

Zielona Góra, 1 grudnia 2024 r.

Prof. dr hab. inż. Robert Smoleński
Instytut Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki
Uniwersytet Zielonogórski

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Przemysława Pietrzaka pt.:

“Diagnostyka uszkodzeń uzwojeń stojana w układach napędowych z silnikami synchronicznymi o magnesach trwałych przy wykorzystaniu zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów i sztucznej inteligencji”

Recenzja została przygotowana na wniosek Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne (AEEiTK) Politechniki Wrocławskiej związany z uchwałą nr 7/1/RDND02/2024-2028 z dnia 19 września 2024 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne Panu mgr. inż. Przemysławowi Pietrzakowi.

Opracowanie recenzji zostało zlecone przez prof. dr. hab. inż. Andrzeja Dziedzica, Przewodniczącego Rady Dyscypliny AEEiTK Politechniki Wrocławskiej

1. Ocena tematyki poruszanej w rozprawie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi wynik prowadzonych przez Pana mgr. inż. Przemysława Pietrzaka badań naukowych, związanych z aktualną oraz istotną z aplikacyjnego punktu widzenia tematyką dotyczącą diagnostyki uszkodzeń uzwojeń stojana w układach napędowych z silnikami synchronicznymi o magnesach trwałych z wykorzystaniem zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów oraz sztucznej inteligencji.

Praca dotyczy znaczącej grupy silników elektrycznych, które pomimo zawirowań geopolitycznych i znacznych fluktuacji na rynku pierwiastków ziem rzadkich, zyskują na popularności, głównie ze względu na ich pożądane parametry użytkowe. Podejmowane zagadnienia badawcze z zakresu diagnostyki uszkodzeń są aktualne i istotne, szczególnie w obszarach wymagających ekstremalnych parametrów niezawodności. Jednak obecnie najbardziej nośne wydają się być

wykorzystywane w pracy algorytmy uczenia maszynowego jako aplikacje metod bazujących na sztucznej inteligencji. Należy zaznaczyć, że zastosowane w recenzowanej rozprawie rozwiązania nie są przejawem „mody naukowej” lecz zostały umotywowane zarówno aspektami poznawczymi jak i technicznymi. Analizy porównawcze obejmowały szeroki zakres aktualnych rozwiązań poprzedzonych dogłębną analizą aktualnego stanu wiedzy. Warty podkreślenia jest fakt, że Doktorant w swoich analizach jako istotny czynnik bierze pod uwagę możliwości aplikacyjne, które w ocenie recenzenta oprócz jakości naukowej stanowią dodatkową wartość, szczególnie ważną w przypadku nauk inżyniersko-technicznych.

Przedstawione powyżej uwarunkowania stanowiły motywację badań w zakresie diagnostyki uszkodzeń uzwojeń stojana w układach napędowych z silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi przy wykorzystaniu zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów oraz sztucznej inteligencji. W tym kontekście należy stwierdzić, że poruszana w rozprawie doktorskiej problematyka jest bardzo istotna, zarówno z kognitywnego jak i praktycznego punktu widzenia – temat rozprawy wpisuje się w aktualne wyzwania i badania prowadzone w obszarze napędów elektrycznych z silnikami synchronicznymi o magnesach trwałych zasilanymi z przekształtników energoelektronicznych. Problematyka naukowa, której dotyczy rozprawa, jest ściśle powiązana z bardzo dużym oraz istotnym gospodarczo obszarem potencjalnych zastosowań. Dotyczy to szczególnie aplikacji w dynamicznie rozwijających się rynkach automatyki i robotyki, elektromobilności, napędów przemysłowych o najwyższych wymaganiach niezawodności, np. w infrastrukturze krytycznej.

Podsumowując ten punkt należy uznać prowadzone przez Pana mgr. inż. Przemysława Pietrzaka badania w zaprezentowanej tematyce oraz w nakreślonym w rozprawie zakresie za jak najbardziej celowe. Doktorant zajmował się tą tematyką niezwykle intensywnie od kilku lat, o czym świadczą liczne współautorskie publikacje zamieszczone w wykazie literatury.

2. Ocena strony redakcyjnej

Do recenzji przedstawiona została praca spełniająca wymagania Art. 187 ust. 3 Ustawy, stanowiąca „zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych”. Recenzowana praca zawiera 332 strony, włączając kopie prac stanowiących zbiór powiązanych tematycznie artykułów naukowych. W pracy składającej się z 5 rozdziałów (111 stron), bibliografii (zawierającej 200 pozycji, wśród których 16 stanowią współautorskie publikacje Doktoranta) oraz 3 załączników, przedstawiono spójny i całościowy opis podejmowanego zagadnienia o logicznym układzie.

Praca posiada istotne elementy rozprawy naukowej: i) motywację, którą stanowi konieczność opracowania i analiz porównawczych metod wczesnej detekcji i klasyfikacji uszkodzeń uzwojeń stojana, silników synchronicznych z magnesami trwałymi, bazujących na zaawansowanych algorytmach przetwarzania sygnału oraz technikach sztucznej inteligencji., ii) cel rozprawy, iii) wyniki autorskich badań symulacyjnych i eksperymentalnych, iv) podsumowanie i wnioski oraz kierunki dalszych prac wynikające z przeprowadzonych badań.

Układ redakcyjny pracy nie budzi zastrzeżeń, chociaż jak w niemal każdym opracowaniu można znaleźć błędy edycyjne oraz drobne omyłki drukarskie, czy też sformułowania nieściśle pod względem merytorycznym.

3. Układ pracy i ocena merytoryczna

Głównym celem przedstawionej do recenzji pracy było opracowanie i analiza porównawcza metod wczesnej detekcji i klasyfikacji uszkodzeń uzwojeń stojana silników synchronicznych z magnesami trwałymi bazujących na zaawansowanych algorytmach przetwarzania sygnału oraz technikach sztucznej inteligencji. Chronologia recenzowanego zbioru opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych wskazuje na konsekwencję Doktoranta w dążeniu do realizacji założonego celu badawczego a prezentowane w kolejnych pracach wyniki potwierdzają Jego szybki rozwój naukowy. Autor zaprojektował i zrealizował układ testowy, który był źródłem wyników eksperymentalnych stanowiących dane treningowe dla algorytmów uczenia maszynowego. W realizacji prac badawczych wykazał się ponadto bardzo dobrą znajomością zagadnień związanych ze sterowaniem napędów elektrycznych zasilanych z przekształtników energoelektronicznych oraz zastosowaniem technik sztucznej inteligencji w diagnostyce maszyn elektrycznych. Imponujący, szczególnie w kontekście pracy doktorskiej, jest również przedstawiony zakres oraz sposób prezentacji wyników analizy aktualnego stanu wiedzy.

Należy stwierdzić, że wyznaczony cel rozprawy oraz realizowane w jej ramach zadania są istotne, zarówno ze względów poznawczych jak i aplikacyjnych. Wskazuje to na trafne rozpoznanie przez Autora problemu badawczego.

W pierwszym rozdziale pracy przedstawiono wprowadzenie obejmujące analizę aktualnego stanu wiedzy związanego z problematyką rozprawy, omówiono i sklasyfikowano uszkodzenia silników synchronicznych z magnesami trwałymi, opisano diagnostykę uszkodzeń uzwojeń stojanów silników

synchronicznych zarówno bazujących na analizie sygnałów diagnostycznych jak i technikach sztucznej inteligencji.

W rozdziale drugim zaprezentowano cel, tezę i zakres rozprawy doktorskiej.

Rozdział trzeci poświęcono metodyce realizowanych w ramach pracy badań eksperymentalnych. Opisano stanowisko pomiarowe składające się z napędu z silnikiem synchronicznym z magnesem trwałym zasilanym z przekształtnika energoelektronicznego i układu obciążenia napędu oraz systemu kontrolno-pomiarowego bazującego na zaawansowanych układach do szybkiego prototypowania NI PXI. Omówiono również metodykę symulowania zwarć międzyzwojowych w układzie eksperymentalnym.

Rozdział czwarty stanowi prezentację kluczowych osiągnięć naukowych rozprawy. Osiągnięcia zaprezentowano poprzez ogólny syntetyczny opis oraz relatywnie szczegółowe omówienie poszczególnych współautorskich prac Doktoranta wchodzących w skład zbioru opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych. Omówienie każdego artykułu podsumowano przedstawionymi w formie podpunktów kluczowymi osiągnięciami.

W rozdziale piątym przedstawiono podsumowanie oraz wnioski wynikające z przedstawionych wcześniej wyników badań oraz analiz porównawczych. Wskazano najważniejsze osiągnięcia oraz wady i ograniczenia opracowanych rozwiązań, wytyczono również kierunki dalszych badań naukowych Autora.

Podsumowując tę część, należy stwierdzić, że recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz ma charakter analityczno-symulacyjno-eksperymentalny. Autor wykazał się dobrą znajomością fizycznych podstaw elektrotechniki, projektowania, modelowania i analizy układów napędowych oraz umiejętnością analizy zjawisk związanych z występowaniem stanów awaryjnych, które mogą zostać wykorzystane jako źródło sygnałów diagnostycznych. W celu detekcji oraz klasyfikacji uszkodzeń Doktorant stosował zaawansowane algorytmy przetwarzania sygnałów również te wykorzystujące techniki sztucznej inteligencji. Recenzowana praca zawiera oryginalne treści oraz wartościowe wyniki implementacji rozwiązań informatycznych wykorzystujących wyniki badań eksperymentalnych. W ocenie recenzenta uzyskane wyniki będą miały duży potencjał aplikacyjny w wielu obszarach techniki. Ich wartość oraz sposób prezentacji potwierdzają bardzo dobre przygotowanie doktoranta do pracy naukowej.

4. Uwagi i komentarze

1. Czym według Autora jest ostatecznie klasyfikacja uszkodzeń? Autor napisał: „Przyjętą w ramach rozprawy klasyfikację podstawowych uszkodzeń UN z PMSM przedstawiono na rysunku 1.1.”, „Równie istotna jest klasyfikacja stopnia uszkodzenia celem zaplanowania działań naprawczych.” oraz „Możliwa jest wczesna detekcja i klasyfikacja stopnia uszkodzenia uzwojeń stojana silnika synchronicznego o magnesach trwałych przy wykorzystaniu zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów diagnostycznych oraz wybranych technik sztucznej inteligencji”. Czy klasyfikacja w recenzowanej pracy dotyczy zatem uszkodzeń przedstawionych na rysunku 1.1., czy też liczby zwartych zwojów od 1 do 5?
2. Jakie są najistotniejsze różnice w praktycznym zastosowaniu klasycznych algorytmów uczenia maszynowego takich jak KNN (K-Nearest Neighbors), NBC, (Naive Bayes Classifier) i SVM (Support Vector Machine) w klasyfikacji uszkodzeń silników indukcyjnych oraz synchronicznych z magnesami trwałymi?
3. Jednym z największych mankamentów pracy jest oparcie wyników na jednym silniku testowym. Autor napisał jednak: „Pomimo wielu podobieństw pomiędzy silnikami, zazwyczaj nie jest możliwe bezpośrednie przeniesienie systemów diagnostycznych z jednego silnika na drugi w przypadku, gdy ich parametry znacząco od siebie odbiegają.” Jakie badania uprawniają do takiego stwierdzenia?
4. Autor jako element motywacji do podjęcia prac badawczych przedstawił analizy częstości występowania poszczególnych typów uszkodzeń silników prądu przemiennego według raportów EPRI oraz EIC, które wskazują na istotny udział uszkodzeń stojana. Czy Doktorant posiada informację jaką część z tych uszkodzeń mogą stanowić zwarcia międzyzwojowe?
5. Autor napisał w pracy: „Modele CNN-1 oraz CNN-2 w swej strukturze miały tylko jedną warstwę konwolucyjną oraz pooling, zawierającą 16 filtrów w przypadku CNN-1 oraz 32 filtry w przypadku CNN-2, natomiast struktura CNN-3 posiadała dwie warstwy konwolucyjne (32 oraz 64 filtrów) oraz pooling. Model CNN-4 charakteryzował się najbardziej rozbudowaną strukturą i posiadał aż trzy warstwy konwolucyjne oraz trzy warstwy pooling”. Jaka była podstawa doboru struktur modeli wybranych do analiz porównawczych?
6. Bardzo cenna w opinii recenzenta jest implementacja opracowanego rozwiązania w tanim mikrokontrolerze (NUCLEO-H7A31IZI-Q). Autor w pracy napisał: „W przypadku testów off-

line (odpowiedź na wektory znajdujące się w zbiorze testowym), skuteczność klasyfikacji wyniosła 97.2%. W kolejnym kroku wytrenowany przy wykorzystaniu języka Python oraz frameworku Edge Learning Machine model został zaimplementowany (język C) w mikrokontrolerze, a opracowany system został zweryfikowany podczas testów on-line na stanowisku eksperymentalnym. (...). Osiągnięta skuteczność klasyfikacji zwarcia międzyzwojowego wyniosła 95.94%”. Co w opinii Doktoranta jest przyczyną zaobserwowanej różnicy w jakości klasyfikacji?

7. Czy w opinii Doktoranta, na podstawie wyników eksperymentalnych możliwe będzie opracowanie tzw. modeli behawioralnych (np. dla różnych mocy silników), które mogłyby zostać wykorzystane w technice Transfer Learning?
8. W publikacji A10 liczba obrazów treningowych wynosiła 600, natomiast w pracy A11 zbiór stanowiło 1080 obrazów, które zostały losowo podzielone na zbiór treningowy 756 obrazów oraz testowy 324 obrazów. W jaki sposób dobierano wielkość zbiorów obrazów treningowych?
9. Autor napisał: „Śluszne wydaje się również zaprojektowanie i wykonanie obudowy systemu odpornej na warunki środowiskowe, który następnie będzie mógł zostać zamontowany niezależnie pomiędzy źródłem zasilania a monitorowaną maszyną.” Czy w opinii Doktoranta istnieje możliwość zintegrowania takiego systemu z układem kontrolno-pomiarowym przekształtnika?

5. Ocena rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Przemysława Pietrzaka pt.: “Diagnostyka uszkodzeń uzwojeń stojana w układach napędowych z silnikami synchronicznymi o magnesach trwałych przy wykorzystaniu zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów i sztucznej inteligencji”, a w szczególności zaproponowane w niej oryginalne rozwiązania, uzupełniające niezwykle bogatą literaturę przedmiotu przedstawioną przez Autora w ramach analizy aktualnego stanu wiedzy, wskazują na istnienie problemów badawczych związanych z zastosowaniem zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów i sztucznej inteligencji w diagnostyce uszkodzeń uzwojeń stojana w układach napędowych z silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi. Zaprezentowane wyniki testów eksperymentalnych, w stanach symulujących rzeczywiste przypadki zwarć międzyzwojowych, wskazują na ich znaczny potencjał aplikacyjny w różnych, dynamicznie rozwijających się obszarach gospodarki. Na podkreślenie zasługuje rzetelny opis wad i ograniczeń opracowanych rozwiązań wskazujących na uczciwość i dojrzałość naukową Doktoranta.

Przedstawione przez Autora wyniki badań wskazują, że główne osiągnięcia poznawcze i aplikacyjne to:

- szczegółowa analiza aktualnie stosowanych metod diagnostyki uszkodzeń uzwojeń stojanów silników synchronicznych z magnesami trwałymi bazujących na analizie sygnałów diagnostycznych oraz na technikach sztucznej inteligencji ze szczególnym naciskiem na klasyczne algorytmy uczenia maszynowego oraz sztuczne sieci neuronowe o strukturze klasycznej i głębokiej,
- projekt oraz realizacja stanowiska laboratoryjnego umożliwiającego badania w zakresie diagnostyki zwarć międzyzwojowych silników synchronicznych o magnesach trwałych,
- opracowanie i eksperymentalna weryfikacja metod ekstrakcji wczesnych symptomów uszkodzeń uzwojeń stojana przy wykorzystaniu klasycznych algorytmów uczenia maszynowego oraz sztucznych sieci neuronowych o strukturze klasycznej oraz głębokiej (sieci konwolucyjne),
- uzyskanie wyników szczegółowej analizy porównawczej kluczowych parametrów treningu detektorów oraz klasyfikatorów uszkodzeń uzwojeń stojana PMSM na ich skuteczność oraz dopasowanie,

- przeprowadzenie analizy wpływu obrazów wejściowych będących wynikiem przetwarzania sygnałów diagnostycznych na jakość dopasowania klasyfikatorów uszkodzeń uzwojeń stojana bazujących na konwolucyjnych sieciach neuronowych,
- opracowanie hybrydowych metod detekcji oraz klasyfikacji uszkodzeń uzwojeń stojana wykorzystujących zaawansowane algorytmy przetwarzania sygnałów z technikami sztucznej inteligencji oraz eksperymentalna weryfikacja opracowanej koncepcji systemu diagnostycznego,
- aplikacja opracowanej koncepcji w postaci prototypu bazującego na niskobudżetowym mikrokontrolerze z rdzeniem ARM Cortex-M i układzie pomiaru prądów fazowych oraz niskopoziomowa implementacja programu pozwalającego na akwizycję sygnałów diagnostycznych, ich przetwarzanie oraz automatyczne wnioskowanie o stanie uzwojenia.

Należy stwierdzić, że zaprezentowane w rozprawie wyniki badań potwierdzone publikacjami w recenzowanych czasopismach, stanowiących zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, dowodzą, że osiągnięto założony cel pracy. Uzyskane wyniki stanowią istotny i samodzielny wkład Doktoranta w rozwój wiedzy z obszaru napędów elektrycznych z przekształtnikami energoelektronicznymi, w zakresie diagnostyki uszkodzeń uzwojeń stojana w układach napędowych z silnikami synchronicznymi o magnesach trwałych przy wykorzystaniu zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów i sztucznej inteligencji. Autor w rozprawie przedstawił wyniki kompleksowych badań teoretycznych oraz eksperymentalnych, wykazał się umiejętnością formułowania i rozwiązywania aktualnych i skomplikowanych problemów naukowych. Uzyskane wyniki mają istotne znaczenie zarówno poznawcze jak i aplikacyjne, mogą z powodzeniem zostać wykorzystane w dalszych pracach badawczych.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska wskazuje na rozległą wiedzę Autora, dotyczącą diagnostyki uszkodzeń uzwojeń stojana w układach napędowych z silnikami synchronicznymi o magnesach trwałych przy wykorzystaniu zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów i sztucznej inteligencji, a także na umiejętność projektowania i implementacji rozwiązań, specyficznych dla przedmiotowego obszaru wiedzy. Przegląd danych literaturowych, wykonany na potrzeby pracy, również wskazuje na szeroki zakres wiedzy Autora, a przytoczone materiały są zgodne z tematyką rozprawy. Zaprezentowane oryginalne wyniki eksperymentalnych badań porównawczych potwierdzają adekwatność przyjętych modeli oraz poprawność przeprowadzonych analiz. Uzyskane wyniki dowodzą, że zrealizowano założony cel rozprawy, którym było oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Stwierdzam zatem, że rozprawa doktorska mgr. inż. Przemysława Pietrzaka pt.: “Diagnostyka uszkodzeń uzwojeń stojana w układach napędowych z silnikami synchronicznymi o magnesach trwałych przy wykorzystaniu zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów i sztucznej inteligencji” spełnia wymagania odnośnie do stopnia naukowego doktora określone w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dziennik Ustaw z 2023 roku, poz. 742 ze zm.) i wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Pawła Derkacza do dalszych etapów przewodu doktorskiego w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Ponadto, w kontekście wymagań określonych w Uchwale nr 221/09/RDN02/2021-2024 Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika z dnia 27 września 2021 r. w sprawie zaopiniowania Zasad wyróżniania rozpraw doktorskich w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika składam wnioski o wyróżnienie recenzowanej rozprawy, którą w mojej opinii cechuje wysoki poziom naukowy, oryginalności metod badawczych oraz wyróżniający dodatkowy dorobek naukowy doktoranta. W tym zakresie na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że Doktorant jest współautorem publikacji w prestiżowym czasopiśmie *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, bezpośrednio związanej z tematyką rozprawy, w której jest tzw. pierwszym autorem. Indeks Hirscha Doktoranta w dniu opracowania recenzji wynosił 8 według bazy Web of Science a wskaźniki cytowań dla prac stanowiących recenzowany zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych są bardzo wysokie, co potwierdza ich wysoką jakość naukową oraz znaczenie dla rozwoju dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.