesorach sygnałowych z okresem próbkowania równym 100 μ s. Zaproponowany regulator neuronowy może być stosowany do napędów elektrycznych z silnikami *PMSM*, które charakteryzują się dobrymi właściwościami dynamicznymi.

Dużo uwagi w publikacjach poświęcono również zagadnieniu dotyczącemu zachowania się napędu bezpośredniego w przypadku napędzanych mechanizmów o zmiennym momencie bezwładności w funkcji położenia wału silnika. Na potrzeby takich napędów przeprowadzono analizę rozważań teoretycznych oraz badań symulacyjnych i doświadczalnych dla układu napędowego w strukturze regulacyjnej *MFC*, z modelem odniesienia *MRAC* oraz modelem odwrotnym *IMC* z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych uczonych *online*. Na podstawie uzyskanych wyników badań symulacyjnych i laboratoryjnych oraz analizie wskaźników jakości, habilitant uważa, że dla badanego układu optymalną strukturą jest *MFC*.

Ważną część publikacji stanowią zagadnienia dotyczące opracowaniu takiego regulatora i struktury regulacji prędkości obrotowej dla obiektu ze zmiennymi parametrami mechanicznymi, aby układ charakteryzował się podobnymi właściwościami dynamicznymi ze stałymi nastawami regulatora przy zachowaniu wysokiej dynamiki. Na potrzeby tych rozważań opracowano kompleksowo zagadnienie syntezy oraz implementację odpornego układu sterowania z rozmytym regulatorem prędkości typu *PD-I* dla układu napędowego w strukturze *MFC*. Parametry nieliniowego regulatora rozmytego były optymalizowane metodą roju cząstek.

W cyklu prac naukowych powiązanych tematycznie, uwagę poświęcono również zagadnieniu, które dotyczy kompensacji tętnień momentu elektromagnetycznego gwarantującego poprawną pracę napędowego układu przemysłowego. Zaproponowano i przetestowano symulacyjnie oraz laboratoryjnie oryginalne rozwiązanie z wykorzystaniem jednokierunkowych sieci neuronowych do poprawy równomierności prędkości obrotowej.

Ponadto, ze względu na istotne zagadnienie praktyczne i realizację badań eksperymentalnych w autoreferacie krótko opisano zagadnienie kompensacji wpływu ograniczonej sztywności na pracę układu regulacji prędkości obrotowej, które szerzej zostało przedstawione w pracach, których habilitant jest współautorem.

Do najważniejszych osiągnięć w głównym nurcie badań naukowych autor wniosku zalicza:

- opracowanie koncepcji adaptacyjnego regulatora neuronowego uczonego *online*, na które składają się: zaproponowanie struktury sieci neuronowej i określenie algorytmu stabilnego uczenia,
- opracowanie i weryfikację symulacyjną zmodyfikowanej metody uczenia na podstawie algorytmu *RPROP*,
- weryfikację laboratoryjną zaproponowanych ww. rozwiązań na trzech różnych stanowiskach ze zmiennymi parametrami mechanicznymi układu napędzanego,
- opracowanie metody nadzoru uczenia sieci neuronowej,
- ocenę implementacyjną i wszechstronne badania symulacyjne i laboratoryjne różnych struktur regulacji (*MFC*, *MRAC*) z neuronowym regulatorem uczonym *online*,
- opracowanie i zaproponowanie struktury sieci neuronowej wykorzystanej jako neuronowy model odwrotny dla układu *IMC*,
- weryfikację symulacyjną i laboratoryjną w strukturze *IMC* zaproponowanego rozwiązania,
- opracowanie struktury i metody pozyskiwania danych do uczenia jednokierunkowej sieci neuronowej w celu kompensacji tętnień momentu elektromagnetycznego,
- weryfikację symulacyjną i laboratoryjną kompensacji tętnień momentu elektromagnetycznego zaproponowanego rozwiązania,
- opracowanie syntezy regulatora odpornego dla układu dwupętlowego w strukturze *MFC*,
- implementację i wszechstronne badania symulacyjne i laboratoryjne regulatora odpornego w strukturze *MFC*.

W cyklu publikacji powiązanych tematycznie ograniczono się tylko do zagadnień ww. w autoreferacie. Wiele problemów dla napędu bezpośredniego z silnikiem synchronicznym o wzbudzeniu od magnesów trwałych z wykorzystaniem koncepcji zastosowania sztucznych sieci neuronowych nie zostało przez habilitanta omówione i zrealizowane ze względu na szeroki zakres analizowanych zagadnień.

Istotnym zagadnieniem jest np. odporność na uszkodzenia napędu z silnikiem *PMSM* z zastosowaniem sterowania adaptacyjnego z układami aktywnego i pasywnego sterowania tolerującego uszkodzenia z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych.

Ważnym tematem o charakterze teoretycznym i praktycznym jest kwestia metod kompensacji wpływu wielomasowego charakteru układu mechanicznego w przypadku zmian parametrów obiektu. Można zastosować np. filtry adaptacyjne lub *ANN* uczone *offline* lub *online*.

Problematyka podjęta przez habilitanta z całą pewnością nie została w pełni wyczerpana. Dotyczy to zwłaszcza luzów w połączeniach mechanicznych czy zmiennego momentu tarcia, gdzie proces adaptacji stwarza szerokie pole do prowadzenia dalszych badań.

d) Wykaz innych (nie wchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w pkt b) opublikowanych prac naukowych

1. Brock S., **Pajchrowski T.**, *Reducing Energy Losses for Fan Applications with V/f control of PMSM*, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review) Vol 2011, No 11, str; 89 – 94.
Punkty MNiSW(2012)=15 (Lista A MNiSW z 2012r.) ; IF(2011)=0,244; IF(5-letni)- brak
2. Brock S., **Pajchrowski T.**, *Sensorless and energy – efficient PMSM drive for fan application*, Archives of Electrical Engineering, 2013, t. 62, nr 2, str. 217–225.
(pkt. MNiSzW, 10)
3. **Pajchrowski T.**, *Energooszczędny napęd z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych z łagodnym startem*, Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering 75/2013, str. 135-140,ISSN 1897-0737.
4. Deskur J., **Pajchrowski T.**, Zawirski K., *Optimal control of current switching angles for high – speed SRM drive*, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering COMPEL, Volume 29, Number 1, 2010, pp. 156–172.
Punkty MNiSW(2010)=13 (Lista A MNiSW z 2010r.); IF(2010)=0,394; IF(5-letni)=0,377.
5. **Pajchrowski T.**, Zawirski K., *Robust speed controller of PMSM based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), Vol. 2009, Nr. 8, pp. 12 – 17.
Punkty MNiSW(2009)=6 (Lista B MNiSW z 2009r.) ; IF(2009)=0,196; IF(5-letni)-brak

e) Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych (nie wchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w pkt b)

Do pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych nie wchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w pkt b zestawu publikacji habilitant zalicza:

- A. publikacje związane z energooszczędnym napędem wentylatora z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych sterowanym według zasady u/f [1-3],
- B. publikacje związane z optymalizacją kąta komutacji dla silnika reluktancyjnego przełączalnego [4],
- C. publikację związaną z syntezą regulatora odpornego z silnikiem *PMSM* [5].

Ad [A]

W artykule [1] przedstawiono problem sterowania częstotliwościowego u/f z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych bez klatki tłumiącej dla napędu wentylatora. Bardzo dobre właściwości dynamiczne silnika *PMSM* mają decydujący wpływ na ich wybór do sterowania precyzyjnego, co zostało między innymi omówione powyżej w niniejszym autoreferacie. Wiele prowadzonych obecnie prac badawczych koncentruje się również na wykorzystaniu tych silników bez klatki tłumiącej do napędów pomp i wentylatorów, które mają znacznie mniejsze wymagania dynamiczne. Znaczne odległości pomiędzy silnikiem a przekształtnikiem w napędach wentylatorów utrudniają pomiar położenia wału wirnika. Zastosowanie bezpośredniego pomiaru położenia wirnika wiąże się z koniecznością prowadzenia długiego połączenia, co zwiększa koszty i obniża niezawodność napędu. Także zastosowanie bloku obserwatora jest utrudnione z uwagi na często stosowane w tych rozwiązaniach filtry pomiędzy przekształtnikiem a silnikiem. Alternatywnym rozwiązaniem sterowania dla napędu wentylatora z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych jest układ ze sterowaniem częstotliwościowym według zasady u/f . Przeprowadzono obszernie badania symulacyjne z silnikiem *PMSM* bez klatki tłumiącej w otwartej pętli sterowania częstotliwościowego u/f . W artykułach przedstawiano analizę stabilności wentylatorowego układu napędowego i wykazano, że układ sterowania z silnikiem *PMSM* bez klatki tłumiącej jest niestabilny. Jednak istnieje możliwość wprowadzenia dodatkowego sprzężenia zwrotnego, które poprzez zmianę wyjściowej częstotliwości napięcia przekształtnika energoelektronicznego będzie stabilizować napęd. Dodatkowo w celu zmniejszenia poboru mocy przez układ wentylatorowy z silnikiem *PMSM* przeprowadzono optymalizację napięcia stojana. W analizowanej pracy [1] przedstawiono model matematyczny silnika *PMSM* oraz przeprowadzono badanie jego stabilności. Do stabilizacji układu napędowego zastosowano dodatkowe tłumienie wirnika poprzez odpowiednią modulację częstotliwości stojana, która pełni rolę pętli stabilizującej. Na podstawie analizy literatury w pracy zaprezentowano taki algorytm. Dodatkowo optymalizowany był sygnał zmiany napięcia stojana, aby osiągnąć minimum prądu w osi d dla pełnego zakresu prędkości obrotowej, w celu uzyskania najmniejszych strat elektromagnetycznych w silniku. Na potrzeby symulacji opracowano tablicę przeglądową w celu uzyskania odpowiedniej wartości zmiany napięcia stojana

w funkcji prędkości zadanej i przyspieszenia kątownego. Jeżeli prąd w osi d po optymalizacji w stanach ustalonych ma wartość równą zero, to oznacza, że układ wentylatorowy z silnikiem PMSM ma najwyższą sprawność. Dodatkowo zaprezentowano układ wentylatorowy z silnikiem PMSM bez optymalizacji napięcia. Dla takiego przypadku prąd w osi d ma znaczną wartość ujemną, przez co silnik charakteryzuje dużo mniejszą sprawnością. Zaprezentowano również wyniki badań polegające na optymalizacji napięcia silnika PMSM tak, aby minimalizować sumę strat mocy czynnej i w rdzeniu silnika. Porównano trzy rodzaje przypadków: bez optymalizacji, z optymalizacją $i_d=0$ i minimalizacją sumy strat mocy $\Delta P=\min$. Największą sprawność uzyskano dla przypadku $\Delta P=\min$. Okazuje się, że aby minimalizować sumę strat mocy czynnej i w rdzeniu rozpatrywanego silnika, wartość prądu w osi d powinna mieć niewielką wartość ujemną. Ponadto, przedstawiono wykresy zmian napięcia korekcyjnego w zależności od prędkości w celu uzyskania jak najmniejszych strat mocy czynnej w silniku.

W celu weryfikacji poprawności rozwiązań symulacyjnych opisanej w poprzedniej pracy [1,] gdzie, przedstawiono problem bezczujnikowego sterowania częstotliwościowego według zasady u/f silnika synchronicznego o magnesach trwałych bez klatki tłumiącej dla napędu wentylatora, przeprowadzono badania na stanowisku laboratoryjnym [2]. W celu zmniejszenia poboru mocy przez układ napędowy wyznaczono na stanowisku laboratoryjnym optymalne charakterystyki napięcia w funkcji częstotliwości silnika. Badania przeprowadzono na zestawie napędowym składającym się ze sprzęgniętych dwóch maszyn PMSM, gdzie jedna maszyna była zasilona z tranzystorowego przekształtnika energoelektronicznego PWM, a druga stanowiła obciążenie bierno. Zaproponowano nowe kryterium minimalizacji na podstawie modułu wektora prądu stojana silnika i zbadano algorytm optymalizacji w stanach ustalonych. Przedstawione wyniki laboratoryjne potwierdzają słuszność zastosowanego rozwiązania dla napędu wentylatora. W pracach [2] opisano stanowisko laboratoryjne i metodykę prowadzenia badań. Pomiar mocy wejściowej dla układów przekształtnikowych z prostownikowym mostkiem diodowym jest problemem trudnym, przede wszystkim ze względu na impulsowy kształt prądu pobieranego z sieci zasilania. Wykorzystując układ pomiarowy składający się z: cyfrowego oscyloskopu typu DPO3014 z modułem pomiaru mocy DPO3PWR oraz sond: prądowej i napięciowej mierzono moc czynną w jednej fazie na wejściu mostka diodowego. Przyjmując symetrię napięć zasilających można na tej podstawie wyznaczyć całkowitą moc pobieraną z sieci. Badania w trybie *offline* polegały na poszukiwaniu takiego napięcia korekty, aby moc czynna odczytywana na oscyloskopie była minimalna. Przykładowe wyniki dla częstotliwości zasilania 90 Hz przedstawione są na rysunkach w pracy [2]. Np. dla charakterystyki podstawowej pobierana moc wynosi 300W, natomiast po uwzględnieniu napięcia korekty moc pobierana zmniejszyła się do 266W. Ponieważ w przekształtniku nie jest mierzona moc, natomiast mierzone są prądy, zaproponowano kryterium minimalizacji modułu wektora prądu. Porównano optymalizację *offline* dla minimalizacji mocy czynnej i modułu wektora prądu. Sprawność z korektą napięcia według kryterium minimalizacji modułu prądu jest tylko nieznacznie niższa, niż w przypadku kryterium minimalizacji pobieranej mocy czynnej. Ponieważ analityczne wyznaczenie charakterystyk wymaga dokładnej identyfikacji parametrów maszyny a uzyskanie ich na drodze pomiarowej jest czasochłonne, dlatego zaproponowano prosty

algorytm doboru napięcia korekty działający w trakcie pracy napędu wg. minimalizacji modułu prądu pobieranego przez układ napędowy. Przeprowadzono optymalizację *online* wg. algorytmu wspinaczkowego o zmiennym kroku działania [2]. Zaprezentowane wyniki laboratoryjne potwierdzają poprawną pracę napędu z minimalizacją wektora modułu prądu, a tym samym poprawy sprawności napędu wentylatorowego z silnikiem *PMSM* sterowanym według zasady *u/f*.

W pracach [1, 2] przeprowadzono obszerne badania symulacyjne i laboratoryjne z silnikiem *PMSM* bez klatki tłumiącej w otwartej pętli sterowania częstotliwościowego *u/f*. Zaprezentowane wyniki poprawnie zweryfikowały słuszność zastosowanego rozwiązania dla napędu wentylatora. W pracy [3] przedstawiono alternatywne rozwiązanie otwartego sterowania według zasady *u/f* z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych z klatką tłumiącą (ang. *LSPMSM – Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor*). Silnik taki w czasie rozruchu zachowuje właściwości maszyny indukcyjnej, a w czasie pracy ustalonej – utrzymuje właściwości silnika synchronicznego. Dla napędu z silnikiem *LSPMSM* nie jest konieczne stosowanie dodatkowej pętli stabilizującej pracę wirnika i uwzględniania jej w układzie sterowania. Rolę takiego stabilizatora pełni klatka tłumiąca. Jednak, w celu zapewnienia zmniejszonego poboru mocy czynnej z sieci dla całego układu napędowego z wentylatorem, konieczna jest optymalizacja napięcia zasilającego w funkcji prędkości zadanej. Do rozwiązania tego zadania zastosowano algorytmy genetyczne. W artykule [3] zaprezentowano obwodowy model matematyczny w osi *dq*, przedstawiono wyniki symulacji przedstawiające przebieg prędkości obrotowej i prądu w osi *d* i *q* dla układu z korekcją i bez korekcji napięciowej. Wartość prądu w osi *d*, dzięki korekcji napięcia zasilającego (zmniejszenie modułu napięcia zasilania) została zredukowana do wartości równej 0, przy nie zmienionej wartości prądu w osi *q*, przez co zwiększono sprawność układu napędowego.

Ad. [B]

Przełączalny silnik reluktancyjny (ang. *Switching Reluctance Motor, SRM*) jest interesującą alternatywą dla napędów z silnikiem indukcyjnym i synchronicznym o magnesach trwałych, ponieważ charakteryzuje się prostą konstrukcją wirnika bez uzwojeń i magnesów, wysoką niezawodnością, dużą wartością stosunku momentu elektromagnetycznego do momentu bezwładności i możliwością osiągania bardzo wysokich prędkości obrotowych. Silniki reluktancyjne przełączalne posiadają jednak również wady, do których należy występowanie znacznych tętnień momentu elektromagnetycznego i złożona struktura sterowania. Ponadto, silnik *SRM* jest obiektem bardzo nieliniowym, w którym moment elektromagnetyczny jest skomplikowaną funkcją zależną od położenia wirnika i prądu stojana [4]. Pomimo prostej budowy silnika sterowanie napędem z *SRM* jest dość skomplikowane, szczególnie jeśli miałby on pracować w układach serwonapędowych. Główną wadą układów napędowych z silnikiem *SRM* są tętnienia momentu elektromagnetycznego i towarzyszący im hałas akustyczny. Hałas i tętnienia momentu nie są jednak kryterium eliminującym zastosowanie napędów z tym silnikiem, zależy to od określonej aplikacji. Tętniący moment elektromagnetyczny jest szczególnie niepożądany w serwonapędach, gdzie jego obecność jest dotkliwie odczuwalna przez użytkownika lub

układ obciążenia. Prawidłowa optymalizacja napędu polegająca na odpowiednim wysterowaniu kąta załączenia i wyłączenia poszczególnych faz silnika reluktancyjnego przełączalnego w funkcji prądu i prędkości silnika pozwala uzyskać różne właściwości napędu. W publikacji [4] optymalizowano kąty załączenia i wyłączenia prądu w poszczególnych fazach dla różnych kryteriów, uzyskując odmienne właściwości układu napędowego. W artykule [4] do optymalizacji wykorzystano metodę roju cząstek (*ang. Particle Swarm Optimization*). W omawianej pracy zaprezentowano i zdefiniowano następujące kryteria optymalizacji kąta załączenia i wyłączenia dla silnika *SRM*:

- maksymalny stosunek średniego momentu elektromagnetycznego do wartości prądu zadanego T_{avg}/I_{ref} ,
- maksymalny stosunek średniego momentu elektromagnetycznego do wartości skutecznej prądu T_{avg}/I_{rms} ,
- minimalizacja tętnień momentu elektromagnetycznego – stosunek wartości skutecznej tętnień momentu do jego wartości średniej.

W artykule przedstawiono porównanie wyników badań symulacyjnych w formie wykresów 3D dla analizowanych kryteriów optymalizacji. Dla stałych kątów przełączania amplituda prądu zmniejsza się wraz ze wzrostem prędkości. Dlatego zaproponowano optymalizację kątów sterowania dla różnych kryteriów, co prowadzi do znacznie lepszej sprawności napędu. W celu weryfikacji założonej koncepcji sterowania badania zastały przeprowadzone na stanowisku laboratoryjnym z silnikiem *SRM*. Zobrazowano wyniki laboratoryjne i symulacyjne w formie charakterystyk statycznych momentu elektromagnetycznego w funkcji prędkości dla stałych kątów załączenia i T_{avg}/I_{ref} , oraz przedstawiono przebiegi prądów i prędkości dla tych metod optymalizacji. Ostatecznie można stwierdzić, że wysoka sprawność napędu *SRM* wymaga dokładnej kontroli prądu podczas komutacji w czasie zmian prędkości i prądu. Optymalny wybór kątów przełączania może odbywać się na podstawie różnych kryteriów, które prawidłowo opisują wymagania sterowania. Proces optymalizacji można przeprowadzić *offline* na komputerze klasy PC z uproszczonym modelem układu, a następnie uzyskane wyniki przechowywać w tablicach przeglądowych, które są wykorzystywane w systemie sterowania. Opisany sposób sterowania może być zaimplementowany do sterowania silnikiem *SRM* z wysokimi prędkościami.

Ad [C]

W publikacji [5] przedstawiono syntezę odpornego regulatora prędkości typu *IP* dla silnika synchronicznego z magnesami trwałymi. W porównaniu do prac w doktoracie w analizowanych pracach zaproponowano nieliniową strukturę regulatora *IP*, zamiast *PD-I*, oraz zmodyfikowano wskaźnik jakości zmniejszając liczbę wag. Do optymalizacji regulatora nieliniowego według zaproponowanego wskaźnika jakości została zaaplikowana metoda *simplex*. Dla regulatora typu *PI* w odpowiedzi na skok sygnału zadanego, prędkość gwałtownie rośnie w początkowej fazie rozruchu (przyspieszenie i zryw osiągają znaczne wartości) co w dalszej konsekwencji prowadzi do znacznego przeregulowania. Filtrując

sygnał prędkości zadanej można uzyskać wyraźną poprawę odpowiedzi na skok jednostkowy prędkości i uzyskać brak przeregulowania w sygnale prędkości silnika. Zaproponowano syntezę nieliniowego bloku regulatora typu *IP* z wykorzystaniem układu *ANFIS* (ang. *adaptive neuro-fuzzy inference system*) i systemu rozmytego. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych, które zostały zweryfikowane na stanowisku [C2]. W ostatecznej wersji porównano uzyskane wyniki z regulatorem *fuzzy* i *ANFIS* dla dwóch skrajnych momentów bezwładności. Porównano czasy regulacji (5%) w odpowiedzi na skok wartości prędkości zadanej i skok momentu oporowego (5%). Lepsze wskaźniki jakości uzyskano dla regulatora z blokiem nieliniowym projektowanym za pomocą układu neuro-fuzzy.

Podsumowanie

Dotychczasowe dorobek naukowy autora wniosku obejmuje łącznie 76 publikacji, w tym 22 samodzielne. W czasopiśmie z listy *Journal Citation Report* zostało opublikowanych w sumie 16 artykułów, w tym 2 samodzielne. Prace ukazały się w renomowanych czasopiśmie, takich jak: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *COMPEL* czy *Przegląd Elektrotechniczny*.

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora dorobek naukowy dotyczący tematyki przedstawionej w autoreferacie obejmuje łącznie 39 artykułów naukowych, w tym 16 samodzielnych. W czasopiśmie z listy *Journal Citation Report* zostało opublikowanych 12 publikacji, w tym 2 samodzielne.

Dodatkowo artykuły wchodzące w skład głównego osiągnięcia naukowego ukazały się w materiałach renomowanych konferencji, takich jak: *Power Electronics and Applications* (EPE), *Power Electronics and Motion Control* (PEMC), *Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym* (SENE), *Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits* (EPNC), *International Conference on Cybernetics* (CYBCONF), *International Conference on Mechatronics, Conference on Methods and Models in Automation and Robotics* (MMAR), *Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice* (ZKwE).

Baza *Web of Science Core Collection* indeksuje 19 publikacji habilitanta z czego 11 publikacji jest cytowanych 45 razy (w tym 26 cytowań obcych); **h-index=3**.

Ponadto, 37 publikacji nieindeksowanych w bazie *WoS* (pobrane z pola *References* artykułów cytujących) jest cytowanych 55 razy (w tym 25 cytowań obcych). Sumarycznie wynikiem przeszukania bazy *Web of Science Core Collection* jest 100 cytowań (w tym **51 cytowań obcych**) 48 publikacji autora wniosku.

Baza *Scopus* indeksuje 23 publikacje habilitanta z czego 15 publikacji jest cytowanych 70 razy (w tym 46 cytowań obcych); **h-index=5**.

Ponadto, 55 publikacji nieindeksowanych w bazie *Scopus* (pobrane z pola *References* artykułów cytujących) jest cytowanych 74 razy (w tym 39 cytowań obcych). Sumarycznie

wynikiem przeszukania bazy *Scopus* są 144 cytowania (w tym **85 cytowań obcych**) 70 publikacji autora wniosku.

Sumaryczna liczba przyznanych punktów na rok publikacji określonych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego wynosi **401** (12.11.2015).


Sumaryczny Impact Factor czasopism według listy JCR zgodnie z rokiem opublikowania wynosi **13,317**.

Aktywność habilitanta w środowisku naukowym jest związana z czynnym uczestnictwem w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych poprzez wygłaszanie referatów i przedstawianiu wyników badań naukowych na sesjach plakatowych (po uzyskaniu stopnia doktora habilitant wygłosił: 6 referatów naukowych na konferencjach krajowych i 10 na konferencjach międzynarodowych, uczestniczył czynnie w naukowych sesjach plakatowych na konferencjach krajowych (9 sesji) i międzynarodowych (4 sesje).

Dodatkowo na arenie międzynarodowej autor wniosku uczestniczył w organizowaniu znanej konferencji naukowej *PEMC 2008* i był członkiem komitetu naukowego sesji specjalnej konferencji *CYBCONF 2015*.

Habilitant czynnie uczestniczył jako kierownik, główny wykonawca i wykonawca w projektach naukowych finansowanych ze środków Komitetu Badań Naukowych (3 projekty), Narodowego Centrum Nauki (1 projekt) oraz Narodowego Centrum Badań i Rozwoju współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego (1 projekt).

Za działalność naukową i dydaktyczną habilitant otrzymał dwie nagrody przyznane przez Rektora Politechniki Poznańskiej oraz Medal Komisji Edukacji Narodowej za szczególne zasługi dla oświaty i wychowania.



Tomasz Pajchrowski