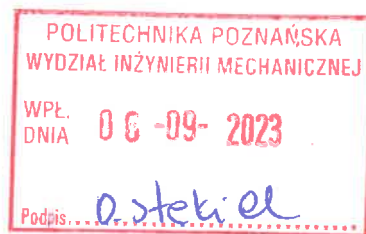


Dr hab. inż. Iwona Komorska, prof. UTH Radom  
Katedra Mechaniki Stosowanej i Mechatroniki  
Wydział Mechaniczny  
Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny  
Ul. Malczewskiego 29  
26-600 Radom



Radom, 30 sierpnia 2023 r.

### RECENZJA rozprawy doktorskiej

**mgr inż. Mateusza Wróbla pt. *Metodyka testowania odbiorczego asynchronicznych silników elektrycznych, w dyscyplinie INŻYNIERIA MECHANICZNA,***  
sporządzona na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki  
Poznańskiej z dnia 3 lipca 2023 r.

Promotor pracy doktorskiej:  
dr hab. inż. Roman Barczewski

#### I. Ogólna charakterystyka pracy

Recenzowana praca doktorska mgr inż. Mateusza Wróbla pt.: *Metodyka testowania odbiorczego asynchronicznych silników elektrycznych* została zredagowana na 171 stronach. Praca zawiera 12 tabel oraz 124 rysunki, wymagane streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wykaz ważniejszych oznaczeń i akronimów. Większość wyników badań została umieszczona w pięciu załącznikach do pracy, co jest uzasadnione zwiększeniem czytelności pracy. Autor cytuje 191 publikacji bezpośrednio związanych z analizą doniesień literaturowych dotyczących wykorzystania różnych metod testowania i diagnozowania uszkodzeń maszyn wirujących, a w szczególności maszyn elektrycznych.

Rozprawa zawiera 6 rozdziałów. W rozdziale 1 Doktorant przybliży zagadnienia testowania odbiorczego i diagnostyki eksploatacyjnej silników asynchronicznych ASE, a także formułuje problem badawczy oraz definiuje cel i zakres pracy. W rozdziale 2 przedstawione są najczęstsze wady produkcyjne i uszkodzenia eksploatacyjne oraz metody diagnozowania i testowania silników asynchronicznych. Rozdział 3 zawiera propozycję metodyki testowania ASE oraz wpływ warunków prowadzenia testów na uzyskanie informacji diagnostycznych, a więc lokalizacji przetworników pomiarowych, sposobu montażu/posadowienia obiektu badań, sposobu zasilania silnika w trakcie testów, wpływu obciążenia testowego. Rozdział 4, to przedstawienie wybranych metod przetwarzania i analizy sygnałów hałasu, drgań i pola magnetycznego. W rozdziale 5 Doktorant weryfikuje opracowaną metodykę detekcji wad produkcyjnych ASE na silniku badawczym GUNT oraz czterech silnikach BESEL produkowanych seryjnie. W rozdziale 6 Doktorant dokonuje podsumowania otrzymanych wyników i formułuje wnioski końcowe oraz przesłanki do dalszych badań. Dodatkowo wyniki badań zawarte są w pięciu załącznikach zawierających wykresy i zestawienia tabelaryczne.

Praca doktorska została napisana starannie, używając właściwego języka technicznego odpowiedniego dla opisu wielu analizowanych procesów, zjawisk i technologii. Dodatkowo, praca jest bogato uzupełniona czytelnymi tabelami oraz odpowiednio dobranymi ilustracjami graficznymi.

## II. Ocena merytoryczna pracy

Doktorant nie sformułował wyraźnie tezy rozprawy doktorskiej, chociaż teza ta wydaje się być czytelna przy przedstawianiu motywacji podjęcia tematu. Doktorant twierdzi, że stosowana obecnie parametryzacja drgań i hałasu, bazująca na normie (np. PN-EN IEC 60034-14, ISO 20958 lub PN-73E-06020) nie umożliwia detekcji wad produkcyjnych asynchronicznych silników elektrycznych ASE. Natomiast detekcja wad produkcyjnych metodami stosowanymi w diagnostyce eksploatacyjnej może być nieskuteczna z uwagi na to, że większość informacji o wadach produkcyjnych w sygnałach diagnostycznych zawiera się w składowych niskoenergetycznych. Stąd uzasadnione i konieczne jest wprowadzenie zaawansowanych metod testowania odbiorczego w celu zwiększenia skuteczności kontroli poprodukcyjnej lub poserwisowej umożliwiając detekcję jak najszerszego spektrum wad.

Za cel pracy Doktorant postawił sobie opracowanie metodyki testowania, obejmującej sprecyzowanie warunków prowadzenia pomiarów i wskazanie ich wpływu na wyniki testów oraz implementacji zaawansowanych metod i technik przetwarzania sygnałów pozwalających na uzyskanie kompleksowej informacji o jakości wykonania części mechanicznej jak i obwodów elektromagnetycznych silnika. W tym celu Doktorant przestudiował literaturę, która zawiera zarówno normy, jak i podręczniki, ale większość to artykuły naukowe, w dużej części z ostatnich lat, opisujące wykorzystanie różnych metod analizy sygnałów i symptomów diagnostycznych do diagnozowania ASE.

W rozdziale 3 Autor zarysował proponowaną metodykę badań do realizacji swoich celów pracy. Dalej dużo miejsca Autor poświęcił na określenie wpływu prowadzenia testów na uzyskanie informacji diagnostycznych, a więc lokalizacji przetworników pomiarowych, sposobu montażu/posadowienia obiektu badań, sposobu zasilania silnika w trakcie testów, wpływu obciążenia testowego. Uważam to za ważne osiągnięcie naukowe, ponieważ opracowane badania porównawcze mogą stanowić wytyczne dla metodyki prowadzenia pomiarów ASE zarówno przez producentów, jak i w dalszych badaniach eksploatacyjnych. Badania porównawcze dotyczyły różnych wielkości mierzonych takich jak drgania, hałas czy pole magnetyczne.

Następnym ważnym osiągnięciem rozprawy jest, w mojej opinii, walidacja różnych metod detekcji wad produkcyjnych ASE (rozdział 5). Tutaj Autor przeprowadził dyskusję na temat przydatności pomiarów wielkości fizycznych takich jak drgania, hałas, pole magnetyczne, prądy fazowe, poślizg silnika czy też analiza stanów nieustalonych, dla kilku rodzajów silnika asynchronicznego. Szczególnie cennym jest podsumowanie potencjału poszczególnych metod (tabela 5.6), które może służyć producentom do wyboru odpowiedniej metody w celu detekcji wad produkcyjnych. Obszerne wyniki badań zostały udokumentowane w pięciu załącznikach, zawierających szereg wykresów i zestawień tabelarycznych. Należy podkreślić, że zebrane dane pomiarowe mają ogromny potencjał do wykorzystania w dalszych badaniach.

Wszystkie te analizy prowadzą do wyboru opracowanej przez Doktoranta metodyki testowania odbiorczego ASE w postaci uproszczonego algorytmu oraz wyboru dwóch miar diagnostycznych,

które łącznie w postaci płaszczyzny stanów  $v_{RMS} - f_{RICE}$  stanowią podstawę klasyfikacji wstępnej stanu silnika. Pozostałe metody badane w pracy zostały uznane za uzupełniające. Doktorant przedstawił również prototyp stanowiska do prowadzenia testów odbiorczych ze zintegrowanymi przetwornikami pomiarowymi, z uwzględnieniem wniosków dotyczących zarówno warunków prowadzenia testów jak i metod pomiarowych.

Uważam, że Doktorant osiągnął swoje cele postawione w pracy. Dowiódł też swoimi badaniami, że same pomiary elektryczne i proste miary sygnałów wibroakustycznych są niewystarczające do detekcji wad produkcyjnych ASE i celowe jest opracowanie nowej metodyki, ponieważ nowoczesne silniki generują mniej procesów resztkowych. Na podstawie badań wysnuł szereg ciekawych wniosków poznawczych i użytkowych.

Po uważnej lekturze rozprawy nasuwa się kilka dalszych szczegółowych pytań i uwag:

1. W trakcie badań doktorant wyznacza wiele cech diagnostycznych sygnałów drgań, prądowych itp. Może zasadne byłoby przeprowadzenie analizy korelacyjnej pomiędzy poszczególnymi cechami w celu redukcji wektora symptomów?
2. Na rys.5.60 przedstawiono przykład płaszczyzny  $v_{RMS} - f_{RICE}$  w kierunku stycznym dla silników BESEL, będącą propozycją klasyfikacji stanu asynchronicznych silników elektrycznych. Każdemu stanowi eksploatacyjnemu odpowiada jeden punkt pomiarowy. W związku z tym rysunkiem nasuwa się kilka pytań:
  - Na str.97 Autor pisze, że czas rejestracji sygnałów diagnostycznych wynosił 180 sekund. Jaka była długość próbek czasowych, na podstawie których określono symptomy  $v_{RMS}$  i  $f_{RICE}$ ?
  - Sygnały drganiowe zawierają składnik losowy. Każdy stan uszkodzenia reprezentowany jest przez jeden punkt. Może wstępnie określone granice stref mogłyby się wyklarować w sposób bardziej naturalny przy użyciu wykresu rozrzutu?
  - Z rysunku wynika, że zwiększenie niecentryczności wirnika powoduje zmniejszenie częstotliwości Rice'a i brak zmian wartości skutecznej prędkości drgań. Czym to można wytłumaczyć?
  - Przy wzroście niecentryczności wirnika dla silnika GUNT częstotliwość Rice'a rośnie (rys. 5.11), a dla silnika BESEL maleje (rys.5.60). Czy częstotliwość Rice'a jest charakterystyczna dla danego typu silnika?
3. Doktorant proponuje częstotliwość Rice'a jako jedną z dwóch kluczowych miar do klasyfikowania nowych silników asynchronicznych na wstępnym etapie. Sposób wyznaczania tej cechy przedstawia wzór 5.5. W mojej opinii informacje na temat tej miary powinny być rozszerzone. Dlaczego właśnie ten symptom niesie w sobie tak dużo informacji?
4. Roz. 5.2.3.3 (Str.117) i Zał.5: przy wizualizacji prądów fazowych niejasna jest relacja pomiędzy prądami  $i_d$  i  $i_q$  w [A] oraz bezwymiarowymi współrzędnymi  $x$  i  $y$ .
5. W Załączniku 5 tylko dla niecentryczności 0,2 mm przy wizualizacji prądów fazowych okręgami Parka zaobserwować można dwa oddzielne cykle. Czym można to zjawisko wytłumaczyć?

Na koniec jedna uwaga, która jest raczej zachętą do dyskusji niż pytaniem do Doktoranta, dotycząca kierunku przyszłych badań. Wydaje mi się, że gwałtowny rozwój metod sztucznej inteligencji, a zwłaszcza wykorzystania głębokich sieci neuronowych w zadaniu klasyfikacji

uszkodzeń będzie koniecznym etapem w dalszych badaniach. Ogromna baza danych zgromadzona podczas prac eksperymentalnych Doktoranta jest mocnym argumentem przemawiającym za przetestowaniem tych metod w dalszych pracach.

### III. Uwagi redakcyjne i edytorskie

Praca została zredagowana w sposób bardzo staranny. Błędy edytorskie i tzw. literówki są nieliczne. Podkreślić należy także staranność wykonania i czytelność rysunków. Kilka uwag:

- Liczne wyniki pomiarów i analiz znalazły się w 5 załącznikach. W tekście powinny znaleźć się odsyłacze do nich, co ułatwiłoby czytającemu analizę danych.
- Str.59: W tekście: *Przy zasilaniu z sieci 1-fazowej wykazano wzrost udziału zjawisk natury mechanicznej aż do 60%*. Z analizy rys. 4.11 i 4.12 wynika, że chodzi o zjawiska **elektromagnetyczne**.
- Str.84: W mianowniku wzoru 4.22 powinno być  $F(f)$  zamiast  $A(f)$
- Str.137, rys.5.53 – 5.56: Może dla czytelności wyników lepiej byłoby przedstawić iloraz tylko składowych informatywnych w widmie? Chociaż należy zaznaczyć, że Doktorant właściwie interpretuje otrzymane wyniki ilorazu widm.
- Wprawdzie wykaz oznaczeń i akronimów nie jest zbyt długi, ale byłoby wygodniej gdyby został spisany w kolejności alfabetycznej

### IV. Ocena pracy

Przedstawiona do oceny praca mgr inż. Mateusza Wróbla pt. *Metodyka testowania odbiorczego asynchronicznych silników elektrycznych* stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jakim jest opracowanie nowej metodyki testowania asynchronicznych silników elektrycznych wraz z prototypem stanowiska testowego. Autor rozwiązał postawiony problem przez zaplanowanie i przeprowadzenie szeregu badań eksperymentalnych. Przy okazji przedstawił dużo ciekawych badań porównawczych dla różnych metod znanych z literatury przy różnych warunkach prowadzenia eksperymentu. Założone cele rozprawy doktorskiej zostały w pełni osiągnięte.

Autor wykazał się wiedzą teoretyczną na temat zjawisk elektrycznych i mechanicznych zachodzących w asynchronicznym silniku elektrycznym oraz metod analizy sygnałów dynamicznych. Wykazał się również dużymi umiejętnościami z zakresu konstrukcji stanowiska, doboru przetworników i metod pomiarowych oraz samodzielnego planowania badań eksperymentalnych. Przedstawione w recenzji uwagi merytoryczne i redakcyjne nie przesłaniają istotnych wartości pracy i znaczenia dla zastosowań praktycznych.

Praca doktorska Pana mgr inż. Mateusza Wróbla spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Przedstawione badania eksperymentalne są oryginalne. Uzyskane wyniki mają znaczenie praktyczne i mogą być wykorzystane przez producentów do testowania asynchronicznych silników elektrycznych, a wnioski sformułowane w pracy również w diagnostyce eksploatacyjnej.

Moja ocena pracy jest pozytywna. Wnioskuje o dopuszczenie Pana mgr inż. Mateusza Wróbla do publicznej obrony swojej pracy doktorskiej.

Jednocześnie wnoszę o wyróżnienie pracy doktorskiej jako rozprawy o wyżej scharakteryzowanym, naukowo, badawczo i aplikacyjnie ponadprzeciętnym osiągnięciu.

Recenzowana praca doktorska jest zbiorem szeregu oryginalnych doniesień naukowych, poszerzających znacząco wiedzę z zakresu badanego przedmiotu, z których część już została opublikowana, a pozostaje jeszcze spory potencjał do dalszego publikowania. Jednocześnie Kandydat poprzez zbudowane stanowisko badawcze i już posiadany potencjał naukowy oraz badawczy może dalej i ciągle głębiej rozwijać sformułowany problem naukowy tworząc w ten sposób podwaliny do ubiegania się o przyznanie kolejnego stopnia w Jego karierze naukowej. Kolejnym istotnym atutem przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej jest jej użyteczność i możliwość a nawet konieczność wdrożenia.



dr hab. inż. Iwona Komorska, prof. UTH

Radom, 30 sierpnia 2023 r.