



Rzeszów, 03.08.2023

prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Katedra Konstrukcji Maszyn
Al. Powstańców Warszawy 12
35-959 Rzeszów

Recenzja rozprawy doktorskiej
pt. INVESTIGATION OF SUBSURFACE MICROCRACKS CAUSING PREMATURE FAILURE
IN WIND TURBINE GEARBOX BEARINGS

Autor: Tahseen Ali MANKI
promotor: prof. dr hab. inż. Stanisław Legutko
promotor pomocniczy: Dr. Jasim H. AL-Bedhany

Podstawa recenzji

Pismo dr hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej numer DIM.075.231.2023 z dnia 4 maja 2023 roku o wyznaczeniu na recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr inż. Tahseen Ali MANKI w oparciu o dysertację pt. Investigation of subsurface microcracks causing premature failure in wind turbine gearbox bearings.

1. Wprowadzenie

Tematyka przedstawionej do recenzji dysertacji dotyczy badań i analizy podpowierzchniowych mikropęknięć bieżni łożysk powodujących przedwczesne awarie łożysk przekładni turbin wiatrowych. Siłownie wiatrowe wykorzystywane są przez człowieka od wielu wieków, a obecnie należą do jednego z istotnych elementów światowego systemu energetycznego opartego o tzw. źródła odnawialne, który rozwija się bardzo dynamicznie. Zwiększanie wydajności siłowni wiatrowych wiąże się z powstawaniem wysokich obciążeń układach wykonawczych turbin wiatrowych i układach przeniesienia napędu. Obecnie w przemyśle energetycznym często stosowane są generatory wiatrowe o mocy 2MW i łożyska z tego typu elektrowni zostały poddane badaniom w ocenianej dysertacji. Istotnym elementem układu przeniesienia napędu przekładni zębatej stosowanej w siłowniach wiatrowych jest łożyskowanie elementów znajdujących się w ruchu obrotowym. Należy tu dodać, że w siłowniach wiatrowych następuje multiplikacja obrotów z roboczej prędkości obrotowej wirnika w granicach $15 \div 25$ obr./min do wymaganej prędkości obrotowej generatora prądowego na poziomie ok. 1800 obr./min. Wiąże się to z pewną specyfiką obciążeń przekładni multiplikujących, co przekłada się również na charakterystykę obciążeń łożysk przekładni. Trwałość łożysk związana jest bezpośrednio na niezawodnością przekładni, co za tym idzie całego układu

przeniesienia mocy i docelowo układu energetycznego. Elektrownie wiatrowe często pracują w lokalizacjach o trudnym dostępie, stąd prace remontowe generatora i jego układu napędowego mogą generować olbrzymie koszty. Z tego względu analiza trwałości łożysk przekładni turbin wiatrowych stanowi istotne zagadnienie zarówno w obszarze samej budowy i eksploatacji maszyn jak również w obszarze energetyki. Biorąc powyższe pod uwagę uważam, że przedstawiona w rozprawie tematyka jest aktualna, a jej podjęcie jest w pełni uzasadnione z punktu widzenia rozwoju nauki, aplikacji przemysłowych i tendencji rozwoju technologii opartych o gospodarkę wykorzystującą tzw. odnawialne źródła energii.

2. Charakterystyka ogólna rozprawy

Przedmiotowa praca jest napisana w języku angielskim, liczy wraz z załącznikami 186, stron zawiera na początku streszczenie, wykaz publikacji, których Autor dysertacji jest również współautorem, wykaz skrótów i symboli, spis treści, wykaz rysunków i tabel. Opracowanie składa się z sześciu numerowanych rozdziałów, bibliografii liczącej 268 pozycji literaturowych oraz dodatków. Przedstawiona kolejność rozdziałów i podrozdziałów tworzy spójny i logiczny układ, przedstawiane treści rozwijają i uzupełniają materiał zawarty w częściach poprzedzających. W końcowej części pracy można zauważyć nienumerowaną część, czyli literaturę i dodatki w których występuje numeracja od 8.1., tak jakby literatura stanowiła siódmy rozdział pracy a dodatki rozdział ósmy. Praca zawiera odpowiednie ilustracje, schematy i wykresy, pozwalające na właściwą interpretację jej zawartości. Autor wprowadził do tekstu różne skróty, które są wyjaśnione w początkowej części pracy i przy ich pierwszym użyciu.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do zagadnień związanych z zastosowaniem siłowni wiatrowych jako istotnego elementu systemu energetycznego. Opisane są również problemy eksploatacyjne wynikające z wykorzystania infrastruktury energetyki wiatrowej. Autor zauważa, że jednym z powodów wolnego tempa rozwoju produkcji energii wiatrowej może być przedwczesna awaria łożysk przekładni turbiny wiatrowej (WTGB - Wind Turbine Gearbox Bearings). Przedstawiono udział składników technicznych układu generowania energii elektrycznej w kontekście występowania uszkodzeń i wpływu na niezawodność pozyskiwania energii wiatrowej. Analiza źródeł literaturowych przez Doktoranta pokazuje, że znaczna część awarii układu napędowego elektrowni wiatrowej wynika z uszkodzeń łożysk, co wskazuje na celowość badań nad mechanizmami powstawania uszkodzeń elementów łożysk. Dodatkowo analiza stanu zagadnienia była podstawą do sformułowania celu pracy który dotyczy określenia progu długości pęknięcia elementów łożyska w odniesieniu do wtrąceń niemetalicznych. Badania tego typu czynników mogą być istotne w procesie doboru łożysk podczas projektowania przekładni turbiny. Biorąc to pod uwagę zagadnienia te mają charakter interdyscyplinarny związany z eksploatacją maszyn, inżynierią materiałową i konstrukcją przekładni zębatych.

Drugi rozdział jest kontynuacją analizy stanu zagadnienia w odniesieniu do konstrukcji elementów generatora wiatrowego począwszy od budowy ogólnej układu turbinowego, stosowanych przekładni i generatorów o różnej mocy. Autor skupił się tu

szczególnie na systemach łożyskowania elementów wirujących oraz zjawiskach występujących podczas pracy łożyska. Przedstawione są również wybrane informacje dotyczące naprężeń kontaktowych oraz przegląd wybranych materiałów stosowanych na łożyska przekładniowe w kontekście smarowania i zużycia.

Rozdział trzeci zamyka część teoretyczną i stanowi kontynuację opisu zagadnień zmiany mikrostruktury materiału stosowanego na łożyska, czyli stali łożyskowej, powstające pod wpływem działających cyklicznie obciążeń stykowych, których źródłem może być praca generatora wiatrowego. Analizie poddano zależności pomiędzy wytrzymałością zmęczeniową a umiejscowieniem wtrącenia, jego geometrią i twardością. Pokazuje to istotność zagadnień związanych z inżynierią materiałową w zakresie czystości i jednorodności materiałów stosowanych na łożyska toczne.

Czwarty rozdział przedstawia wyniki własnych badań mikropęknięć podpowierzchniowych będących przyczyną przedwczesnych awarii łożysk przekładni turbiny wiatrowej. Badania przeprowadzono na próbkach łożysk, które pracowały w przekładni turbiny wiatrowej. Autor nie przedstawia szczegółów konstrukcyjnych przekładni ani całego układu generowania energii elektrycznej poza znamionową mocą generatora równą 2MW, ogólnym widokiem przekładni przedstawionym na rysunku 2-5 i schematem przekładni – dodatek A1, A2. Rysunek 2-5 opisany jest jako schemat przekładni planetarnej, w rzeczywistości jest to zrenderowany widok przekładni, w której układ planetarny stanowi jeden z elementów zespołu napędowego. Rysunek schematu przekładni – dodatek A1, jest mało czytelny nie zawiera opisu przebiegu momentu obrotowego, który można wnioskować z rysunku 2-5, zakładając że odnosi się do tej samej przekładni. Rysunki te mają powołanie w literaturze na pozycję nr 50, która jest witryną internetową portalu Energiforsk, stąd identyfikacja danych przekładni może być utrudniona. W tej części pracy przeprowadzono analizę pęknięć materiału pod względem długości i głębokości oraz usytuowania pęknięcia na powierzchni współpracującej.

Piąty rozdział dotyczy opracowania metodyki doboru łożysk przekładni turbiny wiatrowej z zastosowaniem analizy wielokryterialnej opartej o proces hierarchii analitycznej (AHP – Analytical Hierarchy Process), który jest istotnym narzędziem wspomagającym podejmowania decyzji w oparciu o wiele czynników wynikających z warunków pracy przekładni generatora wiatrowego. Proces ten został odniesiony do analizy wykorzystującej narzędzia programowe typu Expert Choice (EC).

Rozdział szósty zawiera podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań i analiz, które mają charakter naukowy, badawczy i użyteczny. Materiał badawczy może pozwolić na sformułowanie pewnych wskazówek projektowych i eksploatacyjnych dotyczących łożyskowania przekładni generatorów wiatrowych, które mogą mieć wpływ na wydłużenie czasu pracy układu przeniesienia napędu.

Literatura została ułożona w kolejności cytowania i zawiera pozycje książkowe, artykuły naukowe, materiały konferencyjne witryny internetowe o tematyce związanej z energetyką wiatrową, przekładniami zębatymi, łożyskowaniem, zużyciem eksploatacyjnym i inżynierią materiałową, stanowi aktualne i związane z tematem pracy zestawienie.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa zawiera wnikliwą ocenę analizy stanu zagadnienia związanego z mechanizmami zużycia łożysk przekładni wiatrowych oraz bogaty materiał badawczy, który pozwolił na przeprowadzenie symulacji i prognoz eksploatacyjnych zużycia elementów maszyn stanowiący nowy i oryginalny wkład Autora w dyscyplinę inżynieria mechaniczna.

Podstawowym celem pracy było badanie podpowierzchniowych mikropęknięć powodujących przedwczesne awarie łożysk przekładni turbin wiatrowych. Przyczyną podjęcia tematu był problem eksploatacyjny pokazujący, że łożyska ulegają uszkodzeniu w okresie $\frac{1}{4}$ zaplanowanego czasu eksploatacji przekładni generatora wiatrowego w odniesieniu do projektowanej żywotności. Jednym z powodów przedwczesnych uszkodzeń przekładni mogą być zmienne obciążenia, którym poddawane są łożyska podczas pracy turbiny wiatrowej. Autor poddał szczegółowej analizie mechanizm powstawania uszkodzenia bieżni łożyska, który rozpoczyna się od mikropęknięcia podpowierzchniowego, następnie rozprzestrzenia się w skali makro i dociera do powierzchni styku, powodując przedwczesne uszkodzenie. Przeprowadził badania eksperymentalne i symulacyjne mikropęknięć we wczesnej fazie powstawania uszkodzenia (o długości do 15 μm), które jak wynika z analizy inicjują większe uszkodzenia bieżni łożyska.

Autor przeprowadził badania eksperymentalne próbek w postaci bieżni wewnętrznych łożyska walcowego podwójnego wałeczkowego (DRCB – Double Roller Cylindrical Bearing), uszkodzonych w wyniku eksploatacji przekładni planetarnej turbiny wiatrowej o mocy 2 MW. Bieżnia wewnętrzna z punktu widzenia eksploatacji łożyska wydaje się być elementem najbardziej narażonym na uszkodzenia wynikające z obciążeń kontaktowych, stąd wybór obiektu badań wydaje się być uzasadniony. Przedstawione informacje nie pozwalają jednak na pełną analizę obciążenia łożyska z punktu widzenia konstrukcyjnego czy eksploatacyjnego. Szczegółowych danych tych nie przedstawiono w pracy, podając jako powód tajemnicę przemysłową. Być może jest uzasadnione, jednak ogranicza możliwość weryfikacji badań przez odbiorców rozprawy czy recenzentów.

W wyniku oględzin materiału badawczego wykryto 1447 pęknięcia, które sklasyfikowano na podstawie ich długości, głębokości, nachylenia i związku ich powstania z wtrąceniami niemetalicznymi (NMI – Non-Metallic Inclusions). Celem badania było również określenie wpływu wielkości i kształtu NMI na powstawanie uszkodzeń bieżni łożysk. Analiza wtrąceń niemetalicznych odniesiona została do zjawiska inicjacji pęknięć, co badano pod kątem rozkładu naprężeń podpowierzchniowych, procentowego udziału pęknięć z nimi związanych oraz współczynnika kształtu. Przebadano koncentrację naprężeń na końcach wtrąceń potwierdzając wpływ NMI na powstawanie uszkodzeń bieżni łożysk. W wyniku analizy statystycznej określono, że tylko około 15% ogółu zbadanych pęknięć nie było związanych z wtrąceniami niemetalicznymi.

Przeprowadzone zostały badania mikroskopowe w wyniku których stwierdzono, że osnowa stali łożyskowej była nasycona cząstkami twardych węglików, które mogą oddziaływać na przylegające puste przestrzenie, co może prowadzić do procesów

inicjujących mikropęknięcia. W wyniku przeprowadzonych badań zaobserwowano, że podpowierzchniowe mikropęknięcia o wymiarach od 1 do 15 μm są często nachylone pod kątem 45° do stycznej do powierzchni styku. Wskazuje to na wpływ maksymalnego naprężenia ścinającego na inicjację pęknięcia, natomiast nachylenia pęknięć przekraczające 90° mogą wskazywać gwałtowne zmiany obciążenia przekładni wynikające ze zmiennych warunków pracy. Do analizy zjawisk kontaktowych został wykorzystany model Hertz'a oraz zmienny przebieg obciążenia bazujący na rzeczywistych warunkach eksploatacji. Przeprowadzono obliczenia analityczne i symulacje numeryczne wykorzystując metodę elementów skończonych, jednak szczegóły samego modelu i założonych warunków granicznych są dość ogólnikowe.

Wyniki badań symulacji i analiz pozwoliły Autorowi sformułować stwierdzenie, mówiące że przedwczesne uszkodzenie łożyska wynika w pierwszym etapie z uszkodzenia bieżni pierścienia wewnętrznego, czego powodem jest przekroczenie wartości dopuszczalnych naprężeń zredukowanych lub dopuszczalnych wartości składowej stycznej tensora naprężeń.

Doktorant stwierdza, uzyskane wyniki dostarczyły kilku konkretnych zaleceń dotyczących usprawnienia procesów projektowania, wytwarzania, eksploatacji, monitorowania i konserwacji przekładni elektrowni wiatrowych. Stwierdzenie to jest trochę przesadzone, ponieważ praca skupia się na analizie samych łożysk i tylko w obrębie przekładni planetarnej. Nie przeprowadzono szczegółowej analizy konstrukcji całego układu napędowego, lub nie jest to przedstawione w pracy. Nie poddano szczegółowej analizie również procesu eksploatacji elektrowni wiatrowej w okresie jej pracy do momentu pojawienia się uszkodzenia. Stwierdzono, że uszkodzenia łożysk są powodem relatywnie krótkiego czasu eksploatacji elektrowni na poziomie jednej czwartej planowanego czasu pracy generatora. Skupienie się na uszkodzeniach łożysk i mechanizmach inicjacji oraz propagacji tych uszkodzeń stanowi istotne zadanie badawcze, jednak należy pamiętać, że łożyska te zostały dobrane w wyniku procesu projektowego i przyczyna przedwczesnych uszkodzeń może leżeć w samej konstrukcji układu przeniesienia napędu. Być może należałoby przeprojektować całą przekładnię w taki sposób aby spełniała wymogi planowanego czasu eksploatacji. Można zrozumieć, że jednym z kryteriów projektowania przekładni jest dążenie do zmniejszenia gabarytów i masy, jednak można znaleźć rozwiązania konstrukcyjne przekładni wielodrożnych, np. stosowane lotnictwie, które pozwalają na spełnianie wysokich wymagań wytrzymałościowych i trwałościowych. Kolejna kwestia dotycząca zużycia łożysk może wynikać również z dokładności wykonania kół zębatych czy korpusów przekładni. Proces samego montażu elementów przekładni może być przyczyną, szczególnie w przypadku łożysk i ich przedwczesnego zużycia. Przedstawione powyżej uwagi mają charakter pewnej dyskusji i rozważań, które mogą stanowić dla Autora czy osób związanych z konstrukcją i eksploatacją przekładni generatorów wiatrowych pewne pole do przemyśleń. Być może kwestie te są tak oczywiste, że czasami można o nich zapomnieć skupiając się na szczegółowym zagadnieniu analizy uszkodzeń w obrębie przedstawionego w pracy zagadnienia badawczego związanego z inicjacją i propagacją uszkodzeń ocenianą na podstawie samych skutków. Dyskusja ta nie zmienia mojej pozytywnej oceny pracy, która przedstawia bardzo ciekawy materiał badawczy i analizę

naukową zagadnienia, jednocześnie stanowi oryginalny wkład Autora w dyscyplinę inżynieria mechaniczna.

4. Podsumowanie

Przedstawiona do oceny rozprawa dotyczy bardzo istotnych zagadnień, odnoszących się do analizy procesów zużycia eksploatacyjnego łożysk przekładni turbiny wiatrowej. Tematyka ta analizując trendy panujące w nauce i przemyśle z pewnością jest przyszłościowa, ze względu na rozwój konstrukcji przekładni i doboru łożysk generatorów wiatrowych w celu podwyższenia ich niezawodności. Temat pracy został wybrany w sposób przemyślany i trafny, a jej zakres spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Układ formalny pracy jest prawidłowy, zawiera odpowiednią bibliografię i odsyłacze do materiału ilustracyjnego. Rozprawa odnosi się do aktualnej wiedzy, wnosi treści nowe w obszarze badań naukowych i aplikacji przemysłowych. Praca składa się z części teoretycznej będącej jednocześnie analizą stanu zagadnienia oraz części badawczej i analizy wyników badań będącej podstawą realizacji założonego i osiągniętego celu naukowego. Powyższe fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne pozwalające na prowadzenie prac badawczych o charakterze naukowym i aplikacyjnym.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Tahseen Ali MANKI pt. „Investigation of subsurface microcracks causing premature failure in wind turbine gearbox bearings”, spełnia wymagania ustawy: Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce – Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. z późniejszymi zmianami w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna i w mojej ocenie może być dopuszczona do publicznej obrony.

Gregorz Ewke