Wrocław, 19.08. 2016 r.

Dr inż. Marcin Kamiński
Politechnika Wrocławska
Wydział Elektryczny
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
Zakład Napędu Elektrycznego, Mechatroniki i Automatyki Przemysłowej
ul. Smoluchowskiego 19
50-372 Wrocław

Załącznik nr 2A

do wniosku z dnia 19.08.2016 r.

o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

w dziedzinie Nauk Technicznych w dyscyplinie Automatyka i Robotyka

Autoreferat w języku polskim przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych

Marcin Kamiński

AUTOREFERAT

1. **Imię i nazwisko**

   Marcin Kamiński

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

   - **Stopień doktora nauk technicznych** w dyscyplinie Elektrotechnika, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, tytuł rozprawy: *„Zastosowanie sieci neuronowych do estymacji zmiennych stanu w układach napędowych z połączeniem sprężystym"* promotor prof. dr hab. inż. Teresa Orłowska – Kowalska (recenzenci: prof. dr hab. inż. Lech M. Grzesiak, Politechnika Warszawska, prof. dr hab. inż. Józef Korbicz, Uniwersytet Zielonogórski), 20.09.2010.
   - **Dyplom ukończenia studiów magisterskich**, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, kierunek Automatyka i Robotyka, specjalność Automatyzacja Maszyn, Pojazdów i Urządzeń Elektrycznych, rok 2006.

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

   - 01.10.2014 - adiunkt naukowo dydaktyczny w Katedrze Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej (aktualnie)
   - 22.09.2011-30.09.2014 - adiunkt naukowo dydaktyczny w Instytucie Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej
   - 01.10.2010-21.09.2011 - asystent naukowo dydaktyczny w Instytucie Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej

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

   a) Tytuł osiągnięcia naukowego

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

„Struktury adaptacyjne wykorzystujące elementy sztucznej inteligencji w sterowaniu układem dwumasowym"

b) Wykaz publikacji zaliczonych do cyklu

1. Kamiński Marcin, Orłowska-Kowalska Teresa: Regulatory neuronowe trenowane off-line zastosowane w strukturze sterowania prędkością napędu dwumasowego, Przegląd Elektrotechniczny, R. 91, nr 1, s. 9-12, 2015, http://dx.doi.org/10.15199/48.2015.01.02, Punktacja MNiSW z 2014: 10; 2015: 14. *Indywidualny udział procentowy habilitanta* ***wynosi 70%****. Mój wkład w powstanie niniejszej publikacji polegał na: analizie literatury, opracowaniu koncepcji regulatorów, implementacji regulatorów, wykonaniu badań*

symulacyjnych oraz eksperymentalnych, a także współudziale w analizie oraz opisie wyników.

2. Orłowska-Kowalska Teresa, Kamiński Marcin: Adaptive neurocontrollers for drive systems: basic concepts, theory and applications, Advanced and intelligent control in power electronics and drives, Teresa Orłowska-Kowalska, Frede Blaabjerg, José Rodríguez (eds.), Springer, s. 269-302, 2014, (Studies in Computational Intelligence; ISSN 1860-949X, vol. 531), http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-03401-0_8.
   Indywidualny udział procentowy habilitanta ***wynosi 50%****. Mój wkład w powstanie niniejszej publikacji polegał na: przeglądzie aktualnego stanu zagadnień dotyczących sterowania neuronowego przedstawionego w literaturze, opracowaniu opisu poszczególnych regulatorów neuronowych oraz wykonaniu badań.*
3. Kamiński Marcin, Orłowska-Kowalska Teresa: An on-line trained neural controller with a fuzzy learning rate of the Levenberg-Marquardt algorithm for speed control of an electrical drive with an elastic joint, Applied Soft Computing, vol. 32, s. 509-517, 2015, http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2015.04.013, Punktacja MNiSW z 2014: 40; 2015: 40, **IF – 2,857**.
   Indywidualny udział procentowy habilitanta ***wynosi 70%****. Mój wkład w powstanie niniejszej publikacji polegał na: opracowaniu koncepcji regulatora neuronowego trenowanego on-line oraz metodyki dobierania współczynnika uczenia, realizowanego za pomocą modelu rozmytego, realizacji badań oraz współudziale w analizie wyników i redakcji artykułu.*
4. Kamiński Marcin, Orłowska-Kowalska Teresa: Adaptive neural speed controllers applied for a drive system with an elastic mechanical coupling - a comparative study, Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 45, s. 152-167, 2015, http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2015.06.011, Punktacja MNiSW z 2014: 30; 2015: 35, **IF – 2,368**.
   Indywidualny udział procentowy habilitanta ***wynosi 65%****. Mój wkład w powstanie niniejszej publikacji polegał na: wskazaniu oraz zaproponowaniu rozwiązań dotyczących najistotniejszych problemów utrudniających porównanie właściwości dynamicznych regulatorów neuronowych, wykonaniu badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych, współudziale w analizie wyników oraz redakcji artykułu.*
5. Kamiński Marcin, Orłowska-Kowalska Teresa, Szabat Krzysztof: Neural speed controller based on two state variables applied for a drive with elastic connection, 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, PEMC 2014 (previous EPE-PEMC), 21-24 September 2014, Antalya, Turkey, s. 723-728, 2014, Punktacja MNiSW (Web of Science): 10.
   Indywidualny udział procentowy habilitanta ***wynosi 34%****. Mój wkład w powstanie niniejszej publikacji polegał na: opracowaniu koncepcji zmodyfikowanego regulatora neuronowego, uwzględniającego sprzężenie od momentu skrętnego o adaptowalnym wzmocnieniu, wykonaniu badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych, analizie wyników oraz przygotowaniu artykułu.*
6. Kamiński Marcin: Adaptacyjny regulator neuronowy dla układu dwumasowego, Przegląd Elektrotechniczny, R. 92, nr 5, s. 175-180, 2016, http://dx.doi.org/10.15199/48.2016.05.33, Punktacja MNiSW z 2015: 14.

Indywidualny udział procentowy habilitanta ***wynosi 100%****. Mój wkład w powstanie niniejszej publikacji polegał na: opracowaniu koncepcji implementacji modelu neuronowego jako regulatora (wykorzystującego dwie zmienne stanu- obie prędkości) zastosowanego dla układu dwumasowego, realizacji badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych, analizie wyników (w tym porównawczych), napisaniu artykułu.*

7. Kamiński Marcin: Adaptive state space controller for drive with elastic connection, 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2015, November 9-12, 2015, Yokohama, Japan, s. 4917-4922, 2015.
   Indywidualny udział procentowy habilitanta ***wynosi 100%****. Mój wkład w powstanie niniejszej publikacji polegał na: opracowaniu koncepcji zmodyfikowanego regulatora stanu o niskiej złożoności obliczeniowej, implementacji sprzętowej, wykonaniu badań symulacyjnych oraz eksperymentu, porównaniu z rozwiązaniem klasycznym, redakcji artykułu.*
8. Kamiński Marcin, Orłowska-Kowalska Teresa: Clustering in optimization of RBF-based neural estimators for the drive system with elastic joint, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2011, Gdańsk, Poland, 27-30 June, 2011, s. 1907-1912, 2011, http://dx.doi.org/10.1109/ISIE.2011.5984449, Punktacja MNiSW (Web of Science): 10.
   Indywidualny udział procentowy habilitanta ***wynosi 80%****. Mój wkład w powstanie niniejszej publikacji polegał na: opracowaniu idei optymalizacji struktury sieci radialnych RBF za pomocą klasteringu (subtractive clustering), a następnie przedstawieniu możliwości ich zastosowania w estymacji zmiennych stanu układu dwumasowego, wykonaniu testów oraz analizie uzyskanych wyników.*
9. Kamiński Marcin, Szabat Krzysztof: Neuro-fuzzy state variables estimators of a two-mass drive system, IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT 2015, Seville, Spain, 17-19 March, 2015, s. 1723-1728, 2015, http://dx.doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125346, Punktacja MNiSW (Web of Science): 10.
   Indywidualny udział procentowy habilitanta ***wynosi 50%****. Mój wkład w powstanie niniejszej publikacji polegał na: opracowaniu idei optymalizacji struktury modeli neuronowo-rozmytych za pomocą rozmytego klasteringu K-średnich oraz zastosowaniu takich modeli w odtwarzaniu wybranych zmiennych stanu układu dwumasowego, realizacji badań oraz analizie uzyskanych wyników.*
10. Szabat Krzysztof, Tran Van Than, Kamiński Marcin: A modified fuzzy Luenberger observer for a two-mass drive system, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 11, nr 2, s. 531-539, 2015, http://dx.doi.org/10.1109/TII.2014.2327912, Punktacja MNiSW z 2014: 50, **IF – 4,708**.
    Indywidualny udział procentowy habilitanta ***wynosi 33%****. Mój wkład w powstanie niniejszej publikacji polegał na: opracowaniu idei dotyczącej adaptacji wzmocnień obserwatora Luenbergera przy wykorzystaniu modeli rozmytych, pracującego w warunkach rzeczywistych, a także wykonaniu badań, analizie porównawczej oraz opisie wyników.*
11. Kamiński Marcin: Neural network speed controller for drive system with elastic joint, International Conference on Computer as a Tool (EUROCON), EuroCon 2013, Zagreb, Croatia, 1-4 July 2013, s. 2080-2085, 2013,

http://dx.doi.org/10.1109/EUROCON.2013.6625267, Punktacja MNiSW (Web of Science): 10.
Indywidualny udział procentowy habilitanta ***wynosi 100%****. Mój wkład w powstanie niniejszej publikacji polegał na: wykonaniu modelu obliczeniowego adaptacyjnego regulatora neuronowego oraz sprzętowej implementacji analizowanego modelu w procesorze sygnałowym, realizacji testów eksperymentalnych, ocenie uzyskiwanych wyników, redakcji artykułu.*

12. Kamiński Marcin, Orłowska-Kowalska Teresa: FPGA implementation of ADALINE-based speed controller in a two-mass system, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, nr 3, s. 1301-1311, 2013, http://dx.doi.org/10.1109/TII.2012.2226451, Punktacja MNiSW z 2012: 35; 2013: 40, **IF – 8,785**.
Indywidualny udział procentowy habilitanta ***wynosi 70%****. Mój wkład w powstanie niniejszej publikacji polegał na: zaproponowaniu koncepcji prostego regulatora adaptacyjnego oraz implementacji sprzętowej algorytmu sterowania w matrycy FPGA, realizacji badań eksperymentalnych oraz współredakcji artykułu.*

Wyniki badań prezentowałem w czasopismach indeksowanych według JCR, wymienionych na liście ministerialnej, w rozdziałach książek oraz na znaczących konferencjach krajowych i międzynarodowych. W tabeli 1 zamieszczono zestawienie najistotniejszych informacji dotyczących cyklu publikacji stanowiącego podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego.

Tab. 1. Analiza cyklu publikacji powiązanych tematycznie.

Nr publikacji	**Nazwa czasopisma/konferencji**	**Impact Factor**	**Punktacja wg ujednoliconego wykazu czasopism naukowych MNiSW**	**Wkład wnioskodawcy**	**Rok publikacji**
1	Przegląd Elektrotechniczny	nie dotyczy	10(2014) 14(2015)	70%	2015
2	Advanced and intelligent control in power electronics and drives	nie dotyczy	nie dotyczy	50%	2014
3	Applied Soft Computing	2,857	40(2014) 40(2015)	70%	2015
4	Engineering Applications of Artificial Intelligence	2,368	30(2014) 35(2015)	65%	2015
5	16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition - PEMC 2014	nie dotyczy	10(Web of Science)	34%	2014
6	Przegląd Elektrotechniczny	nie dotyczy	14(2015)	100%	2016
7	41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society - IECON 2015	nie dotyczy	nie dotyczy	100%	2015
8	IEEE International Symposium on Industrial Electronics - ISIE 2011	nie dotyczy	10(Web of Science)	80%	2011

9	IEEE International Conference on Industrial Technology - ICIT 2015	nie dotyczy	10(Web of Science)	50%	2015
10	IEEE Transactions on Industrial Informatics	4,708	50(2014)	33%	2015
11	International Conference on Computer as a Tool - EUROCON 2013	nie dotyczy	10(Web of Science)	100%	2013
12	IEEE Transactions on Industrial Informatics	8,785	35 (2012) 40(2013)	70%	2013

Współczynniki prezentujące jakościową ocenę moich publikacji naukowych

Sumaryczny współczynnik IF (Impact Factor) opracowań załączonych do cyklu publikacji powiązanych tematycznie: **18,718**.

Sumaryczny współczynnik IF (Impact Factor) opracowań załączonych do cyklu publikacji powiązanych tematycznie oraz uwzględniający artykuły związane z pozostałymi osiągnięciami naukowymi opisanymi w niniejszym autoreferacie: **19,632**.

Sumaryczny współczynnik IF (Impact Factor), dotyczący dorobku naukowego habilitanta (po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych): **24,191**.

Łączna liczba cytowań (z wyłączeniem autocytowań) wszystkich publikacji według Web of Science: 129.

Łączna liczba cytowań (z wyłączeniem autocytowań) wszystkich publikacji według Scopus: 184.

Łączna liczba cytowań (z wyłączeniem autocytowań) wszystkich publikacji według Google Scholar: 191.

Indeks Hirscha według Web of Science: 6.

Indeks Hirscha według Scopus: 6.

Indeks Hirscha według Google Scholar: 9.

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

Niniejsze opracowanie przedstawia wybrane oryginalne osiągnięcia dotyczące badań, które prowadziłem w dyscyplinie naukowej automatyka i robotyka, po uzyskaniu stopnia doktora. Tematyka rozważań dotyczy przede wszystkim aplikacji struktur adaptacyjnych, wykorzystujących elementy sztucznej inteligencji: sieci neuronowe oraz modele projektowane z zastosowaniem logiki rozmytej, w sterowaniu oraz estymacji zmiennych stanu. Sterowanym obiektem najczęściej był napęd elektryczny, charakteryzujący się złożoną częścią mechaniczną, uwzględniającą sprężysty wał pomiędzy silnikiem napędzającym a maszyną roboczą. Tego typu cecha konstrukcyjna napędu wprowadza istotne zakłócenia dla pętli sterowania prędkością. W przebiegach zmiennych stanu mogą pojawiać się oscylacje utrudniające precyzyjne sterowanie. Jednak prowadzone przeze mnie testy wykazują, że analizowane adaptacyjne struktury regulacji mogą być rozważane w kontekście aplikacji dotyczących innych układów napędowych, w tym napędów o sztywnym połączeniu, z różnymi typami silników. Wymienione spostrzeżenie wynika z uniwersalnej metodyki projektowania, wprowadzonej adaptacji parametrów regulatorów neuronowych, a także testów, które przeprowadziłem w celu analizy wpływu opóźnień pętli kształtowania momentu

elektromagnetycznego na właściwości proponowanych algorytmów sterowania [1]-[12] (publikacje wymienione w punkcie 4b).

W prowadzonych badaniach analizowałem regulatory bazujące na modelach neuronowych oraz rozmytych zastosowane w pętli sterowania prędkością napędów elektrycznych. Na podstawie aplikacji kolejnych struktur zwróciłem uwagę na istotny podział determinujący sposób projektowania, właściwości układu regulacji oraz implementację sprzętową. Klasyfikacja jest bezpośrednio związana ze sposobem wykonywania obliczeń algorytmu adaptacyjnego, precyzując - dotyczy metodyki wprowadzania poprawek w regulatorze neuronowym. Trening modelu neuronowego może być realizowany: *on-line* lub *off-line*. Pierwsza z metod dotyczy wykonywania obliczeń algorytmu adaptacji w trakcie działania obiektu, równolegle do głównego toru obliczeń całej struktury. W celu porównania obu metod badałem także możliwość zastosowania neuronowego regulatora prędkości dostrajanego poza napędem (*off-line*) na podstawie zgromadzonego uprzednio zbioru danych [1]. Zaletą takiej aplikacji jest redukcja mocy obliczeniowej wymaganej do działania regulatora neuronowego w układzie napędowym. Proces treningu jest przesunięty do etapu projektowania, w związku z tym precyzja sterowania oraz odporność na zmiany parametrów są bezpośrednio uzależnione od właściwości generalizacyjnych zastosowanego modelu neuronowego. Natomiast wymienione cechy są ściśle związane ze złożonością struktury modelu, liczbą iteracji lub odpowiednim przygotowaniem zbioru danych treningowych. W związku z tym ten etap prac jest utrudniony, bardziej złożony.

W publikacjach naukowych związanych z teorią sieci neuronowych opisanych zostało wiele struktur modeli oraz algorytmów adaptacyjnych. Zatem, w prowadzonych badaniach należało przyjąć pewne kryterium ograniczające zakres prowadzonych prac. Kierując się wymaganiami dotyczącymi prostoty realizacji praktycznej, ograniczyłem badania do aplikacji jednokierunkowych sieci neuronowych, które nie zawierają wewnętrznych sprzężeń zwrotnych. Wśród metod treningowych analizowałem algorytmy wykorzystujące obliczenia pochodnych funkcji celu względem wag [2], [3]. Wybrane struktury adaptacyjne zastosowałem w pętli regulacji prędkości napędu elektrycznego zawierającego złożoną część mechaniczną (połączenie sprężyste pomiędzy silnikiem napędowym i maszyną roboczą, przybliżone układem dwumasowym). Na tle dostępnej literatury, tego typu podejście jest oryginalne. Przeprowadziłem badania porównawcze dla poszczególnych struktur sterowania [2, 4]. Należy podkreślić, że obiektywna weryfikacja cech zastosowanej sieci neuronowej oraz metody adaptacji jest bardzo trudne w przypadku regulatorów neuronowych. Jest to związane z zapewnieniem odpowiednich warunków przeprowadzanych badań umożliwiających rzetelne porównanie rezultatów. Taka sytuacja wynika z konieczności doboru stałych parametrów algorytmu przeliczającego wagi sieci neuronowej oraz wartości początkowych użytego modelu (liczba tych współczynników w wielu przypadkach jest znacznie większa, porównując do regulatorów przestrajalnych opartych na klasycznych strukturach, np. typu PID, zatem znaczenie tego zagadnienia jest jeszcze bardziej istotne). W związku z powyższym zaproponowałem oryginalne rozwiązanie uwzględniające zastosowanie modelu rozmytego w celu adaptacji parametrów algorytmu treningowego [3]. W ten sposób wartość współczynników uczenia była optymalizowana *on-line*. Uwzględniając identyczne parametry oraz zakresy zmian modelu rozmytego zastosowanego w różnych typach regulatorów neuronowych, możliwe było porównanie właściwości dynamicznych napędu. Kolejnym istotnym problemem w analizie porównawczej struktur sterowania z różnymi regulatorami neuronowymi jest wprowadzanie losowych wartości początkowych wag. Aby wyeliminować wpływ tego etapu projektowania na poprawność oceny porównywanych struktur, zastosowałem wstępny trening sieci neuronowej. Tego typu postępowanie, w przypadku zastosowania przebiegów odpowiadających działaniu napędu,

może prowadzić do skrócenia początkowej fazy dostrajania regulatora. Jednak w prowadzonych badaniach celem było również porównanie oraz wykazanie zbieżności działania algorytmu adaptacyjnego dla błędnie dobranych nastaw początkowych regulatora. Dlatego proces ten zrealizowałem z użyciem identycznych danych, które nie były związane z działaniem napędu. Najlepsze rezultaty (najkrótszy czas odpowiedzi na skok sygnału referencyjnego oraz najskuteczniejsza reakcja na zmiany obciążenia) uzyskałem dla regulatora neuronowego wykorzystującego klasyczną strukturę perceptronu wielowarstwowego, dla której zastosowano algorytmy: *adaptive interaction* oraz wstecznej propagacji błędu. Dodatkową zaletą pierwszego z wymienionych algorytmów jest brak konieczności przetwarzania błędu wyjściowego poprzez strukturę modelu neuronowego. W testach, dla przyjętych założeń, najmniej korzystnie wypadł regulator wykorzystujący model sieci radialnej oraz gradientowy algorytm adaptacji. W niektórych aplikacjach rzeczywistych korzystne może być również zastosowanie regulatora opartego o model *ADALINE* z adaptacją według reguły delta - posiada on uproszczoną strukturę w porównaniu do poprzednich modeli [4].

Struktury sterowania wymienione powyżej wykorzystywały jedno sprzężenie zwrotne od prędkości silnika napędzającego. Warto podkreślić, że jest to grupa struktur sterowania, w której precyzja odtwarzania zadanej trajektorii prędkości jest najtrudniejsza do uzyskania. W układzie dwumasowym występują dodatkowe zmienne stanu, które przy powyższym założeniu nie są bezpośrednio sterowane. Jednak tego typu aplikacje mogą być realizowane dla zadań, w których zakładana jest redukcja liczby czujników pomiarowych (zmniejszenie kosztów realizacji oraz zwiększenie niezawodności), kosztem dokładności sterowania. Doświadczenia naukowo-badawcze uzyskane podczas implementacji oraz testów regulatorów neuronowych w sterowaniu napędami elektrycznymi z połączeniem elastycznym, nakierowały trend moich kolejnych badań na rozwijanie adaptacyjnych struktur sterowania poprzez wprowadzanie dodatkowych sprzężeń zwrotnych od zmiennych stanu związanych z układem dwumasowym. W następnych publikacjach przedstawiłem wpływ wprowadzania dodatkowych sprzężeń na tłumienie oscylacji obu prędkości napędu, efekt ten jest szczególnie widoczny w trakcie zmian momentu obciążenia. Struktury zawierające adaptacyjny regulator neuronowy uwzględniały w obliczeniach sygnał momentu skrętnego [5] (artykuł został wyróżniony podczas konferencji PEMC'14, *Best Paper Award for the paper Neural Speed Controller Based on Two State Variables Applied for a Drive with Elastic Connection presented at the 16th International Power Electronics and Motion Control Conference, Antalya, Turkey, September 21-24, 2014*) oraz prędkości obciążenia [6].

Moje doświadczenia wynikające z prowadzonych badań prowadziły do konkluzji, że w teoretycznych rozważaniach, zakładając pełną, bardzo precyzyjną obserwowalność zmiennych stanu oraz idealną identyfikację parametrów układu dwumasowego, bardzo dobrym rozwiązaniem w sterowaniu układem dwumasowym jest regulator stanu. Struktura sterowania zakłada kształtowanie sygnału sterującego na podstawie pełnej informacji o obiekcie, co umożliwia uzyskanie wysokiej precyzji działania oraz prostoty obliczeniowej. Jednak wadą układu napędowego z takim regulatorem jest zależność jakości regulacji od parametrów napędu oraz wrażliwość na zmiany tych wartości. W związku z powyższym zaproponowałem nowelizację analizowanego algorytmu sterowania. Podstawą była klasyczna konstrukcja regulatora stanu dla układu dwumasowego, natomiast korekty wzmocnień w torach sprzężeń zwrotnych były przeliczane *on-line* w trakcie działania napędu. Wstępnie dobrane wartości nastaw regulatora korygowane były zgodnie z tzw. regułą *Widrowa-Hoffa*, stosowaną często w teorii sieci neuronowych. W ten sposób uzyskałem zwiększenie odporności klasycznego układu regulacji na zmiany parametrów układu dwumasowego [7].

Równolegle do prac dotyczących struktur sterowania prowadziłem badania algorytmów odtwarzających zmienne stanu napędu. Analizowałem możliwość zastosowania sieci radialnych oraz neuronowo-rozmytych do odtwarzania momentu skrętnego oraz prędkości maszyny roboczej w układzie dwumasowym [8], [9]. Jest to charakterystyczne rozwiązanie, które nie było opisywane wcześniej w literaturze oraz implikuje charakterystyczną metodykę projektowania, która nie wymaga bezpośredniej identyfikacji obiektu. W badaniach zwróciłem szczególną uwagę na problem, pojawiający się w etapie projektowania, związany z doborem struktury stosowanych modeli. W tym celu zastosowałem algorytm *subtractive clustering* w optymalizacji neuronów radialnych oraz *fuzzy clustering* w doborze struktury modeli neuronowo-rozmytych. Trening w obu przypadkach był realizowany w trybie *off-line*. Otrzymane wyniki badań prezentują wysoką precyzję estymacji wybranych zmiennych stanu, nawet w przypadku zmian parametrów obiektu sterowania.

Tematyka dotycząca odtwarzania zmiennych stanu z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji była przeze mnie badana również w odniesieniu do algorytmicznych układów odtwarzających. Zaproponowałem oryginalną modyfikację klasycznego obserwatora *Luenbergera*. Celem tych prac było rozwiązanie istotnego problemu projektowego obserwatora, który polegał na doborze parametrów definiujących dynamikę odtwarzanych sygnałów. Zakłada się, że w celu uzyskania wysokiej precyzji, obserwator powinien być kilkukrotnie szybszy od regulatora. Jednak dobór parametrów determinujących te właściwości, który nie był dotychczas jasno sprecyzowany w literaturze, jest pewnego rodzaju kompromisem między dynamiką uzyskiwanych przebiegów a wzmacnianiem szumów pomiarowych oraz innych zakłóceń. W związku z tym zaproponowałem strukturę obserwatora o zmiennych wzmocnieniach, przeliczaną w zależności od wartości z modelu rozmytego. Adaptacja była realizowana zgodnie z dwoma założeniami: zwiększanie dynamiki obserwatora w stanach przejściowych (kiedy błąd estymacji jest największy) oraz redukcja nastaw w celu tłumienia zakłóceń w stanach ustalonych. W ten sposób uzyskałem zdecydowaną poprawę działania klasycznego obserwatora *Luenbergera* [10].

W trakcie prowadzonych prac badawczych rozważałem również możliwość aplikacji sprzętowych układów regulacji analizowanych teoretycznie oraz w obliczeniach numerycznych. Implementacje modeli adaptacyjnych w wielu przypadkach wymagają znaczącej mocy obliczeniowej ze względu na złożone przetwarzanie sygnałów w torze głównym regulatora oraz w algorytmie adaptacji. W związku z tym w realizowanych przeze mnie badaniach eksperymentalnych najczęściej wykorzystywanym układem programowalnym był procesor sygnałowy karty *dSPACE 1103*. Należy zwrócić uwagę na charakter obliczeń - w modelu neuronowym dane są przetwarzane równolegle. Zatem testy sprzętowe zrealizowałem również stosując matryce *FPGA* (będące wyposażeniem sterownika firmy National Instruments – *CompactRIO*). W obu przypadkach założyłem wykorzystanie technik szybkiego prototypowania, w celu uzyskania możliwości szybkiej rekonfiguracji algorytmu sterowania [11], [12]. W celu zwiększenia korzyści dla możliwości zastosowań przemysłowych, analizowane algorytmy implementowałem również w procesorach firmy Texas Instruments – *TMS320F2812* oraz procesorach *ARM*, uzyskując w ten sposób zdecydowaną redukcję kosztów praktycznej realizacji układu sterowania.

Celem prowadzonych przeze mnie badań było opracowanie adaptacyjnych struktur sterowania zawierających modele oparte na algorytmach sztucznej inteligencji, które zastosowałem dla napędu elektrycznego z połączeniem sprężystym. Założeniem prac było uzyskanie algorytmów sterowania, które charakteryzują się odpornością na zmiany parametrów obiektu oraz uproszczoną metodyką projektowania. W układach regulacji

wykorzystałem modele oparte na teoriach wywodzących się ze sztucznej inteligencji, dotyczących sieci neuronowych oraz logiki rozmytej. Zastosowane elementy miały stanowić główny element regulatora adaptacyjnego lub współdziałać z klasycznymi rozwiązaniami (regulator stanu, obserwator *Luenbergera*) w celu poprawienia ich właściwości. Uzyskane rezultaty można odnieść do dwóch grup zagadnień związanych z teorią sterowania: neuronowych adaptacyjnych regulatorów zastosowanych dla układu dwumasowego oraz estymatorów zmiennych stanu układu napędowego z połączeniem sprężystym wykorzystujących elementy sztucznej inteligencji.

W obszarze adaptacyjnych regulatorów neuronowych do najważniejszych osiągnięć zaliczyłbym poniżej przedstawione efekty badań.

- *Badanie właściwości struktur sterowania wykorzystujących regulatory neuronowe trenowane off-line.* Zaimplementowałem oraz przetestowałem w badaniach symulacyjnych oraz eksperymentalnych układy regulacji zawierające modele neuronowe trenowane poza strukturą napędu. Analizowałem struktury sterowania: z modelem odwrotnym (*Direct Inverse Control*) oraz modelem wewnętrznym (*Internal Model Control*). Wykazałem również istotne różnice w projektowaniu oraz właściwościach regulatorów trenowanych *on-line* oraz *off-line* [1].
- *Opracowanie oraz porównanie adaptacyjnych regulatorów neuronowych zastosowanych dla napędu elektrycznego z połączeniem sprężystym.* W trakcie prac zaproponowałem zastosowanie modeli neuronowych o różnych strukturach oraz wykorzystujących różne algorytmy adaptacji współczynników wagowych (realizowanej *on-line*) [2]-[7]. Istotnym elementem badań było zapewnienie warunków testów gwarantujących możliwość porównania właściwości regulatorów. Zagadnienia te dotyczyły: doboru wartości początkowych współczynników wagowych oraz stałych parametrów algorytmów treningowych sieci neuronowych. W publikacjach opisałem szczegółowo wyniki porównawcze uzyskane dla znamionowych oraz zmienionych parametrów napędu [2], [4].
- *Propozycja metodyki wyznaczania współczynników uczenia algorytmów stosowanych dla sieci neuronowych stosowanych jako regulatory prędkości napędu elektrycznego.* W algorytmach treningowych pojawiają się stałe parametry, które należy założyć *a priori* w trakcie projektowania regulatorów neuronowych. Wartości te nie są opisane w literaturze za pomocą zależności matematycznych, jednak są bardzo istotne dla obliczeń regulatorów. W związku z powyższym zaproponowałem metodykę obliczeń współczynników algorytmów uczenia za pomocą modeli rozmytych [3], [4].
- *Poprawienie jakości sterowania uzyskiwanej po zastosowaniu regulatorów neuronowych.* W pętli regulacji prędkości układu napędowego zastosowałem modele neuronowe trenowane *on-line*. W badaniach porównywałem precyzję odtwarzania trajektorii zadanej układów sterowania z regulatorami neuronowymi trenowanymi *on-line* oraz regulatorami PI (strojonymi klasycznymi metodami). Uzyskanym efektem jest poprawa odporności układu regulacji na zmiany stałych czasowych układu dwumasowego [4], [7].
- *Analiza możliwości sterowania układem dwumasowym za pomocą regulatorów neuronowych bazujących na zredukowanej liczbie zmiennych stanu.* W pracach badałem regulatory wykorzystujące wybrane zmienne stanu napędu z elastycznym wałem. Zastosowanie poszczególnych rozwiązań ma wpływ na dokładność tłumienia oscylacji prędkości układu. Wprowadzanie dodatkowych sprzężeń w aplikacjach rzeczywistych może być jednak związane z problemem dotyczącym uzyskiwania informacji o zmiennych stanu. Dlatego w większości badań, rozważałem układy o zredukowanej liczbie wykorzystywanych zmiennych stanu. Testowałem również

układy regulacji, w których dodatkowo wprowadzałem prędkość obciążenia oraz moment skrętny [5], [6].

- *Zwiększenie odporności klasycznego regulatora stanu poprzez wprowadzenie adaptacji współczynników wzmocnień.* Wstępnie dobrane parametry regulatora, obliczone klasycznymi metodami, przeliczane były *on-line*, na podstawie uchybu regulacji prędkości z wykorzystaniem popularnej w teorii sieci neuronowych metody - algorytmu *Widrowa-Hoffa*. Uzyskano regulator nie wymagający znaczącej mocy obliczeniowej, który zapewnia poprawę jakości sterowania (w porównaniu z klasycznym regulatorem), szczególnie w trakcie zmian parametrów obiektu [7].

W zakresie odtwarzania zmiennych stanu układu dwumasowego do oryginalnych autorskich osiągnięć zaliczyłbym poniższe zagadnienia.

- *Opracowanie oryginalnych estymatorów zmiennych stanu wykorzystujących sieci radialne oraz modele neuronowo-rozmyte.* Zaproponowałem metodykę projektowania, wykonałem testy symulacyjne oraz eksperymentalne estymatorów prędkości obciążenia oraz momentu skrętnego opartych na testowanych modelach neuronowych. Estymatory nie wymagają bezpośredniej informacji o modelu matematycznym obiektu oraz identyfikacji jego parametrów. W proponowanym rozwiązaniu uzyskano wysoką dokładność odtwarzanych zmiennych stanu oraz odporność na zmiany parametrów obiektu [8], [9].
- *Propozycja zastosowania klasteringu w optymalizacji struktury estymatorów opartych na radialnych sieciach neuronowych oraz modelach neuronowo-rozmytych.* Zastosowane w estymacji zmiennych stanu modele neuronowe i neuro-rozmyte, wymagają w trakcie projektowania podjęcia decyzji dotyczących struktury, należy wyznaczyć liczbę neuronów ukrytych oraz parametry funkcji radialnych (rozmieszczenie centrów). W tym celu zastosowałem wybrane algorytmy klasteringu. Proponowane rozwiązanie na etapie opracowywania estymatora jest szczególnie istotne, gdyż wpływa na właściwości generalizacyjne oraz precyzję uzyskiwanych wyników [8], [9].
- *Poprawienie jakości odtwarzania zmiennych stanu uzyskiwanych za pomocą klasycznego obserwatora Luenbergera poprzez zastosowanie rozmytej adaptacji współczynników wzmocnień.* W klasycznym obserwatorze Luenebrgera wprowadziłem adaptację macierzy wzmocnień, realizowaną poprzez model rozmyty. Celem wprowadzonej modyfikacji była eliminacja wzmacniania zakłóceń występujących w rzeczywistych aplikacjach. Zaproponowany algorytm poszukuje rozwiązań redukujących wzmacnianie szumów, a jednocześnie nie powoduje pogorszenia dynamiki odtwarzanych zmiennych stanu [10].

Należy zaznaczyć, że wszystkie opisane prace badawcze uwzględniały implementacje sprzętowe opracowanych i przetestowanych w badaniach symulacyjnych algorytmów sterowania oraz weryfikacje wyników testów obliczeniowych w badaniach przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym. Obliczenia związane z przetwarzaniem neuronowym najczęściej wykonywałem z wykorzystaniem procesorów sygnałowych (karta *dSPACE*) [11]. Kolejnym układem programowalnym, który stosowałem była matryca *FPGA* (w celu zapewnienia rzeczywistych obliczeń równoległych). Wykorzystany sterownik (*cRIO*) zapewnia możliwość bezpośredniego zastosowania regulatora neuronowego w aplikacjach przemysłowych [12].

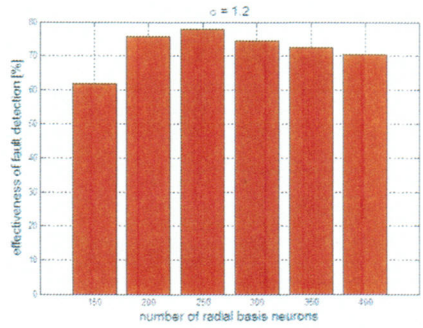
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

Największy zakres realizowanych przeze mnie prac naukowo-badawczych (reprezentowany przez dominującą liczbę publikacji), prowadzonych po uzyskaniu stopnia doktora, dotyczył adaptacyjnych modeli sztucznej inteligencji, stosowanych w strukturach sterowania układem dwumasowym. Szczegóły dotyczące tej tematyki zostały przedstawione w poprzednim rozdziale niniejszego opracowania. Jednak poza wymienionymi badaniami, skupiałem się również na zagadnieniach, które sklasyfikowałem tematycznie poniżej oraz przedstawiłem krótki opis analizowanych zagadnień. Ponieważ przedstawione badania nie zostały uwzględnione w cyklu publikacji stanowiących podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego i nie zostały załączone do dokumentacji, przedstawiłem również wybrane wyniki badań. W części 6 niniejszego opracowania wymieniłem listę dodatkowych publikacji, zawierających szczegóły opisywanych badań. O uznaniu dla poziomu prowadzonych przeze mnie badań naukowych świadczy przyznanie mi 14 listopada 2014 roku nagrody imienia Dionizego Smoleńskiego, która jest nadawana w Politechnice Wrocławskiej młodym pracownikom naukowym za uzyskanie wybitnych osiągnięć naukowych w dziedzinach nauk ścisłych, nauk technologicznych i nauk interdyscyplinarnych.

5.1. Zastosowanie modeli neuronowych w analizie symptomów uszkodzeń silników indukcyjnych

Praktyka polegająca na monitorowaniu oraz analizie stanu technicznego maszyn elektrycznych jest standardowym działaniem przeprowadzanym na rzeczywistych obiektach przemysłowych. Najczęściej takie postępowanie dotyczy silników indukcyjnych, ze względu na popularność zastosowań tego typu maszyn elektrycznych. W literaturze opisano wiele sposobów uzyskiwania symptomów uszkodzeń, które bazują na przetwarzaniu mechanicznych lub elektrycznych zmiennych stanu. Wśród najbardziej popularnych rozwiązań przeważają rozwiązania oparte o sygnały prądu stojana oraz drgań silnika (wynika to z dostępności pomiarowej). We wstępnym przetwarzaniu danych, zaproponowanych systemów diagnostycznych, zastosowałem szybką transformatę Fouriera. Celem zastosowanych modeli neuronowych była analiza symptomów oraz detekcja ewentualnych uszkodzeń klatki wirnika, uwzględniająca konkretną ocenę - wyznaczenie liczby uszkodzonych prętów klatki. Modele neuronowe testowane były poza układem napędowym – *off-line*. Powyższa uwaga jest szczególnie istotna, ponieważ implikuje konieczność optymalizacji właściwości generalizacyjnych sieci neuronowych. Jednym z najistotniejszych czynników wpływających bezpośrednio na dokładność działania modelu neuronowego (w przypadku testów realizowanych z wykorzystaniem danych, które nie były uwzględniane w procesie uczenia) jest złożoność struktury sieci. W przypadku modeli wielowarstwowych sieci perceptronowych (***Multi Layer Perceptron***), pojawia się dodatkowy problem dotyczący wyboru liczby warstw. W opisywanym projekcie zastosowałem sieci neuronowe radialne (***Radial Basis Function*** *Neural Networks*), ze względu na teoretyczne założenia związane z działaniem takich modeli, dotyczące bezpośredniej klasyfikacji danych poprzez podział przestrzeni realizowany za pomocą funkcji Gaussa [13]. Dodatkowym zagadnieniem projektowym, jest zatem rozmieszczenie funkcji radialnych w przestrzeni analizowanych danych (dobór parametrów funkcji radialnych). W wielu przypadkach stosowane jest bezpośrednie wyznaczenie tych informacji na podstawie zbioru danych uczących. Jednak takie podejście prowadzi do wygenerowania modelu o stosunkowo dużych rozmiarach, który nie gwarantuje optymalnych wyników oraz jest problematyczny dla ewentualnej aplikacji sprzętowej. W trakcie badań zaobserwowałem również pewną analogię w działaniu sieci *RBF* do analizy danych za pomocą algorytmów klasteringu. W związku z czym na etapie projektowania detektorów neuronowych dobór struktury (położenie centrów funkcji

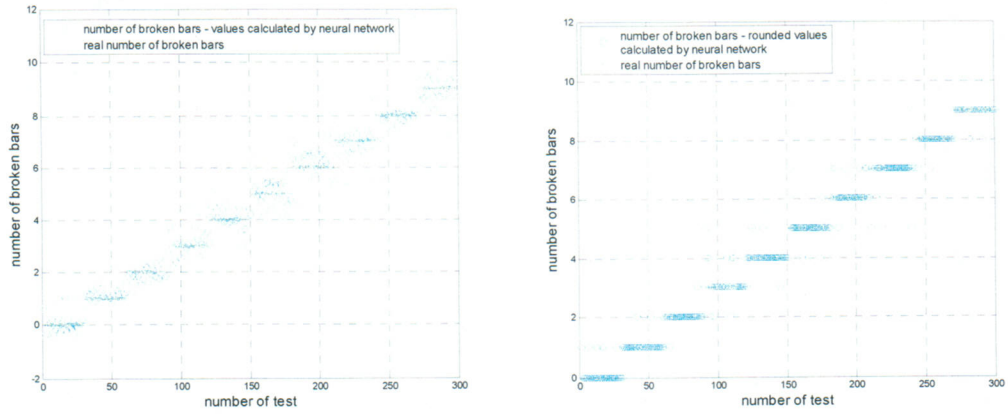
radialnych) wyznaczałem za pomocą algorytmu K-średnich. W badaniach testowałem wpływ liczby neuronów radialnych oraz parametru σ wpływającego na skalowanie argumentów wejściowych (w efekcie działającym jako korekcja szerokości funkcji radialnej). Testy potwierdziły założenia teoretyczne mówiące o zależności dokładności uzyskiwanych wyników od struktury sieci neuronowej. Wykazały również, że istnieje optymalna liczba neuronów warstwy ukrytej, zbyt mała struktura jest niewystarczająca do reprezentacji zbioru danych wykorzystanych w treningu, nadmierne zwiększanie liczby neuronów pogarsza właściwości generalizacyjne (rysunek 1). W sieciach *RBF* stosowana jest jedna warstwa ukryta z neuronami o radialnych funkcjach aktywacji, jednak porównując do wyników uzyskiwanych za pomocą modeli *MLP*, podobne wyniki uzyskiwałem stosując większą liczbę neuronów o radialnej funkcji aktywacji w warstwie ukrytej.



Rys. 1. Wpływ liczby neuronów warstwy ukrytej sieci *RBF* na precyzję wyznaczania uszkodzeń wirnika silnika indukcyjnego.

W celu opracowania oraz przeprowadzenia testów, została zebrana szeroka baza danych pomiarowych, które następnie zostały poddane obliczeniom z wykorzystaniem modeli neuronowych. Należy zaznaczyć, że uwzględnione zostały zmiany momentu obciążenia, które przy analizie składowych poślizgowych stanowią istotne zakłócenie dokładności detekcji uszkodzenia. Dokładność wykrywania uszkodzeń przez sieci neuronowe zachowano poprzez wprowadzenie modułu wektora przestrzennego prądu stojana. Warto podkreślić, że badano silnik podłączony do przemiennika częstotliwości, zatem dodatkowym utrudnieniem w detekcji liczby uszkodzonych prętów wirnika były zmiany częstotliwości zasilania. Uzyskiwane wyniki charakteryzowały się bardzo dużą precyzją wyznaczania liczby uszkodzonych prętów klatki wirnika (rysunek 2).

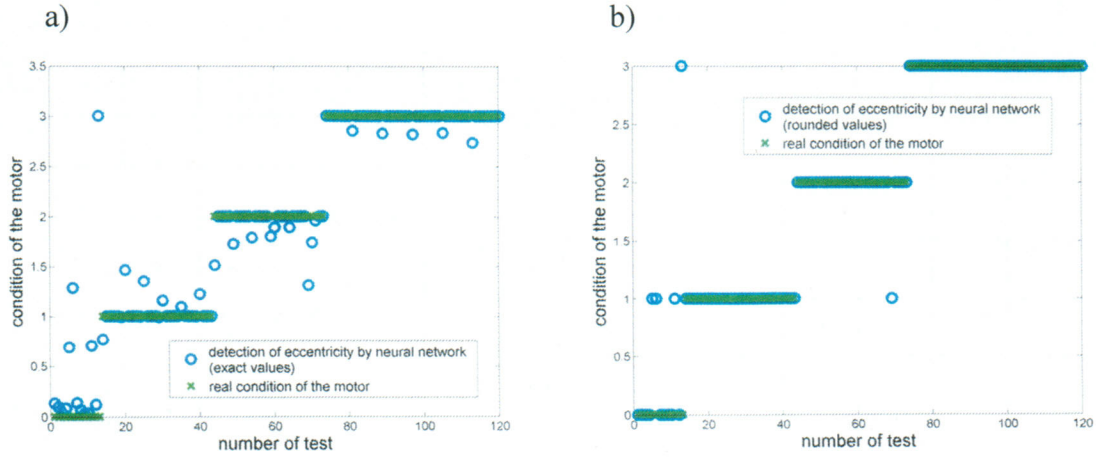
a) b)



Rys. 2. Detekcja uszkodzeń prętów klatki wirnika za pomocą sieci *RBF* optymalizowanych za pomocą klasteringu K-średnich: bezpośrednie wskazania modeli neuronowych (a) oraz wartości zaokrąglone (b).

Oryginalnym rozwiązaniem zastosowanym do opisanego powyżej zadania, było również zastosowanie regresyjnych sieci neuronowych (*General Regression Neural Networks*) [14]. Specyficzny model wykorzystujący metody analizy statystycznej został wcześniej zaimplementowany do postaci sieci neuronowej oraz opisany w literaturze. Zastosowanie tego typu struktury neuronowej determinuje również istotne założenia związane z treningiem zastosowanego modelu. Zauważyłem, że teoria związana z tego typu sieciami neuronowymi może prowadzić do znacznego uproszczenia procesu projektowania detektorów neuronowych - mianowicie możliwe jest wyeliminowanie problemów pojawiających się w etapie projektowania sieci neuronowych *MLP* oraz *RBF*. Czas obliczeń algorytmu treningowego został zdecydowanie skrócony poprzez metodę, w której przetwarzanie jest realizowane w trybie tzw. one-pass, jest to znaczne uproszczenie obliczeń. Powyższa cecha jest szczególnie istotna, w odniesieniu do gradientowych algorytmów uczenia sieci neuronowych (gdzie często stosowany jest algorytm wstecznej propagacji błędu). **Zastosowanie tego typu modeli neuronowych prowadzi również do całkowitego lub częściowego pominięcia ważnych problemów związanych z procesem projektowania: doboru początkowych wartości parametrów oraz stałych współczynników definiowanych dla struktury sieci lub algorytmu uczenia.** W badaniach przeprowadziłem również analizę wpływu postaci wektora wejściowego na uzyskiwane wyniki. Zaprojektowane detektory umożliwiły bardzo dokładną analizę symptomów uszkodzeń klatki wirnika silnika indukcyjnego.

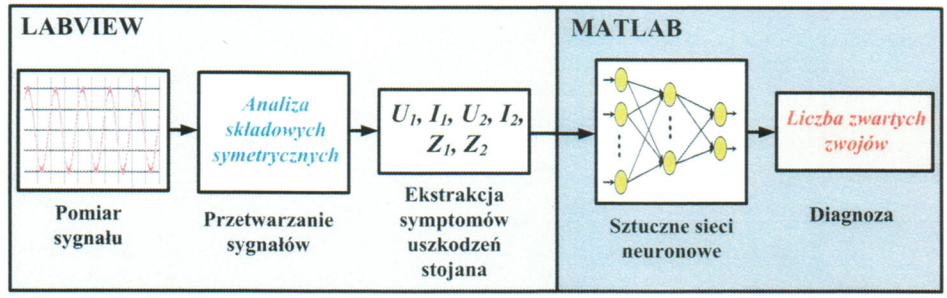
Następnym zastosowaniem modeli neuronowych *GRNN* w diagnostyce silników indukcyjnych, które zaproponowałem, była detekcja ekscentryczności wirnika [15]. Zrealizowane układy diagnostyczne wykrywały uszkodzenie oraz typ niewspółosiowości (statyczna, dynamiczna, mieszana) wirnika oraz stojana maszyny (rysunek 3). Procentowa skuteczność oceny stanu silnika przekraczała 95%.



Rys. 3. Graficzna prezentacja rezultatów wykrywania ekscentryczności za pomocą modeli *GRNN*: bezpośrednie wskazania modeli neuronowych (a) oraz wartości zaokrąglone (b).
Na rysunkach przyjęto następujące oznaczenia: (0 – silnik sprawny, 1 – statyczna ekscentryczność, 2 – dynamiczna ekscentryczność, 3 – mieszana ekscentryczność).

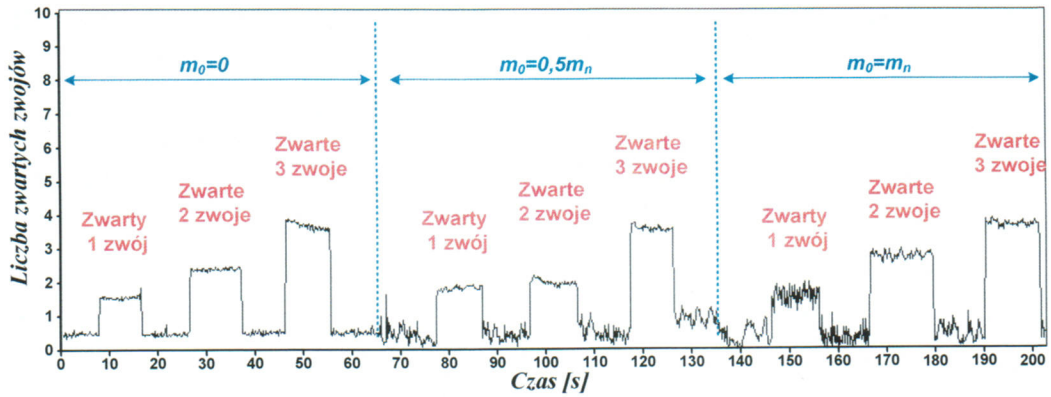
Oddzielnym etapem badań, które dotyczyły zastosowań modeli neuronowych w diagnostyce silników indukcyjnych, było zastosowanie sieci do wykrywania zwarć zwojowych stojana maszyny zasilanej z przekształtnika częstotliwości. Uczestniczyłem w realizacji projektu, w ramach którego przeprowadzono analizę zależności składowych kolejności zgodnej oraz przeciwnej prądu oraz napięcia stojana od liczby zwartych zwojów. Ponadto uwzględniano zmiany obciążenia oraz częstotliwości zasilania. W ten sposób zaobserwowano możliwość analizy stanu technicznego maszyny na podstawie generowanych

sygnałów. W celu analizy uzyskiwanych symptomów zwarć zwojowych zastosowałem sieci neuronowe *MLP*. W procesie treningu sieci neuronowej użyłem algorytmu *Levenberga-Marquardta*. Wiele rozwiązań przemysłowych lub przedstawianych w artykułach naukowych, zakłada wykonywanie poszczególnych etapów procesu diagnostycznego rozłącznie, na podstawie pomiarów wykonywanych cyklicznie. W zrealizowanej aplikacji opracowano niezależny system diagnostyczny, który wykonywał: pomiary, przetwarzanie sygnałów oraz wykrywanie uszkodzeń (rysunek 4). Cały system działał *on-line*, w trakcie testów maszyny, w której zwierano zwoje uzwojenia stojana. Zaproponowana realizacja znacząco wpływa na skrócenie czasu wykrycia uszkodzenia. Sieć neuronową zaprojektowano w programie *MATLAB* (trening realizowany *off-line*), następnie całość została zaimplementowana w *LabVIEW*. W celu realizacji rzeczywistego urządzenia diagnostycznego wykorzystano komputer przemysłowy *NI PXI 8186* z kartą pomiarową DAQ *NI PXI –4472*.



Rys. 4. Etapy przetwarzania danych w neuronowym detektorze zwarć zwojowych silnika indukcyjnego.

Na rysunku 5 zaprezentowano wskazania opracowanego wirtualnego przyrządu pomiarowo-diagnostycznego. Elementem decyzyjnym była sieć neuronowa *MLP* o strukturze {4-12-1} – zawierająca 4 wejścia, 12 neuronów warstwy ukrytej oraz jedno wyjście. Obliczenia realizowano na podstawie składowych symetrycznych kolejności zgodnej i przeciwnej napięcia i prądu stojana. Skuteczność wskazań opracowanego układu diagnostycznego była bardzo wysoka, nawet w trakcie przełączania obciążenia silnika. Szczegółowy opis konstrukcji stanowiska oraz wyniki badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych zostały przedstawione w publikacji [16]. Wykonany system pomiarowo-diagnostyczny stanowi przykład rzeczywistej aplikacji sieci neuronowych, których właściwości: klasyfikacyjne oraz związane z generalizacją danych, umożliwiły uzyskanie wysokiej precyzji (również w obecności zakłóceń) detekcji uszkodzeń.



Rys. 5. Odpowiedzi neuronowego detektora uszkodzeń uzwojeń stojana pracującego *on-line* przy fizycznym modelowaniu zwarć zwojowych fazie A silnika przy różnym obciążeniu maszyny.

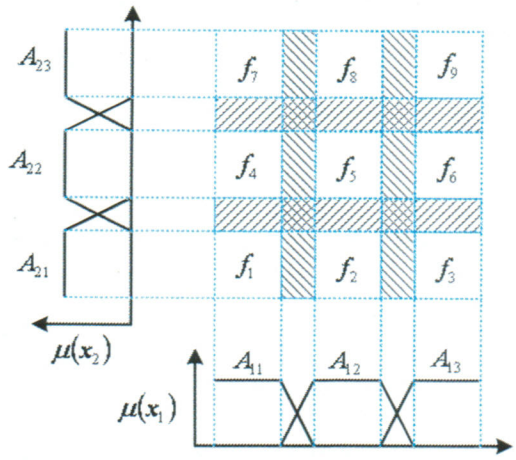
Część zagadnień, opisanych w punkcie 5.1. Autoreferatu, była związana z realizacją poniżej wymienionych projektów.

- System do monitorowania i diagnostyki uzwojeń stojana silnika indukcyjnego. Narodowe Centrum Nauki, Umowa: 6373/B/T02/2011/40 do wniosku N N510 637340, 2011-2014.
- Diagnostyka mechanicznych uszkodzeń napędów z silnikami indukcyjnymi przy wykorzystaniu sieci neuronowych. MNiSW, Umowa: 5381/B/T02/2010/39 dla projektu: N N510 538 139, 2010-2012.
- System zdalnego sterowania, monitorowania i diagnostyki urządzeń napędowych oraz procesów biologiczno-chemicznych oczyszczalni i przepompowni ścieków. MNiSW projekt rozwojowy, Umowa: 0483/R/T02/2007/03 dla projektu: R01 014 03, 2007-2011.

5.2. Rozmyty regulator ślizgowy typu TSK (Takagi-Sugeno-Kang) zastosowany dla napędu elektrycznego

W ramach międzynarodowego projektu: „A novel advanced sliding mode-based control structures for a complex mechatronic systems (2012-2014)", przy współudziale profesora S. Ryvkina (Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moskwa), byłem współautorem zmodyfikowanego rozmytego regulatora ślizgowego. Wykonany regulator stanowił kombinację dwóch metod sterowania: ślizgowego oraz rozmytego. Opracowana koncepcja wykorzystywała zalety obu typów regulatorów, które są bardzo popularne w aplikacjach przemysłowych, natomiast algorytmy są wciąż rozwijane. Sterowanie ślizgowe charakteryzuje się dużą odpornością na zmiany parametrów obiektu oraz zakłócenia zewnętrzne, jednak istotną wadę stanowi tzw. *chattering*, wynikający z postaci funkcji przełączającej (signum). Najczęstszym rozwiązaniem tego problemu jest zastąpienie standardowej funkcji poprzez jej ciągłą aproksymację. Niestety, taka modyfikacja prowadzi do pogorszenia właściwości dotyczących odporności regulatora, również w niektórych zastosowaniach może się pojawiać uchyb ustalony. Regulator rozmyty charakteryzuje się specyficzną metodyką projektowania opartą o bazę reguł opisującą działanie modelu. Obecnie w publikacjach naukowych, związanych z teorią sterowania oraz praktycznymi aplikacjami, obserwowany jest znaczący trend dotyczący łączenia różnych algorytmów sterowania w celu uzyskania lepszych wyników lub rozwiązania charakterystycznych problemów. Założeniem w niniejszym projekcie było połączenie sterowania ślizgowego z rozmytym, poprzez wykorzystanie pewnych podobieństw struktur obu regulatorów, w celu uzyskania zalet związanych z każdą z tych technik sterowania.

Opracowany regulator oparto o strukturę TSK [17]. Poprzez odpowiednie rozmieszczenie wejściowych funkcji przynależności, powierzchnia sterowania może być podzielona na niezależne podregiony, w których prawo sterowania zależy tylko od jednej reguły regulatora rozmytego. Przy takim założeniu, procedura projektowania zostaje uproszczona, z drugiej strony w poszczególnych podregionach możliwe jest zastosowanie różnych praw sterowania. Zastosowanie trapezoidalnych funkcji przynależności (rysunek 6) umożliwia uzyskanie 9 głównych regionów. W zakreskowanych sektorach wartość wyjściowa zależy od dwóch lub czterech reguł. W tym obszarze realizowane jest miękkie przełączanie między głównymi sektorami.



Rys. 6. Podział powierzchni sterowania na lokalne obszary.

Konkluzja dla sektora f_5 została zdefiniowana, jako regulator PD:

$$u_5 = K_1 e + K_1 de \tag{1}$$

gdzie: u_5 – sygnał sterujący generowany w danym sektorze, K_1, K_2 – współczynniki danej funkcji, e – błąd sterowania, de – pochodna błędu.

W pozostałych sektorach zastosowano następującą funkcję opisującą konkluzje reguł:

$$u_i = sign(s) = sign(K_i e + de) \tag{2}$$

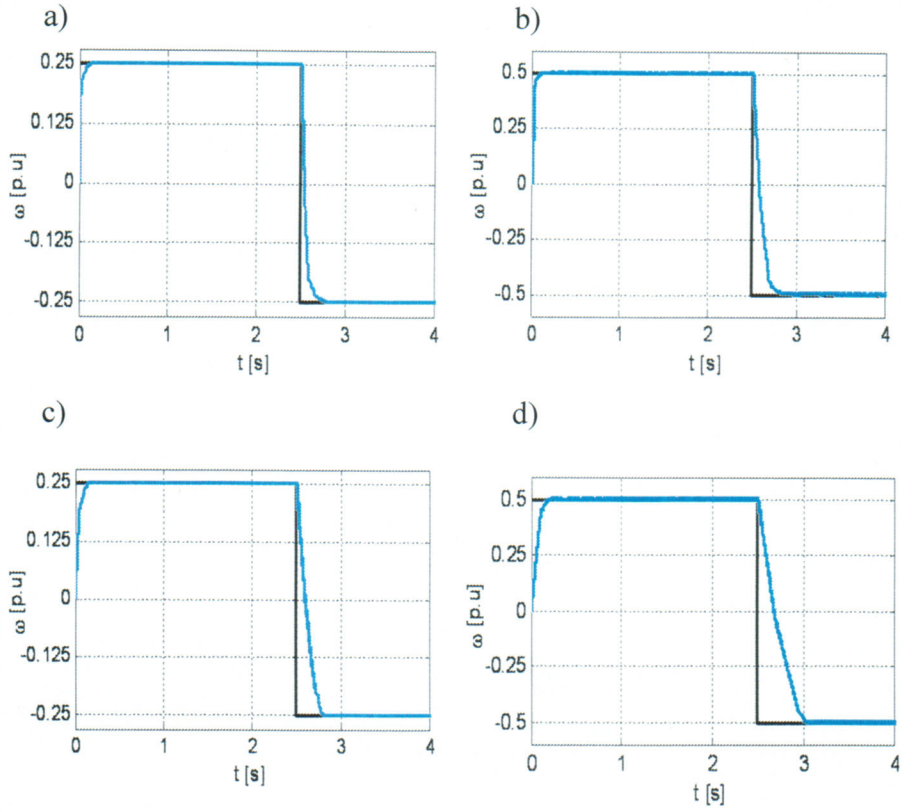
gdzie: K_i – dodatkowy współczynnik skalujący, niezależny dla poszczególnych sektorów, umożliwiający kształtowanie powierzchni sterowania.

W celu wyeliminowania zjawiska *chatteringu* na wyjściu regulatora zastosowano dodatkowy element całkujący, sumujący sygnały u_i. W związku z tym zdefiniowany powyżej regulator o strukturze PD został przekształcony do PI w formie przyrostowej.

Zaproponowany regulator zastosowano dla układu jednomasowego, który odpowiadał uproszczonej części mechanicznej układu napędowego (w której uwzględniono dodatkowe elementy nieliniowe reprezentujące tarcie). Założono idealną pętlę kształtowania momentu elektromagnetycznego. Ze względu na wprowadzone założenia dotyczące modelu obiektu oraz typu projektowanego regulatora, należy zaobserwować pewną uniwersalność zastosowań zaprojektowanego regulatora.

Algorytm sterowania zaimplementowano w procesorze sygnałowym karty *dSPACE1103*. Wyniki badań eksperymentalnych prezentują następujące zalety opracowanego regulatora: dynamiczna reakcja na zmiany sygnału zadanego oraz odporność na zmiany parametrów obiektu (mechanicznej stałej czasowej T_{mn}). Jednocześnie zjawisko *chatteringu* zostało wyeliminowane (rysunek 7).

Zaproponowana struktura może działać poprawnie przy większych krokach obliczeniowych, w porównaniu do klasycznego regulatora ślizgowego. Podział powierzchni sterowania ułatwia projektowanie parametrów regulatora.

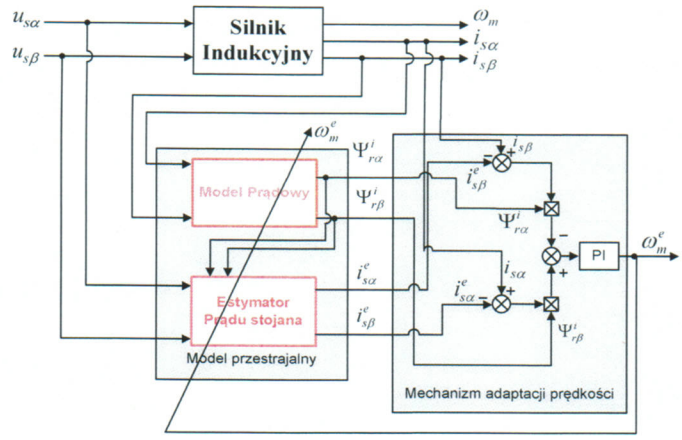


Rys. 7. Przebiegi prędkości układu napędowego z zastosowanym rozmytym regulatorem ślizgowym. Testy wykonano dla różnych wartości prędkości zadanej oraz mechanicznej stałej czasowej: $T_m=T_{mn}$ (a,b) oraz $T_m=3T_{mn}$ (c,d).

5.3. Adaptacyjny estymator $MRAS^{CC}$ z neuronowym mechanizmem wyznaczania prędkości kątowej

Estymacja zmiennych stanu jest jednym z najistotniejszych zagadnień rozwijanych w teorii sterowania, mającym praktyczne znaczenie w zastosowaniach przemysłowych. W bezczujnikowych układach sterowania dominują algorytmiczne metody odtwarzania zmiennych stanu: filtr *Kalmana*, obserwator *Luenbergera* oraz estymatory wykorzystujące modele odniesienia. Po obronie doktoratu uczestniczyłem w realizacji projektu: „Uniwersalny estymator strumienia i prędkości wirnika dla napędów bezczujnikowych z silnikami indukcyjnymi" (projekt badawczy MNiSW nr N N510 334637, 2009-2011), w którym jednym z zadań była modyfikacja wcześniej opracowanego estymatora $MRAS^{CC}$. Algorytm przetwarzania wykorzystuje dwa równolegle połączone symulatory zmiennych stanu: model prądowy strumienia wirnika oraz układ odtwarzający prąd stojana (rysunek 8). Otrzymywane wartości zmiennych stanu wykorzystywane są w ostatnim etapie przetwarzania estymatora $MRAS^{CC}$, który wyznacza estymowaną wartość prędkości. Standardowe rozwiązanie zakłada zastosowanie w układzie wyznaczania prędkości regulatora PI. W zaproponowanej modyfikacji zastosowałem prosty układ adaptacyjny – model *ADALINE* [18]. Estymator testowano w strukturze bezpośredniego sterowania polowo zorientowanego *DFOC* (***D**irect **F**ield **O**riented **C**ontrol*). Za pomocą opracowanego modelu uzyskano wysoką dokładność odtwarzania prędkości silnika, wykonano również szereg badań (symulacyjnych oraz eksperymentalnych) prezentujących precyzję wyznaczania zmiennych stanu w przypadku zakłóceń parametrycznych obiektu. Zrealizowana modyfikacja, w porównaniu do innych rozwiązań opisywanych z artykułach naukowych, wprowadzała również ułatwienia projektowe związane z wyznaczaniem parametrów mechanizmu adaptacji prędkości (jak

w przypadku aplikacji regulatora PI) oraz umożliwiła zmniejszenie wymaganych nakładów obliczeniowych związanych z realizacją algorytmu (zastosowanie modelu rozbudowanej sieci neuronowej).



Rys. 8. Schemat blokowy estymatora $MRAS^{CC}$.

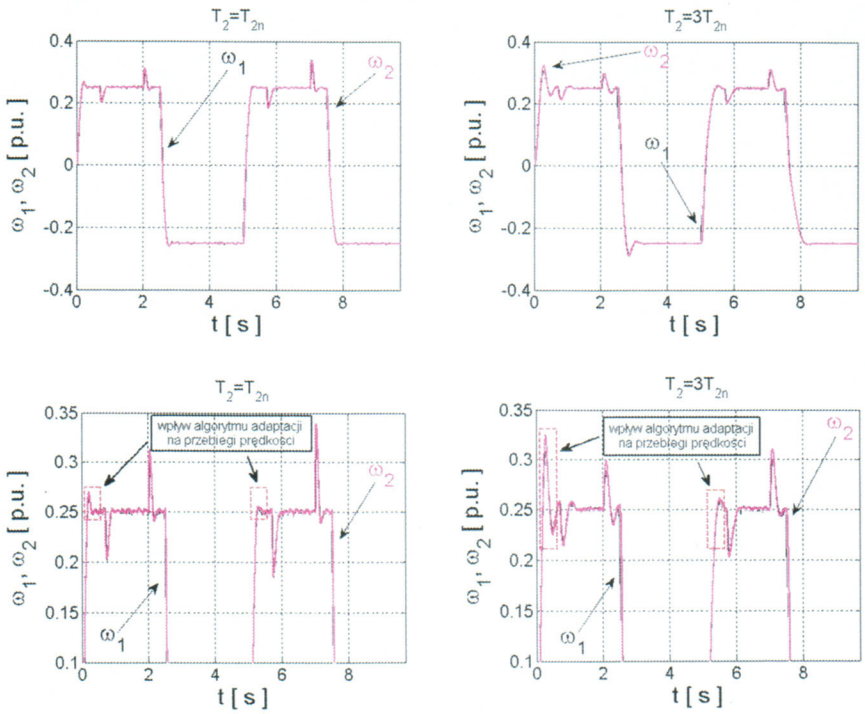
5.4. Aplikacja metaheurystycznego algorytmu optymalizacyjnego w projektowaniu adaptacyjnego regulatora stanu układu dwumasowego

Aktualnie moje zainteresowania naukowe, poza układami sterowania oraz estymacji, koncentrują się na optymalizacji nastaw regulatorów, realizowanej z wykorzystaniem algorytmów ewolucyjnych. Istnieje wiele rozwiązań stosowanych w teorii sterowania (regulatorów, kompensatorów, estymatorów, itp.), w których wyznaczenie parametrów jest trudne (skomplikowane obliczenia matematyczne), zależy w sposób niejednoznaczny od parametrów obiektu, nie zostało jasno przedstawione w publikacjach. Przykładem takich aplikacji są modele rozmyte lub neuronowe stosowane w układach regulacji obiektów przemysłowych. Wartości wzmocnień zewnętrznych (skalujących dane dla modelu neuronowego lub rozmytego), współczynników uczenia, wag początkowych, itp., są zawsze problematycznym zagadnieniem w procesie projektowania tego typu regulatorów. Ponadto, strojenie regulatorów klasycznych za pomocą algorytmów optymalizacyjnych jest w wielu przypadkach metodą umożliwiającą dobór parametrów, zapewniający lepsze rezultaty niż w przypadku klasycznych sposobów strojenia (umożliwiający uwzględnienie w trakcie projektowania zmian parametrów obiektu lub zakłóceń zewnętrznych, takich jak szumy oraz nieliniowości).

Pierwsze rezultaty uzyskane w niniejszej tematyce, które opublikowałem, dotyczą doboru parametrów początkowych adaptacyjnego regulatora stanu zastosowanego dla układu dwumasowego [19]. W odniesieniu do napędów elektrycznych, regulator stanu jest często stosowany dla przypadku, w którym silnik jest połączony z maszyną roboczą za pomocą sprężystego sprzęgła. Stanowi jeden z najprostszych oraz najefektywniejszych algorytmów dla tego typu układów o złożonej części mechanicznej. W celu poprawienia precyzji podążania obu prędkości napędu za wartością zadaną, wprowadzono dodatkową adaptację współczynników regulatora. Jednak w trakcie projektowania adaptacyjnego regulatora stanu, istotnym zagadnieniem jest dobór wartości współczynnika adaptacji oraz początkowych parametrów układu regulacji. Rozruch układu napędowego z przyjętymi losowymi nastawami początkowymi (metoda często stosowana w adaptacji współczynników sieci neuronowych), nawet pomimo możliwej zbieżności algorytmu adaptacyjnego, może wprowadzać zakłócenia trajektorii zmiennych stanu, pojawiające się w początkowej fazie pracy, efektem czego mogą

ulegać uszkodzeniom elementy konstrukcyjne napędu (np. sprzęgła). W związku z tym zaproponowałem oryginalne rozwiązanie polegające na doborze nastaw początkowych regulatora stanu, wykorzystujące algorytm *BAT (Bat-inspired Algorithm)*. Jest to metaheurystyczny algorytm optymalizacyjny. Należy zaznaczyć, że jest to relatywnie niedawno przedstawiona metoda optymalizacyjna (2010). Zaproponowane połączenie algorytmu optymalizacyjnego oraz adaptacyjnego regulatora stanu, umożliwia pominięcie złożonych klasycznych metod projektowania regulatorów (np. rozłożenia biegunów równania charakterystycznego), zapewnia globalną optymalizację współczynników regulatora stanu uwzględniającą zmiany parametrów obiektu (w tym zakłóceń pomiarowych).

Celem moich prac było również zaimplementowanie adaptacyjnego regulatora stanu projektowanego z wykorzystaniem algorytmu *BAT* w rzeczywistej strukturze układu napędowego. Realizacja zadania była związana z implementacją programową założeń teoretycznych algorytmu, testami symulacyjnymi, a następnie weryfikacją eksperymentalną na stanowisku laboratoryjnym. Wyniki badań (rysunek 9), prezentują dynamiczne oraz precyzyjne sterowanie prędkościami: silnika ω_1 oraz obciążenia ω_2, przeregulowanie (wynikające ze zmiany stałej czasowej T_2) obserwowanie w początkowej fazie pracy napędu jest eliminowane.

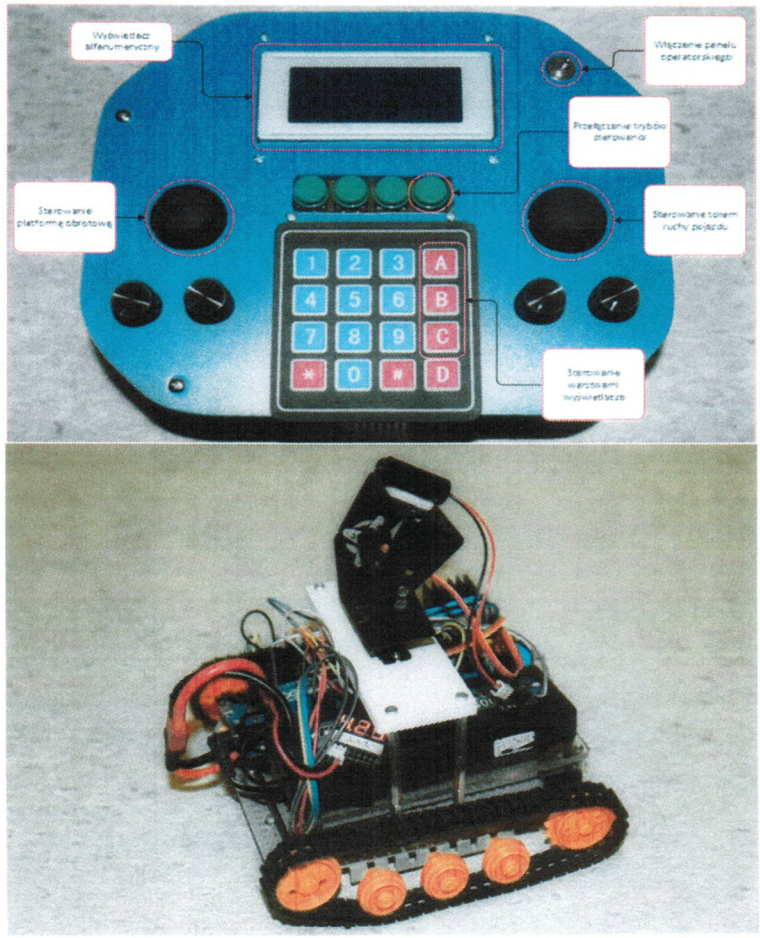


Rys. 9. Wyniki badań eksperymentalnych adaptacyjnego regulatora stanu zastosowanego dla napędu elektrycznego z połączeniem sprężystym.

5.5. Zastosowanie mikrokontrolerów *AVR* w konstrukcji rzeczywistych urządzeń automatyki

Oddzielny etap moich prac stanowią zastosowania układów programowalnych w realizacji praktycznych projektów, które mogą być wykorzystane w przemyśle. Mikrokontrolery *AVR* są obecnie często stosowanymi elementami elektronicznymi, umożliwiającymi odczyt danych z czujników pomiarowych, analizę danych oraz sterowanie urządzeniami wykonawczymi. Popularność ich zastosowań wynika z niskiej ceny, darmowych narzędzi programistycznych oraz dużych możliwości obliczeniowych (dla danego typu układów).

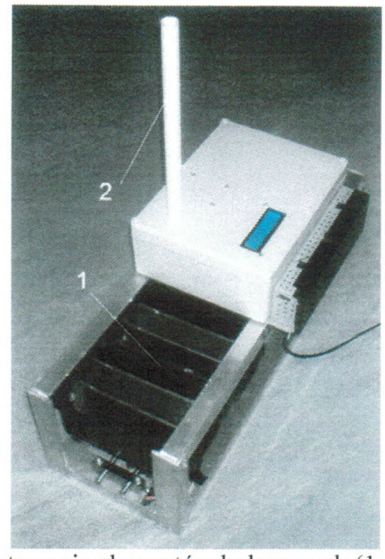
Reprezentatywnym przykładem realizowanych projektów jest model zdalnie sterowanego pojazdu przystosowanego do trudnych warunków otoczenia (wyposażony w napęd gąsienicowy). W zakresie realizacji projektu, wykonano dodatkowo panel sterowniczy umożliwiający zdalną kontrolę pracy urządzenia wyposażonego w specjalnie skonstruowaną platformę, na której możliwe jest umieszczenie dodatkowego urządzenia wykonawczego, związanego z przeznaczeniem całego pojazdu, np. kamery (rysunek 10). W związku z tym wykonany pojazd spełnia założenia związane z pracą w niebezpiecznych warunkach otoczenia (zagrażających bezpośredniej ingerencji człowieka). Moduł sterujący oparto na mikrokontrolerach *ATmega*, zawartych na platformie *Arduino*. W artykule [20] opisano szczegółowo: koncepcję, zastosowane elementy konstrukcyjne oraz testy zdalnie sterowanego łazika. Zrealizowany projekt spełniał wszystkie wstępne założenia, dotyczące działania robota: precyzję sterowania, zdalną kontrolę oraz skuteczne pokonywanie przeszkód. Opracowane urządzenie jest w pełni modyfikowalne (wielkość robota, moc silników, itp.), natomiast koszty realizacji są niewielkie.



Rys. 10. Panel operatorski oraz model pojazdu.

Następnym charakterystycznym urządzeniem, które zostało zaprojektowane i wykonane jest neuronowy detektor elementów kolorowych. Zakres projektu obejmował część konstrukcyjną rzeczywistego sortownika (rysunek 11). Układem programowalnym nadzorującym pracę serwomechanizmów był mikrokontroler *ATmega32*, który współpracował z czujnikiem kolorów *TCS3200* (przetwornikiem informacji o kolorze na częstotliwość sygnału wyjściowego). Algorytm sterujący zawierał sztuczną sieć neuronową (*MLP*), w celu analizy danych z czujników pomiarowych. Model opracowano *off-line*, następnie strukturę sieci zaimplementowano w mikrokontrolerze. Wykonane urządzenie

stanowi rzeczywisty model, który może być wykorzystany w aplikacjach przemysłowych. Szczegóły zostały opisane w publikacji [21].



Rys. 11. Urządzenie do sortowania elementów kolorowych (1 – pojemnik z przegrodami, 2 – zasobnik).

Przedstawione powyżej przykłady realizowanych projektów, stanowią najczęściej tematykę prac dyplomowych realizowanych przez studentów. Należy podkreślić, że wybrane prace dyplomowe znalazły uznanie na konkursach: przemysłowych oraz kół branżowych. Poniżej zamieszczono przykładowe wyróżnienia.

- Nagroda dla dr. inż. Marcina Kamińskiego Promotora Pracy Dyplomowej pt.: „Zdalne sterowanie silnikiem prądu stałego" złożonej w V edycji konkursu „Odkrywca" (organizowanego przez firmę ELEKTROTIM S.A.), napisanej przez Pana Jacka Hnata absolwenta Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej. (03.10.2015 r.)
- Nagrody w Konkursie Oddziału Wrocławskiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich na najlepsze prace dyplomowe w roku akademickim 2014/2015 na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej, realizowane pod moją opieką.
  - I miejsce – praca wykonana przez studenta Wojciecha Barczyka nt. „Sterowanie serwomechanizmem za pomocą zestawu *Arduino*".
  - Wyróżnienie – praca wykonana przez studenta Piotra Fitowskiego nt. „Sterowanie układem pneumatycznym z wykorzystaniem układu *Arduino*".

6. Bibliografia

13. Kowalski Czesław, Kamiński Marcin: Rotor fault detector of the converter-fed induction motor based on RBF neural network, Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, vol. 62, nr 1, s. 69-76, 2014. Punktacja MNiSW z 2013: 25; 2014: 25, **IF – 0,914**.
14. Kamiński Marcin, Kowalski Czesław: Rotor fault detection of the converter-fed induction motor using general regression neural networks, Przegląd Elektrotechniczny, R. 88, nr 12a, s. 71-77, 2012. Punktacja MNiSW z 2010: 13; 2012: 15, Lista Filadelfijska – T, (załączony do listy MNiSW na wykazie A, uwzględniono w bazie WoS, jednak nie wyznaczono **IF**).
15. Ewert Paweł G, Kamiński Marcin, Kowalski Czesław: Eccentricity detection of the induction motors using general regression neural networks, 10th International

Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Convertes and System, ELECTRIMACS 2011, Paris, France, June 6-8th 2011, s. 1-6, 2011.
16. Wolkiewicz Marcin, Kowalski Czesław, Kamiński Marcin: Wykrywanie zwarć zwojowych silnika indukcyjnego z wykorzystaniem składowych symetrycznych oraz sieci neuronowych, Przegląd Elektrotechniczny, R. 88, nr 4b, s. 276-281, 2012. Punktacja MNiSW z 2010: 13; 2012: 15, (załączony do listy MNiSW na wykazie A, uwzględniono w bazie WoS, jednak nie wyznaczono **IF**).
17. Szabat Krzysztof, Orłowska-Kowalska Teresa, Kamiński Marcin, Serkies Piotr J, Ryvkin S: Control of the uncertain drive system using a sliding mode fuzzy TSK controller, 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, PEMC 2014 (previous EPE-PEMC), 21-24 September 2014, Antalya, Turkey, s. 851-854, 2014. Punktacja MNiSW (Web of Science): 10.
18. Kamiński Marcin, Dybkowski Mateusz: Analiza układu bezczujnikowego wektorowego sterowania silnikiem indukcyjnym z estymatorem MRASCC z neuronowym mechanizmem wyznaczania prędkości kątowej, Przegląd Elektrotechniczny, R. 88, nr 4b, s. 116-121, 2012. Punktacja MNiSW z 2010: 13; 2012: 15, (załączony do listy MNiSW na wykazie A, uwzględniono w bazie WoS, jednak nie wyznaczono **IF**).
19. Kamiński Marcin: Projektowanie adaptacyjnego regulatora stanu dla układu dwumasowego z wykorzystaniem algorytmu BAT, XII Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, SENE 2015, Łódź, 18-20 listopada 2015, s. 1-6, 2015.
20. Hatouka Ramuald, Kamiński Marcin: Zastosowanie modułu Arduino w układzie zdalnego sterowania robotem mobilnym, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały = Scientific Papers of the Institute of Electrical Machines, Drives and Measurements of the Wrocław University of Technology. Studies and Research, nr 34, s. 121-132, 2014. Punktacja MNiSW z 2013: 03; 2014: 03.
21. Wawrzyniak Dariusz, Kamiński Marcin: Sprzętowa implementacja neuronowego detektora kolorów, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały = Scientific Papers of the Institute of Electrical Machines, Drives and Measurements of the Wrocław University of Technology. Studies and Research, nr 34, s. 193-205, 2014. Punktacja MNiSW z 2013: 03; 2014: 03.

7. Podsumowanie

Na moją aktywność naukową nie składają się same badania naukowe, realizowałem również działania mające na celu popularyzację nauki oraz dotyczące dydaktyki. Zdając sobie sprawę z ważności wszystkich tych trzech elementów w trakcie mojej pracy zawodowej, podejmowałem działania, których efekty zostały poniżej przedstawione.

- **Artykuły opublikowane w czasopismach z bazy Journal Citation Reports (JCR): 12.**
- **Publikacje w czasopismach międzynarodowych lub krajowych innych, niż znajdujące się w bazie Journal Citation Reports (JCR): 21.**
- **Publikacje w monografiach: 1.**
- **Sumaryczny Impact Factor publikacji naukowych według listy Journal Citation Reports (JCR) po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych: 24,191.**
- **Całkowita liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS): 129.**

- **Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS): 6.**
- **Kierowanie międzynarodowymi lub krajowymi projektami badawczymi lub udział w takich projektach: 6.**
- **Międzynarodowe lub krajowe nagrody za działalność naukową: 12.**
- **Prezentacja referatów na międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych (18) oraz lista referatów opublikowanych w materiałach konferencyjnych: 23.**
- **Uczestnictwo w programach europejskich i innych programach międzynarodowych lub krajowych: 2.**
- **Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych lub krajowych konferencji naukowych: 2.**
- **Otrzymane nagrody i wyróżnienia związane z działalnością dydaktyczną:3.**
- **Członkostwo w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych: 1.**
- **Osiągnięcia dydaktyczne oraz dotyczące popularyzacji nauki.**
- **Opieka naukowa nad studentami: 37 (inż.), 10 (mgr).**
- **Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze promotora pomocniczego: 1.**
- **Staże w zagranicznych lub krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich: 1.**
- **Recenzowanie artykułów zgłoszonych do publikacji w czasopismach oraz materiałach konferencyjnych (międzynarodowych i krajowych): 14 różnych czasopism oraz 10 konferencji.**
- **Inne aktywności związane z działalnością organizacyjno-dydaktyczną na Uczelni oraz szkolenia podnoszące kwalifikacje.**

.....

Podpis wnioskodawcy