

dr hab. inż. Łukasz Jankowski, prof. IPPT PAN  
Zakład Technologii Inteligentnych  
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN  
ul. Pawińskiego 5B  
02-106 Warszawa  
email: [ljank@ippt.pan.pl](mailto:ljank@ippt.pan.pl)

Warszawa, 13 lipca 2023 r.

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Arkadiusza Smagały**  
**pt. „Diagnostyka skośnego łożyska tocznego za pomocą analizy**  
**rekurencyjnej”**

**1. Podstawa opracowania**

Podstawą opracowania recenzji jest pismo nr RDN/IM/89/2023 Pana dr. hab. inż. Jarosława Bieniasia, prof. PL, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej, z dnia 21 kwietnia 2023 r. wraz z dołączoną do niego rozprawą doktorską Pana mgr. inż. Arkadiusza Smagały pt. „Diagnostyka skośnego łożyska tocznego za pomocą analizy rekurencyjnej”.

Praca powstała w Katedrze Mechaniki Stosowanej Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej. Promotorem Doktoranta jest Pan dr hab. inż. Krzysztof Kęcik, prof. PL. Większość prac przedstawionych w rozprawie została zrealizowana w ramach współpracy pomiędzy Politechniką Lubelską a Fabryką Łożysk Tocznych – Kraśnik S.A., gdzie Doktorant jest zatrudniony jako kierownik Oddziału Konstrukcji i Badań Łożysk.

**2. Podstawowe dane o Kandydacie do stopnia doktora**

Pan Arkadiusz Smagała posiada dwa tytuły zawodowe magistra:

- 1) w roku 2008 uzyskał tytuł magistra inżyniera po ukończeniu studiów na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej;
- 2) w roku 2016 uzyskał tytuł magistra po ukończeniu studiów na kierunku Zarządzanie na Wydziale Zarządzania Politechniki Lubelskiej.

Ponadto Doktorant uzyskał dodatkowo tytuł licencjata i ukończył szereg studiów podyplomowych:

- w roku 2011 uzyskał tytuł licencjata z Informatyki na wydziale Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej (UMCS) w Lublinie;
- w roku 2013 ukończył podyplomowe studia pedagogiczne na wydziale Podstaw Techniki Politechniki Lubelskiej;
- w roku 2018 ukończył podyplomowe studia Symulacje Komputerowe dla Inżynierów na wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej;
- w roku 2020 ukończył podyplomowe studia Analiza Danych na Wydziale Matematyki, Fizyki i Informatyki UMCS w Lublinie.

Na podstawie dostępnych recenzentowi dokumentów można przyjąć, że Kandydat nie ubiegał się wcześniej o nadanie stopnia naukowego doktora.

Od roku 2010 doktorant jest pracownikiem Fabryki Łożysk Tocznych – Kraśnik S.A. (FŁT), gdzie jego kariera zawodowa kształtowała się następująco:

- w latach 2010–2017 był zatrudniony na stanowisku konstruktora w sekcji konstrukcyjno-technologicznej pomocy pomiarowych w dziale Głównego Technologa;
- w latach 2017–2018 był zatrudniony na stanowisku konstruktora w Oddziale Konstrukcji i Badań Łożysk;
- od roku 2018 Doktorant jest kierownikiem Oddziału Konstrukcji i Badań Łożysk w Centrum Badań i Rozwoju FŁT.

Studia doktoranckie na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej Kandydat rozpoczął w roku akademickim 2018/2019.

### **3. Cel rozprawy i zasadność podjęcia tematu**

Główny cel swojej pracy Doktorant formułuje następująco (str. 18):

*Głównym celem pracy jest analiza oraz weryfikacja możliwości zastosowania metod rekurencyjnych do diagnostyki skośnego łożyska tocznego.*

W rozprawie podane są również cel szczegółowy i cel finalny (str. 19):

*Celem rozprawy było również wyselekcjonowanie wskaźników rekurencyjnych, które mogą posłużyć do identyfikacji uszkodzeń w łożyskach.*

*Celem finalnym jest podniesienie skuteczności diagnostyki stanu łożyska w porównaniu do powszechnie stosowanych metod.*

Rozprawa zawiera również tezę sformułowaną w postaci następującego stwierdzenia (str. 19):

*Możliwa jest diagnostyka skośnego łożyska tocznego za pomocą wybranych wskaźników rekurencyjnych.*

Cele i teza pracy zostały sformułowane poprawnie i precyzyjnie. Temat wpisuje się w ważny i intensywnie rozwijany obszar światowej nauki i techniki związany z nieniszczącymi technikami monitorowania i oceny stanu technicznego metodami analizy sygnałów (ang. condition monitoring).

Praktyczną motywacją pracy jest potrzeba wiarygodnych i szybkich wskaźników uszkodzenia łożyska, które w zastosowaniach przemysłowych pozwalałyby na uniknięcie zarówno przedwczesnej jego wymiany, jak i uszkodzenia maszyny wywołanej eksploatacją łożyska uszkodzonego i zdegradowanego. Podstawowym technicznym wyzwaniem w tym obszarze jest złożony charakter sygnału drganiowego łożyska oraz sposobu w jaki są w nim odzwierciedlone ewentualne uszkodzenia. Specyficzne charakterystyki sygnału świadczące o uszkodzeniu zależą nie tylko od rozmiaru uszkodzenia, ale też od jego umiejscowienia oraz od konstrukcji badanego łożyska i parametrów jego pracy (prędkość obrotowa, obciążenie). Pomimo że istnieje wiele powszechnie stosowanych metod oceny stanu technicznego wykorzystujących sygnały drganiowe, jest to obszar wciąż intensywnie rozwijany.

Problem rozważany w rozprawie recenzent uważa więc za interesujący i aktualny. Jest on ważny zarówno z badawczego, jak i aplikacyjno–przemysłowego punktu widzenia. Podjęcie tak określonej tematyki badań należy uznać za w pełni uzasadnione.

#### **4. Układ rozprawy**

Rozprawa jest sformułowana w języku polskim i liczy 145 stron. Struktura rozprawy jest logiczna, przejrzysta i właściwie dobrana do prezentowanych treści. Zasadnicza jej część zawiera się w Rozdziałach 3–8, które są poprzedzone wykazem najważniejszych symboli i skrótów, krótkimi streszczeniami w języku polskim i angielskim oraz wprowadzeniem w tematykę, cel i zakres rozprawy, a zakończone podsumowaniem, spisem literatury i podstawowymi informacjami o dorobku naukowo–badawczym Doktoranta. Bibliografia liczy 133 pozycje. W tej liczbie znajdują się dwie publikacje autorstwa Doktoranta.

Rozdział 1 rozprawy (*Wstęp*) to – zgodnie z tytułem – zwięzłe, ogólne wprowadzenie do tematyki rozprawy, w tym problematyki trwałości łożysk oraz metod diagnostycznych.

W krótkim, zaledwie trzystronicowym Rozdziale 2 (*Temat, cel i zakres rozprawy*) Doktorant omawia motywację rozprawy, podaje jej cel i tezę oraz zwięzłe charakteryzuje sposób jej realizacji i podstawowe elementy pracy.

Kolejny Rozdział 3 (*Charakterystyka łożysk tocznych*) przedstawia przedmiot pracy: omawia budowę łożysk tocznych i ich rodzaje oraz charakteryzuje ich typowe defekty i uszkodzenia.

Rozdział 4 (*Przegląd wybranych metod diagnostyki łożysk*) to szeroki przegląd literaturowy dotyczący metod diagnostyki i oceny stanu łożysk. Szczególna uwaga jest poświęcona relatywnie wyczerpującemu przeglądowi pięciu wybranych grup metod wibroakustycznych oraz metodom prądowym. Następnie Doktorant charakteryzuje metody wykorzystujące diagramy rekurencyjne oraz ich nieliczne i ograniczone zastosowania w diagnostyce łożysk.

W Rozdziale 5 (*Analiza rekurencyjna*) czytelnik zostaje wprowadzony w metody diagnostyczne wykorzystujące diagramy rekurencyjne. Doktorant przedstawia sposób tworzenia takich diagramów i metody doboru podstawowych parametrów. Bezpośrednia wizualna analiza diagramów ma charakter jakościowy, więc w dalszej części rozdziału wymienionych jest szereg tzw. wskaźników rekurencyjnych, czyli miar wykorzystywanych w celu ilościowej kwantyfikacji diagramów, oraz omówione są możliwe sposoby ich zastosowania.

Rozdział 6 (*Metodyka badań*) poświęcony jest konkretnemu łożysku będącemu przedmiotem badań. Doktorant przedstawia jego parametry techniczne, w tym charakterystyczne częstotliwości, oraz sposób wykonania fizycznych uszkodzeń różnych rozmiarów na trzech elementach (pierścieniu zewnętrznym, wewnętrznym i elemencie tocznym) metodą elektrodrążenia.

Rozdział 7 (*Wyniki badań podstawowych*) przedstawia i podsumowuje wyniki oceny stanu technicznego łożyska nieuszkodzonego i łożysk z wprowadzonymi uszkodzeniami przeprowadzonych z wykorzystaniem klasycznych metod stosowanych w przemyśle: metody analizy wartości skutecznej oraz metody częstotliwościowej analizy obwiedni.

Kluczowym rozdziałem rozprawy jest Rozdział 8 (*Wyniki analizy rekurencyjnej*), w którym Doktorant przedstawia sposób przeprowadzenia oraz wyniki diagnostyki wykonanej metodami analizy diagramów rekurencyjnych. Po standaryzacji sygnału i doborze odpowiednich wartości parametrów, wyniki analizy przedstawione są kolejno dla trzech analizowanych typów uszkodzeń (pierścień zewnętrzny, pierścień wewnętrzny i element toczny). Doktorant przedstawia, interpretuje i porównuje zarówno same diagramy, jak i wyliczone na ich podstawie wartości wskaźników rekurencyjnych. Porównane są wyniki otrzymane dla łożyska nieuszkodzonego oraz łożyska z uszkodzeniami o wzrastającym rozmiarze. Przeanalizowany jest również wpływ liczby elementów tocznych (kulek) oraz wartości siły obciążającej łożysko.

Rozdział 9 (*Podsumowanie, wnioski oraz najważniejsze osiągnięcia rozprawy*) podsumowuje rozprawę oraz przekonująco przedstawia najważniejsze wnioski, oryginalne osiągnięcia i potencjalne kierunki dalszych badań.

## **5. Merytoryczna ocena rozprawy**

Rozprawa doktorska Pana Arkadiusza Smagały poświęcona jest tematowi aktualnemu badawczo, oryginalnemu naukowo i o dużym praktycznym znaczeniu aplikacyjnym. Doktorant poprawnie posługuje się metodyką prowadzenia badań naukowych w swojej dyscyplinie, to jest 1) rozpoczyna pracę od zarysowania szerokiej problematyki i formułuje problem szczegółowy. Następnie 2) omawia wyzwania, uwarunkowania techniczne i literaturę oraz na tym tle przedstawia wybraną specyficzną metodę rozwiązania problemu szczegółowego. Dalej 3) opisany jest konkretny przedmiot badań (łożysko) i metodyka ich prowadzenia. Doktorant kolejno 4) przedstawia i porównuje wyniki analizy prowadzonej metodami klasycznymi oraz metodą zaproponowaną w rozprawie. Finalnie 5) przedstawia wnioski, podsumowuje oryginalne osiągnięcia i opisuje możliwe dalsze kierunki badań. Taki schemat badań, precyzyjnie odzwierciedlony w strukturze rozprawy, pozytywnie świadczy o naukowej dojrzałości Doktoranta.

Tematyka rozprawy uzupełnia i dobrze wpisuje się w intensywnie rozwijany obszar światowej nauki związany z zagadnieniami nieniszczącego monitorowania i oceny stanu technicznego. Jako oryginalne, interesujące i wartościowe osiągnięcia rozprawy recenzent podkreśliłby przede wszystkim:

- Całościowy charakter, dużą systematyczność i precyzję badań. Doktorant uwzględnił trzy możliwe lokalizacje uszkodzenia, szereg jego rozmiarów, różne prędkości obrotowe i wartości obciążenia łożyska. Konsekwentnie przeanalizowanych zostało paręnaście potencjalnych wskaźników uszkodzenia.
- Przekonujące wykazanie przydatności metod diagnostycznych wykorzystujących diagramy rekurencyjne dla celów wiarygodnej oceny i analizy stanu technicznego łożysk tocznych.
- Wyselekcjonowanie wskaźników rekurencyjnych o największej czułości, czyli pozwalających na najbardziej wiarygodną diagnostykę stanu łożyska.
- Szczegółową analizę wrażliwości wyznaczonych wskaźników na warunki pracy łożyska (prędkość obrotowa, wartość siły obciążającej).

Bardzo pozytywne wrażenie sprawia ewidentnie duży nakład pracy niezbędny w celu systematycznego uwzględnienia wielu możliwych modalności metody i uszkodzenia łożyska.

Wartościowy, interesujący i relatywnie wyczerpujący jest również przegląd literatury dotyczącej wibroakustycznych metod oceny stanu łożysk.

## 6. Pytania i uwagi dyskusyjne

Recenzent nie zauważył w rozprawie żadnych większych błędów ani zaniedbań. Przedstawione poniżej uwagi i pytania mają charakter dyskusyjny. W zamierzeniu mają ewentualnie przyczynić się do zwiększenia przejrzystości i walorów poznawczych rozprawy.

- 1) Przedstawione wyniki są wartościowe i bardzo interesujące zarówno badawczo, jak i z punktu widzenia praktycznych zastosowań w przemyśle. Badaniom poddane zostało jednak jedno bardzo konkretne łożysko. Doktorant uwzględnił różne możliwe lokalizacje i rozmiary uszkodzenia, jak również warunki pracy. Na ile jednak ogólne są uzyskane wnioski? Czy można założyć podobne zachowanie wyznaczonych wskaźników dla łożysk innego typu?
- 2) Analiza przydatności wskaźników jest przekonująca, ma jednak charakter raczej jakościowy niż ilościowy. Czy wytypowane wskaźniki można w jakiś sposób znormalizować i wykorzystać do stworzenia pojedynczego wskaźnika zbiorczego, pozwalającego na jednoznaczną, zunifikowaną ocenę stanu łożyska? Taki wskaźnik zbiorczy mógłby mieć różny charakter, na przykład klasyfikatora wykorzystującego sztuczną sieć neuronową.
- 3) Doktorant przydatność wskaźników ocenił na podstawie analizy pewnego zbioru danych pomiarowych. Z uwagi na liczebność i zróżnicowanie tego zbioru wyniki są przekonujące. Czy jednak nie byłoby wskazane wykorzystanie schematu badań typowego dla metod z zakresu uczenia maszynowego: podział pierwotnego zbioru danych na część treningową i testową, wyznaczenie wskaźników i kryteriów na podstawie analizy zbioru treningowego, po czym przeprowadzenie weryfikacji na zbiorze testowym? Takie podejście byłoby wskazane zwłaszcza w wypadku ewentualnego wskaźnika zbiorczego.
- 4) Wykorzystywane w rozprawie diagramy rekurencyjne mają charakter binarny. Wymaga to nieco arbitralnego doboru poziomu odcięcia epsilon (lub wartości wskaźnika RR określającego procentowy udział wartości 1 w całym diagramie).
  - a) Czy wartości wytypowanych wskaźników są czułe względem wskaźnika RR i jak go wyznaczyć w praktyce?
  - b) Czy możliwe byłoby ominięcie tego etapu poprzez wykorzystanie ciągłych diagramów rekurencyjnych (bez ich binaryzacji)? Wydaje się, że większość omówionych w Rozdziale 5.2 wskaźników rekurencyjnych można relatywnie łatwo dostosować do ciągłej postaci diagramu.
- 5) Zdaniem recenzenta okno czasowe wykorzystane w Rozdziale 8.7.1 mogłoby być dłuższe, to znaczy znacznie większe niż 1500 punktów pomiarowych. Pozwoliłoby to wiarygodniej ocenić zmienność analizowanych wskaźników i – być może – umożliwiłoby statystyczną analizę i normalizację ich wartości.
- 6) Rozdział 7.2.4: czy przy zmianie częstości obrotowej z 1800 rpm na 900 rpm nie należałoby odpowiednio zmienić definicji pasm LB, MB i HB?

## 7. Uwagi techniczne i redakcyjne

Rozprawa sformułowana jest w języku polskim. Jej język jest poprawny, czytelny, z jedynie niewielką liczbą błędów literowych. Skład rozprawy jest estetyczny i bardzo staranny. Poniższe uwagi nie mają charakteru merytorycznego, a jedynie techniczno-redakcyjny.

- Na str. 14 znajduje się uwaga: „Z zależności (1.1) wynika, że moment tarcia i poziom hałasu są proporcjonalne do poziomu drgań natomiast odwrotnie proporcjonalne są trwałość i dokładność obrotu.” Wniosek ten jest prawdziwy, niemniej podane jego uzasadnienie jest nieco skrótowe: wynika on nie tyle bezpośrednio z zależności (1.1), co ze współzależności poszczególnych składników (1.1).
- Str. 41: „Na skutek tego działania, otrzymuje się sygnał analityczny  $s(t)$ , którego widmo nie jest już symetryczne względem punktu zero na osi częstotliwości, tylko symetryczne względem częstotliwości środkowej  $f_c$  [71] (Rys. 4.2c)”. Widmo przedstawione na Rys. 4.2c nie wygląda na symetryczne względem  $f_c$ .
- Czy górna granica sumowania w liczniku wzoru (5.6) nie powinna wynosić  $N$  lub  $I_{\max}$ ?
- Wyjaśnienie wskaźników  $T_1$  i  $T_2$  na str. 58 nie jest wystarczająco zrozumiałe. Czym jest wektor  $R_i$ ? Czy jeden z symboli „ $\in$ ” nie powinien być zastąpiony symbolem „ $\subset$ ”?
- Czy sumowanie w liczniku wzoru (5.16) nie powinno być względem indeksu  $j$  zamiast  $i$ ?
- Czy wykresy Rys. 7.1c i Rys. 7.1d nie powinny być zamienione miejscami? Tak mogłyby sugerować większe amplitudy widoczne na Rys. 7.1c.

## 8. Podsumowanie

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Arkadiusza Smagały dotyczy aktualnego i oryginalnego tematu z obszaru nieniszczących technik identyfikacji uszkodzeń i monitorowania stanu technicznego metodami analizy sygnałów. Rozwiązując postawiony problem badawczy Doktorant posłużył się klasyczną metodyką prowadzenia badań naukowych i wykazał się umiejętnością samodzielnego i bardzo systematycznego ich prowadzenia. Osiągnięte wyniki są oryginalne i interesujące dla szerszego środowiska naukowego. Rozprawa zaowocowała publikacjami w czasopismach naukowych i generuje dalsze problemy badawcze, co pośrednio potwierdza jej istotność. Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne mają charakter techniczny i w żaden sposób nie umniejszają wartości pracy.

Recenzowana praca spełnia warunki stawiane formalnie i zwyczajowo rozprawom doktorskim, w szczególności stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy Pana mgr. inż. Arkadiusza Smagały do publicznej obrony.

Wnioskuje również o wyróżnienie pracy. Wniosek ten uzasadniam:

- 1) ponadprzeciętnie szerokim zakresem badań Doktoranta,
- 2) imponującą systematycznością, starannością i dbałością o szczegóły z jaką zostały one przeprowadzone oraz
- 3) istotnością oraz potencjałem badawczym i aplikacyjnym otrzymanych wyników.

Wyróżniającą ocenę pracy potwierdza również:

- Publikacja wyników w wysokopunktowanych międzynarodowych czasopismach naukowych:
  - a. Measurements (Elsevier, 200p MEiN, IF=5.6, lipiec 2023) oraz
  - b. Materials (140p MEiN, IF=3.4, wrzesień 2022).
- Fakt zauważenia wyników Doktoranta przez międzynarodowe środowisko naukowe: opublikowana 10 miesięcy temu (we wrześniowym wydaniu 2022 r. czasopisma Materials) praca Doktoranta zdążyła zgromadzić dotychczas, w ciągu 10 miesięcy od publikacji online, już 5 cytowań obcych.