

Kraków, 17. 07. 2023

Dr hab. inż. Joanna Iwaniec, prof. AGH
Katedra Robotyki i Mechatroniki
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
Email: jiwaniec@agh.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Arkadiusza Smagały

pod tytułem:

**“Diagnostyka skośnego łożyska tocznego za pomocą analizy rekurencyjnej”
('Diagnosis of an angular contact ball bearing by recurrence analysis')**

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Formalną podstawą opracowania recenzji jest pismo Pana dr hab. inż. Jarosława Bieniasia, Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej z dnia 21 kwietnia 2023 r. wraz z umową.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została napisana pod opieką naukową Pana dr hab. inż. Krzysztofa Kęcika, profesora Politechniki Lubelskiej. Tematyka recenzowanej rozprawy mieści się w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie: **inżynieria mechaniczna**.

2. Ocena aktualności tematu rozprawy doktorskiej

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy ważnego i aktualnego zagadnienia: metod diagnostyki i monitorowania stanu technicznego łożysk tocznych. Uszkodzenia łożysk tocznych są jednym z najczęściej występujących rodzajów uszkodzeń maszyn wirnikowych stosowanych m.in. w lotnictwie, energetyce i transporcie. Wszelkie niedokładności obróbki technologicznej i montażu elementów łożysk maszyn wirnikowych, a także błędy obsługi i eksploatacji prowadzą do uszkodzenia węzłów łożyskowych, a w efekcie do awarii całej maszyny. Układ wał maszyny wirującej – łożysko jest uważany za najbardziej odpowiedzialny zespół odzwierciedlający stan techniczny maszyny.

Powszechnie stosowaną metodą zapobiegania awariom maszyn i urządzeń jest planowa wymiana łożysk, które przepracowały określoną liczbę cykli. Praktyka pokazuje jednak, że duża liczba łożysk tocznych demontowana jest zbyt wcześnie, wskutek braku oceny rzeczywistego stanu technicznego. Z drugiej strony, wiele prac badawczych opublikowanych

w ostatnich latach dotyczy metod monitorowania stanu dynamicznego węzłów łożyskowych umożliwiających prowadzenie remontów uwarunkowanych stanem maszyny i zaniechanie remontów zapobiegawczych lub poawaryjnych. Praktyka przemysłowa wskazuje, że stosowanie „klasycznych” metod diagnostyki łożysk często nie umożliwia jednoznacznego określenia stanu badanego łożyska. Problem opracowania efektywnych metod diagnostycznych, umożliwiających wykrywanie defektów łożyska już na etapie ich powstawania nadal pozostaje otwarty.

Uważam, że temat pracy doktorskiej jest aktualny pod względem naukowym, jak również pod względem użytecznym. Tematyka rozprawy jest ściśle związana z rozwiązywaniem aktualnych problemów diagnozowania i monitorowania stanu technicznego łożysk tocznych.

3. Przegląd treści pracy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Arkadiusza Smagały została napisana w języku polskim i liczy 145 stron. Składa się z dziewięciu rozdziałów, bibliografii oraz streszczeń w języku polskim i angielskim. Śledzenie rozważań ułatwia zawarty w początkowej części pracy wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów stosowanych przez Autora.

Rozdział pierwszy zawiera krótkie wprowadzenie w zagadnienia związane z diagnostyką i monitorowaniem stanu technicznego łożysk.

W rozdziale drugim Autor przedstawił uzasadnienie podjęcia tematu pracy oraz krótką dyskusję jego aktualności, sformułował cel i tezę pracy oraz nakreślił zakres przeprowadzonych prac badawczych. Cel pracy został jasno sprecyzowany, a zaproponowany zakres prac w pełni odpowiada tematowi rozprawy. Teza rozprawy doktorskiej w brzmieniu: *„Możliwa jest diagnostyka skośnego łożyska tocznego za pomocą wybranych wskaźników rekurencyjnych”*, w mojej opinii, jest tezą nietrywialną, a wykazanie jej słuszności ma zarówno aspekt poznawczy jak i duże znaczenie praktyczne.

W rozdziale trzecim Autor przedstawił budowę i zasadę działania łożysk tocznych oraz ich klasyfikację ze względu na kształt elementów tocznych i nominalny kąt działania. W dalszej części rozdziału przedstawił różne rodzaje uszkodzeń łożysk najczęściej spotykane w procesie eksploatacji maszyn i urządzeń, a także krótko omówił mechanizmy ich powstawania.

Rozdział czwarty poświęcony został wnikliwemu przeglądowi znanych z literatury metod diagnostycznych łożysk. Najwięcej uwagi poświęcił Autor najczęściej stosowanym w warunkach przemysłowych metodom wibroakustycznym: szczegółowo omówił algorytmy i własności m.in. metod analizy widmowej, analizy obwiedni oraz metody impulsów uderowych.

W rozdziale piątym przedstawione zostały metody umożliwiające badanie własności rekurencyjnych układów fizycznych. Autor omówił zagadnienia związane z koniecznością rekonstrukcji przestrzeni fazowej na podstawie przeprowadzonych pomiarów przebiegów

czasowych wybranej wielkości fizycznej (np. przyspieszeń drgań). Przedstawił algorytmy metod umożliwiających wyznaczenie parametrów diagramu rekurencyjnego: minimalnego wymiaru przestrzeni fazowej m i wartości opóźnienia τ , a także przeprowadził rozważania dotyczące wyboru wartości parametru ε . W dalszej części rozdziału przedstawione zostały definicje miar analizy RQA oraz możliwości zastosowania analizy RQA do analizy całego zmierzonego sygnału lub jego kolejnych fragmentów.

W rozdziale szóstym Autor zaprezentował metodykę przeprowadzonych badań: uzasadnił powody wyboru skośnego łożyska tocznego B7208CTAP4 jako obiektu badań, przedstawił częstotliwości charakterystyczne badanego łożyska (nieuszkodzonego) dla wybranych częstotliwości obrotowych oraz różnej liczby elementów tocznych (11, 12, 13 i 14 kulek). W dalszej części rozdziału omówił sposób wykonania defektów poszczególnych komponentów łożyska: pierścienia zewnętrznego, pierścienia wewnętrznego i elementu tocznego (kulki), a także zaprezentował stanowisko badawcze, na którym przeprowadzone zostały pomiary prędkości drgań. Autor szczegółowo opisał warunki przeprowadzania pomiarów: m.in. sposób mocowania i warunki pracy obiektu badań, metodę kalibracji czujnika pomiarowego, przyjętą częstotliwość próbkowania mierzonego sygnału.

Rozdział siódmy poświęcony został wynikom badań stanu technicznego skośnego łożyska kulkowego B7208CTAP4 z uszkodzeniami. Do analizy zmierzonych odpowiedzi badanego układu (przebiegów czasowych prędkości drgań) zastosowane zostały klasyczne metody diagnostyki łożysk tocznych: tzw. badanie ogólnego poziomu drgań oraz analiza obwiedni sygnału pomiarowego. Badania przeprowadzone zostały dla łożyska z 13-toma elementami tocznymi (kulkami), przy nieruchomym pierścieniu zewnętrznym, pierścieniu wewnętrznym obracającym się z prędkością 1800 obr/min, dla stałej wartości obciążenia osiowego wynoszącej 230 N. Eksperymenty identyfikacyjne powtórzono dla różnych rodzajów i rozmiarów uszkodzeń: defektu pierścienia zewnętrznego o rozmiarze 0,25 mm, 0,5 mm, 0,75 mm i 1 mm, defektu pierścienia wewnętrznego o rozmiarze 0,25 mm, 0,5 mm, 0,75 mm i 1 mm oraz defektu punktowego kulki o rozmiarze 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm oraz 2,25 mm. Badania przeprowadzono w trzech pasmach częstotliwości: 50 ÷ 300 Hz (pasmo niskich częstotliwości), 300 ÷ 1800 Hz (pasmo średnich częstotliwości) oraz 1800 ÷ 10 000 Hz (pasmo wysokich częstotliwości). Jako wartości referencyjne przyjęto wartości RMS prędkości drgań łożyska nieuszkodzonego wyznaczone w poszczególnych analizowanych pasmach częstotliwości.

Rozdział ósmy jest jednym z najważniejszych rozdziałów pracy: zawiera wyniki analiz przeprowadzonych z zastosowaniem metody diagramów rekurencyjnych i analizy RQA dla przebiegów czasowych prędkości drgań łożyska nieuszkodzonego i łożyska z wadami poszczególnych elementów. Po przeprowadzeniu standaryzacji analizowanych sygnałów, Autor wyznaczył diagramy rekurencyjne dla analizowanych przypadków uszkodzeń. Zastosowanie tych samych parametrów m i τ dla wszystkich sygnałów oraz założenie $RR = 2\%$ ułatwiło przeprowadzenie analizy porównawczej uzyskanych wyników. Dalsze etapy badań obejmowały przeprowadzenie analizy RQA oraz lokalnej analizy RQA (z zastosowaniem metody okna ruchomego) oraz określenie miar RQA wrażliwych na

analizowane rodzaje uszkodzeń. Ostatni etap przeprowadzonych badań obejmował analizę wpływu obciążenia łożyska na jakość i zawartość informacyjną diagramów rekurencyjnych oraz wartości miar RQA.

W rozdziale dziewiątym zamieszczono syntetyczne podsumowanie przeprowadzonych prac badawczych i uzyskanych wyników oraz wnioski, potwierdzające realizację wyznaczonego celu naukowego pracy. Zaproponowano kierunki prowadzenia dalszych prac badawczych.

Spis literatury, do której odwołuje się Autor w treści pracy, liczy 131 pozycji, głównie z zakresu diagnostyki i monitorowania stanu technicznego łożysk tocznych, metod przetwarzania sygnałów stosowanych w diagnostyce maszyn i urządzeń oraz metod analizy własności rekurencyjnych. Są to głównie prace opublikowane w renomowanych czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym oraz w mniejszym zakresie prace opublikowane w materiałach konferencyjnych i książki.

3. Ocena merytoryczna, wyniki pracy i ich ocena

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Arkadiusza Smagały zawiera nowe osiągnięcia w zakresie diagnostyki stanu technicznego skośnych łożysk tocznych z zastosowaniem metod diagramów rekurencyjnych i analizy RQA. Treść pracy jest podporządkowana przyjętemu celowi naukowemu. Przedłożona rozprawa jest wartościowym opracowaniem naukowym, zawierającym wyniki badań istotne zarówno z naukowego jak i użytkowego punktu widzenia.

Za główne zalety i osiągnięcia opiniowanej rozprawy uważam:

1. Przeprowadzenie obszernych badań literaturowych dotyczących metod diagnozowania i monitorowania stanu technicznego łożysk tocznych.
2. Opracowanie metodyki badań doświadczalnych i wykonanie typoszeregu elementów uszkodzonych (pierścieni zewnętrznych, pierścieni wewnętrznych i kulek) skośnego łożyska kulkowego B7208CTAP4.
3. Przeprowadzenie eksperymentów identyfikacyjnych dla łożysk nieuszkodzonych i uszkodzonych.
4. Przeprowadzenie diagnostyki rozpatrywanych łożysk uszkodzonych i nieuszkodzonych klasycznymi metodami diagnostycznymi: tzw. badania ogólnego poziomu drgań oraz metodą obwiedni sygnału pomiarowego.
5. Przeprowadzenie analizy zmierzonych odpowiedzi łożyska nieuszkodzonego i łożyska z wprowadzonymi uszkodzeniami z zastosowaniem metod diagramów rekurencyjnych i analizy RQA.
6. Eksperymentalne określenie miar RQA wrażliwych na analizowane rodzaje uszkodzeń.
7. Przeprowadzenie analizy wpływu liczby kulek oraz obciążenia łożyska na zawartość informacyjną wyznaczanych diagramów rekurencyjnych i wartości miar analizy RQA.

Podczas analizy treści rozprawy nasuwają się następujące uwagi dyskusyjne:

1. W rozdziale pierwszym, na stronie 1, Autor stwierdza, że „*Stopień uszkodzonego łożyska dyskwalifikuje maszynę z dalsze pracy*”. Co Autor rozumie pod pojęciem „stopnia uszkodzonego łożyska”?
2. Na stronie 18, Autor stwierdza, że metoda diagramów rekurencyjnych „wymaga bardzo krótkiego sygnału pomiarowego”, co nie jest prawdą.
3. Co Autor rozumie pod pojęciem „metody rekurencyjnej” i „zaawansowanej analizy zarejestrowanych sygnałów” (str. 18)?
4. Na str. 52 Autor stwierdza, że znane z literatury metody rekonstrukcji trajektorii fazowej układu na podstawie zmierzonego przebiegu czasowego pojedynczej wielkości fizycznej (np. przyspieszenia) „pozwalają na odróżnienie badanego szeregu czasowego od szumu lub pozwalają na wykrycie pewnych odstępstw (zakłóceń) w sygnałach deterministycznych”. Proszę o wyjaśnienie powyższego stwierdzenia.
5. Na wykresach prezentowanych na Rys. 5.1 brakuje opisów osi (informacji o prezentowanych wielkościach fizycznych i jednostkach).
6. Na str. 53 (linia 3) podane odwołanie do literatury jest błędne.
7. Na str. 53 (w przedostatnim akapicie), zdanie: „W praktyce jako m przyjmuje się pierwsze lokalne minimum funkcji FNN (lub punkt, w którym ta funkcja staje się stabilna)” jest bardzo niejasne. Pierwsza część zdania wydaje się odnosić do metody wyznaczania opóźnienia czasowego τ metodą poszukiwania pierwszego lokalnego minimum funkcji MI (*mutual information function*). Sformułowanie „punkt, w którym ta funkcja staje się stabilna” jest niejasne i wymaga wyjaśnienia.
8. Co oznacza sformułowanie: „diagram rekurencyjny stanowi obraz stanów czasów” (str. 54, ostatni akapit).
9. Co autor rozumie pod pojęciem „występowania nieregularnych zmian w układzie”? (str. 55, nad Rys. 5.2).
10. Sformułowanie „gdy wektor x_i znajduje się dostatecznie blisko wektora x_j ” (str. 56, pierwszy akapit) jest nieprecyzyjne.
11. Czy odwołanie do literatury [26] na str. 56 jest prawidłowe?
12. Czy wzór opisujący miarę DET jest prawidłowy? W pracy [76] Autorzy proponują inny wzór.
13. Opis własności jednego z wariantów metody RQA (str. 60, drugi akapit): „Według pracy [85], druga metoda działa bardziej niezawodnie, gdyż zachowanie deterministyczne można wykryć na większą skalę uzyskując przy tym solidniejsze wartości wskaźników rekurencyjnych” jest nieprecyzyjny i niejasny.
14. Zdanie: „W wyniku badań wstępnych sporządzono zbiór czynników stałych i zmiennych, które przy udziale niepożądanych czynników zakłócających pozwoliły otrzymać czynniki wynikowe” (str. 63, nad Rys. 6.2) jest niezrozumiałe.

Uwagi krytyczne odnoszące się do strony edytorskiej i redakcyjnej:

1. W pierwszych rozdziałach pracy (1-3) Autor stosuje nazwę wielkości fizycznej „przyśpieszenie” zamiast „przyspieszenie”.
2. Na stronie 25 (linia 8) podany numer rysunku jest błędny (Autor odwołuje się do Rys. 3.4a, a nie Rys. 3.1a).
3. W pracy można znaleźć dość częste błędy stylistyczne i językowe, które zaznaczone zostały w recenzowanym egzemplarzu pracy. Niektóre z nich zestawiono w tabeli poniżej.

Strona, linia	Jest	Powinno być
str. 10, linia 1	badan diagnostyki	badan diagnostycznych
str. 14, linia 17	... metod diagnostycznych, które potrafią zdiagnozować	... metod diagnostycznych, które umożliwiają zdiagnozowanie
str. 14, linia 7 od dołu strony	wielkości współczynników wagowych	wartości współczynników wagowych
str. 16, linia 3 od dołu strony	maszyn oraz obiektów	maszyn oraz urządzeń technicznych
str. 18, linia 22	Metoda ta może wykryć	Metoda ta umożliwia wykrywanie
str. 20, linia 12	kształtu, ilości i sposobu ułożenia elementów tocznych	kształtu, liczby i sposobu ułożenia elementów tocznych
str. 22, linie 35 i 36	wykazują dłuższą trwałość	wykazują większą trwałość

Należy podkreślić, że rozprawa została opracowana bardzo starannie, a wymienione powyżej drobne niedociągnięcia i błędy nie mają wpływu na zrozumienie jej treści.

4. Ocena końcowa

Opiniowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Arkadiusza Smagały stanowi istotny wkład w rozwój metod diagnostyki i monitorowania stanu technicznego łożysk tocznych. Przeprowadzone przez Autora badania eksperymentalne zostały starannie zaplanowane i przygotowane m.in. poprzez wykonanie typoszeregu elementów uszkodzonych (pierścieni zewnętrznych, pierścieni wewnętrznych i kulek) obiektu badań - skośnego łożyska kulkowego B7208CTAP4. Autor wykazał, że zastosowanie metod diagramów rekurencyjnych i analizy RQA umożliwia przeprowadzenie jednoznacznej diagnostyki stanu technicznego łożysk tocznych, nawet w przypadku niewielkich rozmiarów uszkodzenia.

Uważam, że sposób realizacji badań naukowych, których rezultaty przedstawiono w recenzowanej rozprawie, a także dorobek naukowy liczący 9 publikacji w czasopismach naukowych (w tym 2 artykuły opublikowane w czasopismach z listy JCR) oraz 1 patent

świadczą o dobrym przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia działalności naukowo-badawczej.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Arkadiusza Smagały spełnia warunki określone w **Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki**. Wnoszę o przyjęcie recenzowanej rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Joanna Szwamiec