

Poznań, 24.08.2021

Dr hab. inż. Wojciech Pietrowski
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3a
61-138 Poznań
tel. 61 665 2396
e-mail: wojciech.pietrowski@put.poznan.pl

Ocena rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Skowrona „Diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych i synchronicznych z magnesami trwałymi przy wykorzystaniu sieci neuronowych z głębokim uczeniem”

1. Podstawa wykonania recenzji

Podstawą do opracowania recenzji rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Macieja Skowrona było pismo z dnia 28 czerwca 2021 roku Pana prof. dr hab. inż. Andrzeja Dziedzica, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej powołujące mnie na recenzenta tej rozprawy.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Skowrona „Diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych i synchronicznych z magnesami trwałymi przy wykorzystaniu sieci neuronowych z głębokim uczeniem”. Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Czesław T. Kowalski, natomiast promotorem pomocniczym jest dr hab. inż. Marcin Wolkiewicz, prof. nadzw. Przedłożona recenzja zawiera opinię rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Skowrona przygotowaną w odniesieniu do dyscypliny naukowej elektrotechnika, w dziedzinie nauk technicznych.

2. Charakterystyka ogólna rozprawy doktorskiej

Opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Skowrona pt.: „Diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych i synchronicznych z magnesami trwałymi przy wykorzystaniu sieci neuronowych z głębokim uczeniem” wydana w 2021 roku zawiera 169 stron, składa się z 9 rozdziałów oraz wykazu ważniejszych oznaczeń, bibliografii i załączników. Bibliografia zawiera 255 pozycje literaturowe, w tym 10 współautorskich publikacji naukowych Doktoranta. W załączniku 1. można znaleźć wzory jednostek bazowych do obliczeń wielkości względnych w modelu matematycznym silnika indukcyjnego. Załącznik 2. zawiera parametry znamionowe silników indukcyjnych klatkowych natomiast załącznik 3.

Ocena rozprawy doktorskiej mgr. inż. M. Skowrona „Diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych i synchronicznych z magnesami trwałymi przy wykorzystaniu sieci neuronowych z głębokim uczeniem”

Strona 1 z 7



zawiera parametry znamionowe silnika synchronicznego magnesami trwałymi, zastosowanych w badaniach eksperymentalnych.

Doktorant w swojej rozprawie podjął tematykę związaną z systemami diagnostyki maszyn elektrycznych a zatem podstawową dyscypliną, w której można ulokować rozprawę jest automatyka, robotyka i elektrotechnika. Ponadto w swoich badaniach uwzględnił najnowsze osiągnięcia z dyscypliny informatyka techniczna w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych związanych z metodami sztucznej inteligencji, a w szczególności z uczeniem maszynowym. Można zatem stwierdzić, że recenzowana rozprawa doktorska ma charakter interdyscyplinarny. Doktorant oprócz wspomnianych metod uczenia maszynowego wykorzystał wiedzę z zakresu metrologii i systemów pomiarowych.

Przedstawiony w rozprawie cel dotyczy analizy i oceny możliwości zastosowania sieci neuronowych z głębokim uczeniem do wczesnego wykrywania uszkodzeń stojana i wirnika w silnikach indukcyjnych i synchronicznych z magnesami trwałymi.

Tezę rozprawy sformułowano następująco: „Zastosowanie konwolucyjnej sieci neuronowej umożliwia detekcję uszkodzeń stojana i wirnika silników indukcyjnych oraz synchronicznych z magnesami trwałymi na bardzo wczesnym etapie przy wykorzystaniu bezpośredniej analizy sygnałów.”

W celu udowodnienia tej tezy Doktorant zrealizował następujące zadania naukowe:

- Opracowanie stanowiska laboratoryjnego przeznaczonego do badań diagnostycznych silników indukcyjnych oraz synchronicznych z magnesami trwałymi.
- Opracowanie systemów diagnostycznych z płytkimi i głębokimi sieciami neuronowymi do wykrywania uszkodzeń silników indukcyjnych oraz silników synchronicznych z magnesami trwałymi a następnie sprawdzenie ich skuteczności działania na stanowisku laboratoryjnym.
- Analizę i ocenę obecnie stosowanych metod wykrywania uszkodzeń maszyn elektrycznych w tym wybranych typów sieci neuronowych stosowanych w diagnostyce maszyn elektrycznych.
- Badania wpływu sygnału diagnostycznego na poprawność działania opracowanych systemów diagnostycznych.
- Badania wpływu zastosowanej struktury oraz metody uczenia sieci neuronowej na poprawność działania systemów diagnostycznych.

Postawiona w ten sposób teza oraz zadania naukowe stawiają rozprawę doktorską w głównym nurcie badań związanych z diagnostyką maszyn elektrycznych. Na szczególną uwagę zasługuje skoncentrowanie się na wykrywaniu uszkodzeń we wczesnym etapie ich pojawienia się. Poszukiwanie skutecznych metod wykrywania uszkodzeń maszyn

elektrycznych ma zarówno walor naukowy jak i praktyczny. Moim zdaniem przyjęty cel rozprawy jest aktualny i oceniam go pozytywnie. Zakres zadań naukowych zrealizowanych w ramach rozprawy jest obszerny i oceniam go pozytywnie. Postawioną przez Doktoranta tezę rozprawy, pomimo drobnej nieścisłości, oceniam pozytywnie. Ta drobna nieścisłość dotyczy braku określenia miejsca zastosowania sieci neuronowej.

3. Charakterystyka i ocena merytoryczna rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Skowrona liczy 9 rozdziałów, bibliografię i załączniki.

Rozdział pierwszy wprowadza do tematyki diagnostyki maszyn elektrycznych. Przedstawiono szeroki przegląd aktualnej literatury dotyczącej eksploatacji napędów elektrycznych. Zwrócono uwagę na rolę jaką pełni skuteczna diagnostyka w liniach produkcyjnych. Omówiono czynniki wpływające na pojawienie się uszkodzenia w maszynie elektrycznej oraz statystykę występowania uszkodzeń silników prądu przemiennego. Przedstawiono cele i metody diagnostyki eksploatacyjnej, w tym charakterystykę wybranych sygnałów diagnostycznych. Wymieniono i opisano metody analizy sygnałów diagnostycznych, zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości. W dalszej części wprowadzenia Doktorant zaprezentował ideę zastosowania sztucznych sieci neuronowych w systemie diagnostycznym. Opisał zarówno klasyczne struktury neuronowe jak również głębokie sieci neuronowe. Na podstawie przeglądu literaturowego Doktorant wskazał obszary zastosowania omawianych struktur sieci neuronowych. Przegląd ten został zrealizowany systematycznie i wyczerpująco. Rozdział pierwszy kończy opisanie celu i zakresu rozprawy oraz postawienie tezy naukowej.

Rozdział drugi zawiera charakterystykę uszkodzeń silników elektrycznych prądu przemiennego. W tym rozdziale Doktorant przedstawił:

- Podział uszkodzeń obwodu stojana i wirnika silników prądu przemiennego z wyszczególnieniem przyczyn powstania uszkodzenia, rodzaju uszkodzenia oraz pojawiających się skutków uszkodzenia.
- Podział uszkodzeń uzwojenia stojana silników prądu przemiennego: zwarcie doziemne, zwarcie międzyfazowe, zwarcie zezwojów, zwarcie zwojów oraz przerwa w obwodzie.
- Uszkodzenia wirników silników indukcyjnych klatkowych.
- Uszkodzenia wirników silników synchronicznych z magnesami trwałymi.

Wszystkie wymienione rodzaje uszkodzeń zostały opisane od strony zachodzących zjawisk elektromagnetycznych, cieplno-wentylacyjnych, wibroakustycznych. W podsumowaniu Doktorant stwierdził, że rozprzestrzenianie się uszkodzenia w maszynie elektrycznej jest bardzo dynamiczne. A zatem celowe jest opracowanie skutecznych metod jak najwcześniejszego ich wykrywania.

Rozdział trzeci Doktorant przeznaczył na opis modeli matematycznych silników indukcyjnych i synchronicznych z magnesami trwałymi z uwzględnieniem uszkodzeń stojana oraz wirnika. Celem stosowania symulacji komputerowych z zastosowaniem opracowanych modeli jest otrzymanie wzorców diagnostycznych. Doktorant wyróżnił i scharakteryzował trzy grupy modeli: modele polowe, modele polowo-obwodowe oraz modele obwodowe. Szczegółowo został opisany model obwodowy silnika indukcyjnego klatkowego z uwzględnieniem zwarć zwojowych w obwodzie stojana. Na podstawie opracowanego modelu zostały zrealizowane badania symulacyjne dla wybranych stanów pracy. Doktorant dokonał weryfikacji opracowanego modelu z pomiarami laboratoryjnymi. Obliczone przebiegi prądów fazowych różniły się mniej niż 8% w porównaniu do wyników pomiarowych. W dalszej części rozdziału Doktorant opisał model matematyczny silnika indukcyjnego z uszkodzonym wirnikiem, bez prezentacji wyników obliczeń opisanego modelu. Następnie opisany został model silnika synchronicznego z uwzględnieniem zwarć zwojowych w obwodzie stojana. Przedstawiono porównanie wyników obliczeń symulacyjnych z wynikami pomiarów na obiekcie rzeczywistym dla wybranych stanów pracy. Różnica amplitud przebiegów prądu fazowego wynosiła 6% w przypadku braku obciążenia, natomiast dla obciążenia znamionowego różnica wynosiła 1%. Rozdział trzeci kończy opis modelowania uszkodzeń magnesów trwałych w silnikach synchronicznych. W badaniach zastosowano dwuwymiarowy model polowy opracowany w oprogramowaniu Maxwell firmy Ansys. W badaniach wyznaczono przebieg siły elektromotorycznej indukującej się w uzwojeniu stojana dla uszkodzenia polegającego na usunięciu 20% powierzchni pojedynczego magnesu. Na podstawie porównania obliczonych oraz zmierzonych przebiegów SEM, Doktorant zauważył bardzo dobrą dokładność otrzymanych przebiegów z obliczeń symulacyjnych. W podsumowaniu rozdziału Doktorant stwierdził, że opracowane modele matematyczne mogą być stosowane podczas opracowywania i weryfikacji metod diagnostycznych.

W czwartym rozdziale Doktorant opisał analityczne metody detekcji uszkodzeń silników elektrycznych, w tym: detekcja zwarć zwojowych w uzwojeniu stojana silników indukcyjnych oraz synchronicznych, detekcja uszkodzeń prętów klatki wirnika oraz uzwojenia stojana silnika indukcyjnego, detekcja uszkodzenia magnesów trwałych silnika synchronicznego. Do wykrywania powyższych uszkodzeń Doktorant zastosował wyniki analizy widmowej przebiegów sygnałów diagnostycznych takich jak: prąd fazowy uzwojenia stojana oraz napięcie indukowane przez strumień osiowy. Wskazane zostały częstotliwości charakterystyczne w sygnale diagnostycznym, które pojawiają się po wystąpieniu uszkodzenia. W podsumowaniu Doktorant stwierdził, że pojawienie się częstotliwości charakterystycznych czyli symptomów uszkodzenia podlega klasyfikacji przez człon decyzyjny systemu diagnostycznego.

W piątym rozdziale Doktorant opisał struktury sztucznych sieci neuronowych, od tzw. klasycznych sieci, tj. wielowarstwowej sieci perceptronowej, samoorganizującej sieci typu Kohonena, do głębokich sieci neuronowych (struktura autoenkodera, LSTM, konwolucyjne

sieci neuronowe). Następnie opisany został proces trenowania sieci oraz metodę sprawdzenia jego poprawności.

Przedstawione w rozdziale 5 struktury sztucznych sieci neuronowych zostały zastosowane w diagnostyce uszkodzeń silników elektrycznych. Wyniki badań zostały opisane w rozdziale 6. W pierwszej części rozdziału opisana została detekcja uszkodzeń obwodu wirnika i stojana silnika indukcyjnego. W badaniach zastosowano następujące struktury sieci: wielowarstwowa sieć perceptronowa oraz samoorganizująca sieć Kohonena. Następnie przedstawiono detekcję uszkodzeń w silniku synchronicznym z zastosowaniem wielowarstwowej sieci perceptronowej oraz samoorganizującej sieci Kohonena. Dla wszystkich omawianych struktur sieci oraz silników elektrycznych zrealizowana została weryfikacja pomiarowa na stanowisku laboratoryjnym. W kolejnym etapie zbadano zastosowanie hybrydowych struktur sieci neuronowych w diagnostyce silników elektrycznych. Badania zrealizowano dla następujących uszkodzeń silnika indukcyjnego: zwarcie zwojowe uzwojenia stojana, uszkodzenie prętów klatki wirnika oraz uszkodzenie mieszane czyli wystąpienie różnych uszkodzeń jednocześnie. W podsumowaniu rozdziału Doktorant dokonał oceny badanych struktur sieci w detekcji uszkodzeń. Wskazał wady i zalety płynące z zastosowania przebadanych struktur sieci w diagnostyce silników elektrycznych.

W rozdziale 7 Doktorant przedstawił wyniki badań zastosowania głębokich sieci neuronowych w diagnostyce silników elektrycznych. We wstępie uzasadnił zastosowanie tego typu sieci. Następnie opisał kolejne etapy prac badawczych. W pierwszym etapie badań zastosował konwolucyjne sieci neuronowe w detekcji uszkodzeń uzwojenia stojana silnika indukcyjnego. W badaniach uwzględniono zwarcia zwojowe w zakresie od 0 do 5. zwartych zwojów w trzech fazach dla obciążenia silnika momentem od 0 do momentu znamionowego oraz regulacji częstotliwości napięcia zasilania od 20 Hz do 50 Hz. Wykorzystanym sygnałem diagnostycznym były przebiegi prądów fazowych uzwojenia stojana. Następnie Doktorant zbadał zastosowanie napięcia indukującego się w cewce przez strumień osiowy w silniku indukcyjnym z uszkodzoną klatką wirnika. W podsumowaniu tej części badań poddał analizie wpływ rodzaju sygnału diagnostycznego na skuteczność rozpoznawania uszkodzenia silnika indukcyjnego. W kolejnym etapie Doktorant zastosował konwolucyjne sieci neuronowe do detekcji uszkodzeń silnika synchronicznego z magnesami trwałymi. Najpierw zbadał ich zastosowanie do detekcji uszkodzeń uzwojenia stojana silnika pracującego w zamkniętej strukturze sterowania. Następnie zbadał zdolność sieci do rozpoznawania uszkodzeń magnesów trwałych. W ostatnim etapie badań Doktorant zbadał wpływ parametrów struktury sieci konwolucyjnej na skuteczność rozpoznawania uszkodzeń. Pod uwagę wzięte zostały m.in. liczba warstw konwolucyjnych, liczba warstw w pełni połączonych, liczba filtrów warstw konwolucyjnych, liczba neuronów, funkcja aktywacji. Na zakończenie rozdziału, w podsumowaniu, Doktorant stwierdza, że badane konwolucyjne sieci neuronowe skutecznie dokonują detekcji uszkodzenia oraz jego stopnia.

Rozdział 8 został poświęcony opisowi praktycznej realizacji opracowanych systemów detekcji uszkodzeń silników indukcyjnych i synchronicznych. Przedstawiona została metodyka badań oraz opis stanowiska laboratoryjnego. W dalszej części rozdziału opisana została aplikacja opracowana przez Doktoranta w środowiskach LabVIEW oraz Matlab. Zadaniem aplikacji było gromadzenie i przetwarzanie sygnałów pomiarowych a następnie detekcja i klasyfikacja uszkodzenia silnika.

Rozdział 9 stanowi podsumowanie rozprawy doktorskiej. Przedstawiono cele badań, zadania badawcze oraz wnioski i uwagi końcowe. Na podstawie wniosków w podsumowaniach wcześniejszych rozdziałów sformułowano sześć wniosków ogólnych. Zdaniem Doktoranta opisane badania powinny być kontynuowane w kierunku opracowania uniwersalnych i skalowalnych systemów diagnostycznych. Potwierdzono zrealizowanie celu i wszystkich punktów zakresu rozprawy.

Na zakończenie rozprawy, w załącznikach podano jednostki bazowe do obliczeń wielkości względnych, parametry znamionowe wykorzystanych silników indukcyjnych, parametry znamionowe wykorzystanego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi.

4. Uwagi do treści rozprawy doktorskiej

Opiniowana rozprawa doktorska liczy 169 stron i wypełni wyczerpuje temat zawarty w tytule. Struktura pracy jest spójna i właściwa. Redakcja i formatowanie tekstu jest bardzo dobre. Tekst rozprawy jest napisany w sposób zrozumiały. Błędów redakcyjnych i językowych jest niewiele i nie wpływają one na końcową pozytywną ocenę rozprawy.

Do opiniowanej rozprawy zgłaszam poniższe uwagi i proszę Doktoranta o ustosunkowanie się do nich podczas publicznej obrony.

1. W rozprawie zostały przedstawione wyniki obliczeń symulacyjnych na podstawie modelu obwodowego silnika indukcyjnego z uwzględnieniem uszkodzenia uzwojenia stojana oraz wyniki modelu polowego silnika synchronicznego z uwzględnieniem uszkodzenia magnesu. Czy otrzymane wyniki zostały wykorzystane w badaniach nad zastosowaniem sieci neuronowych do wykrywania uszkodzeń?
2. W ramach prac badawczych wyniki obliczeń symulacyjnych zostały porównane z wynikami pomiarów. Czy zawężenie porównania tylko do wartości amplitudy przebiegu jest wystarczające do oceny opracowanego modelu?
3. W rozprawie bardzo dużo miejsca poświęcono zastosowaniu głębokich sieci neuronowych do wykrywania uszkodzeń silników. Niestety zabrakło opisu metod i algorytmów uczenia głębokich sieci neuronowych.
4. W pracach badawczych zastosowano przebiegi sygnałów diagnostycznych z pomiarów na stanowisku laboratoryjnym. W jaki sposób można ocenić

otrzymane przebiegi z punktu widzenia metrologii? W szczególności: błędy pomiarów, niepewność pomiaru, statystyczna analiza pomiaru.

5. Opracowany przez Doktoranta system diagnostyczny jest bardzo interesujący. Jeżeli jest możliwość to proszę o demonstrację systemu, może być w formie pokazu slajdów lub filmu wideo.

5. Ważniejsze osiągnięcia rozprawy

Opiniowana rozprawa stanowi potwierdzenie rozwiązania zadania naukowego. Do ważniejszych osiągnięć Doktoranta można zaliczyć:

- Opracowanie modeli obwodowych i polowych a następnie wykonanie badań symulacyjnych silników z uwzględnieniem ich uszkodzeń.
- Opracowanie systemu pomiarowo-diagnostycznego silników indukcyjnych oraz synchronicznych z magnesami trwałymi.
- Wykonanie badań testowych opracowanego systemu dla wybranych rodzajów uszkodzeń.
- Przeprowadzenie analizy wykorzystania wybranych struktur i doboru parametrów sztucznych sieci neuronowych zastosowanych w systemie diagnostycznym.

6. Opinia końcowa

Podsumowując, uważam, że Pan mgr inż. Maciej Skowron w przedstawionej rozprawie doktorskiej rozwiązał samodzielnie postawione zadanie naukowe oraz wykazał się wiedzą i umiejętnościami wymaganymi do uzyskania stopnia naukowego w zakresie dyscypliny elektrotechnika, dziedziny nauk technicznych zgodnie z warunkami określonymi w art.13 ust.1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 21.06.2016 r., poz. 882).

Przedstawiona ocena osiągnięć naukowych mgr. inż. Macieja Skowrona w zakresie dyscypliny elektrotechnika, dziedziny nauk technicznych pozostaje taka sama do oceny osiągnięć w zakresie dyscypliny automatyka, elektroniki i elektrotechnika w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych.

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Macieja Skowrona spełnia obowiązujące wymagania ustawowe w związku z tym wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

24.08.2021 *W. Pietrowski*

Dr hab. inż. Wojciech Pietrowski

Ocena rozprawy doktorskiej mgr. inż. M. Skowrona „Diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych i synchronicznych z magnesami trwałymi przy wykorzystaniu sieci neuronowych z głębokim uczeniem”