

Poznań, 27.11.2024

Dr hab. inż. Wojciech Pietrowski  
Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej  
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki  
Politechnika Poznańska  
ul. Piotrowo 3A  
60-965 Poznań  
tel. 61 665 2396  
email: wojciech.pietrowski@put.poznan.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra 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”**

#### I. Podstawa wykonania recenzji

Podstawą do opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgra inż. Przemysława Pietrzaka jest uchwała nr 7/1/RDND02/2024-2028 Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej z dnia 19.09.2024 w sprawie wyznaczenia mnie na recenzenta tej rozprawy.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgra 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”. Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Marcin Wolkiewicz, prof. uczelni.

#### II. Charakterystyka ogólna rozprawy doktorskiej

Opiniowana rozprawa doktorska mgra inż. Przemysława Pietrzaka składa się z cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych pod wspólnym tytułem „Diagnostyka uszkodzeń uzwojeń stojana w układach napędowych z silnikami synchronicznymi o magnesach

---

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra 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”



trwałych przy wykorzystaniu zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów i sztucznej inteligencji” została wydana w 2024 roku. Zawiera omówienie osiągnięć naukowych opublikowanych w 12 artykułach. Ponadto w rozprawie zamieszczono opis 6 prac naukowych Doktoranta, które nie wchodzą do cyklu publikacji jednak zostały zamieszczone ze względu na przedstawianą tematykę diagnostyki silników elektrycznych prądu przemiennego. Rozprawa doktorska zawiera 322 strony, składa się z 7 rozdziałów oraz wykazu wybranych oznaczeń i skrótów.

Doktorant w swojej rozprawie podjął tematykę związaną z wykrywaniem zwarć zwojowych uzwojenia stojana silnika synchronicznego o magnesach trwałych a zatem podstawową dyscypliną, w której można ulokować rozprawę jest automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Przedstawiony w rozprawie cel dotyczy zastosowania metod przetwarzania sygnałów oraz uczenia maszynowego w diagnostyce silnika synchronicznego o magnesach trwałych z uwzględnieniem zwarć zwojowych w uzwojeniu stojana. Doktorant sformułował następujący cel rozprawy: „Celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest opracowanie i analiza porównawcza metod wczesnej detekcji i klasyfikacji uszkodzeń uzwojeń stojana silników synchronicznych o magnesach trwałych bazujących na zaawansowanych algorytmach przetwarzania sygnałów oraz sztucznej inteligencji.”. Natomiast tezę rozprawy Doktorant sformułował następująco: „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”.

W ramach zrealizowanych badań naukowych opracowano stanowisko laboratoryjne składające się m.in. z silnika synchronicznego, w którym możliwe jest zrealizowanie w sposób kontrolowany zwarć zwojowych uzwojenia stojana. Następnie wykonano serię pomiarów przebiegu prądu stojana dla wybranej liczby zwartych zwojów oraz wybranych wartości momentu obciążenia. W ostatnim etapie badań zastosowano metody przetwarzania sygnału oraz sztucznej inteligencji do wykrywania i klasyfikacji zwarć zwojowych w badanym silniku.

W celu osiągnięcia wymienionego celu rozprawy oraz udowodnienia postawionej tezy Doktorant zrealizował następujące zadania naukowe:

- Szczegółowy przegląd literaturowy w zakresie diagnostyki elektrycznych układów napędowych ze szczególnym uwzględnieniem rodzaju zastosowanego silnika elektrycznego.

- Zaprojektowanie i zbudowanie stanowiska laboratoryjnego do rejestracji przebiegów prądów silnika synchronicznego z magnesami trwałymi.
- Akwizycja i archiwizacja przebiegów prądów silnika synchronicznego dla wybranych stanów pracy.
- Porównanie wybranych metod ekstrakcji cech uszkodzenia w przebiegach prądów silnika synchronicznego.
- Porównanie wybranych metod sztucznej inteligencji w procesie wnioskowania o stanie technicznym silnika synchronicznego.
- Zbadanie wpływu parametrów modeli klasyfikatorów uszkodzeń na wyniki klasyfikacji uszkodzeń silnika synchronicznego.
- Analiza zastosowania metod uczenia maszynowego, głębokich sieci neuronowych w diagnostyce silnika synchronicznego.
- Opracowanie i realizacja systemu diagnostycznego wykorzystującego zarówno metody przetwarzania sygnału jak również metody sztucznej inteligencji.
- Opracowanie i realizacja projektu systemu do monitorowania i diagnostyki uzwojenia stojana silnika synchronicznego wykorzystującego mikrokontroler z rdzeniem ARM Cortex-M.
- Opracowanie i analiza otrzymanych wyników badań laboratoryjnych.

Zrealizowane przez Doktoranta badania naukowe opisane w rozprawie znajdują się pośród badań realizowanych w wielu ośrodkach naukowych na całym świecie. Na uwagę zasługuje bardzo szczegółowe opisanie aktualnego stanu wiedzy na podstawie bardzo szerokiego, liczącego 200 pozycji, przeglądu literaturowego. Moim zdaniem przyjęty cel rozprawy oraz przedstawione zadania naukowe są aktualne i wszystkie oceniam pozytywnie.

### III. Charakterystyka i ocena merytoryczna rozprawy doktorskiej

Przedstawiona rozprawa naukowa jest zbiorem powiązanych tematycznie dwunastu artykułów naukowych oznaczonych od [A1] do [A12].

[A1] P. Pietrzak, M. Wolkiewicz, "Comparison of Selected Methods for the Stator Winding Condition Monitoring of a PMSM Using the Stator Phase Currents," *Energies* (Basel), vol. 14, no. 6, p. 1630, 2021, doi: 10.3390/en14061630.

---

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra 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”

- [A2] P. Pietrzak, M. Wolkiewicz, "Stator Winding Fault Detection of Permanent Magnet Synchronous Motors Based on the Short-Time Fourier Transform," *Power Electronics and Drives*, vol. 7, no. 1, pp. 112–133, 2022, doi: 10.2478/pead-2022-0009.
- [A3] P. Pietrzak, M. Wolkiewicz, "Stator winding fault detection of permanent magnet synchronous motors based on the bispectrum analysis," *Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences. Technical Sciences*, vol. 7, no. 2, 2022, doi: 10.24425/bpasts.2022.140556.
- [A4] P. Pietrzak, M. Wolkiewicz, "Stator Interturn Short-Circuits Detection in the PMSM Drive by Using Current Symmetrical Components and Selected Machine Learning Algorithms," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 993, Springer, 2023, pp. 421–434. doi: 10.1007/978-3-031-24837-5\_32.
- [A5] P. Pietrzak, M. Wolkiewicz, "Machine Learning-Based Stator Current Data-Driven PMSM Stator Winding Fault Diagnosis," *Sensors*, vol. 22, no. 24, p. 9668, 2022, doi: 10.3390/s22249668.
- [A6] P. Pietrzak, M. Wolkiewicz, "Zastosowanie krótkoczasowej transformaty Fouriera oraz sztucznej inteligencji do wykrywania uszkodzeń uzwojeń stojana silnika synchronicznego o magnesach trwałych," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 1, no. 4, pp. 21–31, 2023, doi: 10.15199/48.2023.04.05.
- [A7] P. Pietrzak, M. Wolkiewicz, "Diagnostyka zwarć międzyzwojowych uzwojenia stojana PMSM przy zastosowaniu analizy STFT składowych symetrycznych prądów stojana oraz uczenia maszynowego," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 1, no. 3, pp. 3–10, 2023, doi: 10.15199/48.2023.03.01.
- [A8] P. Pietrzak, M. Wolkiewicz, "Fault Diagnosis of PMSM Stator Winding Based on Continuous Wavelet Transform Analysis of Stator Phase Current Signal and Selected Artificial Intelligence Techniques," *Electronics (Basel)*, vol. 12, no. 7, p. 1543, 2023, doi: 10.3390/electronics12071543.
- [A9] P. Pietrzak, M. Wolkiewicz, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Permanent Magnet Synchronous Motor Stator Winding Using the Continuous Wavelet Transform and Machine Learning," *Power Electronics and Drives*, vol. 9, no. 1, pp. 106–121, 2024, doi: 10.2478/pead-2024-0007.
- [A10] P. Pietrzak, M. Wolkiewicz, T. Orłowska-Kowalska, "PMSM Stator Winding Fault Detection and Classification Based on Bispectrum Analysis and Convolutional Neural Network," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 1–11, 2022, doi: 10.1109/TIE.2022.3189076.
- [A11] P. Pietrzak, M. Wolkiewicz, "Application of continuous wavelet transform and convolutional neural networks in fault diagnosis of PMSM stator windings," *Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences. Technical Sciences*, 2024, doi: 10.24425/bpasts.2024.150202.

[A12] P. Pietrzak, M. Wolkiewicz, J. Kotarski, "Low-cost microcontroller-based system for condition monitoring of the permanent magnet synchronous motor stator windings", *Electronics (Basel)*, vol. 13, no. 15, p. 2975, 2024, doi: 10.3390/electronics13152975.

Realizację prac badawczych zrealizowano w następujących etapach:

Etap 1: Ekstrakcja symptomów uszkodzeń.

Pierwszy etap badań dotyczył ekstrakcji symptomów uszkodzeń uzwojeń stojana w silnikach PMSM na bardzo wczesnym etapie rozwoju uszkodzenia. Szczególną uwagę zwrócono na zwarcia międzyzwojowe, analizując sygnały prądów fazowych stojana oraz ich przekształcenia, obwiednie i moduł wektora przestrzennego.

W pracy [A1] porównano metody FFT i DWT w celu analizy składowych częstotliwościowych. Stwierdzono, że zwarcie powoduje wzrost amplitudy składowej 3fs w widmie prądu fazowego oraz składowej 2fs w widmie obwiedni prądu. Analiza DWT nie wykazała istotnej przewagi nad klasyczną FFT.

W [A2] rozszerzono badania o analizę STFT, co pozwoliło na śledzenie dynamiki uszkodzeń w czasie. Największe zmiany wykazano w składowej 2fs na spektrogramie modułu wektora przestrzennego. Z kolei w [A3] zastosowano analizę bispectrum, która ujawniła dodatkowe wskaźniki uszkodzeń (np. punkt 0,2fs w bispectrum modułu wektora przestrzennego), choć kosztem większych wymagań obliczeniowych.

Etap 2: Automatyzacja detekcji i klasyfikacji uszkodzeń.

Drugi etap badań skoncentrowano na opracowaniu metod automatycznej detekcji i klasyfikacji uszkodzeń, wykorzystując techniki uczenia maszynowego (ML). W [A4]-[A5] zastosowano algorytmy KNN, SVM, NB i MLP w połączeniu z analizą FFT i STFT składowych symetrycznych prądów fazowych. Modele KNN i SVM osiągnęły najwyższą skuteczność (powyżej 95%), z przewagą KNN ze względu na prostotę implementacji.

W pracach [A6]-[A7] rozwinięto hybrydowe podejścia, łączące analizę STFT z lokalizacją uszkodzeń w uzwojeniach PMSM. Wyniki badań wykazały, że metoda łącząca STFT składowych symetrycznych i KNN osiąga skuteczność przekraczającą 98%. Rozszerzono także badania o zastosowanie transformaty falkowej (CWT), co umożliwiło skuteczną ekstrakcję symptomów uszkodzeń w szerokim zakresie warunków pracy silnika.

Prace [A8] i [A9] koncentrują się na wykorzystaniu transformaty falkowej (CWT) jako narzędzia do analizy czasowo-częstotliwościowej sygnałów diagnostycznych, mającej na celu

ekstrakcję symptomów zwarć międzyzwojowych w uzwojeniach stojana PMSM. Ich szczegółowe opisy przedstawiają nowe podejścia i ich skuteczność w kontekście automatycznej detekcji uszkodzeń. Stwierdzono, że zastosowanie CWT w diagnostyce uszkodzeń uzwojeń stojana PMSM jest innowacyjnym i skutecznym podejściem. Łącząc zalety analizy czasowo-częstotliwościowej z modelami uczenia maszynowego, udało się osiągnąć bardzo wysoką skuteczność klasyfikacji, co czyni te metody atrakcyjnymi zarówno w zastosowaniach badawczych, jak i przemysłowych.

Etap 3: Zastosowanie głębokich sieci neuronowych.

W pracach [A10]-[A11] zaproponowano hybrydowe podejście, łącząc przetwarzanie sygnałów (CWT, bispectrum) z głębokimi sieciami neuronowymi (CNN). Wyniki eksperymentów wykazały, że metoda ta osiąga blisko 99% skuteczności, umożliwiając monitorowanie stanu układu w czasie rzeczywistym.

Etap 4: Zwiększenie potencjału wdrożeniowego.

Ostatni etap badań, opisany w [A12], skupiał się na opracowaniu niskokosztowego systemu diagnostyki, wykorzystującego mikrokontrolery z rdzeniem ARM Cortex-M. Rozwiązanie to zintegrowało prosty układ pomiarowy z algorytmem KNN, co pozwoliło na znaczną redukcję kosztów i osiągnięcie skuteczności detekcji powyżej 95%.

Opisane osiągnięcia naukowe wnoszą oryginalne rozwiązania dotyczące wczesnej detekcji i klasyfikacji stopnia uszkodzeń uzwojeń stojana silników synchronicznych z magnesami trwałymi (PMSM) w układach napędowych zasilanych z przemiennika częstotliwości. Na podstawie przeglądu literatury zidentyfikowano obszary wymagające dalszych badań, szczególnie w zakresie wczesnych uszkodzeń uzwojeń stojana.

Podsumowując można stwierdzić, że recenzowana rozprawa prezentuje nowatorskie metody diagnostyczne, które umożliwiają wczesne wykrywanie uszkodzeń uzwojeń stojana PMSM, zarówno za pomocą klasycznych algorytmów ML, jak i nowoczesnych technik głębokiego uczenia. Opracowane podejścia charakteryzują się wysoką skutecznością, szerokim zakresem zastosowań oraz dużym potencjałem wdrożeniowym.

#### IV. Uwagi do treści rozprawy doktorskiej

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.

W trakcie czytania opiniowanej rozprawy nasunęły mi się następujące pytania i proszę Doktoranta o ustosunkowanie się do nich:

1. W jaki sposób zdefiniowano pojęcie „wczesnej diagnostyki” oraz „wczesnego stadium uszkodzenia” w kontekście omawianych badań diagnostyki silników synchronicznych? Jakie znaczenie ma wczesna detekcja uszkodzeń uzwojeń stojana silników synchronicznych dla ich niezawodności i wydajności operacyjnej?
2. Jakie były wyniki porównania rezystancji obwodu zwierającego z rezystancją zwartych zwojów uzwojenia stojana silnika synchronicznego? W jaki sposób te parametry wpływają na skuteczność diagnostyki oraz na interpretację wyników pomiarów w kontekście diagnostyki wczesnych uszkodzeń uzwojeń stojana?
3. Jakie zostały zastosowane wartości parametrów rejestracji sygnału diagnostycznego dla silników synchronicznych, takie jak czas rejestracji, częstotliwość próbkowania oraz długość okna analizy? W jaki sposób te parametry wpływają na dokładność i efektywność wykrywania uszkodzeń w uzwojeniu stojana silnika synchronicznego?
4. W jaki sposób przeprowadzono pomiar momentu obrotowego oraz prędkości obrotowej silnika synchronicznego w badaniach eksperymentalnych? Jakie znaczenie mają te pomiary w kontekście diagnostyki stanu technicznego silnika synchronicznego oraz detekcji uszkodzeń w jego uzwojeniu stojana?
5. Jakie kryteria zostały uwzględnione przy wyborze odpowiedniej funkcji falki do analizy sygnałów diagnostycznych w silnikach synchronicznych? Jakie cechy sygnału diagnostycznego, związane z uszkodzeniami uzwojeń stojana, decydowały o doborze falki i jak ten wybór wpływa na jakość detekcji wczesnych symptomów uszkodzeń?
6. Biorąc pod uwagę, że obiektem badań są silniki synchroniczne z magnesami trwałymi, w jaki sposób opracowane metody diagnostyczne mogą być zastosowane w elektrycznych układach napędowych z innymi typami silników synchronicznych? Jakie wyzwania mogą wystąpić przy implementacji tych metod w różnych rodzajach silników synchronicznych, takich jak silniki reluktancyjne lub inne rodzaje silników elektrycznych, i jak można je przezwyciężyć?

#### V. Ważniejsze osiągnięcia rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska stanowi udowodnienie postawionych tez oraz rozwiązania zadań naukowych. Przedstawiono istotne osiągnięcia w dziedzinie diagnostyki uszkodzeń silników synchronicznych z magnesami trwałymi (PMSM), które wnoszą znaczący wkład w rozwój nowych technik w tej dziedzinie. Do kluczowych zadań zrealizowanych w ramach pracy należą:

1. Analiza stanu wiedzy i istniejących metod diagnostycznych:
  - Przeprowadzenie kompleksowego przeglądu literatury dotyczącego metod diagnostyki uszkodzeń uzwojeń stojana PMSM.
  - Dokonanie szczegółowej oceny metod diagnostycznych opartych na analizie sygnałów oraz technikach sztucznej inteligencji, w tym klasycznych algorytmach uczenia maszynowego i sieciach neuronowych.
2. Opracowanie infrastruktury badawczej:
  - Opracowanie projektu i realizacja budowy stanowiska laboratoryjnego.
  - Opracowanie oprogramowania umożliwiającego prowadzenie badań diagnostycznych silników synchronicznych o magnesach trwałych.
3. Opracowanie i weryfikacja metod diagnostycznych:
  - Opracowanie metody ekstrakcji symptomów uszkodzeń uzwojeń stojana PMSM przy użyciu zaawansowanych algorytmów przetwarzania sygnału.
  - Eksperymentalna weryfikacja klasycznych algorytmów uczenia maszynowego (np. KNN, SVM, MLP) oraz sztucznych sieci neuronowych do automatycznego wnioskowania o stanie uzwojeń.
  - Opracowanie hybrydowej metody łączącej przetwarzanie sygnału i głębokich sieci neuronowych (CNN) do diagnostyki silników synchronicznych.
4. Analiza parametrów diagnostycznych:
  - Przeprowadzenie szczegółowych badań nad wpływem parametrów treningu i struktury klasyfikatorów na ich dopasowanie oraz skuteczność.
  - Zbadanie wpływu formatu danych wejściowego przetwarzanych sygnałów diagnostycznych na efektywność CNN.
5. Rozwój systemów wdrożeniowych:
  - Opracowanie prototypu niskokosztowego systemu diagnostyki, opartego na mikrokontrolerze ARM Cortex-M oraz algorytmach ML.



- o Implementacja programu do akwizycji, przetwarzania sygnałów oraz automatycznego wnioskowania o stanie uzwojeń.

## VI. Opinia końcowa

Podsumowując, uważam, że Pan mgr inż. Przemysław Pietrzak udowodnił postawione tezy rozprawy doktorskiej, rozwiązał wymienione zadania naukowe, opisał w sposób wystarczający uzyskane wyniki badań naukowych oraz wykazał się wiedzą i umiejętnościami wymaganymi do uzyskania stopnia naukowego doktora.

Moim zdaniem rozprawa doktorska Pana mgra 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 obowiązujące wymagania ustawowe w zakresie dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne w dziedzinie nauk technicznych 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 wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgra inż. Przemysława Pietrzaka oraz dopuszczenie jej do publicznej obrony.



---

Dr hab. inż. Wojciech Pietrowski