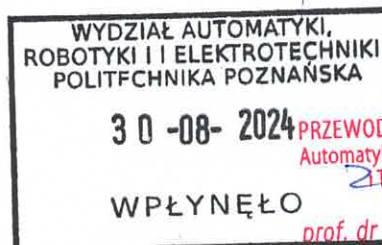


Prof. dr hab. inż. Mariusz Jagieła
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Politechnika Opolska
45-758 Opole
ul. Prószkowska 76
E-Mail: M.jagiela@po.edu.pl

Opole, sierpień, 2024



PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY
Automatyki, Elektronika, Elektrotechnika
Technologie Kosmiczne
prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

Recenzja Rozprawy Doktorskiej

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

autorstwa mgr inż. Konrada Górnego, wykonanej pod kierunkiem

Promotora - Dr hab inż. Wojciecha Pietrowskiego

Promotora pomocniczego - Dr hab. inż. Mariusza Barańskiego

Recenzję wykonano na podstawie uchwały z dnia 18 czerwca 2024 r Rady naukowej dyscypliny Elektrotechnika, automatyka, elektronika i technologie kosmiczne Politechniki Poznańskiej

1. Wstęp

Recenzowana rozprawa dotyczy naukowych analiz możliwości zastosowania metod uczenia maszynowego w diagnostyce uzwojenia stojana silników indukcyjnych w oparciu o dane treningowe pochodzące z obliczeń polowo-obwodowych metodą elementów skończonych. Realizacja pracy doktorskiej o takiej tematyce jest istotna ze względu na powszechne zastosowanie silników indukcyjnych w różnych gałęziach przemysłu oraz konieczność zapewnienia ich niezawodnej pracy. Ponadto, bardzo dynamicznie zachodzi rozwój różnorodnych metod opartych na wykorzystaniu sztucznej inteligencji, a dostępność opartych na nich specjalistycznych narzędzi informatycznych jest praktycznie nieograniczona. Zagadnienie wykorzystania tego rodzaju metod w diagnostyce maszyn elektrycznych i transformatorów ma już ponad 30 letnią historię. Nie jest ono zatem nowe, ale każde podejście do jego rozwiązania jest inne gdyż różni naukowcy stawiają sobie różne cele i stosują różne koncepcje przygotowania danych treningowych, trenowania i interpretacji wyników. Ponadto wykorzystuje się różne modele i struktury metod sztucznej inteligencji. W międzyczasie pojawiają się także nowe metody, których wykorzystanie w diagnostyce maszyn elektrycznych nie jest oczywiste ani proste, toteż wymaga prowadzenia badań naukowych.

Strategia przygotowania danych szkoleniowych, które w praktyce posiadają cechy tzw. dużych zbiorów danych, wyłącznie za pośrednictwem symulacji komputerowych może okazać się użyteczna i ekonomicznie opłacalna, a samo zgromadzone doświadczenie z zastosowania różnych technik wykorzystania sztucznej inteligencji - bezcenne. W kontekście powyższego uważam, że tematyka rozprawy wraz z jej głównym problemem badawczym do rozwiązania w przedmiotowej rozprawie sformułowano w sposób poprawny i korelujący z najnowszymi trendami w badaniach naukowych.

2. Zawartość pracy

Rozprawa jest podzielona na kilka części, w tym przegląd literatury, opis metodologii, wyniki badań eksperymentalnych oraz wnioski. Zawiera ona jasno sformułowany cel badań oraz jedną tezę badawczą, która moim zdaniem niezbyt precyzyjnie oddaje głębię głównego osiągnięcia pracy. Jest ona w istocie poprawna, ale nie jest do końca wiadomo co jest rozumiane jako „metody diagnostyki uzwojenia stojana trójfazowych silników indukcyjnych” gdyż istnieje spektrum takich metod i są to zarówno metody klasyczne jak i wykorzystujące sztuczną inteligencję. Ponadto metody opracowane w przedmiotowej pracy obejmują tylko diagnostykę zwarć wewnętrznych w uzwojeniu stojana.

Rozdziały metodologiczne rozprawy przedstawiają bardzo szczegółowy przegląd technik uczenia maszynowego i modeli matematycznych wykorzystanych w dalszych rozdziałach. Autor zastosował konwolucyjne sieci neuronowe (CNN) ze względu na ich zdolność do obsługi złożonych wzorców danych i dokładnych klasyfikacji. Opracowano szczegółowy model polowy zjawisk elektromagnetycznych w silniku wykorzystując profesjonalne oprogramowanie. Stworzono eksperymentalne środowisko badawcze, które obejmuje stanowisko pomiarowe i pomiary wykonane na stanowisku badawczym w celu weryfikacji proponowanych modeli i metod. Opracowanie danych pochodzących z obliczeń elektromagnetycznych przy wykorzystaniu różnych technik analizy sygnałów w recenzowanej rozprawie doktorskiej zostało przeprowadzone na bardzo wysokim poziomie. Autor dostosował do tego celu zaawansowane techniki, takie jak transformata Fouriera i falkowa, co pozwoliło na dokładne opisanie najbardziej istotnych efektów zjawisk elektromagnetycznych w silniku indukcyjnym występujących pod wpływem zwarć wewnątrz uzwojenia stojana. Wyniki analiz zostały przedstawione w sposób jasny i przejrzysty, z wykorzystaniem dobrze zaprojektowanych wykresów i tabel. Analizy przeprowadzono z dużą starannością, co uwiarygadnia uzyskane wyniki. Autor bardzo starannie przedstawił wszystkie kroki analizy, co umożliwia ich weryfikację i odtworzenie. Krytyczna ocena ograniczeń poszczególnych technik analizy sygnałów, takich jak ograniczenia transformacji falkowej w kontekście rozdzielczości czasowej i częstotliwościowej, świadczy o świadomości i doświadczeniu Autora jako badacza. Sposób przygotowania danych treningowych w rozprawie zasługuje na szczególną

pochwałę. Dane zostały zebrane systematycznie, obejmując różne scenariusze działania silnika. Przetwarzanie i czyszczenie potężnych zbiorów danych przeprowadzono zgodnie z najlepszymi praktykami, usuwając szumy i niekompletne rekordy. Autor zadbał również o zbalansowanie zbioru danych, aby uniknąć problemu niezrównoważonych klas, co uczyniło modele uczenia maszynowego bardziej stabilnymi i niezawodnymi. Dane zostały podzielone na zbiory treningowe, walidacyjne i testowe, co umożliwia rzetelną ocenę ich wydajności. Autor zastosował walidację krzyżową, co zwiększa wiarygodność prezentowanych wyników.

Ogólnie, układ pracy jest logiczny i spójny. Łatwo śledzi się tok myślenia autora. Styl języka jest klarowny i precyzyjny. Autor skutecznie wykorzystuje specjalistyczne terminologie i pojęcia, co świadczy o głębokim zrozumieniu tematu. W całej pracy nie zauważyłem żadnych błędów edycyjnych. Ogólnie rzecz biorąc, praca stanowi przemyślane i bardzo rzetelnie opracowane podejście do diagnostyki uzwojenia stojana silników indukcyjnych.

3. Metodologia badawcza i osiągnięcia pracy

Proponowane w pracy modele i metody zostały porównane z istniejącymi technikami diagnostycznymi, dzięki czemu możliwe było wykazanie ich wyższość pod względem dokładności i niezawodności. W rozprawie omówiono również potencjalne ograniczenia metodologii, takie jak złożoność obliczeniowa CNN i potrzeba dużych zbiorów danych do treningu, co świadczy o dojrzałości naukowej Autora. Mocną stroną badań jest ich niekwestionowana praktyczność w diagnostyce uzwojenia stojana silnika indukcyjnego i potencjalnie niewielki koszt instalacji podsystemu diagnostyki on-line opartego na proponowanej metodzie.

Prezentowane wyniki generalnie pokazują, że proponowany model w analizowanej klasie uszkodzeń osiąga zadowalającą precyzję, wysoką czułość i specyficzność, jednak można zauważyć, iż pomimo faktu, że dane treningowe zostały zebrane systematycznie i obejmowały różne przypadki, istnieje kilka ograniczeń, które mogą wpłynąć na generalizację przyjętego modelu. Przede wszystkim, zbiór danych mógłby być bardziej zróżnicowany, obejmując więcej przypadków uszkodzeń oraz różne typy silników indukcyjnych. Obecny zestaw danych może nie w pełni odzwierciedlać wszystkie możliwe scenariusze awarii, co może ograniczać zdolność modelu do rozpoznawania mniej typowych uszkodzeń w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Dla przykładu, w silnikach zasilanych wysokim napięciem pojawiają się mierzalne symptomy uszkodzeń zanim jeszcze dochodzi do wystąpienia zwarców zwojowych. Ponadto, model polowo-obwodowy zaproponowany w rozprawie odzwierciedla wiele istotnych aspektów zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w silniku indukcyjnym. Jednakże, jak każdy model, ma on swoje ograniczenia. Przede

wszystkim, model ten może nie w pełni uwzględniać wszystkie niuanse rzeczywistych warunków pracy, takie jak wpływ zmiennych warunków środowiskowych, starzenie się materiałów czy wpływ nieprzewidzianych sytuacji. Wyniki eksperymentalne przedstawione w pracy sugerują, że model jest wystarczająco dokładny do celów diagnostycznych, jednak dalsze badania mogłyby skupić się na weryfikacji modelu w bardziej zróżnicowanych warunkach. Dalsze badania powinny skupić się na rozszerzeniu zbioru danych treningowych oraz na weryfikacji modelu w bardziej zróżnicowanych warunkach pracy, aby jeszcze lepiej odzwierciedlał rzeczywiste uszkodzenia silników indukcyjnych. W pracy zastosowano także pełny, aczkolwiek bardzo kosztowny obliczeniowo model połowo-obwodowy określony w dziedzinie czasu. Powstaje wobec tego pytanie: „Czy możliwe jest wykorzystanie modelu analitycznego, wykorzystanie innej techniki obliczeniowej/oprogramowania lub sformułowanie modelu bardziej wydajnego obliczeniowo, np. modelu określonego w dziedzinie częstotliwości”? Powyższe uwagi nie mają za cel umniejszenia wkładu naukowego Autora, a zwrócenie uwagi na możliwe kierunki kontynuacji bardzo wartościowych, poznawczo i praktycznie, badań zawartych w pracy.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Konrada Górnego wnosi znaczący wkład do rozwoju metod diagnostyki silników indukcyjnych. Oryginalne, samodzielnie rozwiązanie problemu naukowego polegające na zastosowaniu modelu połowo-obwodowego oraz konwolucyjnych sieci neuronowych stanowią ważne osiągnięcia w zakresie poprawy niezawodności i efektywności metod diagnostycznych maszyn indukcyjnych. Badania te stanowią solidną podstawę dla dalszych prac w tej dziedzinie, z potencjalnymi zastosowaniami wykraczającymi poza silniki indukcyjne, obejmującymi inne typy maszyn elektrycznych. Wybrane wyniki zawarte w rozprawie zostały opublikowane na łamach kilku uznanych periodyków naukowych oraz konferencji, co świadczy o tym, że zostały one pozytywnie odebrane przez środowisko naukowe.

W kontekście powyższego uważam, że recenzowana rozprawa stanowi rozprawę doktorską spełniającą wymagania Art. 13 ust. 1 Ustawy o stopniach i tytule naukowym z dnia 31 grudnia 2014 roku Dz.U. z 2017 r. poz. 1789 i wnoszę o dopuszczenie autora, Pana mgr inż. Konrada Górnego do jej publicznej obrony.



2024 -08- 2 3