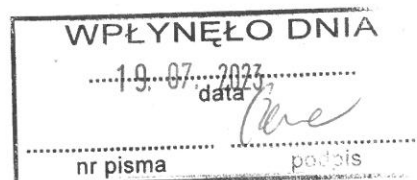


Dr hab. inż. Monika Madej, prof. PŚk
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Katedra Eksploatacji, Technologii Laserowych
i Nanotechnologii
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
27-314 Kielce



RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr inż. Tahseena Ali MANKHI
pt. Investigation of subsurface microcracks causing premature
failure in wind turbine gearbox bearings

Promotor pracy: **Prof. dr hab. inż. Stanisław LEGUTKO**

Podstawa opracowania: pismo Dziekana Wydziału Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP (DIM.075.2312023) z dnia 04.05.2023 roku.

OCENA DOBORU PROBLEMATYKI BADAWCZEJ I TEMATU ROZPRAWY

Stale wzrastające ceny paliw kopalnych w decydujący sposób wpływają na stabilność i efektywność systemów energetycznych. Kryzys obserwowany we współczesnym świecie wskazuje, iż istnieje wyraźna potrzeba globalnej transformacji energetycznej. Ten problem należy rozpatrywać w dwóch aspektach: po pierwsze w celu zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego z powodu wzrostu cen energii, po drugie stopień degradacji środowiska oraz zmiany klimatyczne obligują do podjęcia niezwłocznych zmian i decyzji. Obecnie najtańszym wariantem zasilania okazuje się energia elektryczna pozyskiwana z odnawialnych źródeł energii, OZE. Literatura przedmiotu wskazuje, że rozwój współczesnej energetyki oraz perspektywy jej dalszego rozwoju nie będą osiągalne bez kluczowego udziału OZE, a zwłaszcza energii wiatrowej. Ponadto według Światowej Organizacji Zdrowia

energia wiatrowa charakteryzuje się oddziaływaniami mniej negatywnymi na zdrowie niż inne konwencjonalne formy pozyskiwania energii, a poprzez zmniejszenie emisji zanieczyszczeń pozytywnie wpływa na zdrowie.

Energia wiatrowa wykorzystywana była przez człowieka od początku rozwoju cywilizacji aż do czasów współczesnych. Obok spalania drewna była najwcześniej wykorzystywaną przez ludzi energią odnawialną już w starożytnym Egipcie (energia wiatru jako napęd statków i łodzi podczas transportu bloków kamiennych przy budowie piramid). Pierwszy opis wykorzystania wiatraków do pompowania wody powstał około 400 r. p.n.e. w Indiach i Persji.

Burzliwy rozwój technologii wykorzystującej wiatr jako źródło energii, wynika z czynników ekologicznych związanych z emisją CO₂, a także względów ekonomicznych. Zamiana energii wiatru w energię mechaniczną następuje w turbinie wiatrowej. Podczas eksploatacji turbiny wiatrowej części ruchome ulegają zużyciu prowadzącemu do powstawania różnych awarii, a koszty utrzymania tych turbin znaczącą część całkowitych kosztów wytworzenia energii elektrycznej. Dla eksploatowanych urządzeń udział ten zwiększa się wraz ze zużywaniem się turbiny od 10% do 35%. Najbardziej narażone na uszkodzenia turbiny wiatrowej są takie elementy jak:

- przekładnia główna, a w niej w szczególności: koła zębate, łożyska, wały i sprzęgła,
- mechanizm nastawiania kąta,
- wieża turbiny (posadowienie na fundamencie, łączenia wieży).

Uszkodzenie, bądź nieprawidłowa praca któregoś z tych elementów może spowodować awarię całej elektrowni. Awarie przekładni w turbinie wynikają ze sposobu ich pracy oddziaływań zewnętrznych. Występują tu zmienne, cykliczne obciążenia, zazwyczaj o charakterze impulsowym, powodujące powstawanie uszkodzeń zmęczeniowych, a także dochodzi do ujawniania się wad materiałowych i konstrukcyjnych. Elementami najbardziej narażonymi na uszkodzenia w przekładniach turbin wiatrowych są łożyska i koła zębate.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy ważnego i aktualnego zagadnienia z zakresu eksploatacji łożysk w turbinach wiatrowych. Tytuł recenzowanej rozprawy doktorskiej został sformułowany jednoznacznie i zrozumiale. Zainteresowanie Doktoranta problematyką eksploatacji łożysk w turbinach wiatrowych jest ambitnym wyzwaniem poznawczym. Dobór problematyki i tematu rozprawy stanowią poważny atut recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Problematyka badawcza recenzowanej pracy jest bardzo złożona i zgodnie z tytułem dotyczy badań mikropęknięć podpowierzchniowych powodujących przedwczesne zużycie łożysk przekładni turbiny wiatrowej. Biorąc pod uwagę znaczenie i potencjalny zakres tematyki podjętej w pracy przez mgr inż. Tahseena Ali MANKHI uważam wybór tematu pracy doktorskiej za bardzo

trafny, aktualny i uzasadniony. Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy zagadnień związanych z dyscypliną naukową Inżynieria Mechaniczna.

ZAKRES, CHARAKTERYSTYKA I OCENA ROZPRAWY

Rozprawa doktorska mgr inż. Tahseena Ali MANKHI wraz z załącznikami przedstawiona jest na 184 stronach i zawiera różnorodny materiał ilustracyjny w postaci 97 rysunków, fotografii i wykresów oraz 7 tabel. Praca zawiera 5 rozdziałów merytorycznych i zakończona jest wnioskami z badań oraz wskazaniem kierunków dalszych badań. Załączono także spis cytowanej literatury, w której zamieszczono 268 pozycji literaturowych. Znaczną część cytowanych pozycji literaturowych stanowią publikacje wydane w okresie ostatnich dwudziestu lat. Wybór literatury jest trafny i wyczerpujący. W pracy zamieszczono ponadto 24 załączniki. Praca została starannie opracowana pod względem redakcyjnym. Dysertacja ma klasyczny układ, tzn. podziału dwie zasadnicze części: teoretyczną oraz doświadczalną, choć w części eksperymentalnej Doktorant wielokrotnie odnosi się do danych literaturowych. Układ pracy jednak nie odbiega od typowego układu dla prac doktorskich z dyscypliny Inżynieria Mechaniczna. Doktorant na początku określił genezę wyboru tematyki badań oraz przedstawił problem badawczy, następnie sformułował cel i założenia pracy oraz wskazał nowatorskie aspekty dysertacji. Tematyka niniejszej rozprawy jest nowoczesna, aktualna i potrzebna. Na podstawie analizy przedmiotowej literatury Doktorant dokonał oceny wpływu czynników zewnętrznych, wpływających na niezawodność i wydajność łożysk eksploatowanych w turbinach wiatrowych. Tytuł recenzowanej rozprawy w pełni koresponduje z treściami zawartymi w pracy. Objętość rozprawy jest uzasadniona i wynika z potrzeby opisu przeprowadzonych analiz i rozważań. Rysunki oraz tabele zamieszczone w pracy wykonane są starannie i przejrzysto.

We wprowadzeniu - rozdział 1 - Autor rozprawy przedstawia aktualną charakterystykę energii pozyskiwanej w elektrowniach wiatrowych. Następnie przedstawia genezę badań wraz z celem, zakresem rozprawy oraz planem badań. Doktorant przedstawił korzyści ekonomiczne i środowiskowe elektrowni wiatrowych w porównaniu do innych systemów pozyskiwania energii. Wskazuje także na główne czynniki wpływające na konieczność analizy awarii przekładni wiatrowych z powodu ponadnormatywnego zużycia łożysk. Według danych producentów trwałość eksploatacyjna łożysk stosowanych w turbinach wiatrowych powinna wynosić 20 lat, a nie, jak wskazuje Doktorant 1÷5 lat. W dysertacji mgr inż. Tahseen Ali MANKHI przeprowadził badania symulacyjne i eksperymentalne inicjacji mikropełnięć elementów łożysk w turbinie wiatrowej, w celu określenia czynników determinujących ich przedwczesne awarie.

Główne cele pracy sformułowane przez Doktoranta to:

- Określenie progu długości pęknięcia, od którego zaczyna ono zmieniać kierunek,
- Ocena roli wtrąceń niemetalicznych (NMIs) oraz naprężeń w inicjacji pęknięć.
- Wybór najbardziej wydajnego typu łożyska do przekładni turbiny wiatrowej (WTGBs).

Cele pracy zostały sformułowane prawidłowo i zawierają aspekty naukowo-badawcze, a dodatkowo mają charakter użyteczny.

W rozdziale 2 Doktorant dokonał przeglądu literatury, w którym przedstawił historię energetyki wiatrowej, scharakteryzował i opisał poszczególne elementy turbiny wiatrowej, zaprezentował różne rodzaje systemów monitoringu turbin wiatrowych. Następnie przedstawił charakterystyki materiałów stosowanych w łożyskach, czynniki wpływające na ich uszkodzenia jak: zmęczenie materiału, naciski w styku Hertza oraz metody prognozowania trwałości eksploatacyjnej.

Rozdział 3. Poświęcony jest tematyce dotyczącej wpływu wtrąceń niemetalicznych, zmian mikrostrukturalnych oraz najczęściej występujących typów uszkodzeń (powierzchniowych i podpowierzchniowych) łożysk przekładni turbiny wiatrowej. W tym rozdziale zaprezentowano główne przyczyny powstawania uszkodzeń oraz przedstawiono hipotezy z zakresu interpretacji występowania zmian mikrostrukturalnych i typów uszkodzeń łożysk w turbinach wiatrowych.

W czwartym rozdziale w części symulacyjnej doktorant zaprezentował analizę rozkładu naprężeń wokół wtrąceń niemetalicznych z zastosowaniem oprogramowania ABAQUS oraz analizy elementów skończonych (FEA). Zbadał próbki uszkodzonych łożysk z przekładni turbiny wiatrowej o mocy 2 MW. Sklasyfikował pęknięcia pod względem długości, ilości, głębokości i nachylenia pęknięcia względem powierzchni styku oraz określił ich związek z obecnością występowania cząstek niemetalicznych. Doktorant analizował wpływ wtrąceń niemetalicznych na inicjację pęknięć w zależności od występowania defektów strukturalnych oraz stanu naprężeń.

Rozdział 5 zawiera procedurę wyboru najbardziej wydajnego typu łożyska do zastosowania w przekładni turbiny wiatrowej w wykorzystaniu metody wielokryterialnego podejmowania decyzji, w szczególności analitycznej hierarchii procesowej. Powiązanie danych dotyczących typów łożysk oraz wymuszeń/obciążeń występujących w turbinie wiatrowej umożliwiły wprowadzenie parametrów wejściowych do modeli MCDM. Dane teoretyczne i wyniki badań własnych doktoranta pozwoliły na przedstawienie częściowej propozycji wyboru najlepszego typu łożyska dla planetarnej przekładni turbiny wiatrowej. Doktorant wykazał skuteczność stosowania oprogramowania "Expert Choice" (EC) do przeprowadzenia procesu analizy hierarchii (AHP) w celu wyboru najlepszego rozwiązania problemu.

Rozdział 6 stanowią podsumowanie wyników badań i analiz zrealizowanych podczas realizacji tej pracy, wnioski końcowe oraz zalecenia dotyczące ograniczania uszkodzeń przekładni łożysk turbin wiatrowych w fazie: projektowania, produkcji oraz eksploatacji.

Pod względem formalnym rozprawa została opracowana poprawnie, a treści zawarte w poszczególnych rozdziałach rozmieszczone zostały zgodnie z postawionymi celami. Układ pracy jest prawidłowy, przejrzysty i konsekwentny, zgodny z zasadami twórczości naukowej.

OCENA ROZPRAWY

Doktorant po przeprowadzeniu analizy bieżącego stanu wiedzy dotyczącej eksploatacji turbin wiatrowych, wskazał najważniejsze czynniki wpływające na ich trwałość eksploatacyjną. Podjęty w rozprawie temat jest ważny dla nauki w zakresie inżynierii mechanicznej, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień eksploatacji elektrowni wiatrowych. Recenzowana rozprawa posiada logiczną i spójną konstrukcję, typową dla prac naukowych. Mgr inż. Tahseen Ali MANKHI w rozprawie potwierdza znajomość literatury i problematyki przedmiotu. Wiedzę tę właściwie potrafił wykorzystać podczas realizacji badań własnych.

Do najważniejszych osiągnięć doktoranta należy zaliczyć:

- Określenie wartości krytycznej długości pęknięcia mniejszej niż 15 μm , po przekroczeniu którego pęknięcie ma tendencję do zmiany kierunku. Na tej podstawie podzielił pęknięcia na: małe - mikropęknięcia o długościach $<15 \mu\text{m}$ do zbadania inicjacji pęknięcia; duże pęknięcia o długościach $\geq 15 \mu\text{m}$, do zbadania ich rozprzestrzeniania się.
- Wykazanie, że niemetaliczne wtrącenia oraz ich rozmiary nie wpływają znacząco na inicjację pęknięć.
- Wykazanie, że na inicjację pęknięć ma wpływ występowanie pustek oraz twardych węglików.
- Ustalenie roli naprężeń von Misesa, maksymalnych naprężeń stycznych oraz sił trakcyjnych w inicjacji pęknięć w zakresie ich rozłożenia oraz ich nachylenia do głębokości.
- Wskazanie jednorzędowego łożyska stożkowego jako rozwiązania najbardziej wydajnego i kompatybilnej alternatywy do zastosowania w przekładniach turbin wiatrowych pod względem kilku kryteriów, takich jak trwałość, niezawodność, koszt, cechy konstrukcyjne i dostępność.
- Opracowanie zaleceń dotyczących przyszłych prac przyczyniających się do rozwiązania problemu przedwczesnych awarii łożysk turbin wiatrowych.

Doktorant zaplanował i przeprowadził plan badawczy, a postawione w pracy cele zrealizował. Przeprowadzone badania własne doktoranta zostały przeprowadzone w sposób kompleksowy, uwzględniając metody symulacyjne i doświadczalne. Sposób, zastosowane narzędzia badawcze oraz przeprowadzone analizy wyników badań uznaję za rzetelne i wiarygodne. Wskazuje to na nabycie przez mgr Tahseena Ali MANKHI umiejętności samodzielnej realizacji pracy naukowej. Zastosowane w procesie badawczym różnorodnych metod i narzędzi badawczych świadczy o dobrym warsztacie metodycznym doktoranta. Wykonał on pracę badawczą wraz z wielowątkową analizą, wymagającą dużego doświadczenia i samodyscypliny przy jej realizacji. Praca dotyczy ważnego problemu o istotnym znaczeniu teoretyczno-poznawczym oraz praktycznym.

Całość przeprowadzonych badań i analiz została opracowana na wysokim poziomie. Przedstawiona do recenzji praca doktorska jest bardzo wartościowym opracowaniem naukowym i zawiera wnioski badawcze, które mają duże znaczenie aplikacyjne. Ostateczne rezultaty przedłożonej dysertacji stanowią oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego.

UWAGI

Pewne zagadnienia poruszane w rozprawie wymagają uszczegółowienia, dlatego też proszę aby podczas publicznej obrony Autor odniósł się do następujących kwestii:

- Jakie były przesłanki wybrania przez Pana tej właśnie mocy turbin wiatrowych i łożysk w nich pracujących?
- Jakie jeszcze inne metody, oprócz wskazanych w pracy, można byłoby zastosować do zwiększenia trwałości i niezawodności pracy łożysk w turbinach wiatrowych?
- Gdzie i przez kogo zaproponowany przez Pana dobór łożysk do turbiny wiatrowej może być zaimplementowany?
- Czy rozpatrywał Pan zastosowanie powłok np.: diamentopodobnych na elementy robocze - łożyska turbin wiatrowych?

Przedstawione w niniejszej recenzji pytania mają charakter poznawczy i nie mają one wpływu na moją pozytywną ocenę recenzowanej rozprawy.

WNIOSEK KOŃCOWY

Opiniowana rozprawa doktorska posiada oryginalne cechy nowości, a także istotne walory użytkowe. Przedstawiona do recenzji dysertacja wpływa na stan istniejącej wiedzy pod względem: metodologicznym, metodycznym i poznawczym. Podsumowując moją ocenę stwierdzam, że rozprawa:

- jest oryginalnym rozwiązaniem przez Autora problemu naukowego,
- potwierdza jego ogólną wiedzę w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna,

- poprzez zrealizowane badania własne: symulacje i badania analityczne, stanowi istotny wkład w rozwój badań nad eksploatacją oraz utrzymaniem ruchu w elektrowniach wiatrowych.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska opracowana została na dobrym poziomie merytorycznym.

Po zapoznaniu się z pracą mgr inż. Tahseena Ali MANKHI pt. „Investigation of subsurface microcracks causing premature failure in wind turbine gearbox bearings” stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane przez stosowne ustawy (Ustawa z dnia 14 marca 2003 r., tekst ujednolicony z dnia 29 września 2014 r. wraz z Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r., a także Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce). Dlatego stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie mgr inż. Tahseena Ali MANKHI do publicznej obrony.

Kielce, 4 lipca 2023 roku

Monika Madej