

Prof. dr hab. inż. Paweł Drożdziel
Katedra Zrównoważonego Transportu
i Źródeł Napędu
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36
20- 618 Lublin
p.drozdziel@pollub.pl

Lublin, 11.06.2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Grzegorza Piotrowicza pt.:
*„Systemy oceny stanu dynamicznego łożysk tocznych za pomocą ustalenia poziomu drgań
generowanych przez łożyska”*

1. Wprowadzenie

Recenzję rozprawy doktorskiej wykonano na podstawie pisma nr MAA-511/63/2025 z dnia 17 kwietnia 2025 r. dra hab. inż. Sławomira Błasiaka, prof. PŚk Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej.

2. Charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pana mgra inż. Grzegorza Piotrowicza pt.: *„Systemy oceny stanu dynamicznego łożysk tocznych za pomocą ustalenia poziomu drgań generowanych przez łożyska”* liczy 184 strony tekstu. W skład rozprawy wchodzi: spis najważniejszych oznaczeń, wstęp, 7 rozdziałów merytorycznych, wnioski z badań, literatura oraz streszczenie w języku polskim i angielskim,

Wykaz cytowanej w rozprawie doktorskiej literatury wynosi 130 pozycji, w tym: 106 publikacji naukowych (monografie, czasopisma i materiały konferencyjne), 5 instrukcji, 2 patenty, 9 norm oraz 8 źródeł informacji pozyskanych z Internetu. Przy czym monografii krajowych jest 12, zaś zagranicznych 6. Należy zwrócić uwagę na fakt, że w wykazie literatury aż 80 publikacji naukowych wydanych jest zagranicą, co stanowi ponad 75% ich całkowitej liczby. Doktorant zacytował także 4 artykuły oraz 1 patent, w których jest współautorem.

Przedstawiona analiza przywoływanej przez Autora rozprawy literatury wskazuje, że oparł On swoje rozważania teoretyczne oraz badania eksperymentalne w głównej mierze na zagranicznej literaturze zagadnienia dotyczącej oceny stanu technicznego łożysk tocznych.

Uwagi krytyczne dotyczące recenzowanej rozprawy doktorskiej, zawierającej: 83 rysunki, 30 tabel oraz 35 wzorów przedstawiono w dalszej części recenzji.

2.1. Wybór problemu badawczego i zakres pracy

Doktorant w swojej rozprawie doktorskiej bardzo dokładnie przedstawił i omówił, powody, dla których zajął się oceną właściwości metrologicznych systemu (stanowiska) pomiarowego służącego do określania stanu technicznego łożysk tocznych, z wykorzystaniem analizy poziomu drgań generowanych przez nie w warunkach przemysłowych.

Doktorant w celu realizacji postawionych celów rozprawy przeprowadził szereg prac koncepcyjnych i symulacyjnych oraz co jest najważniejsze badań eksperymentalnych w warunkach laboratoryjnych. Wykonane przez Autora działania obejmowały także obliczenia matematyczne ukierunkowane na ocenę dokładności określania poziomu drgań generowanych przez łożyska toczne na stanowiskach badawczych.

Biorąc pod uwagę zakres dokonanych oraz opisanych przez Autora rozważań literaturowych, opracowań komputerowych oraz analiz statystycznych wyników przeprowadzonych badań stwierdzam, że zostały one przeprowadzone właściwie i zgodnie z zasadami dociekań naukowych, zaś temat rozprawy doktorskiej mieści się w zakresie dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.

2.2. Ogólna charakterystyka pracy

W rozdziale doktoratu pt. *Wstęp* Autor pokrótce przedstawił historię powstania łożysk oraz ich obecną rolę w inżynierii mechanicznej.

W rozdziale trzecim pt. *Aktualny stan wiedzy* Doktorant opisał czynniki wpływające na występowanie drgań łożysk oraz metody i właściwości metrologiczne przyrządów służących do ich pomiaru. W rozdziale tym zaprezentowano także stosowane parametry sygnału drganiowego oraz omówiono współczesne metody oceny stanu technicznego łożysk tocznych

W kolejnym rozdziale pt. *Cel pracy* Doktorant przedstawił problem badawczy, cele pomocnicze oraz wstępną hipotezę badawczą.

W rozdziale piątym pt. *Rozwiązania konstrukcyjne urządzeń badawczych do pomiaru drgań łożysk kulkowych* Autor omówił najważniejsze podzespoły różnych konstrukcji urządzeń stosowanych do oceny drgań łożysk kulkowych oraz wpływ tych zespołów na dokładność prowadzonych pomiarów.

W rozdziale szóstym rozprawy zatytułowanym *Rozwiązania konstrukcyjne nowo zaprojektowanego systemu do pomiaru drgań łożysk kulkowych* Autor przedstawił i omówił projekt opracowanego stanowiska pomiarowego, który posłużył do badań opisanych w dalszej części doktoratu.

Rozdział siódmy pt. *Przenośny system do oceny poziomu drgań łożysk* prezentuje budowę opracowanego przez Doktoranta systemu do oceny poziomu drgań generowanych w łożyskach tocznych, który według koncepcji Doktoranta może być montowany w różnych stanowiskach badawczych stosowanych w przemyśle.

W rozdziale ósmym zatytułowanym *Wstępne testy systemu (stanowiska) pomiarowego* Autor przedstawił wyniki badań porównawczych autorskiego stanowiska pomiarowego z urządzeniem wzorcowym, które pozwoliły na ocenę jego dokładności i precyzji.

W kolejnym dziewiątym rozdziale pt. *Statystyczne badania porównawcze systemów pomiarowych* w celu oceny wiarygodności i jakości uzyskiwanych wyników na stanowisku badawczym Doktorant przeprowadził badania drgań z wykorzystaniem przenośnego systemu oceny drgań łożysk kulkowych dla różnych systemów pomiarowych.

W ostatnim rozdziale pt. *Wnioski z badań nad systemami do pomiaru drgań łożysk* Autor rozprawy zaprezentował wnioski naukowe i praktyczne, które zostały opracowane na podstawie przeprowadzonych przez niego eksperymentów dotyczących oceny precyzji i dokładności pomiarowej zbudowanego stanowiska (systemu) pomiarowego służącego do oceny drgań łożyska tocznego. Doktorant proponował także kierunki dalszych prac badawczych oraz wykazał, że udowodnił postawioną w pracy hipotezę badawczą.

2.3. Problem badawczy, cele pomocnicze oraz hipoteza badawcza pracy doktorskiej

Doktorant sformułował następujący problem badawczy *Ocena właściwości metrologicznych oryginalnego systemu pomiaru stanu dynamicznego łożysk tocznych za pomocą oceny drgań i szumów.*

Doktorant proponował w doktoracie następującą hipotezę badawczą stwierdzając, że *Uwzględniając właściwości metrologiczne zbudowanego systemu pomiarowego istnieją teoretyczne i praktyczne przesłanki do jego zastosowania w warunkach przemysłowych w celu podniesienia jakości wyprodukowanych wyrobów.*

Celami recenzowanej pracy doktorskiej było:

1. *przeprowadzenie oceny zrealizowanych dotychczas prac teoretycznych i eksperymentalnych oraz ocena stosowanych systemów pomiarowych stanów dynamicznych łożysk tocznych;*
2. *przeprowadzenie analizy stosowanych parametrów wykorzystywanych do pomiaru drgań i szumów łożysk tocznych;*

3. *ocena dotychczas zbudowanego systemu pomiarowego dla potrzeb przemysłu łożyskowego na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych z wykorzystaniem statystyki matematycznej;*
4. *określenie właściwości użytkowych i metrologicznych nowo zbudowanego stanowiska pomiarowego oraz analiza dotychczas stosowanych procedur i instrukcji ustalenia stanu dynamicznego łożysk;*
5. *wdrożenie zbudowanego systemu w warunkach produkcji oraz opracowanie nowych procedur i instrukcji badawczych.*

Należy stwierdzić, że problem badawczy, w toku przeprowadzonych eksperymentów, został zrealizowany a postawiona hipoteza badawcza zweryfikowana i udowodniona przez Doktoranta. W mojej opinii cele w większości zostały zrealizowane, a uwagę dotyczącą jednego z nich zamieściłem w punkcie 3.2 recenzji.

2.4. Metodyka i obiekty badań

Obiektami, przeprowadzonych badań laboratoryjnych, w których określano poziom drgań generowanych przez łożyska toczne były specjalistyczne stanowiska pomiarowe, w tym nowo zbudowane. Zastosowana metodyka badań oraz wykonane analizy statystyczne uzyskanych wyników pomiaru umożliwiły Doktorantowi ustalenie oraz ocenę właściwości użytkowych i metrologicznych poszczególnych stanowisk.

Metodyka badań tego samego łożyska tocznego, w seriach po 50 pomiarów i przy stałych określonych wartościach prędkości obrotowej oraz siły jego docisku, obejmowała pomiar poziomu generowanych przez nie drgań w trzech pasmach częstotliwości. Takie kontrolowane warunki badań umożliwiły potwierdzenie skuteczności zastosowania nowego systemu (stanowiska) pomiarowego w warunkach przemysłowych, co było założeniem realizacji rozprawy doktorskiej.

Chciałbym także w tym miejscu pochwalić Doktoranta za właściwie przygotowany oraz zrealizowany zakres badań wykonanych w celu realizacji założonych celów recenzowanej pracy doktorskiej oraz udowodnienia postawionej hipotezy badawczej. Z pewnością wymagało to od Badacza osobistego zaangażowania, co pozwala stwierdzić, że potrafi On rozwiązywać złożone problemy naukowo-techniczne.

2.5. Oryginalność pracy

Oryginalną wartością recenzowanej rozprawy doktorskiej było sprawdzenie czy nowo opracowany przez firmę produkującą łożyska toczne system (stanowisko) pomiarowy służący do oceny poziomu ich drgań przy uwzględnieniu jego najważniejszych właściwości metrologicznych, może być zastosowany w warunkach przemysłowych.

Jest to istotne z punktu widzenia poprawy jakości produkcji łożysk tocznych oraz diagnozowania ich stanu technicznego w urządzeniach o wysokich wymaganiach eksploatacyjnych dotyczących przede wszystkim niezawodności i bezpieczeństwa działania.

Należy stwierdzić, wykonane przez Doktoranta analizy i badania wykazały, że oceniany system (stanowisko) spełnia wymagania stawiane w przemyśle dotyczące monitorowania stanu technicznego w stanach dynamicznych łożysk tocznych.

3. Uwagi krytyczne

3.1. Uwagi o charakterze edycyjnym

Po pierwsze w tekście rozprawy występują liczne błędy łamania tekstu. Dla przykładu tzw. „wiszące wiersze” można znaleźć na stronach: 25, 36, 49, 58, 61, 84, 90, 114, 135, itd.

Kolejny zbiór uwag o charakterze edycyjnym dotyczy błędów językowych i stylistycznych występujących w recenzowanej rozprawie doktorskiej.

Dla przykładu na końcu strony 23 możemy przeczytać *Wadą tego sposobu pomiaru jest fakt, że czujniki te zaczytują nie tylko drgania generowane przez łożysko, ale także tło, czyli drgania pochodzące z maszyny*. Proszę powiedzieć, jak czujniki zaczytują drgania?

Kolejnym przykładem błędów językowych jest zdanie ze strony 24 *Po chwilowym zachłśnięciu nową technologią pomiaru, wszyscy światowi producenci (nawet SKF, który mocno był zaangażowany w upowszechnianie pomiaru laserowego) łożysk, kontrolę poziomu drgań generowanych przez łożyska powierzyli czujnikom kontaktowym*. Rodzi się pytanie, dlaczego tak się stało?

Kolejna moja uwaga związana ze stylem użytego języka technicznego dotyczy zdania ze strony 34 (piąty wiersz pod opisem wzoru 8) *W diagnostyce maszyn wartość RMS jest często używana jako wskaźnik ogólnego stanu zdrowia maszyny*. Proszę powiedzieć, co Autor rozumie jako „zdrowie maszyny”.

Na początku strony 49 możemy przeczytać *Łożyska toczne są kluczowymi elementami w różnorodnych systemach mechanicznych, od maszyn przemysłowych po środki transportu, takie jak pociągi*. Zdanie to jest oczywiste, ale rodzi się pytanie czy tylko do środków transportu zaliczamy pociągi?

Na stronie 52 (5 wiersz od dołu) występuje zdanie *Przykłady zastosowania sztucznych sieci neuronowych do przewidywania amplitud drgań łożysk kulkowych zwykłych są szczegółowo opisane w pracach [53]*. Jest tu oczywisty błąd językowy, gdyż Autor cytuje tylko jeden artykuł.

Kolejne zdanie z błędem możemy odnaleźć na końcu podrozdziału 5.1 na stronie 59 *Dodatkowe wymagania jakie muszą spełniać wrzeczona to pozioma oś obrotu oraz obroty rzędu 1800 rpm*. Skrót rpm jest stosowany, ale w języku angielskim. Polskim odpowiednikiem jest obr/min.

Na stronie 66 pod rysunkiem 31 czytamy *Zastanawiające jest rozwiązanie....* Rodzi to moje pytanie, dlaczego wg Autora to rozwiązanie jest zastanawiające. W punkcie 5.7 na stronie 68 czytamy *Drugą zaś kolekcjonowanie informacji.....* Chyba chodzi o rejestrację informacji?

Pragnę zauważyć, że w recenzowanej pracy doktorskiej występują także błędy oznaczeń i opisów dotyczących prezentowanych w rozprawie rysunków i tabel.

Dla przykładu: czym różnią się zdjęcia przedstawione na rysunkach 3 (str. 19) i 6 (str. 23)? Proszę o wyjaśnienie.

Z kolei na stronie 62 czytamy *Na rysunku 23 przedstawiono konstrukcje czujników,.....* W mojej opinii rysunek ten nie przedstawia żadnych konstrukcji tylko wygląd czujników drgań w postaci ich zdjęć. Kolejna uwaga dotyczy opisu zdjęć z rysunków 30 i 31 na stronie 65, który brzmi: *Przykłady różnych rozwiązań konstrukcyjnych przedstawiono na rysunkach 30, 31*. Z takiego opisu nic nie wynika.

W rozdziale 6 znalazły się rysunki nowo zaprojektowanego systemu (stanowiska) do pomiaru drgań łożysk kulkowych. Niektóre z nich, w mojej opinii, nic nie wnoszą do recenzowanej rozprawy, jak dla przykładu rysunki 36 i 44.

Na stronie 124 na rysunku 78 wstępuje napis *Histogram*. Powinno być *STPPD LB*. Na rysunkach 81, 82, 83 występuje oznaczenie *PSK*. Chodzi chyba o oznaczenie *STPPD*?

W tekście doktoratu występują tabele, które w mojej opinii powinny się znaleźć w załącznikach, co nie zmieniałoby merytoryki rozprawy a poprawiłoby jej czytelność. Dotyczy to tabel 5, 6, 7, 20, 25, 26 i 27.

Inne mało istotne błędy językowe oraz moje uwagi dotyczące rysunków, wzorów czy tabel zostały zaznaczone w tekście recenzowanej rozprawy oraz przekazane Autorowi.

3.2. Uwagi o charakterze ogólnym

Moja pierwsza uwaga o charakterze ogólnym dotyczy braku jednostek przy wskazanych wielkościach fizycznych w rozdziale pt. *Spis najważniejszych oznaczeń*.

Druga uwaga dotyczy ostatniego celu pomocniczego zaprezentowanego przez Autora rozprawy na stronie 54, który brzmi *wdrożenie zbudowanego systemu w warunkach produkcji oraz opracowanie nowych procedur i instrukcji badawczych*. Jako, że nie znalazłem w rozprawie nowych procedur i instrukcji badawczych oraz informacji o wdrożeniu tego systemu (stanowiska) proszę o omówienie przez Autora tego zagadnienia na obronie.

Trzecia uwaga ogólna dotyczy sformułowania znajdującego się nad rysunkiem 28 ze strony 64 *W opinii użytkowników tego rozwiązania, konstrukcja SKF pozwala uzyskiwać najmniejszy rozrzut wyników pomiarów*. Mam pytanie, dlaczego tak jest oraz dlaczego Autor nie przytoczył tutaj żadnych odniesień do literatury.

Czwarta uwaga ogólna dotyczy opisu ze strony 77 związanego z informacją, że Autor przeprowadził symulacje komputerowe związane z zaprojektowanym urządzeniem pomiarowym. Proszę doktoranta o szersze przedstawienie tych symulacji.

Ostatnia moja uwaga o charakterze ogólnym dotyczy zdania ze strony 112 (4 wiersz od góry) *Nie ma również wzorcowych systemów pomiarowych, za pomocą których można by było zmierzyć łożysko z dużą dokładnością i mieć możliwość porównania różnych systemów pomiarowych*. Mam pytanie do Autora, dlaczego tak się dzieje?

4. Pytania szczegółowe do Autora pracy

1. Na stronie 19 w ostatnim zdaniu drugiego akapitu czytamy *Poziom generowanych drgań przez łożyska nasmarowane jest mniejszy niż poziom drgań generowany przez łożyska tylko naoliwione*. Proszę powiedzieć czym różni się nasmarowanie od naoliwienia łożyska oraz dlaczego poziom generowanych drgań w przypadku nasmarowanego łożyska jest mniejszy?
2. Kolejne pytanie dotyczy zdania ze strony 53 (środkowy akapit) *Falistość powierzchni bieżni łożysk stanowi jeden głównych czynników wpływających na generowanie drgań, a zaawansowane modele dynamiczne pozwalają na lepsze zrozumienie tych zjawisk* Proszę Doktoranta o odpowiedź na pytanie jak wpływa falistość powierzchni bieżni na generowanie drgań w łożysku tocznym?
3. W ostatnim pytaniu szczegółowym proszę Doktoranta o przeprowadzenie wielowymiarowej analizy wariancji związanej z porównaniem uzyskanych wartości średnich poziomu drgań badanego łożyska w poszczególnych pasmach częstotliwości dla analizowanych systemów pomiarowych i przedstawienie uzyskanych wyników w czasie publicznej obrony.

5. Ocena rozprawy i wniosek końcowy

Pomimo przedstawionych przeze mnie w punkcie 3 uwag krytycznych, recenzowaną rozprawę doktorską Pana mgra inż. Grzegorza Piotrowicza oceniam pozytywnie. Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością problematyki prowadzenia badań literaturowych oraz eksperymentalnych, co jest bardzo istotne.

Rozprawa doktorska mgra inż. Grzegorza Piotrowicza ma przede wszystkim znaczenie aplikacyjne, a uzyskane wyniki mogą być wykorzystane w praktyce. Autor wykazał się bardzo dobrą analizą stanu zagadnienia oraz zrozumieniem problematyki odnoszącej się do przedmiotu badań. Biorąc pod uwagę całość pracy tj. jej wartość poznawczą i użyteczną oraz znaczący wkład własny uważam, że Doktorant rozwiązał ważny problem z zakresu dziedziny nauk inżynierijno-technicznych w dyscyplinie naukowej **inżynieria mechaniczna**.

Dlatego też stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgra inż. Grzegorza Piotrowicza pt.: „Systemy oceny stanu dynamicznego łożysk tocznych za pomocą ustalenia poziomu drgań generowanych przez łożyska” spełnia wymogi obowiązujących przepisów w odniesieniu do prac doktorskich. **Wnioskuje, zatem o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.**