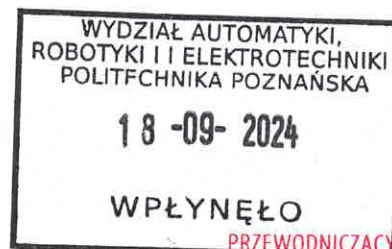


**dr hab. inż. Maciej Sułowicz prof. PK**  
Katedra Inżynierii Elektrycznej  
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej  
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków  
Tel. 12 628 26 58, e-mail: [maciej.sulowicz@pk.edu.pl](mailto:maciej.sulowicz@pk.edu.pl)

Kraków, 25.08.2024 r.



PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY  
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika  
i Technologie Kosmiczne

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pana mgr. inż. **Konrada Górnego** pt.:

*„Metody uczenia maszynowego w diagnostyce uzwojenia stojana silnika indukcyjnego z wykorzystaniem polowego modelu zjawisk elektromagnetycznych”*

wykonanej na Wydziale Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki Politechniki Poznańskiej

Promotor: dr hab. inż. Wojciech Pietrowski

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Mariusz Barański

Recenzję wykonano na podstawie uchwały nr 34/2023-2024 podjętej przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej

z dnia 18 czerwca 2024 r., nr pisma DR-012/64//2024

## **1. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej**

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 190 strony i składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu treści, wykazu wybranych oznaczeń, 6 rozdziałów w tym wprowadzenia i wniosków i uwag końcowych, spisu literatury zawierającego 183 pozycji, w tym 5 pozycji współautorskich Autora i Promotora rozprawy. Na końcu rozprawy zamieszczono załącznik z wykazem rysunków i wykazem tabel. Przedstawione w rozprawie wyodrębnione i ponumerowane rozdziały to:

### **Rozdział 1. Wprowadzenie. Cel, teza i zakres pracy**

Rozdział 1 zawiera wprowadzenie w tematykę rozprawy i przegląd aktualnego stanu wiedzy w zakresie diagnostyki maszyn elektrycznych. Autor przedstawił obszary, w których można poprawić niezawodność pracy układów napędowych i wskazał nieinwazyjną diagnostykę maszyn napędowych jako jedną z możliwych metod poprawy niezawodności. Kolejną część rozdziału to przegląd literatury pod kątem metod monitorowania i diagnozowania silników indukcyjnych. W dalszej części tego rozdziału Autor określił cele, tezę i zakres pracy. Na podstawie rozpoznania literaturowego wskazał obszary w diagnostyce silników indukcyjnych dotąd słabiej zbadane, którymi będzie się zajmował w rozprawie.

### **Rozdział 2. Diagnostyka silnika indukcyjnego klatkowego**

W rozdziale 2 przedstawiono problematykę diagnostyki silników indukcyjnych. Przeanalizowano przyczyny powstawania uszkodzeń, odniesiono się do statystyki uszkodzeń podawanych przez organizacje *Electric Power Research Institute (EPRI)* oraz *IEEE Industry Applications Society (IAS)*. W kolejnej części przedstawiono podział metod diagnozowania silników elektrycznych. Omówiono metody bazujące na analizie sygnałów w dziedzinie czasu, w dziedzinie częstotliwości wykorzystujące przekształcenie Fouriera oraz metody analizy wyższych rzędów. Następnie Autor omówił metody uczenia maszynowego oparte o klasyczne metody klasyfikacji i regresji oraz metody oparte o klasyczne sieci neuronowe. Kolejno omówiono metody oparte o sieci neuronowe o uczeniu głębokim oraz systemy rozmyte. W dalszej części Autor przedstawia klasyfikację sygnałów diagnostycznych, wybrane metody przetwarzania sygnału oraz szczegółowo opisuje proces pozyskiwania sygnału diagnostycznego z wykorzystaniem kompleksowych systemów akwizycji danych opartych o wielofunkcyjne kary pomiarowe.

### **Rozdział 3. Modele matematyczne silników indukcyjnych**

W rozdziale 3 przedstawiono wprowadzenie i rozważania dotyczące zasad formułowania modelu matematycznego dla silników indukcyjnych. Skoncentrowano się na opisie modelu silnika indukcyjnego o parametrach skupionych, który jest jednym z powszechnie wykorzystywanych modeli w układzie współrzędnych naturalnych do opisu zjawisk zachodzących w silniku indukcyjnym. Po przedstawieniu opisu w składowych naturalnych Autor przedstawił znane z literatury przekształcenia do innych niż naturalny układów współrzędnych w tym:  $012$ ,  $0ab$ ,  $0dq$ , składowych wirujących. Autor zobrazował na diagramie zależności transformacyjne do poszczególnych układów współrzędnych. Następnie przedstawiono opis matematyczny uzwojenia stojana z uwzględnieniem zwarcia międzyzwojowego. Przedstawiono graficzną reprezentację zwarć w poszczególnych fazach silnika. Przy modelowaniu wprowadzono współczynniki podział uzwojenia na tzw. część zwartą i niezwartą. W dalszej części przedstawiono model polowo-obwodowy silnika indukcyjnego wraz z równaniami opisującymi rozkład pola elektromagnetycznego za pomocą potencjałów skalarnych i wektorowych. Zastosowanie modelu polowo-obwodowego pozwoliło na uzyskanie sygnałów diagnostycznych, które zostały wykorzystane do opracowania algorytmu na potrzebę diagnostyki uszkodzeń uzwojeń stojana maszyny indukcyjnej.

### **Rozdział 4. Metody uczenia maszynowego w diagnostyce silników elektrycznych**

Rozdział 4 zawiera opis i charakterystykę metod uczenia maszynowego, które są najczęściej stosowane w diagnostyce maszyn elektrycznych. W pierwszej części rozdziału Autor przedstawił podział metod uczenia maszynowego wykorzystywanych w zagadnieniach diagnostyki silników indukcyjnych. Następnie szczegółowo omówił tematykę sztucznych sieci neuronowych, wychodząc o budowy pojedynczego neuronu i jego opisu przy pomocy zależności matematycznych. Następnie przybliżył zagadnienia wielowarstwowych sieci preceptorowych i ich metod uczenia. Tę część zakończył podsumowaniem obszarów wykorzystania sieci MLP w zagadnieniach diagnostyki maszyn elektrycznych.

Następnie omówił samoorganizujące sieci neuronowe *SOM* (ang. *Self-Organizing Map*). Wśród tych sieci najpopularniejszą jest samoorganizująca sieć Kohonena, która jest kolejnym najczęściej wykorzystywanym typem sieci w diagnostyce maszyn elektrycznych. Podano przykłady zastosowań i odwołania do literatury. W dalszej części tego rozdziału omówiono zastosowanie sieci neuronowych o uczeniu głębokim. Są to aktualnie najczęściej i najbardziej chętnie stosowane sieci neuronowe. Autor opisuje ideę, zasadę działania i rodzaje sieci

neuronowych o uczeniu głębokim. Po informacjach dotyczących głębokich sieci neuronowych DNN (ang. *Deep Neural Networks*) podano informacje o konwolucyjnych sieciach neuronowych CNN (ang. *Convolutional Neural Network*). Opisano ich budowę, główne własności, sposób uczenia oraz oceniono przydatność tych sieci do realizacji zadań związanych z zadaniami diagnostycznymi. Dodatkowo w tym rozdziale omówiono jeszcze metody oceny klasyfikatorów neuronowych.

## **Rozdział 5. Głębokie sieci neuronowe w diagnostyce uzwojenia stojana silnika indukcyjnego**

W rozdziale 5 Autor przedstawił sposób modelowania uszkodzeń uzwojeń stojana silnika indukcyjnego typu 3SIE 100L-4B. Opisał szczegółowo sposób modelowania poszczególnych uszkodzeń oraz braku uszkodzenia, sposób ich odwzorowania w oprogramowaniu ANSYS Electronics Desktop, którego użył do przeprowadzenia szeregu obliczeń i analiz polowych dla silnika będącego obiektem badań.

Przedstawiono metodykę badań eksperymentalnych. Opisano stanowisko laboratoryjne wykorzystywane do badań. Opisano realizację uszkodzeń uzwojenia stojana silnika indukcyjnego. Opisano użytą aparaturę pomiarową do badań eksperymentalnych. Opisano wyniki badań eksperymentalnych oraz obliczeń symulacyjnych.

W dalszej części przedstawiono realizację neuronowych układów diagnostycznych w których zastosowano głębokie sieci neuronowe. Do zastosowań diagnostycznych wybrano sieci konwolucyjne CNN. Przedstawiono zastosowanie konwolucyjnej sieci neuronowej w procesie detekcji zwarć międzyzwojowych w różnej kombinacji w uzwojeniach stojana silników indukcyjnych. Przeanalizowano wpływ rodzaju informacji diagnostycznej, struktury sieci oraz parametrów procesu uczenia na precyzję klasyfikacji oraz poziom skuteczności detekcji zwarć międzyzwojowych przy pomocy konwolucyjnej sieci neuronowej. Przedstawiono dokładnie wyniki procesu uczenia wybranych modeli głębokich sieci neuronowych, opisano proces strojenia hiperparametrów sieci a także omówiono wyniki opracowanych klasyfikatorów, które poparto bogatą ilustracją uzyskanych wyników.

## **Rozdział 6. Wnioski i uwagi końcowe**

W rozdziale 6 Doktorant przedstawił wnioski i uwagi końcowe oraz omówił najważniejsze osiągnięcia przedstawione w ocenianej rozprawie. Uzyskane wyniki dobrze potwierdzają postawione tezę rozprawy jak i poszerzają wiedzę na temat modelowania matematycznego i polowo-obwodowego dla symetrycznego jak i silnika z uszkodzeniami oraz metod

diagnostyki silników indukcyjnych z uwypukleniem metod sztucznej inteligencji opartych na sieciach neuronowych o uczeniu głębokim.

Podsumowując przedstawiony opis zawartości poszczególnych rozdziałów w recenzowanej rozprawie mogę stwierdzić, że ma ona charakter teoretyczno-praktyczny i przedstawia obszerne wyniki badań, które w stopniu wystarczającym pozwalają udowodnić postawioną główną tezę pracy. Pracę czyta się dobrze a układ i struktura recenzowanej rozprawy jest przedstawiona logicznie i we właściwy sposób.

## **2. Ocena rozprawy doktorskiej**

### **2.1. Motywy podjęcia tematu rozprawy doktorskiej**

Motywacja do podjęcia tematu rozprawy przez Doktoranta została przedstawiona w rozdziale 1. Doktorant przedstawił główny cel pracy, który sformułował następująco:

*Celem rozprawy jest opracowanie skutecznej metody diagnostyki uzwojeń stojanów silników indukcyjnych, wykorzystującej polowo-obwodowy model zjawisk elektromagnetycznych oraz konwolucyjne sieci neuronowe.*

Na potrzebę realizacji tak postawionego celu pracy Doktorant dokonał obszernego przeglądu literatury po sporządzeniu, którego wysnuł wnioski i sformułował postulat co do poprawy niezawodności pracy układów napędowych. Wskazał wczesną i nieinwazyjną diagnostyka napędu, jako narzędzie, które poprzez wykorzystanie wyników analizy sygnałów diagnostycznych pozwala na przygotowanie procesu diagnostycznego, umożliwiającego możliwie jak najwcześniejsze wykrycie awarii, a tym samym przygotowanie procedur konserwacyjnych z odpowiednim wyprzedzeniem.

Z przeglądu i statystyk branżowych wynika, że najczęściej stosowanymi silnikami w układach napędowych są silniki indukcyjne. Coraz częściej są też stosowane w układach pojazdów elektrycznych. Popularność tych silników wynika z ich prostej budowy, niskich kosztów produkcji i dobrych własności ruchowych. W ocenianej rozprawie, jak Autor podaje, skupiono się na wczesnej i nieinwazyjnej diagnostyce silników indukcyjnych, która może stanowić samodzielną metodę diagnostyczną, jak również może być uzupełnieniem innych metod poprawy niezawodności pracy elektrycznych układów napędowych.

Uszkodzenia i awarie uzwojeń stojana są jednymi z najgroźniejszych. Niewielkie uszkodzenia mogą bardzo szybko i lawinowo się rozprzestrzeniać i w niedługim czasie doprowadzić do poważanej awarii maszyny, która może być zagrożeniem dla zdrowia i życia

obsługi napędu. Z tego względu coraz większe znaczenie w eksploatacji tych maszyn odgrywa diagnostyka, która może zapewnić poprawę bezpieczeństwa i bezawaryjną pracę.

Uszkodzenie uzwojenia stojana w początkowej fazie jego powstawania jest bardzo trudne do wykrycia pomimo zmian w sygnałach diagnostycznych prądów, napięć czy innych sygnałów. Rozwój metod przetwarzania sygnałów i metod sztucznej inteligencji rodzi nadzieję poprawy tego stanu rzeczy i możliwość wykrywania tych uszkodzeń we wczesnym stadium.

Stąd celem rozprawy jest opracowanie skutecznej metody diagnostyki uzwojeń stojanów silników indukcyjnych, wykorzystującej polowo-obwodowy model zjawisk elektromagnetycznych oraz konwolucyjne sieci neuronowe.

Uważam, że podjęty temat rozprawy dotyczący możliwości wykorzystania polowo-obwodowy model zjawisk elektromagnetycznych do skutecznej diagnostyki uszkodzeń uzwojeń stojana silników indukcyjnych z wykorzystaniem głębokich sieci neuronowych jest bardzo ważny i aktualny. Zakres tematyczny rozprawy oraz motywacja do podjęcia tak trudnego tematu zasługuje na uznanie.

## **2.2. Teza rozprawy doktorskiej i zadania badawcze**

Doktorant sformułował następującą tezę pracy:

***Zastosowanie metod uczenia maszynowego z wykorzystaniem polowo-obwodowego modelu zjawisk elektromagnetycznych może poprawić skuteczność metod diagnostyki uzwojenia stojana trójfazowych silników indukcyjnych.***

Dla udowodnienia postawionej tezy, Doktorant założył realizację następujących zadań badawczych, które zostały przez Niego zapisane w poniższych punktach i obejmują:

- *Analizę aktualnego stanu wiedzy w zakresie diagnostyki silników indukcyjnych na podstawie przeglądu dostępnej literatury,*
- *Przegląd aktualnie wykorzystywanych metod diagnostycznych oraz metod przetwarzania sygnału w diagnostyce silników elektrycznych,*
- *Przedstawienie, przeprowadzenie analizy oraz omówienie zagadnień związanych z matematycznym modelowaniem silników indukcyjnych zarówno w ujęciu obwodowym jak i polowym,*
- *Omówienie i analiza matematycznego modelowania uszkodzeń uzwojenia stojana trójfazowych silników indukcyjnych,*
- *Opracowanie modeli obwodowych oraz polowych trójfazowego silnika indukcyjnego*

*z uwzględnieniem uszkodzenia we wszystkich fazach uzwojenia stojana,*

- *Obliczenia symulacyjne przebiegów prądów fazowych silnika z uwzględnieniem zwarć międzyzwojowych we wszystkich fazach uzwojenia stojana w wybranych stanach pracy z zastosowaniem opracowanego modelu uszkodzonego silnika,*
- *Przeprowadzenie analizy wyników badań symulacyjnych z zastosowaniem transformacji Fouriera oraz transformacji falkowej,*
- *Opracowanie bazy danych treningowych i walidacyjnych na podstawie wyników analizy badań symulacyjnych,*
- *Przeprowadzenie weryfikacji eksperymentalnej modelu polowego trójfazowego silnika indukcyjnego,*
- *Analizę aktualnego stanu wiedzy w obszarze metod uczenia maszynowego ze szczególnym uwzględnieniem wykorzystania sztucznych sieci neuronowych w zagadnieniach związanych z diagnostyką silników elektrycznych,*
- *Przedstawienie oraz omówienie struktury wybranych klasycznych, jak i głębokich modeli sztucznych sieci neuronowych,*
- *Przedstawienie oraz analiza metod oceny zarówno binarnych jak i wieloklasowych klasyfikatorów neuronowych,*
- *Opracowanie oprogramowania własnego do: wizualizacji struktury, treningu, strojenia parametrów z wykorzystaniem metod losowego i siatkowego przeszukiwania hiperparametrów oraz wizualizacji i analizy wyników konwolucyjnych sieci neuronowych,*
- *Opracowanie i analiza modeli konwolucyjnych sztucznych sieci neuronowych umożliwiających klasyfikację zwarć międzyzwojowych w trzech fazach trójfazowego silnika indukcyjnego,*
- *Analizę wpływu rodzaju danych treningowych na wyniki klasyfikacji konfiguracji zwarć międzyzwojowych w trzech fazach trójfazowego silnika indukcyjnego,*
- *Analizę wpływu hiperparametrów konwolucyjnej sieci neuronowej na wyniki klasyfikacji zwarć międzyzwojowych uzwojenia stojana,*
- *Analizę porównawczą metryk modeli konwolucyjnych sieci neuronowych w zagadnieniach klasyfikacji zwarć międzyzwojowych uzwojenia stojana.*

Należy dodać, że Autor w rozprawie dla realizacji powyższych zadań musiał jeszcze zrealizować wiele prac, które nie zostały ujęte w tym wykazie. Wiązały się one z budową układów pomiarowych, rozpoznaniem oprogramowania MATLAB, techniką pomiarową oraz

językiem programowania, w którym zostało przygotowane oprogramowanie do uczenia testowania i weryfikacji sieci neuronowych o uczeniu głębokim.

### **2.3. Realizacja rozprawy doktorskiej**

Zrealizowane poszczególne zadania składające się na całość prac można podzielić zgodnie z wydzielonymi rozdziałami rozprawy doktorskiej. Dla przygotowania rozdziału pierwszego wykonano prace analityczne i koncepcyjne. Określono problematykę rozprawy, sformułowano cel i założenia jej realizacji, dokonano przeglądu literatury i sformułowano cele badawcze i tezę pracy. Zidentyfikowano luki w badaniach w obszarze diagnostyki silników indukcyjnych, które praca ma wypełnić.

Rozdział drugi to merytoryczna podbudowa związana z problematyką diagnostyki silników indukcyjnych. Autor dokonuje tu klasyfikacji uszkodzeń, metod diagnostycznych, sygnałów diagnostycznych, wybranych metod ich przetwarzania oraz procesu pozyskania danych do skutecznej oceny stanu maszyn elektrycznych.

W kolejnym trzecim rozdziale Autor skoncentrował się nad zagadnieniami modelowania silników indukcyjnych klatkowych. Wychodząc od opisu w składowych naturalnych sformułował opis matematyczny silnika pozwalającego przeprowadzić analizy dla symetrycznego silnika przy braku uszkodzenia jak również dla stanów pracy silnika, gdzie występują uszkodzenia. Autor skoncentrował się w dalszej części nad opisem matematycznym uzwojenia stojana z uwzględnieniem zwarcia międzyzwojowego. Ten typ uszkodzenie przy różnych konfiguracjach zwarć i różnej ilości zwartych zwojów był główny typem uszkodzenia rozważanym w dalszej części rozprawy. Po przedstawieniu modelu obwodowego Autor przechodzi do przybliżenia modelu połowo-obwodowego, który posłuży mu do generacji sygnałów diagnostycznych, które zostały przez Niego wykorzystane do uczenia głębokich sieci neuronowych.

Natomiast w rozdziale czwartym Autor dokonuje przeglądu i charakterystyki metod sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego, które są najczęściej stosowane w diagnostyce maszyn elektrycznych. Po omówieniu klasycznych sieci neuronowych w tym sieci MLP, Kohonena przechodzi do omówienia sieci neuronowych o uczeniu głębokim. Ta część rozdziału jest ostatnią częścią poruszającą zagadnienia teoretyczne.

Rozdział piąty to główny i najobszerniejszy rozdział rozprawy. Autor w tym rozdziale podał parametry silnika indukcyjnego typu 3SIE 100L-4B, który został wybrany do badań.



Zostały dla tego silnika przeprowadzone badania laboratoryjne oraz Autor przeprowadził wiele obliczeń symulacyjnych przy pomocy opracowano polowo-obwodowy modelu numerycznego w oprogramowaniu ANSYS Electronics Desktop 2021 R1.

Zasadniczo prace badawcze zrealizowane w ramach ocenianej rozprawy zostały podzielone na cztery ważne etapy. Pierwszy z nich obejmował opracowanie polowego modelu trójfazowego silnika indukcyjnego. Autor wykorzystując zdobytą wiedzę i umiejętności odwzorował w programie umożliwiającym modelowanie maszyn elektrycznych, model silnika uwzględniający wybrane zjawiska jak najbardziej odzwierciedlające rzeczywiste warunki pracy silnika.

W drugim etapie przeprowadzono badania laboratoryjne dla silnika indukcyjnego typu 3SIE 100L-4B. Etap ten dotyczył również weryfikacji i optymalizacji opracowanego modelu polowo-obwodowego z wykorzystaniem wyników z badań eksperymentalnych w laboratorium.

Zebranie dużej ilości danych pomiarowych podczas badań eksperymentalnych pozwoliło Autorowi na zgromadzenie danych testowych do weryfikacji opracowanych modeli neuronowych opartych na konwolucyjnych sieciach neuronowych.

Trzeci etap skupiał się na obliczeniach symulacyjnych, do których wykorzystano polowo-obwodowy model trójfazowego silnika indukcyjnego. Uzyskane wyniki obliczeń symulacyjnych umożliwiły utworzenie baz danych do uczenia oraz walidacji modeli konwolucyjnych sieci neuronowych.

Ostatnim czwartym etapem prac badawczych było opracowanie, trenowanie i strojenie modelu konwolucyjnych sieci neuronowych. Konsekwentnie z wyborem typu uszkodzenia, który był rozważany w rozprawie, dokonano licznych analiz skuteczności oceny diagnostycznej prezentując wiele wyników klasyfikacji zwarć międzyzwojowych przez sieć neuronową.

Poszczególne kroki w zrealizowanych badania w ramach rozprawy ilustrują, wykorzystanie zaawansowanych metody modelowania matematycznego, symulacji komputerowej, analizy sygnałów oraz sztucznej inteligencji do diagnozowania uszkodzeń silników indukcyjnych.

Po zapoznaniu się z całością rozprawy mogę stwierdzić, że jej realizacja przebiegała w kilku istotnych etapach wzajemnie z sobą powiązanych a rzetelna realizacja wszystkich tych etapów przez Doktoranta pozwoliła na osiągnięcie bardzo dobrego efektu końcowego.

W ostatnim rozdziale 6 Autor podsumował rezultaty swoich badań i sformułował wnioski końcowe. Wskazał działania, które doprowadziły do udowodnienia tezy pracy. Na szczególne uznanie i ich wyróżnienie według mnie zasługują:

- Przygotowanie modeli polowych trójfazowych silników indukcyjnych, pozwalających na uwzględnienie uszkodzeń obwodu stojana i przeprowadzenie analizy wpływu zwarć międzyzwojowych na przebiegi prądów fazowych,
- Przygotowanie w oparciu model polowy silnika indukcyjnego bazy danych z bardzo licznymi zbiorami danymi do uczenia głębokich sieci neuronowych,
- Opracowanie skutecznego klasyfikatora zwarć międzyzwojowych uzwojenia stojana silnika indukcyjnego wykorzystujące konwolucyjne sieci neuronowe,
- Uzyskanie zadowalającej skuteczności detekcji i klasyfikacji zwarć międzyzwojowych uzwojenia stojana dzięki zastosowaniu dyskretnego sygnału wejściowego dla dobranych konwolucyjnych struktur sieci neuronowych,
- Opracowanie i skuteczne przeprowadzenie strojenia hiperparametrów konwolucyjnych modeli sieci neuronowych na potrzebę diagnostyki uzwojenia stojana z wykorzystaniem deterministycznych i stochastycznych metod doboru hiperparametrów modelu znacznie poprawiających jakości detekcji i klasyfikacji zwarć międzyzwojowych uzwojenia stojana,
- Potwierdzenie możliwości zastosowania modeli polowych silników indukcyjnych oraz zaawansowanych modeli głębokich sieci neuronowych do opracowywania systemu diagnostycznego do diagnostyki uzwojeń stojana trójfazowych silników indukcyjnych i wykrywania tych uszkodzeń we wczesnym etapie ich postawiania.

### **3. Uwagi krytyczne**

#### **3.1. Uwagi ogólne**

Układ i formalna strona pracy nie budzą zarzutu. Jej treść jest prezentowana systematycznie a kolejność omawianych problemów właściwa i logicznie uzasadniona. Rozdziały są z sobą spójnie powiązane każdy kolejny rozdział jest następstwem poprzedniego.

Bardzo dokładnie przedstawiono zastosowane modele trójfazowego silnika indukcyjnego. Przedstawiono właściwe ilustracje modelowanych elementów oraz zwięźle wzory i wyprowadzenia zależności w poszczególnych krokach przekształceń do zapisu modelu obwodowego.

Autor wykazuje się ugruntowaną wiedzą teoretyczną, w szczególności w zakresie modelowania uszkodzeń maszyn elektrycznych, analizy sygnałów, akwizycji sygnałów i sztucznych sieci neuronowych.

Na wyróżnienie zasługuje klarowny język, w którym praca jest napisana oraz umiejętność zwięzłego zapisu przedstawianych treści. Jak wcześniej wspomniałem pracę czyta się dobrze.

Wszystkie badania i analizy prezentowane w rozprawie poparto syntetycznymi zestawieniami uzyskanych wyników. W pracy zawarto dużą ilość ilustracji graficznych i tabelarycznych. Są one dobrze przedstawione, czytelne, estetyczne i dobrze ilustrują omawiane zagadnienia.

Pomimo, że praca dotyczy konkretnych problemów związanych z modelowaniem uszkodzeń silników indukcyjnych na potrzebę ich diagnostyki, to opracowanie modeli, wykonanie obliczeń i symulacji oraz przeprowadzenie badań eksperymentalnych, wymagało od Doktoranta również bardzo dobrego przyswojenia innych zagadnień. Można tu wymienić zagadnienia związane z sieciami neuronowymi, teorią cyfrowego przetwarzania sygnałów i ich analizą, systemami akwizycji sygnałów, programowaniem w środowisku MATLAB o Python.

Wkład pracy Doktoranta w przygotowanie tej rozprawy jest zatem bardzo duży. Wnioski końcowe z przeprowadzonych badań i analiz są sformułowane poprawnie i potwierdzają postawione przez Doktoranta tezy. Wykaz literatury zawierający 183 pozycje i częste odwołania do poszczególnych pozycji w tekście rozprawy wskazują na dobre rozeznanie Doktoranta w obszarze diagnostyki maszyn indukcyjnych, której to tematyki dotyczy recenzowana rozprawa doktorska.

### **3.2. Uwagi szczegółowe związane z edycją pracy**

Pragnę zaznaczyć, że poniższe uwagi redakcyjne nie mają istotnego wpływu na ocenę merytoryczną pracy i nie utrudniają jej czytania.

1. Praca napisana jest poprawnym językiem polskim, tylko w niektórych miejscach pojawiają się literówki, drobne przejęzyczenia i niedociągnięcia edycyjne.
2. Zauważyłem pojedyncze błędy stylistyczne lub literówki na stronach: 15, 42, 45, 61, 77, 80, 86, 121, 126.
3. Jako przykład literówek mogę podać zdanie ze strony 49 „*Operację spotu matematycznego w ogólnym przypadku można opisać wzorem: ..., (4.35)*”.
4. Innym przykładem drobnych niezręczności językowych jest zdanie ze strony 77, w którym powtórzono dwa razy jedno słowo „*Niemniej, na aktualną popularność głębokich modeli*

*szucznych sieci neuronowych miało wpływ miało zdefiniowanie przez profesora Yanna Le Cuna, jednej z popularniejszych w dzisiejszych czasach struktur głębokich sieci neuronowych, nazwanej Konwolucyjną (Splotową) Siecią Neuronową (ang. Convolutional Neural Network, CNN) [143–147].”*

5. Strona 42 wydaje się niepotrzebną, można było ewentualnie inaczej sformatować tekst i wzory w tej części pracy.
6. W kilku miejscach zdania są rozpoczęte od aby np. *„Aby możliwe było opracowanie w pełni funkcjonalnego modelu sieci neuronowej, umożliwiającej klasyfikację zbiorów liniowo”*.
7. Na stronach 101 i 102 w opisach nagłówków tabel 5.2 i 5.3 z parametrami siatki dyskretyzacyjnej modelu 2D i 3D dobrze byłoby uporządkować zapis jednostek w tabeli i sformatować tak, aby nie było dzielenia na dwa wiersze zapisu danej jednostki.
8. Na stronie 121 zapisano zdanie: *„Otrzymane wyniki z modelu polowego oraz wyniki otrzymane podczas badań eksperymentalnych, poddano dyskretnej transformacie Fouriera oraz ciągłej transformacie falkowej”*. Powinno raczej zostać zapisane transformacji a nie transformacie. Zauważyłem podobne nieścisłości w jeszcze w kilku miejscach rozprawy.
9. W podrozdziale *„3.2 Opis modelu silnika indukcyjnego o parametrach skupionych”* – myślę, że dobrze byłoby dodać rysunek obrazujący poglądowo modelowane elementy silnika.

### **3.3. Uwagi dyskusyjne dotyczące merytorycznej strony pracy**

Uwagi o charakterze ogólnym, które są zarówno pytaniami do Doktoranta, komentarzami jak również uwagami, które powinny być wyjaśnione.

1. Przy modelowaniu zwarć zwojowych Autor założył podział uzwojenia na część zwartą i część bez zwarcia. Czy można rozbudować przyjęty model i zamodelować uszkodzeń w środku uzwojenia i dzieląc go np. na trzy części ze zwartą częścią w środku. Jakie zmiany należałoby wprowadzić w modelu polowym na schematach z rys 5.8.
2. Na ile uwzględnienie wyższych harmonicznych w napięciu zasilania pozwoliło udokładnić wyniki uzyskane z modelu polowo-obwodowego i na ile są one zgodne z wynikami uzyskanymi podczas badań eksperymentalnych.
3. Jaka jest jeszcze możliwość dokładniejszego odwzorowania uszkodzeń w modelu symulacyjnym i na ile można to jeszcze poprawić zbieżność z wynikami pomiarów przeprowadzonymi na rzeczywistym silniku.

4. Czy na etapie odwzorowania własności badanego silnika w modelu polowo-obwodowym dokonano pomiarów identyfikacyjnych dla tego konkretnego silnika i czy w jakiś sposób dokonano kalibracji opracowanego modelu w oparciu o te pomiary.
5. Czy zdaniem Autora skuteczność klasyfikacji dla uszkodzeń w wczesnej fazie powstawania (zwarłe dwa sąsiednie zwoje) jest wystarczająca do zastosowań opracowanej przez Autora metody w warunkach przemysłowych.
6. Jakie kroki Autor podejmie w celu wdrożenia opracowanej metody diagnostycznej dla szerszej liczby silników o różnej budowie uzwojeń stojana.

#### 4. Wniosek końcowy

Zamieszczone uwagi w niniejszej recenzji nie mają żadnego wpływu na moją ostateczną pozytywną ocenę. Zatem stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana **mgr. inż. Konrada Górniego** pt. „*Metody uczenia maszynowego w diagnostyce uzwojenia stojana silnika indukcyjnego z wykorzystaniem polowego modelu zjawisk elektromagnetycznych*”, stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego, a spójnie i kompleksowo przedstawiony sposób rozwiązania problemów dowodzi umiejętności prowadzenia prac naukowych.

Stwierdzam, że opiniowana rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. (Dz. U. 2023 poz. 742 - tekst ujednolicony z dnia 08.03.2023 r.) jak również przez ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr. 65, poz. 595), Rozporządzenia Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15 stycznia 2004 roku, Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 3 października 2014 roku oraz Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r., poz. 261).

**W związku z tym, przedkładam Radzie Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej wniosek o przyjęcie i dopuszczenie recenzowanej rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.**

