Olsztyn, 2023-08-30

Dr hab. inż. Sławomir WIERZBICKI, prof. UWM
Katedra Mechatroniki
Wydział Nauk Technicznych
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ
WPŁ. DNIA 05 -09- 2023
Podpis D. Stelkiel

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartosza Jakubka pt. „Metodyka testowania poprodukcyjnego łożysk stożkowych z zastosowaniem technik cyfrowego przetwarzania sygnałów wibroakustycznych"

Promotor: dr hab. inż. Roman Barczewski
Promotor pomocniczy: dr inż. Michał Jakubowicz

Recenzja wykonana na podstawie pisma nr DIM.075.321.2023 Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP, z dnia 3 lipca 2023.

Ocena problematyki pracy

Łożyska toczne to jedne z podstawowych elementów praktycznie każdej maszyny posiadającej elementy obrotowe. Stan techniczny tych elementów ma decydujący wpływ nie tylko na efektywność realizowanych procesów, ale także na bezpieczeństwo użytkowania maszyn.

Problem diagnostyki stanu technicznego łożysk tocznych jest przedmiotem licznych badań, mających na celu opracowanie skutecznych metod identyfikacji ich stanu technicznego. Najczęściej stosowanymi metodami identyfikacji stanu tych łożysk są metody wibroakustyczne, analizujące sygnał drganiowy generowany przez pracujące łożyska. Łożyska te, pomimo relatywnie prostej budowy, są elementami, których uszkodzenia mogą generować złożone sygnały diagnostyczne niejednokrotnie trudne do jednoznacznej identyfikacji.

Problem ten jest szczególnie istotny w przypadku diagnostyki poprodukcyjnej, mającej na celu ocenę poprawności wykonania łożysk tocznych. Obecnie produkcja tego typu elementów, odbywa się przy wykorzystaniu precyzyjnych maszyn, gwarantujących niejako poprawne wykonanie łożyska. Jednak w celu zapewnienia wysokiej jakości oferowanych łożysk zachodzi konieczność ich testowania przed dostarczeniem do odbiorcy. Jednoznaczna ocena stanu nowo wyprodukowanego łożyska jest znacznie trudniejsza do określenia z uwagi na bardzo częste nieznaczne odstępstwa od norm określających poprawność ich wykonania. Jednocześnie różnorodność możliwych uszkodzeń łożysk jest na tyle duża, że nie jest możliwe proste i jednoznaczne określenie stanu technicznego.

Właśnie problem opracowania skutecznej metodyki testowania poprodukcyjnego łożysk tocznych jest przedmiotem ocenianej rozprawy doktorskiej.

Z uwagi na tematykę rozprawy, problem badawczy oraz zakres realizacji pracy, należy uznać, **że rozprawa ta spełnia kryteria stawiane tematom rozpraw doktorskich realizowanych w dyscyplinie naukowej budowa i eksploatacja maszyn (obecnie inżynieria mechaniczna).**

Analiza rozprawy doktorskiej

Główna część rozprawy liczy łącznie 134 strony, dodatkowo do rozprawy dołączone jest 6 załączników, w tym 3 w wersji elektronicznej.

Treść pracy podzielona jest na 7 rozdziałów poprzedzonych streszczeniami rozprawy w języku polskim i angielskim, wykazem ważniejszych oznaczeń, na końcu pracy zamieszono wykaz cytowanej literatury.

Struktura ocenianej rozprawy jest poprawna, a kolejność rozdziałów logicznie powiązana z sobą.

W **rozdziale 1. „Wstęp"** (str. 8-9), Autor wprowadza w tematykę rozprawy, opisując krótko rolę diagnostyki technicznej na poszczególnych etapach życia obiektu technicznego, jak również, zwraca uwagę na rolę łożysk tocznych w różnego rodzaju maszynach i urządzeniach. W rozdziale tym Doktorant zamieszcza również cel i zakres rozprawy w którym krótko i precyzyjnie opisuje zagadnienia poruszane w pracy doktorskiej. Główne cele rozprawy określa jako:

- Opracowanie metodyki poprodukcyjnego testowania stożkowych łożysk tocznych, pozwalającej na uzyskanie sygnałów diagnostycznych o znanym wpływie warunków prowadzenia testów i małej podatności na zakłócenia.

– Opracowanie nowych i / lub adaptacja istniejących technik przetwarzania i parametryzacji sygnałów wibroakustycznych, pozwalających polepszyć trafność klasyfikacji poprodukcyjnej i zwiększyć skuteczność detekcji wad produkcyjnych stożkowych łożysk tocznych.

Rozdział 2 „Łożyska toczne – metody i techniki diagnozowania" (str. 10-31) zawiera opis metod diagnostyki łożysk tocznych. W tej części pracy Doktorant scharakteryzował stosowane obecnie metody wykorzystywane do oceny stanu łożysk tocznych. W podsumowaniu tego rozdziału Doktorant podkreśla „że w zdecydowanej większości przypadków wady produkcyjne generują sygnały WA o dużo mniejszej energii niż typowe uszkodzenia eksploatacyjne (pitting, łuszczenie, pęknięcia itd.). Ich wykrycie umożliwiają metody pozwalające na detekcję niskoenergetycznych składowych sygnału związanych z wadami. Ponadto specyfika testowania poprodukcyjnego łożysk wymaga aby test był możliwie krótki a kryteria klasyfikacji były oparte (o ile jest to możliwe) o wartości kryterialne (wartości liczbowe)." Jest to niezwykle ważne, gdyż ogranicza to możliwość wykorzystania niektórych metod.

W **rozdziale 3 „Poprodukcyjne testowanie łożysk tocznych – wytyczne i uwarunkowania"** (str. 32-66), Doktorant bardzo szczegółowo opisał metody oraz stanowiska wykorzystywane do poprodukcyjnego testowania łożysk tocznych. W rozdziale tym przedstawił również opis stanowiska badawczego, wykorzystywanego podczas badań.

Rozdział ten zawiera również opis wpływu czynników takich jak smarowanie, obciążenie, prędkość obrotowa, czas pomiaru na przebieg weryfikacji stanu technicznego łożysk tocznych. Co istotne, w rozdziale tym Doktorant odwołuje się do przeprowadzonych przez siebie badań (opublikowanych w trzech artykułach naukowych), w tym 2 mających na celu określenie wpływu właściwości oleju smarującego na przebieg wartości skutecznej przyspieszeń drgań oraz do artykułu w którym określono wpływ czasu badania na temperaturę węzła łożyskowego.

Rozdział 4 „Zastosowanie metod cyfrowego przetwarzania sygnałów wibroakustycznych w badaniach łożysk" (str. 67-90) zawiera informacje o obiekcie badań jakim jest łożysko stożkowe typu 513-716A. Ponadto przedstawione są w nim informacje o doborze próby badawczej, wynikach badań wybranego zestawu łożysk przeprowadzonych w PBF Kraśnik S.A. W rozdziale tym Doktorant zamieszcza bardzo ciekawe zestawienie badań wstępnych łożysk dostarczanych przez producenta

o różnym stanie technicznym i badań tych samych łożysk na stanowisku referencyjnym wykorzystywanym przez producenta jako urządzenia referencyjnego. Jak wynika z przedstawionych wyników 12,5% łożysk jest błędnie klasyfikowanych. Z porównania tego wynika, że tematyka podjęta w rozprawie jest bardzo istotna i ważna zarówno z punktu widzenia producenta jak i finalnego użytkownika. W dalszej części rozdziału Doktorant szczegółowo opisuje budowę stanowiska badawczego, podaje informacje na temat toru pomiarowego, sposobu rejestrowania i przetwarzania sygnałów wibroakustycznych i emisji akustycznej. W ostatnim podrozdziale 4.4 „Wyniki podstawowej parametryzacji sygnałów WA – usuwanie redundancji" Doktorant dokonał trzyetapowej selekcji miar, opisujących stan łożysk tocznych. Z opisanych pierwotnie 276 miar, wskazał 8 miar sygnałów wibroakustycznych, które pozwalają na jednoznaczną klasyfikację stanu technicznego łożysk.

W kolejnym **5 rozdziale „Rozwój technik i metod cyfrowego przetwarzania sygnałów wibroakustycznych"** (str. 91-113) Doktorant opisał ideę opracowanej metody badań łożysk „metoda uderzeń w pasmach rezonansowych struktury" (ISRB z ang. - Impacts in the Structure Resonance Bands). Dość szczegółowo opisał algorytm cyfrowego przetwarzania sygnałów oraz zaproponował miary oceny zarejestrowanych sygnałów. W rozdziale tym Autor zamieścił również wyniki badań analizowanych łożysk z wykorzystaniem zaproponowanej metody. Ponadto zamieszczone zostały wybrane wyniki badań, będące rezultatem opracowanej metody. Należy podkreślić, że pełne zestawienie wyników badań zostało zamieszone w załączniku nr 5, który pozwala czytelnikowi na pełne zapoznanie się z rezultatami opracowanej metody.

Rozdział 6 pracy **„Reklasyfikacja łożysk – zestaw B"** (str. 114-124) dotyczy weryfikacji 30% łożysk dla których zaproponowana wcześniej klasyfikacja w płaszczyźnie a_{RMS}-f_{RICE} nie była jednoznaczna. W rozdziale tym zamieszczone jest również porównanie klasyfikacji łożysk przeprowadzonej w PBF Kraśnik S.A. i klasyfikacji przeprowadzonej na stanowisku Laboratorium Diagnostyki Systemów Politechniki Poznańskiej.

Ostatni zasadniczy rozdział pracy **„Podsumowanie i wnioski"** zawiera wnioski ogólne dotyczące analizowanego zagadnienia, wnioski poznawcze i utylitarne, a także przesłanki do dalszych prac.

Na końcu rozprawy (str. 129-134) zamieszczony jest spis literatury, który łącznie obejmuje 151 pozycji w tym 12 pochodzących z źródeł internetowych. Zaledwie 15 pozycji cytowanej literatury napisanych jest w języku polskim, pozostałe zaś pochodzą z renomowanych czasopism międzynarodowych. Co istotne załączony wykaz literatury zawiera, aż 9 pozycji, w których Autor rozprawy jest jednym ze współautorów.

Ocena merytoryczna rozprawy

Oceniana rozprawa dotyczy aktualnego tematu badawczego, wpisującego się w dyscyplinę naukową, w której realizowana jest rozprawa doktorska. Diagnostyka poprodukcyjna, nie tylko łożysk tocznych, jest niezwykle istotnym elementem procesu produkcyjnego, decydującego o pozycji producenta na rynku. Wysokie wymagania odbiorców łożysk tocznych wymuszają utrzymywanie produkcji na wysokim poziomie, co wymaga stosowania procedur kontrolnych / diagnostycznych gwarantujących spełnienie oczekiwań odbiorcy. Z punktu widzenia producenta konieczne jest zatem posiadanie relatywnie prostych i tanich metod oceny stanu technicznego oferowanych produktów.

Rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Jakubka stanowi spójną logiczną całość, zawartość poszczególnych rozdziałów jest kompletna, nie wymaga uzupełnień i jest logicznie z sobą powiązana.

Doktorant po krótkim wprowadzeniu w tematykę rozprawy, bardzo szeroko opisał metody jak i techniki analizy sygnałów wykorzystywane przy ocenie stanu technicznego łożysk tocznych w oparciu o analizę literatury. Następnie, szeroko opisał zagadnienia związane z poprodukcyjnym testowaniem łożysk tocznych, zwracając uwagę na ograniczenia i uwarunkowania. Co bardzo istotne, w rozdziale tym Autor nie ograniczył się tylko do analizy literatury, ale również odwołał się do własnych publikacji.

Następnie, na podstawie przeprowadzonych badań na specjalnie opracowanym stanowisku badawczym, zaproponował do oceny stanu technicznego łożysk tocznych współautorską (opracowaną razem z promotorem) metodę uderzeń w pasmach rezonansowych struktury łożysko-oprawa-stanowisko (*ISRB - Impacts in the Structure Resonance Bands*). Następnie na podstawie przeprowadzonych badań udowodnił jej wyższość nad metodami stosowanym obecnie do oceny poprodukcyjnej łożysk tocznych.

Oceniana rozprawa doktorska zawiera bardzo szeroki zakres badań, który pozwolił Doktorantowi na wnikliwą i szeroką analizę problemu badawczego. Należy

również podkreślić, iż uzupełnieniem rozprawy są załączniki, które dokumentują przeprowadzenie szczegółowych analiz zarejestrowanych sygnałów.

W mojej opinii, przedstawiona do oceny rozprawa doktorska zawiera bardzo szeroki zakres badań i analiz, znacznie przekraczający obecnie obowiązujące standardy. Wydaje się, że Autor rozprawy podszedł do realizowanego tematu zbyt szeroko. Jak sam zaznacza we wnioskach, (str. 125) analizował aż 282 miar sygnału wibroakustycznego (na str. 83, podał informacje, że analizowanych było 276 miar) wyłonił 8, które uznał za potencjalnie przydatne do rozszerzonej klasyfikacji łożysk. W mojej ocenie, liczbę rozpatrywanych miar można było na wstępie znacznie zawęzić, na podstawie analizy literatury jak i wcześniejszych badań Autora i Promotora. W obecnej formie oceniana rozprawa doktorska, fragmentami przypomina bardziej encyklopedię niż krytyczną analizę stanu wiedzy na dany temat.

Pewnym mankamentem wydaje się brak wyraźnego porównania czasochłonności proponowanej metody diagnozowania poprodukcyjnego łożysk z metodami stosowanymi obecnie. Celowe byłoby również wyraźne podkreślenie możliwości szerszego wykorzystania proponowanej metody do diagnostyki poprodukcyjnej innych typów łożysk tocznych, a także ewentualnie wskazanie ograniczeń zaproponowanej metody.

Praca napisana jest poprawnym językiem, w trakcie jej czytania zauważyłem kilka literówek, przykładowo:

- str. 9 (w. 15d.) jest „rozszerzona", powinno być „rozszerzoną";
- str. 11 (w. 1d.) jest „mała", powinno być „małą";
- str. 14 (w. 1d.) jest „opcja" powinno być „opcją";
- str. 18 (w. 6d.) jest „ograniczeni" powinno być „ograniczeniem";
- str. 64 (w. 1g.) jest „obrotowa" powinno być „obrotową";
- str. 67, dwie literówki w tytule rozdziału „Zastosowanie metod cyfrowego przetwarznia sygnałów wibroaksutycznych w badaniach łożysk";
- str. 68 (w. 4d.) jest „testó" powinno być „testów;
- str. 74 (w. 12d.) jest „równą w 1465";
- str. 91 (w. 7d.) jest „odniesieni" powinno być „odniesieniu";
- str. 94 (w. 1g.) jest „szczytowa" powinno być „szczytową";
- str. 95 (w. 4d.) jest „ze" powinno być „że";
- str. 103 (w. 8g.) jest „skuteczna" powinno być „skutecznej";

- str. 114 (w. 14d.) jest „Czerwona" powinno być „Czerwone";
- str. 123 (w. 9g.) jest „mona" powinno być „można".

Podsumowując ocenianą rozprawę stwierdzam, że zawiera ona oryginalne i wartościowe wyniki dotyczące oceny poprodukcyjnej łożysk tocznych. Przedstawione w niej badania zostały wykonane na oryginalnym stanowisku badawczym, w warunkach gwarantujących powtarzalność wyników. Doktorant dowiódł, że ponad 10% łożysk klasyfikowanych obecnie przez producenta obarczonym jest błędem, co dowodzi wyższości zaproponowanej metodyki w stosunku do metod stosowanych obecnie. Poziom analizy i prezentacji wyników w pracy świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia prac naukowych z wykorzystaniem nowoczesnych technik pomiarowych jak i oprogramowania naukowo-inżynierskiego.

Konkluzja

Zawarte w mojej recenzji nieliczne uwagi krytyczne nie wpływają na ogólną, bardzo pozytywną ocenę rozprawy, ponadto mogą mają one charakter dyskusyjny.

Biorąc, zatem pod uwagę omówione i ocenione wyżej rezultaty rozprawy doktorskiej stwierdzam, że rozprawa doktorska **mgr inż. Bartosza Jakubka pt. „Metodyka testowania poprodukcyjnego łożysk stożkowych z zastosowaniem technik cyfrowego przetwarzania sygnałów wibroakustycznych"**, spełnia wymogi stawiane pracom na stopień doktora nauk technicznych, w rozumieniu art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (*Dz. U. nr 65, poz.595 z późniejszymi zmianami*) oraz ustawy z dnia 20 lipca 2018r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (*Dz. U. 2018 poz. 1668*). Wnioskuję zatem o **dopuszczenie mgr inż. Bartosza Jakubka do publicznej obrony** przedstawionej rozprawy doktorskiej.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę sposób realizacji badań, zastosowaną metodykę analizy uzyskanych wyników, jak również formę ich prezentacji **wnioskuję o wyróżnienie ocenianej rozprawy doktorskiej.**