

Recenzja w postępowaniu habilitacyjnym dra inż. Macieja Skowrona

1. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została sporządzona na wniosek Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej w oparciu o uchwałę nr 139/6/RDND02/2024-2028 z dnia 24 lutego 2025 roku, dotyczącą postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego dr. Maciejowi Skowronowi w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, wszczętym w dniu 20 listopada 2024 r. Do udziału w pracach komisji habilitacyjnej zostałem wyznaczony przez Radę Doskonałości Naukowej – pismo skierowane do Rektora PWr o sygn.: DRKN.Z2 400.103.2024 z dnia 21 stycznia 2025 r.

2. Charakterystyka sylwetki kandydata

Pan Maciej Skowron rozpoczął studia w październiku 2013 roku na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. Stopnie inżyniera i magistra ze specjalizacją Automatyka i Robotyka uzyskał odpowiednio w lutym 2017 roku (temat pracy dyplomowej: *System diagnostyczny uzwojeń stojana silnika indukcyjnego zasilanego z przemiennika częstotliwości*) i w lipcu 2018 roku temat pracy dyplomowej: *Diagnostyka uszkodzeń elektrycznych silnika indukcyjnego z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych*).

Po ukończeniu studiów podjął pracę na tymże wydziale w charakterze najpierw stypendysty w projekcie badawczym przygotowując jednocześnie swoją rozprawę doktorską, a po uzyskaniu w dniu 25. 10. 2021 stopnia doktora nauk w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika (promotor: prof. dr hab. inż. Czesław Kowalski, promotor pomocniczy: dr hab. inż. Marcin Wolski, temat dysertacji: *Diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych i synchronicznych z magnesami trwałymi przy wykorzystaniu sieci neuronowych z głębokim uczeniem*).

Głównym celem badań przedstawionych w rozprawie doktorskiej pt.: „Diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych i synchronicznych z magnesami trwałymi przy wykorzystaniu sieci neuronowych z głębokim uczeniem” była analiza i ocena możliwości zastosowania sieci neuronowych z głębokim uczeniem do wykrywania w początkowych stadium uszkodzeń silników indukcyjnych klatkowych oraz synchronicznych z magnesami trwałymi oraz porównania ich skuteczności z sieciami płytkimi. W rozprawie tej przedstawione zostały wyniki badań eksperymentalnych nad zastosowaniem konwolucyjnych sieci neuronowych CNN (ang. *Convolutional Neural Network*) do diagnostyki uszkodzeń w dwóch rodzajach trójfazowych silników prądu przemiennego: klasycznym asynchronicznym silniku zwartym (silniku indukcyjnym) oraz silniku synchronicznym z magnesami trwałymi (PMSM). Badania prowadzono na kilku stanowiskach laboratoryjnych i rozpatrywano rozmaite warianty topologii wykorzystywanych sieci neuronowych. Analizie poddawano przebiegi prądów i napięć uzwojeń stojana. W obu silnikach zajmowano się detekcją uszkodzeń pojawiających się w uzwojeniach stojana, a ponadto w przypadku silnika indukcyjnego także uszkodzeniami prętów klatki wirnika, zaś w przypadku silnika synchronicznego - uszkodzeniami magnesów trwałych w wirniku. Wykorzystanie informacji diagnostycznej zawartej w mierzonych sygnałach przez zaproponowaną strukturę neuronową CNN umożliwiło rezygnację z analitycznych metod wyodrębniania symptomów uszkodzeń (niezbędnych w przypadku klasycznych sieci neuronowych). Z ważniejszych działań badawczych przeprowadzonych przez habilitanta w czasie przygotowywania jego rozprawy doktorskiej należy wymienić:

- opracowanie oprogramowania pomiarowego oraz wykonanie stanowisk do badań diagnostycznych rozpatrywanych silników prądu przemiennego posiadających fizycznie spreparowane uszkodzenia stojana oraz wirnika,
- przeprowadzenie weryfikacji eksperymentalnej opracowanych modeli matematycznych obu rodzajów silników w przypadku występowania uszkodzeń stojana oraz wirnika,
- przeprowadzenie weryfikacji eksperymentalnej szeregu rozważanych systemów diagnostycznych opartych na szeregu rozmaitych struktur neuronowych (takich jak perceptron wielowarstwowy, rekurencyjna sieć Hopfielda, samoorganizująca się sieć Kohonena oraz sieć konwolucyjną).
- przeprowadzenie analizy wpływu parametrów struktury oraz procesu treningu głębokiej sieci konwolucyjnej na skuteczność detekcji uszkodzeń badanych silników.

Wnioski o charakterze ogólnym podsumowujące tę rozprawę brzmiały (cytuję):

1. *Zastosowanie klasycznych struktur neuronowych, działających na podstawie danych uzyskiwanych z analitycznych metod ekstrakcji symptomów uszkodzeń umożliwia opracowanie w pełni zautomatyzowanych systemów diagnostycznych o wysokim stopniu precyzji. Niemniej jednak etap przetwarzania sygnałów (opracowanie wektora wejściowego sieci) znacznie wydłuża czas reakcji systemu na pojawiające się uszkodzenie, co ze względu na dynamikę postępowania defektów silników elektrycznych ma szczególne znaczenie;*
2. *Wykorzystanie sieci neuronowych o głębokim uczeniu umożliwia pominięcie etapu ekstrakcji symptomów uszkodzeń. Poszukiwanie cech sygnału diagnostycznego charakterystycznych dla rozpatrywanych defektów odbywa się wewnątrz struktury neuronowej, dzięki czemu ograniczenia wynikające z analitycznych metod przetwarzania sygnałów zostają wyeliminowane;*
3. *Zastosowanie bezpośredniej analizy sygnałów mierzonych przez konwolucyjną sieć neuronową, zapewnia uzyskanie bardzo wysokiej precyzji systemu diagnostycznego dla początkowych stopni uszkodzeń analizowanych silników prądu przemiennego, przy kilkudziesięciokrotnie krótszym czasie akwizycji sygnału;*
4. *Weryfikacja eksperymentalna potwierdziła skuteczność opracowanych systemów detekcji zarówno w stanach ustalonych, jak i przejściowych, co stanowi istotną zaletę zaproponowanego podejścia. Ponadto podczas badań laboratoryjnych nie zaobserwowano znacznego wpływu warunków pracy badanych maszyn (zmiany momentu obciążenia i częstotliwości napięcia zasilania) na precyzję systemu diagnostycznego;*
5. *Głębokie sieci neuronowe charakteryzują się rozbudowaną strukturą, oraz brakiem formalnych zasad doboru parametrów, przez co ich projektowanie jest utrudnione. Przedstawione w rozprawie podstawowe zależności pomiędzy parametrami struktur, właściwościami procesu treningu a skutecznością systemu diagnostycznego, mogą stanowić ważną wskazówkę podczas projektowania głębokich struktur neuronowych;*
6. *Przeprowadzone badania wykazały, że zaproponowane podejście diagnostyczne wykorzystujące metody głębokiego uczenia może stanowić alternatywę dla obecnie stosowanych systemów wczesnego wykrywania i lokalizacji uszkodzeń w silnikach prądu przemiennego.*

Opracowane w rozprawie systemy diagnostyczne mogą być z powodzeniem stosowane do diagnostyki on-line napędów z silnikiem indukcyjnym i synchronicznym z magnesami trwałymi w skalarnych i wektorowych strukturach sterowania prędkością i momentem. Zdaniem Autora otrzymane wyniki badań wykazały, że zastosowanie głębokich struktur neuronowych w detektorach uszkodzeń maszyn elektrycznych istotnie upraszcza i obiektywizuje poszukiwanie symptomów uszkodzeń, przenosząc to zadanie na sieci neuronowe. Dlatego należy kontynuować badania w poszukiwaniu nowych głębokich struktur neuronowych i metod ich uczenia umożliwiających projektowanie uniwersalnych i skalowalnych systemów diagnostycznych.

Potwierdzam, że powyższe wnioski zostały przez dra inż. Macieja Skowrona konsekwentnie rozwinięte w licznych późniejszych publikacjach, z których wybrano 9 najważniejszych poświęconych jedynie diagnostyce uszkodzeń o charakterze elektrycznym, stanowiących cykl tematyczny będący podstawą niniejszego przewodu habilitacyjnego.

3. Omówienie i ocena osiągnięcia naukowego

Jako swoje osiągnięcie naukowe w postępowaniu habilitacyjnym w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych w grupie nauk: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologia kosmiczne, dr inż. Maciej Skowron przedstawił jednotematyczny cykl 9 publikacji zatytułowany: „*Diagnostyka uszkodzeń układów napędowych z silnikami prądu przemiennego z zastosowaniem głębokich sieci neuronowych uczonych transferowo i technik modelowania matematycznego*”.

Publikacje te są wynikiem zespołowych prac naukowo-badawczych prowadzonych w Katedrze Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, często z inicjatywy i we współpracy z prof. Teresą Orłowską-Kowalską, kierującą tą katedrą. Rozwój i osiągnięcia naukowe tego zespołu mam okazję obserwować od 1983 roku, gdy po raz pierwszy dołączyłem w Sulejowie do grona uczestników seminarium naukowego organizowanego przez trzy uczelnie – Politechnikę Łódzką, Warszawską i Wrocławską, współpracujących ze sobą w ramach tzw. programu resortowego RI-17, co przerodziło się w trwające do dzisiaj regularne spotkania, znane w polskim środowisku naukowym pod obecną nazwą Konferencji SENE – Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym.

Poza tym cyklem publikacji habilitant przedstawił także dodatkowe osiągnięcia naukowo-badawcze w okresie po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych. Zostały one szczegółowo opisane w dodatkowych publikacjach i referatach konferencyjnych (w sumie 11 pozycji) – w postaci osobnego zbioru dołączonego do złożonego wniosku.

Równolegle do badań związanych z diagnostyką uszkodzeń o charakterze elektrycznym, habilitant podjął badania dotyczące wykorzystania technik głębokiego uczenia do diagnozowania innych ważnych i często spotykanych uszkodzeń w maszynach elektrycznych takich jak: uszkodzenia łożysk, uszkodzenia wybranych elementów przekształtników energoelektronicznych - kondensatorów i czujników prądu. Niektóre z tych publikacji opisujących wyniki tych badań były na etapie recenzowania w chwili formułowania wniosku.

Wśród omawianego tu podstawowego cyklu 9 publikacji dwie są całkowicie samodzielne, a w pozostałych siedmiu potwierdzony udział habilitanta jako współautora dotyczy: 70% - w jednej publikacji oraz 60% - w dwóch publikacjach (tych samych trojga współautorów), a także 50% - w jednej publikacji oraz 40% - w trzech publikacjach (także trojga, a w jednym przypadku czworga współautorów). We wszystkich siedmiu wspólnych publikacjach 20% udział ma prof. Teresa Orłowska-Kowalska (kierowniczka Katedry), zaś pozostałymi współautorami są także: prof. Czesław Kowalski (promotor rozprawy doktorskiej habilitanta, od wielu lat związanych z badaniami dotyczącymi diagnostyki maszyn elektrycznych) – w trzech publikacjach (10%, 20% i 20%), mgr Krystian Teler (doktorant habilitanta) – w trzech publikacjach (40%, 40% i 20%), dr Mateusz S. Krzysztosiak – w jednej publikacji (30%) oraz dr Michał P. Adamczyk – w jednej publikacji (20%),

Publikacje naukowe wchodzące w skład cyklu [I-IX] zestawione zostały w tabeli umieszczonej w załączniku nr 3 (Autoreferacie) wniosku habilitacyjnego. Ukazały się one w renomowanych czasopismach znajdujących się na liście MNiSzW (IEEE Access, Power Electronics and Drives, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Bulletin of the Polish Academy of Sciences - Technical Sciences, Electronics, IEEE Transactions on Industrial Electronics oraz Energies). Charakteryzuje je wysoka sumaryczna wartość wskaźnika oddziaływania *Impact Factor* ($IF = 38,1$) oraz duża liczba punktów MNiSW (1140 pkt). Sumaryczny współczynnik *IF* dla wszystkich publikacji habilitanta wynosi 65,59, przy czym po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych przyrost wynosił 46,70 (38,1 – wykazane w cyklu publikacji). Odpowiednio liczba punktów MNiSzW wynosi: 2620 pkt za całość publikacji, oraz 1600 pkt za publikacje po uzyskaniu stopnia doktora.

Łączna liczba cytowań (z wyłączeniem autocytowań - stan na dzień 18.11.2024) wynosi: wg bazy Web of Science: 308, wg bazy Scopus: 387, a wg bazy Google Scholar: 622. Wartości Indeksu Hirscha wynoszą: wg bazy Web of Science: 10, wg bazy Scopus: 11, a wg bazy Google Scholar: 12.

Maszyny elektryczne stanowią istotną część składową urządzeń wykonawczych w bardzo wielu współczesnych układach sterowania, od skali mikro – np. w robotyce, w urządzeniach techniki komputerowej, narzędziach elektrycznych, w urządzeniach medycznych zarówno obsługujących pacjentów jak i wspomagających pracę lekarzy, do skali makro – np. w przemyśle produkcyjnym i wydobywczym, transporcie lądowym, morskim czy lotniczym. Dzięki postępom w zakresie wykorzystania energoelektroniki i techniki mikroprocesorowej możliwe stało się wyposażanie napędów elektrycznych w coraz bardziej wyrafinowane przekształtniki w których sterowniki początkowo zajmowały się wyłącznie nadzorowaniem jedynie ruchu wału silnika od strony mechanicznej. Potem dołączono do tego możliwość jednoczesnego kontrolowania dwukierunkowej wymiany energii pomiędzy źródłem energii elektrycznej (tj. siecią zasilającą lub baterią) a odbiornikiem energii mechanicznej (jakim jest napędzana maszyna robocza), co pozwoliło na minimalizowanie zużycia energii.

Ciągle rosnące moce obliczeniowe procesorów instalowanych w tych sterownikach pozwalają już od pewnego czasu na bieżące (on-line) monitorowanie stanu nie tylko samej maszyny elektrycznej i współpracującego z nią przekształtnika, ale również stanu maszyny roboczej dołączonej do wału tej maszyny. Przykładem zastosowania takiej autodiagnostyki zrozumiałej dla przeciętnego użytkownika może być układ kontroli trakcji pojazdu szczególnie łatwy do zaimplementowania w samochodzie z napędem elektrycznym. Już 10 lat temu we własnym opracowaniu wykonanym na zlecenie Korporacyjnego Centrum Badawczego ABB w Krakowie wskazywałem, że nawet tradycyjne wykorzystanie analizy statystycznej samych drgań mechanicznych, mierzonych od dawna za pomocą odpowiednich czujników zamontowanych na zewnętrznej powierzchni maszyny przynosi wiele korzyści w bieżącej eksploatacji maszyn elektrycznych zasilanych z przekształtników, szczególnie tych największej mocy, ale także maszyn mniejszych mocy, ale wykonujących bardzo odpowiedzialne zadania. W tym celu w diagnostyce bieżącego stanu eksploatowanego napędu należy wykorzystywać nie tylko pomiary drgań mechanicznych mierzonych za pomocą odpowiednio zamontowanych akcelerometrów, ale również pomiary wielkości czysto elektrycznych, takich jak prądy i napięcia uzwojeń stojana.

Nowoczesne napędy elektryczne prądu przemiennego spotykane w ważnych zastosowaniach przemysłowych są obecnie na ogół sterowane za pomocą metod zorientowanych wektorowo, co wymaga wyposażenia ich w nowoczesne, szybkie i wydajne obliczeniowo wbudowane systemy mikroprocesorowe, które mogą wykonywać *on-line* nawet bardzo złożone obliczenia, towarzyszące w czasie rzeczywistym realizacji podstawowych zadań sterowania napędem. Powalają one nie tylko obserwować i rejestrować różne zdarzenia (na przykład takie jak wtórne efekty drgań) w funkcji upływu czasu, ale również w funkcji kąta obrotu wału. Tak rozbudowane sterowniki mikroprocesorowe o coraz większej mocy obliczeniowej stwarzają nowe możliwości diagnostyczne, pozwalające na dokładniejsze wskazanie rodzaju i miejsca wystąpienia awarii lub niepożądanego pojawienia się czynnika zewnętrznego zakłócającego normalną pracę maszyny.

Zautomatyzowane napędy elektryczne od bardzo dawna stanowią więc interesujący poligon doświadczalny do wdrażania i testowania najnowszych zdobyczy naukowych w dziedzinie matematycznej teorii sterownia. Szczególnie dotyczy to maszyn asynchronicznych stanowiących nadal podstawowy rodzaj maszyn elektrycznych spotykanych w praktycznych zastosowaniach. Bowiem złożony, często nieliniowy opis matematycznych modeli dotyczących takich napędów a także obecność zjawisk elektromechanicznych wymagających szybkiego działania, skłaniają do ciągłego poszukiwania nietrywialnych metod badawczych, a łatwy dostęp do zwiększonej mocy obliczeniowej sterowników daje nadzieję na ich szybką i skuteczną implementację.

Dlatego pole zainteresowań habilitanta lokujące się w dziedzinie szeroko rozumianej automatyki uważam za nowatorskie i ważne. Uzyskane przez niego wyniki mogą być z wykorzystane w innych dziedzinach, niż tylko napęd elektryczny.

W dalszej części tej recenzji omówię więc jakie wyniki badań związanych z głębokimi sieciami neuronowymi w zastosowaniach diagnostycznych opisano w cyklu 9 publikacji zaliczonych do zbioru wybranego jako podstawa złożenia wniosku o wszczęcie przewodu habilitacyjnego. Poniżej

zamieszczam przetłumaczone wybrane fragmenty wniosków końcowych zawartych w każdej z tych publikacji – aby nie powtarzać własnymi słowami tego, co sam autor (w pierwszych dwóch) i jego współautorzy (w siedmiu dalszych) tam zamieścili.

Publikacja I [IEEE Access (2024) – samodzielna]

„Transfer Learning-Based Fault Detection System of Permanent Magnet Synchronous Motors”

W tym badaniu szczegółowo opisano analizę niepewności dla wykorzystania TL w systemie wykrywania uszkodzeń PMSM. W tym badaniu wykorzystano trzy różne pomysły, aby wytrenować głęboką sieć splotową, która zapewnia wykrywanie uszkodzeń uzwojeń stojana i rozmagnesowanie poprzez bezpośrednią analizę sygnałów prądu fazowego. Wyniki testów potwierdziły wysoką precyzję proponowanego podejścia do zastosowań diagnostycznych. Ponadto analiza porównawcza wykazała zalety wykorzystania poszczególnych metod TL pod względem ich praktycznej implementacji. W tym celu przeprowadzono pełną eksperymentalną weryfikację systemów, zaczynając od procesu szkolenia, analizy ustalonej odpowiedzi CNN i wpływu stanów przejściowych (skokowych zmian momentu obciążenia i prędkości) na odpowiedź sieci. Należy podkreślić, że każda przedstawiona metoda polegała w różnym stopniu na wykorzystaniu modelu matematycznego PMSM w celu wyodrębnienia uniwersalnych objawów diagnostycznych. Ponadto metoda przetwarzania wejściowego (bezpośrednie przetwarzanie prądów fazowych) skutkowała maksymalnym czasem reakcji sieci wynoszącym 0,061 s, co stanowi alternatywę dla obecnych technik diagnostycznych. Ponadto uzyskano wysoką precyzję wykrywania usterek w warunkach ustalonych i przejściowych. Tak więc idea uczenia transferowego przedstawiona w tym artykule umożliwia swobodną rozbudowę systemów detekcji opartych na głębokich strukturach neuronowych przy pełnym wykorzystaniu informacji z modeli matematycznych badanych obiektów.

Publikacja II [Power Electronics and Drives (2024) – samodzielna]

“Analysis of PMSM Short-Circuit Detection Systems Using Transfer Learning of Deep Convolutional Networks”

Zastosowanie idei TL (z ang. Transfer Learnig) pozwala na znaczne rozszerzenie zakresu analizowanych uszkodzeń przy zachowaniu wysokiej skuteczności ich wykrywania i klasyfikacji. Na podstawie wyników przedstawionych badań można wnioskować, że możliwe jest wykorzystanie symptomów defektów (cech uszkodzeń) opracowanych dla silnika indukcyjnego w zadaniach diagnostyki PMSM. Badania wykazały również możliwość pełnego wykorzystania informacji z modelu PMSM do określania wzorców diagnostycznych. Ponadto wykorzystanie przedstawionego w artykule modelu matematycznego nie wymaga fizycznego modelowania uszkodzeń, co jest szczególnie ważne w przypadku analizy silników dużej mocy. Jednak układy oparte na modelu nie zapewniają wysokiej precyzji przy pracy napędu z niskim momentem obciążenia. W przypadku braku obciążenia, interakcja wirnika z magnesami trwałymi wprowadza zakłócenia w przebiegach prądu, powodując pojawianie się na wyjściu układu nieprawidłowych informacji diagnostycznych opartych na informacjach z modelu polowo-obwodowego PMSM. Problem ten nie jest obserwowalny, gdy informacja jest przesyłana między silnikiem indukcyjnym a silnikiem PMSM. Z uwagi na powyższe, idea TL może być z powodzeniem stosowana w systemach diagnostyki PMSM, w których źródłem informacji jest model matematyczny (dla pracy maszyny pod obciążeniem) i silnik indukcyjny (w pełnym zakresie pracy). Ponadto idea TL eliminuje trudności w doborze hiperparametrów struktury CNN i procesie uczenia. Przedstawione w artykule systemy diagnostyczne charakteryzowały się nie tylko bardzo wysoką precyzją w wykrywaniu i klasyfikacji uszkodzeń stojana PMSM, ale także ograniczeniem czasu trwania pomiaru sygnału diagnostycznego poprzez zastosowanie bezpośredniego przetwarzania prądów fazowych.

Publikacja III [IEEE Trans. on Ind. Inform. (2024) – udział 40%]

„Implementation of MLP-Based Classifier of Current Sensor Faults in Vector-Controlled Induction Motor Drive”

Proponowany klasyfikator charakteryzuje się stabilną wydajnością w szerokim zakresie prędkości kątowych wirnika (od 15% ω_N do 100% ω_N) również przy obciążeniu znamionowym. Przy niskich

prędkościach występują pojedyncze błędy klasyfikacji, które można wyeliminować, stosując dokładniejszy estymator prądu. Proponowana struktura użytej sieci neuronowej NN (ang. Neural Network) została zoptymalizowana pod kątem liczby połączeń. Opracowany klasyfikator może być używany do niezależnego wykrywania usterek w CS w obu fazach silnika i może być łatwo rozszerzony na większą liczbę używanych czujników. Należy podkreślić, że dane użyte do trenowania klasyfikatora zostały wygenerowane głównie sztucznie i pomiary są wykonywane wyłącznie na stanowisku testowym z nieuszkodzonymi CS. Dlatego też przedstawiona metoda generowania danych do trenowania NN nie wymaga fizycznego uszkodzenia czujników. Wyniki testów przeprowadzonych na 15 023 indywidualnych okresach prądu zarejestrowanych na stanowisku laboratoryjnym wskazały 97,2% dokładności. Taki wynik należy uznać za bardzo wysoki, biorąc pod uwagę, że użyto podstawowej struktury neuronowej w postaci MLP. Ze względu na małą liczbę połączeń neuronowych, uzyskany klasyfikator można łatwo zaimplementować w procesorze kontrolującym układ napędowy. Pomimo problemów, jakie NN zwykle stwarzają w procesie uczenia (duża ilość wymaganych danych treningowych i długość procesu uczenia), w niniejszym badaniu wykazano, że cały proces można znacznie uprościć, wykorzystując dane treningowe pochodzące z prostego modelu matematycznego sygnału. Co więcej, proponowany system wykorzystuje płytką NN, której proces uczenia jest bardzo krótki (ok. 5 min na komputerze Intel Core i7). Wartości sygnałów wprowadzanych na wejście NN są znormalizowane, a zatem ograniczone, dzięki czemu zapewniono stabilność i powtarzalność wydajności. NN wykorzystana w naszym badaniu została zoptymalizowana pod kątem liczby ważonych połączeń, dzięki czemu proces uczenia i późniejsze przetwarzanie sygnału są bardzo szybkie. Największą zaletą proponowanego systemu diagnostycznego jest proces uczenia sieci przy użyciu minimalnej ilości danych pomiarowych z testowanego układu napędowego. Podsumowując powyższe, można wyróżnić następujące zalety proponowanej metody: 1) Redukcja materiałów i przestrzeni związana z zastosowaniem dodatkowego czujnika prądu, który jest wymagany w podstawowych metodach diagnostycznych. 2) Koszt redundancji analitycznej w postaci wdrożonej struktury MLP jest wielokrotnie niższy niż koszt czujnika prądu (redundancja sprzętowa). Przedstawiona struktura MLP jest na tyle mała, że mogą ją obsłużyć nawet niedrogie mikrokontrolery. 3) Możliwość rozszerzenia systemu opartego na NN o nowe typy usterek bez opracowywania dodatkowych algorytmów (jak w przypadku metod analitycznych); 4) Uniwersalność systemu — dzięki normalizacji wektora wejściowego system można przenieść na inne silniki o innych parametrach znamionowych. 5) Opracowany algorytm wykrywania okresu prądu jest stosunkowo prosty i opiera się na odpowiednim zliczaniu kolejnych próbek sygnału. 6) Brak ingerencji w strukturę sterowania w celach diagnostycznych.

Publikacja IV [Bull. Pol. Acad. Sci. (2024) – udział 40%]

„Verification of MLP network-based current sensor fault classifier for vector-controlled AC motor drives”

Przedstawione testy potwierdzają przydatność klasyfikatora błędów opracowanego dla czujników prądu stojana do silników prądu przemiennego o dwóch różnych konstrukcjach, a tym samym potwierdzają wszechstronność metody. Z przeprowadzonych badań symulacyjnych można wyciągnąć następujące wnioski:

- Dokładność klasyfikatora dla napędu IM i napędu PMSM jest porównywalna (99,6% dla IM i 99,8% dla PMSM). Wyniki te uzyskano dla testów przeprowadzonych w różnych punktach pracy napędu, nawet przy niskich prędkościach i obciążeniach (25% wartości znamionowych) (Tab. 3).
- Klasyfikator neuronowy nie wymaga ponownego szkolenia, aby działać poprawnie na nowym obiekcie.
- Czas odpowiedzi klasyfikatora zależy odwrotnie od częstotliwości pierwszej harmonicznej prądu fazowego stojana.
- Dane syntetyczne pochodzące z matematycznego modelu błędu stanowiły 80% całkowitego zestawu treningowego. Pozostałe 20% zarejestrowano w układzie napędowym z nieuszkodzonymi czujnikami prądu. Taka kompilacja pozwoliła na niezależność klasyfikatora od punktu pracy i parametrów silnika.
- Zaletą klasyfikatora jest jego zdolność do pracy w stanie dynamicznym, jak pokazano na rys. 7.

- *Uniwersalna metoda klasyfikacji opracowana przy użyciu MLP jest również łatwa do wdrożenia, a ze względu na małą strukturę sieci neuronowej nie wymaga znacznej mocy obliczeniowej. Ta właściwość może być ważna w przypadku wdrożenia na fizycznym sterowniku.*

Przyszłe badania będą koncentrować się na wdrożeniu systemu na stanowisku laboratoryjnym z PMSM, a także na zapewnieniu niezawodności działania metody w przypadku zmian parametrów maszyny spowodowanych efektami termicznymi.

Publikacja V [Electronics (2023) – udział 70%]

„Diagnosis of Stator Winding and Permanent Magnet Faults of PMSM Drive Using Shallow Neural Networks”

Testy te wykazały skuteczność wykorzystania struktur płytkich sieci neuronowych w procesie detekcji uszkodzeń elektrycznych i magnetycznych silnika PMSM. Spośród dwóch struktur NN przedstawionych w artykule, w tym rozróżniania stanu uszkodzonego/nieuszkodzonego silnika (detekcja uszkodzeń) i oceny poziomów uszkodzeń uzwojenia stojana PMSM (klasyfikacja uszkodzeń), najskuteczniejszy jest wielowarstwowy perceptron. Samoorganizująca się sieć Kohonena stosowana w systemie diagnostyki PMSM charakteryzuje się wysoką precyzją w wykrywaniu i ocenie stopnia uszkodzenia stojana. Należy zauważyć, że wyniki eksperymentów przedstawione w tym artykule potwierdzają również możliwość oceny mieszanych uszkodzeń uzwojenia stojana i uszkodzeń rozmagnesowania w oparciu o prostą analizę widmową prądu fazowego stojana, o której dotychczas nie wspomniano w literaturze. Należy jednak zauważyć, że ocena stopnia początkowych zwarc międzyzwojowych jest trudna ze względu na niewielkie zmiany wartości elementów wektora wejściowego (objawy uszkodzenia) spowodowane zwarciami na wczesnym etapie. Jednak biorąc pod uwagę wyniki badań eksperymentalnych, a także zalety przedstawionych struktur neuronowych, takie jak łatwość implementacji, prosty opis matematyczny procesu uczenia i, co bardzo ważne, niewielki rozmiar wektora uczenia, zapewniający wysoką wydajność klasyfikacji danych, proponowane płytkie sieci neuronowe mogłyby stanowić bardzo dobre narzędzia wspomagające systemy diagnostyczne PMSM.

Wkład autorów: Wszyscy autorzy wnieśli równy wkład w koncepcję pracy, M.S., T.O.- K. i C.T.K., zaproponowali metodologię i organizację pracy, M.S. przeprowadził pomiary i przeanalizował dane eksperymentalne, M.S. i T.O.-K. przygotowali oryginalny projekt, M.S. zatwierdził otrzymane wyniki, C.T.K. nadzorował projekt, T.O.-K. zrewidował i zredagował ostateczną wersję pracy. Wszyscy autorzy przeczytali i zaakceptowali opublikowaną wersję manuskryptu.

Publikacja VI [IEEE Trans. on Ind. Electron. (2024) – udział 60%]

„Detection of Permanent Magnet Damage of PMSM Drive Based on Direct Analysis of the Stator Phase Currents Using Convolutional Neural Network”

W tym artykule wyniki badań eksperymentalnych potwierdzają poprawność proponowanej metody diagnostyki uszkodzeń rozmagnesowania napędu PMSM. Bezpośrednie przetwarzanie sygnału przez CNN eliminuje wstępną analizę sygnału pod kątem definiowania symptomów uszkodzenia, a także zapewnia krótki czas detekcji i wysoką precyzję wykrywania uszkodzeń, zarówno w stanach ustalonych, jak i przejściowych. Należy zauważyć, że również równoczesne ITSC do uzwojenia stojana występujące przy istniejących uszkodzeniach PM były poprawnie wykrywane. Tak więc opracowany system został zastosowany do wykrywania mieszanych uszkodzeń uszkodzeń rozmagnesowania i uzwojeń stojana napędu PMSM. Pomysł wykorzystania CNN w systemie diagnostycznym opartym na bezpośrednim przetwarzaniu sygnałów prądu fazowego przez sieć pozwala na dostosowanie układu detekcji uszkodzeń do dynamiki rozpatrywanego typu uszkodzenia, jak również stanów dynamicznych napędu PMSM ze sterowaniem wektorowym. Dodatkowo należy podkreślić, że przeniesienie zadania ekstrakcji symptomów z metod analizy sygnału do samej sieci CNN zapewnia czas reakcji systemu diagnostycznego na pojawienie się uszkodzeń nieosiągalnych dla systemów opartych na klasycznych strukturach sieci neuronowych wspomaganych metodami analitycznymi ekstrakcji cech. Jak opisano w tym artykule, wykorzystanie tylko 500 próbek sygnału prądu stojana w analizowanym problemie umożliwiło wykrycie uszkodzenia w maksymalnym czasie równym 0,06 s. Fakt ten stanowił niewątpliwą przewagę proponowanego systemu detekcji nad klasycznymi technikami diagnostycznymi

opisanymi w literaturze. Na podstawie badań w zakresie diagnostyki rozmagnesowania PMSM (np. w [5] i [6]) byliśmy zdania, że proponowane podejście związane z detekcją rozmagnesowania PMSM z wykorzystaniem opracowanego systemu opartego na sieciach CNN będzie w stanie wykryć na podstawie surowych prądów stojana zarówno objawy rozmagnesowania spowodowane nadmiernym wzrostem temperatury magnesów, jak i ten przez nas modelowany, tj. spowodowany uszkodzeniem mechanicznym PM, ponieważ oba przypadki powodują degradację magnesów i osłabienie strumienia silnika. Sieć CNN analizuje prądy stojana, w których proces rozmagnesowania powoduje pojawienie się określonych harmoniczných (wzory podano w artykule), niezależnie od przyczyny procesu rozmagnesowania. Dlatego uważamy, że przedstawiona koncepcja systemu diagnostycznego opartego na analizie surowych prądów stojana przez opracowaną strukturę CNN zdolną do pracy online została zaimplementowana w rzeczywistym napędzie i spełni swoje zadanie, ostrzegając użytkownika zarówno o początkowej fazie rozmagnesowania PM, jak i o wczesnych ITSC, co zostało udowodnione w artykule wynikami badań eksperymentalnych.

Publikacja VII [IEEE Access (2022) - udział 50%]

„Effectiveness of Neural Fault Detectors of Permanent Magnet Synchronous Motor Trained With Symptoms From Field-Circuit Modeling”

W artykule przedstawiono praktyczne zastosowanie płytkiego detektora i klasyfikatora uszkodzeń opartego na NN, trenowanego przy użyciu wzorców próbek, uzyskanych przez symulację obwodów MES w procesie wykrywania uszkodzeń PMSM. Wykorzystanie informacji z modeli matematycznych jest korzystne pod względem generowania wzorców diagnostycznych dla dowolnych warunków pracy maszyny. Możliwości oferowane przez obliczenia obwodów MES można również wykorzystać do mapowania zjawisk fizycznych występujących w czasie defektów silnika. Ponadto wykorzystanie modeli matematycznych pozwala na uzyskanie symptomów i porzucenie fizycznego modelowania uszkodzeń analizowanego obiektu, co, szczególnie w przypadku silników o większej mocy, może być kosztowne i niebezpieczne. Wyniki badań symulacyjnych uzyskane na podstawie modelu obwodowego MES odpowiadały sytuacji, w której napęd pracował w idealnych warunkach. Modele te ignorują wpływ zakłóceń pomiarowych, błędów czujników oraz asymetrii elektrycznej i mechanicznej maszyn. Wpływ warunków zewnętrznych widoczny jest w widmach FFT mierzonego prądu stojana w postaci zwiększonego poziomu szumu pomiarowego (rozdział II). Nie wpłynęły one jednak na jakość symptomów uszkodzeń. Uwzględnienie tych zjawisk w modelu matematycznym jest możliwe, ale czas potrzebny na obliczenia MES byłby znacznie dłuższy. Zastosowanie sieci SOM Kohonena nauczanej na podstawie wyników badań symulacyjnych przedstawionych w niniejszym artykule charakteryzowało się bardzo wysoką skutecznością klasyfikacji uszkodzeń PMSM. Ponadto analiza SOM zapewnia automatyzację procesu oceny stanu technicznego silnika, charakteryzującą się bardzo prostym opisem matematycznym i niewielką ilością danych treningowych, co zapewnia bardzo wysoką precyzję klasyfikacji. Możliwość wykorzystania odległości euklidesowej do opracowania obszarów charakterystyk mapy Kohonena dla rozpatrywanych kategorii uszkodzeń pozwala na pełną automatyzację procesu diagnostycznego i przyspieszenie procesu implementacji NN. Aplikacja diagnostyczna oparta na MLP charakteryzuje się prostotą implementacji w układach programowalnych, a także możliwością mapowania dowolnej funkcji. Sieć MLP aproksymuje dane uczenia, a proces uczenia polega na minimalizacji odpowiedniej funkcji kosztu. W związku z ideą działania MLP, struktura NN wymaga dobrze dobranych sygnałów pod względem zmian spowodowanych uszkodzeniem (najlepiej liniowych). Podczas testów eksperymentalnych, system diagnostyczny oparty na MLP charakteryzował się poprawną oceną stopnia uszkodzenia w ponad 88,6% przypadków, a dokładność wykrywania usterek przekraczała 96,9%. Należy podkreślić, że weryfikacja eksperymentalna struktur MLP i SOM przeprowadzona została w różnych warunkach pracy PMSM, w przeciwieństwie do procesu uczenia opartego na symulacji. Wyniki badań eksperymentalnych przedstawione w tym artykule potwierdzają możliwość praktycznej implementacji proponowanej metodyki diagnostycznej dla napędów PMSM. Ponadto możliwość wykorzystania modelu polowo-obwodowego jako źródła wzorców diagnostycznych stosowanych podczas procesu uczenia NN stanowi zdecydowaną zaletę proponowanej metody. Proponowany system wykrywania usterek oparty na NN został wdrożony przy współpracy środowisk

programistycznych VeriStand i MATLAB. Niemniej jednak przyszłe badania skoncentrują się na wdrożeniu systemu pomiarowo-diagnostycznego w formie oddzielnego urządzenia opartego na ogólnie dostępnych (niskokosztowych) przemysłowych maszynach RISC (ARM).

Publikacja VIII [Energies (2022) - udział 60%]

„Impact of the Convolutional Neural Network Structure and Training Parameters on the Effectiveness of the Diagnostic Systems of Modern AC Motor Drive”

Na podstawie przedstawionych badań nad wpływem struktury i parametrów CNN oraz jej procesu uczenia na zadanie diagnostyki usterek napędów silników prądu przemiennego, można sformułować następujące wnioski:

- *Pomimo wielu podobieństw w budowie uzwojeń stojana silników IM i PMSM, systemy diagnostyczne oparte na CNN mają różne poziomy precyzji. Zjawisko to można zaobserwować podczas analizy krzywych uczenia procesu uczenia CNN. Fakt ten wynika z wpływu magnesów trwałych wirnika PMSM, zwłaszcza przy pracy z niskim momentem obciążenia. Wpływ magnesów trwałych znacznie ogranicza możliwości bezpośredniego przetwarzania sygnałów prądu fazowego przez CNN. Dlatego przy projektowaniu systemów detekcyjnych opartych na CNN, aplikacje dla IM i PMSM należy rozpatrywać oddzielnie jako systemy o różnych właściwościach.*

- *Stopniowy wzrost liczby warstw splotowych powoduje wzrost wskaźnika precyzji sieci, co wynika ze wzrastającego udziału cech wyższego rzędu w końcowej ocenie. Jednakże charakter tych zmian jest prawdziwy tylko dla pewnego zakresu liczby warstw splotowych, w których cechy wyższego rzędu zawierają użyteczne informacje diagnostyczne.*

- *Nadmierna rozbudowa struktury sieciowej znacznie wydłuża proces uczenia, jednak nie poprawiając jego skuteczności; wraz ze wzrostem liczby filtrów precyzja sieci konwekcyjnej ulega wyraźnej poprawie, co jest wynikiem zwiększonej liczby cech charakterystycznych dla poszczególnych kategorii. Jednakże, podobnie jak w przypadku deklaracji liczby warstw splotowych, poprawa stopnia precyzji ze względu na wzrost liczby filtrów następuje tylko do pewnego poziomu.*

- *Zwiększenie liczby w pełni połączonych warstw, jak również liczby neuronów w poszczególnych warstwach, nie wpływa znacząco na precyzję struktury splotowej. Jak wykazano w przeprowadzonych badaniach, użycie tylko dwóch warstw zapewnia wysoki poziom precyzji w określaniu przynależności macierzy wejściowej do jednej z rozpatrywanych klas.*

- *Zastosowanie warstwy odrzucającej zapewnia zachowanie własności generalizacyjnych sieci neuronowej, co skutkuje zwiększeniem precyzji systemu dla nieznanymi próbek. Ponadto warstwa odrzucająca powinna być zlokalizowana przede wszystkim w miejscach struktury o największej liczbie połączeń neuronowych (na przejściu między splotem a zbiorem klasyfikacyjnym). Jednak deklarowane prawdopodobieństwo odrzucenia powinno zapewnić zbieżność procesu uczenia. W większości opisanych przykładów implementacji CNN wartość ta wynosi 0,5.*

- *Funkcje aktywacji sieci CNN nie odgrywają kluczowej roli w ostatecznej precyzji systemu. W zdecydowanej większości przypadków głębokie sieci wykorzystują funkcje aktywacji typu ReLU lub jego warianty. Ponadto wykorzystanie funkcji sigmoidalnych umożliwia osiągnięcie wysokiej precyzji w systemach diagnostycznych. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że zastosowanie funkcji liniowych zamiast sigmoidalnych ma na celu uproszczenie procesu obliczeniowego znacznie rozbudowanej struktury neuronowej.*

- *Dobór liczby epok uczenia powinien uwzględniać liczbę iteracji zapewniających stabilizację wartości funkcji straty wyznaczonej dla danych uczenia i testowania. Należy pamiętać, że z każdą epoką uczenia przebiegi funkcji straty obliczonych dla danych uczenia i testowania powinny mieć podobny kształt. W momencie pojawienia się stopniowo większych różnic w przebiegach (bifurkacji przebiegów) lub całkowitego braku zmian wartości funkcji straty, należy zatrzymać proces i poprawić jego parametry.*

- *Zastosowanie techniki okresowego osłabiania stałej uczenia eliminuje w pewnym stopniu problem precyzyjnego dopasowania początkowej stałej uczenia. Cykliczna redukcja stałej umożliwia korygowanie stałej w trakcie procesu uczenia, co jest zauważalne w postaci płaskich fragmentów funkcji straty. Właściwy dobór liczby epok, po których następuje redukcja stałej (najczęściej nowa wartość*

to 80–95% wartości sprzed aktualizacji) umożliwia znaczne skrócenie czasu strojenia stałej uczenia. Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie algorytmu SGDM przy zadeklarowanej wartości współczynnika momentu pędu w zakresie 0,80–0,95 powoduje wzrost precyzji sieci splotowej. Ponadto zwiększenie stopnia udziału poprzednich klientów w procesie poszukiwania minimum funkcji celu zmniejsza ryzyko zatrzymania procesu szkoleniowego, co skutkuje brakiem zmniejszenia wartości funkcji straty; dobór rozmiaru mini-partii danych szkoleniowych powinien uwzględniać liczbę wszystkich przypadków uwzględnionych w pakiecie szkoleniowym. Badania wykazały, że pomimo różnych rozmiarów pakietów szkoleniowych dla IM i PMSM, najwyższy poziom precyzji osiągnięto dla rozmiaru mini-partii, który wynosił około 2% rozmiaru pakietu szkoleniowego.

Wkład autorów: Wszyscy autorzy wnieśli równy wkład w koncepcję artykułu i zaproponowali metodologię; M.S., C.T.K. i T.O.-K.; badania i analizy formalne, M.S.; oprogramowanie i opracowywanie danych, M.S.; pomiary, M.S.; oprogramowanie, M.S.; pisanie — przygotowanie oryginalnego projektu, M.S., T.O.-K. i C.T.K.; pisanie — przegląd i edycja, M.S. i T.O.-K.; nadzór, administrowanie projektem i pozyskiwanie funduszy, M.S. i T.O.-K. Wszyscy autorzy przeczytali i zaakceptowali rękopis publikacji.

Publikacja IX [Energies (2022 - udział 40%]

„Classification of Single Current Sensor Failures in Fault-Tolerant Induction Motor Drive Using Neural Network Approach”

Wyniki badań przedstawione w tym artykule pozwalają nam stwierdzić, że proponowany neuronowy klasyfikator uszkodzeń NN-FC (ang. Neural Fault Classifier) różnych uszkodzeń CS (ang. Current Sensor) jest w stanie różnicować wybrane uszkodzenia CS w czasie rzeczywistym. Charakteryzuje się on wysoką skutecznością, a także krótkim czasem reakcji na powstałe uszkodzenie. Wyniki testów podczas pracy online układu napędowego DRFOC (ang. Rotor Field-Oriented Control) potwierdzają, że czas klasyfikacji uszkodzenia jest podobny dla uszkodzeń CS w fazach A i B. Najdłuższy czas klasyfikacji zaobserwowano w przypadku uszkodzenia nasycenia. Czas ten jest zależny od rzeczywistej częstotliwości pracy napędu i nie powinien być dłuższy niż 1,5 okresu prądu. Należy jednak podkreślić, że ze względu na proponowaną trzyetapową strategię FTC (ang. Fault-Tolerant Control), w czasie przeznaczonym na klasyfikację uszkodzenia, wcześniej wykryty błąd CS został skompensowany przez przełączenie struktury sterowania na prądy stojana oszacowane przez VCS (ang. Virtual Current Sensor), więc nie wpływa to negatywnie na jakość pracy całego układu napędowego. Należy również podkreślić, że zastosowana koncepcja systemu FTC polega na wykorzystaniu VSC nie tylko na etapie wykrywania uszkodzeń, ale również na kompensacji wykrytej awarii w dowolnej fazie stojana i zapewnieniu nieprzerwanej pracy struktury sterowanej wektorowo. To z kolei umożliwiło klasyfikację rodzaju uszkodzenia za pomocą proponowanego klasyfikatora neuronowego podczas pozauszkodzeniowej pracy napędu. Ponadto, dzięki tak dokładnej klasyfikacji analizowanych awarii CS, proponowane rozwiązanie pozwala na rozszerzenie systemu FTC o metody kompensacji wykrytego rodzaju uszkodzenia. Należy zauważyć, że proponowaną metodę można łatwo rozszerzyć o wykrywanie uszkodzeń więcej niż jednego czujnika. Można to osiągnąć poprzez dostarczenie odpowiednich rozszerzonych danych treningowych dla zaprojektowanej sieci MLP (ang. Multilayer Perceptron). Zaletą sieci MLP wykorzystanej w badaniu jest łatwy opis matematyczny, który pozwala na praktyczną implementację proponowanej metody, wykorzystując ogólnie dostępne (tanie) procesory przemysłowe (np. ARM). Przyszłe badania będą powiązane z testem eksperymentalnym klasyfikacji błędów CS opartej na MLP opracowanej w proponowanej strategii FTC również dla wielu błędów CS.

Wkład autorów: Wszyscy autorzy wnieśli równy wkład w koncepcję artykułu i zaproponowali metodologię; badania i analizy formalne, M.S., K.T., M.A. i T.O.-K.; oprogramowanie i opracowywanie danych, K.T. i M.A.; pomiary, K.T. i M.S.; pisanie — przygotowanie oryginalnego projektu, M.A., K.T. i M.S.; pisanie — przegląd i edycja, T.O.-K. i M.S.; nadzór, administrowanie projektem i pozyskiwanie funduszy, T.O.-K. Wszyscy autorzy przeczytali i zaakceptowali rękopis publikacji.

Cele naukowe związane z tymi publikacjami zostały sformułowane w Autoreferacie habilitanta, dołączonym do jego wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego (Załącznik nr 3, str. 9), cytując:

1. *Opracowanie uniwersalnych metod detekcji i oceny stanu technicznego napędów z silnikami prądu przemiennego (IM oraz PMSM) przy wykorzystaniu technik uczenia transferowego głębokiej sieci neuronowej, zapewniających wysoką skuteczność podczas pracy w stanach ustalonych oraz przejściowych – osiągnięcie I.*
2. *Zastosowanie technik sztucznej inteligencji oraz modelowania matematycznego w diagnostyce układów napędowych z silnikami prądu przemiennego – osiągnięcie II.*
 - *Opracowanie metod detekcji i klasyfikacji uszkodzeń czujników prądu w zamkniętych strukturach sterowania silnikami prądu przemiennego wykorzystujących sieci neuronowe uczone w części na wzorcach pozyskanych z modeli symulacyjnych;*
 - *Wykorzystanie modeli polowo-obwodowych oraz klasycznych struktur neuronowych w diagnostyce uszkodzeń silnika PMSM.*

Po zapoznaniu się z wyżej wymienionymi publikacjami, włączonymi do cyklu prac objętych wspólnym tematem o brzmieniu wymienionym na początku tego rozdziału mojej recenzji, stwierdzam, że tak sformułowane cele naukowe zostały osiągnięte.

4. Ocena aktywności naukowej, dydaktycznej i organizacyjnej

Poza prowadzeniem badań naukowych w Katedrze Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej habilitant wykazywał się systematyczną dużą aktywnością zawodową. Świadczą o tym:

1) Aktywna współpraca z innymi instytucjami naukowymi, do których można zaliczyć:

- a) Politechnikę Krakowską, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, gdzie odbył dwumiesięczny staż naukowy 01.07.2024 – 15.09.2024.

W ramach stażu badawczego zrealizowane zostały prace badawcze nad zastosowaniem technik uczenia głębokiego w diagnostyce układów wielomaszynowych przy zastosowaniu sygnału strumienia unipolarnego. Ponadto, w ramach współpracy ogłoszony został referat podczas seminarium naukowego „Technologie AI na Rynku Transportowym” pt.: Zastosowanie technik sztucznej inteligencji w sterowaniu, diagnostyce i predykcji stanu technicznego przemysłowych układów napędowych.

Dodatkowym rezultatem stażu naukowego było przeprowadzenie wstępnych prac badawczych wchodzących w zakres rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Zielonki pt. „Badanie skuteczności diagnostyki silników indukcyjnych na podstawie rozkładów temperatury oraz pola magnetycznego, algorytmami sieci neuronowych o głębokim uczeniu”, gdzie pełnię funkcję promotora pomocniczego. Ponadto w ramach zrealizowanego stażu naukowego przeprowadzone zostały badania odnoszące się do wykorzystania bezpośredniego przetwarzania sygnału strumienia unipolarnego. W ramach tych badań opracowany został artykuł naukowy obejmujący diagnostykę uszkodzeń prętów klatki wirnika silnika indukcyjnego (artykuł w recenzji w czasie opracowywania wniosku).

- b) University of Lorraine, France, Group of Research in Elec. Eng. of Nancy (GREEN) gdzie odbył krótkoterminowy staż naukowy 06.2023 - 07.2023

W ramach badań przeprowadzonych w laboratorium badawczym “Group of Research in Electrical Engineering of Nancy (GREEN)” University of Lorraine opublikowany został referat na konferencję międzynarodową IEEE Transportation Electrification Conference and Expo pt.: Current sensor fault detection and compensation system for wound rotor synchronous motor based on neural networks. Ponadto, wizyta miała na celu ustalenie zakresu dalszej współpracy pomiędzy zespołami badawczymi, co skutkuje realizacją prac badawczych w ramach 2-miesięcznego stażu naukowego przez mgr. inż. Krystiana Telera, w którego doktoracie habilitant pełni funkcję promotora pomocniczego. Obecnie kontynuuje on współpracę z University of Lorraine w ramach prac nad układami sterowania tolerującymi uszkodzenia w zastosowaniu dla silników synchronicznych o uzwojonym wirniku. W ramach prowadzonych badań jest odpowiedzialny za rozszerzenie funkcjonalności klasycznych systemów diagnostycznych na inny rodzaj silnika przy wykorzystaniu technik głębokiego uczenia.

Ponadto jego współpraca z University of Lorraine skutkuje utworzeniem sekcji specjalnej w czasopiśmie Power Electronics and Drives pt. „Diagnostic Applications in Fault-tolerant Drive Systems”.

2) Osiągnięcia dydaktyczne, organizacyjne oraz popularyzujące naukę:

a) Udział w kształceniu kadry:

- pełnienie funkcji promotora pomocniczego w 6 przewodach doktorskich prowadzonych w Politechnice Wrocławskiej (w jednym obronionym w 2024 roku i w 5 aktualnie otwartych, rozpoczętych w latach 2022 - 2024),
- pełnienie funkcji promotora w pracach dyplomowych: 11 inżynierskich (7 już obronionych i 4 w trakcie realizacji) oraz 2 już obronionych pracach magisterskich.

b) W celu doskonalenia jakości prowadzonych zajęć dydaktycznych z zakresu robotyki oraz napędu elektrycznego brał udział w certyfikowanych szkoleniach:

- Szkolenie: Podstawy Robotyki – firma Lenze, Szkolenie: Programowanie i obsługa robotów przemysłowych oraz Zaawansowane programowanie i funkcje robotów – firma Mitsubishi, Programowanie kompaktowych sterowników iQ-F w środowisku GX Works – firma Mitsubishi.
- Ponadto, w ramach rozwoju umiejętności zarządzania projektami odbył akredytowane szkolenie z zakresu zarządzania projektami badawczymi „Agile Project Management Foundation” zakończone egzaminem. W efekcie uzyskał międzynarodowy certyfikat Agile PM.

c) Pełnione funkcje dydaktyczne oraz organizacyjne:

- członek organizacji Academia Iuvenum Politechniki Wrocławskiej w kadencji 2023-2025,
- kierownik Laboratorium Elektromobilności na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej (od 2022 - obecnie),
- członek Komisji Programowej dla Kierunku Elektromobilność na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej w kadencji 2024 – obecnie.

d) Udział w organizacji wydarzeń promujących naukę, takich jak:

- Dolnośląski Festiwal Nauki (w jego czterech edycjach odbywających się na przestrzeni lat 2018 - 2023),
- Wrocławskie Dni Młodego Elektryka w roku 2019,
- PWr Challenge (dwukrotnie w roku 2023 i 2024),
- Festiwal Wiedzy “Nauka – droga do sukcesu” w roku 2024,
- Mistrzostwa Polski Programistów PLC, czterokrotnie na przestrzeni lat 2019 - 2024,
- Noc Innowacji Politechniki Wrocławskiej w roku 2021,
- Noc Politechniki, trzykrotnie pod rząd w latach 2022 - 2024

5. Posumowanie

Na podstawie otrzymanej dokumentacji i własnej wiedzy oraz dodatkowych informacji zgromadzonych przez siebie w oparciu o dostęp do internetu stwierdzam, że dokonania dra inż. Macieja Skowrona w pełni uzasadniają złożony przez niego wniosek o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, bowiem pokazują jego znaczący wkład w rozwój tej dyscypliny.

Bogaty dorobek wiążący się z działalnością naukową, dydaktyczną i organizacyjną dra inż. Macieja Skowrona – bardzo starannie udokumentowany, co w mojej ocenie zasługuje na szczególne podkreślenie, wypełnia całkowicie ustawowe warunki nadania mu tego stopnia.

/Andrzej Dębowski/
podpis zaufany