

Prof. dr hab. inż. Adam Barylski
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 06.06.2025 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej
pt.: „Systemy oceny stanu dynamicznego łożysk tocznych
za pomocą ustalenia poziomu drgań generowanych przez łożyska”
Autor rozprawy: mgr inż. Grzegorz Piotrowicz
Promotor: prof. dr hab. inż. Stanisław Adamczak

Podstawa opracowania: pismo dyrektora naukowego dyscypliny inżynieria mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 17 kwietnia 2025 r. oraz umowa o dzieło nr XII/DEC-M/7RD/25.

Otrzymany do recenzji tekst rozprawy zawarty jest na 184 stronach (formatu B5) i został podzielony na 9 głównych rozdziałów, plus streszczenie (w języku polskim i angielskim), wykaz występujących oznaczeń (bez podania jednostek i zachowania kolejności alfabetycznej) oraz spis cytowanej literatury (łącznie 129 poz., w tym 2 patentów, 6 tematycznych norm, 5 instrukcji i 8 stron internetowych). We wstępie (s.12-14) wspomniano o historii łożysk i skrótowo podkreślono istotność doboru łożysk kulkowych we współczesnych maszynach, a w zdaniu końcowym podano ogólny cel pracy własnej.

Kulkowe łożyska toczne to jedno z najczęściej stosowanych elementów w maszynach i są wytwarzane przez wyspecjalizowane firmy. Jakość wykonania łożysk i ich eksploatacja ma znaczący wpływ na poprawną pracę urządzeń. Poziom drgań generowanych przez łożysko jest istotnym parametrem charakteryzującym jego stan techniczny. Procedura pomiarów drgań tych łożysk jest standaryzowana w normie ISO-15242. Najdokładniejsze z nich są osiągane przez pomiar prędkości drgań, gdyż ciśnienie akustyczne jest proporcjonalne do sygnału prędkości na powierzchni pomiarowej, zapewniając najlepszą rozdzielczość sygnału w szerokim paśmie częstotliwości, co uwzględniono w pracy własnej Doktoranta w rozprawie.

Uszkodzenie łożyska jest najczęstszą przyczyną awarii maszyny, stąd doniosłość wczesnego wykrycia zużycia łożysk i symptomów nieprawidłowej pracy. Analiza właściwości metrologicznych systemu pomiarowego stanu dynamicznego łożyska, przez pomiar generowanych drgań, wymaga budowy specjalistycznych innowacyjnych urządzeń badawczych i porównania z dotychczas istniejącymi procedurami. Tak więc, podjęta w rozprawie problematykę należy uznać za aktualną i bardzo ważną, zarówno z poznawczego, jak i użytkowego punktu widzenia.

W rozdziale 3 (s.15-53) przedstawiono aktualny stan wiedzy z zakresu tematyki rozprawy, w tym sposoby pomiarów drgań łożysk w warunkach przemysłowych i laboratoryjnych. Są to

pomiary amplitudy drgań mierzone w jednostkach przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia. Omówiono istniejące w Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach stanowisko badawcze, wyposażone w czujnik elektrodynamiczny, akcelerator piezoelektryczny i wibrometr laserowy, gdzie od wielu lat, pod kierunkiem prof. Stanisława Adamczaka, z sukcesem realizowane są prace poznawcze i wdrożeniowe z zakresu diagnostyki łożysk tocznych. Zdaniem recenzenta, podane propozycje dalszych badań (s.27, w.13_d -19_d) powinny znaleźć się w rozdziale 10. Scharakteryzowano ogólnie metody diagnostyczne, w tym pomiary drgań, hałasu, temperatury łożyska i zanieczyszczenia smaru. Na s.30, w pkt.3, pominięto metodę termowizyjną. Omówiono stosowane w analizie drgań parametry statystyczne, mieszane i specjalne w dziedzinie czasu oraz współczesne metody diagnostyki uszkodzeń łożysk, również z uwzględnieniem metod sztucznej inteligencji. Korzystnym, dla potencjalnego czytelnika rozprawy, byłoby zamieszczenie ważniejszych reprezentatywnych wyników badań, opublikowanych w specjalistycznej i cytowanej literaturze. Brak jest też krótkiego podsumowania analizy wiedzy z zakresu tematyki rozprawy, w aspekcie podjętej pracy własnej.

W rozdziale 4 (s.54) sformułowano problem badawczy i szczegółowo hipotezę wstępną oraz cele rozprawy. Pomocnym, ze względów metodycznych oraz dla prezentacji zakresu pracy, byłoby przedstawienie ogólnego schematu graficznego realizacji pracy własnej.

W rozdziale 5 (s.55-69) omówiono pokrótce budowę urządzeń do pomiaru drgań łożysk, stosowanych między innymi przez czołowych producentów systemów łożyskowych. Dotyczą one konstrukcji wrzeciona hydrodynamicznego, głowic pomiarowych, czujników drgań, rozwiązania docisku osiowego, stosowanego napędu wrzeciona, układów sterowania i monitorowania, analizy i archiwizacji wyników pomiarów oraz sposobów izolacji zakłóceń pochodzących z otoczenia stanowiska. Podane informacje świadczą o dużej wiedzy Doktoranta z zakresu techniki i procedur badawczych łożysk tocznych. Zdaniem recenzenta rozdział ten, pod nazwą „Urządzenia badawcze”, powinien być włączony do tej części rozprawy, w której omawiany jest aktualny stan wiedzy. Również i w tym przypadku, pomocne byłoby krótkie podsumowanie.

W rozdziale 6 (s.70-94) przedstawiono budowę zaprojektowanego stanowiskowego systemu do pomiaru drgań łożysk kulkowych, opisując, bardzo ogólnie, wrzeciono hydrodynamiczne, głowicę pomiarową, czujnik drgań, zespół docisku, napęd wrzeciona, zespół sterowania, część nośną stanowiska oraz, bardziej szczegółowo, oprogramowanie użyte w badaniach – podając między innymi jego strukturę i możliwości informatyczno-analityczne.

W rozdziale 7 (s.95-110) omówiono wykorzystywany przenośny system do analizy drgań łożyska, skrótowo charakteryzując: czujnik drgań, adapterowy wzmacniacz sygnałów oprogramowanie i sposób kalibracji analizatora drgań, stosowany w FŁT - Kraśnik S.A.

W rozdziale 8 (s.102-111) przedstawiono sposób testowania zbudowanego stanowiska MDL-54, porównując go z urządzeniem firmy SKF użytkowanym w laboratorium FŁT -

Kraśnik S.A. Podano wyniki testowania w trzech pasmach częstotliwości: niskich (LB), średnich (MB) i wysokich (HB), wykorzystując testy porównania wartości średnich i wariancji zmierzonych poziomów drgań oraz współczynnik korelacji r-Pearsona i dokładności DO (w %). Wysznuęto teę zalecanyia dla dalszych dociekań badawczych.

W rozdziale 9 (s.112-157), który stanowi głuówną część analityczną rozprawy, ogólnie scharakteryzowano cztery porównywane systemy pomiarowe: zbudowanego MDL-54, stosowanych przez FŁT - Kraśnik S.A. (MGG-11 i GPW-8) oraz będącego na wyposażeniu laboratorium w Politechnice Świętokrzyskiej (STPPD). W części analitycznej zastosowano wnioskowanie statystyczne wyników pomiarów, w trzech badanych pasmach częstotliwości, stosując poprawnie postawione hipotezy. Sprawdzano zgodność zbudowanych rozkładów z rozkładem normalnym oraz porównano wartości średnie i wariancje dwóch populacji wyników, analizując parami nowy system MDL-54 z trzema pozostałymi (MGG-11, GPW-8 i STPD). W każdym z badanych przypadków stwierdzono istotność (nieprzypadkową) rozbieżność porównywanych wielkości. Pokróćce, podsumowano teę wyniki przeprowadzonego wnioskowania statystycznego. Wyznaczono również charakterystyki metrologiczne analizowanych systemów pomiarowych, a więc: błąd poprawności, graniczny błąd wierności oraz klasę dokładności (w %). Skoro na s. 148 stwierdzono, że system MDL-54 pozostaje niezastąpiony w szerokim zakresie częstotliwości, to dlaczego proponowane są dalsze badania (w rozdziale 10)? Wykonano także porównania powtarzalności rozrzutu otrzymanych wyników pomiarów. Szkoda, że nie podano jakich wielkości one dotyczą (tabela 25, 26 i 27). Nie podano również na jakiej podstawie przyjęto granice zdolności systemów pomiarowych (s.156).

Rozdział 10 (s.158-160) zawiera wnioski ogólne z przeprowadzonych badań i analiz statystycznych. Zdaniem recenzenta, zbyt mało miejsca poświęcono rzeczywistym, konstrukcyjnym i innym, przyczynom stwierdzonych różnic, podkreślając jedynie korzystny wpływ opatentowanego osiowego docisku w systemie MDL-54, który zdaniem Autora znacząco redukuje błędy systematyczne, w porównaniu do przegubowych docisków zastosowanych w pozostałych urządzeniach. Sformułowano także rekomendacje dotyczące przyszłych badań oraz zaistniałe przesłanki zastosowania opracowanego systemu pomiarowego w warunkach przemysłowych.

W wykazie cytowanej literatury specjalistycznej (s.164-178) z satysfakcją dostrzegłem 4 pozycje współautorskie Doktoranta, w tym przyznanego patentu, oraz wystąpienie na konferencji metrologicznej we Wrocławiu w roku 2024. Dobór literatury uważam za trafny i aktualny. Niestety, nie zachowano w kilku miejscach jednolitej formy zapisu poszczególnych pozycji.

Do najistotniejszych osiągnięć Doktoranta w rozprawie zaliczam:

1. Ocenę stosowanych systemów pomiarowych stanu dynamicznego kulkowych łożysk tocznych, w warunkach przemysłowych i laboratoryjnych, z wykorzystaniem wnioskowania statystycznego.

2. Wyznaczenie właściwości użytkowych i metrologicznych zbudowanego innowacyjnego stanowiska badawczego do analizy drgań poprzecznych łożysk kulkowych.

Podczas czytania rozprawy nasunęły mi się też pytania do Doktoranta:

1. Proszę o bliższe wyjaśnienie stwierdzenia: „Zadaniu takiemu najlepiej odpowiada pomiar prędkości drgań, która w najistotniejszym dla pomiarów zakresie częstotliwości zachowuje się najstabilniej” (s.61, w.6^g-8^g).
2. Co było podstawą wyboru określonego typu łożyska tocznego do badań własnych?
3. Jaki był cel przedstawienia w podrozdziale 6.1 wstępnych rozwiązań konstrukcyjnych, bez ich opisu?
4. Na s.77 podano: „Po zakończeniu symulacji i wprowadzeniu ewentualnych poprawek przystąpiono do etapu budowy prototypów”. Jakie to były prototypy?
5. Na s.80 stwierdzono, że w wyniku prac przeprowadzonych w ramach projektu opracowany został czujnik drgań. Jaki to był projekt?
6. Na s.85 podano: „Efektem pracy tego oprogramowania ma być zarówno rzetelna ocena poziomu drgań badanych łożysk w trzech zakresach częstotliwości, jak również ocena wpływu poszczególnych elementów konstrukcyjnych łożyska na ten poziom”. Proszę bliższe skomentowanie tego zapisu.
7. Z jakiego gatunku żeliwa sferoidalnego i o jakiej strukturze wykonano płytę główną stanowiska?
8. Na jakiej podstawie wybrano liczbę pomiarów drgań pojedynczego łożyska i grupy łożysk tego samego typu?
9. Co, zdaniem Doktoranta, jest przyczyną występowania (podczas testowania) dużej różnicy wariancji wyników pomiarów, pojawiającej się w zakresie wysokich częstotliwości?
10. Jakie (i na jakiej podstawie) podjęto działania po testach wstępnych systemu pomiarowego?
11. Co oznacza, iż w badaniach zachowano stały stan łożyska (s.135).
12. Co oznacza założenie, że wszystkie elementy ruchome łożyska generują te same drgania (s.135)?
13. Na jakiej podstawie w obliczeniach błędów względnych (tabela 21, 22 i 23) jako odniesienie przyjęto wartość średnią z czterech pomiarów danego łożyska?
14. W czym upatruje Doktorant „wyższość” opracowanego systemu pomiarowego, w porównaniu z pozostałymi (badanymi w pracy)? Czy pojawiły się również propozycje zmian dotyczących pozostałych stanowisk?
15. Co oznacza: „zastosowanie w bardziej wymagających procesach pomiarowych” (s.157)?
16. Jak powinno zostać opracowane (wykonane), zdaniem Doktoranta, zaproponowane łożysko wzorcowe (s.162)?

W tekście rozprawy dostrzegłem usterki redakcyjne i inne (formalne i językowe).

Należą do nich:

s.10, w.10^g, powinno być: ... najniższa ...

s.11, w.1^g i 10^g, powinno być: liczba ...
 s.12, w.10_d, określenie: ... wyjątkową precyzją ...
 s.16, w.13^g, styl: ... niedostateczne starania ...
 s.18, w.12^g i 13^g, powinno być: ... szybkościach obrotowych ...
 s.19, w.13_d, określenie: ... zakropić ...
 s.20, rys.4 oraz s.66, rys.30 i s.67, rys.32: brak źródła
 s.20, w. 9_d, powinno być: ... chropowatości powierzchni ... (także w kilku innych miejscach)
 s.21, w. 3^g, zamiast jest, powinno być: ... są ...
 s.22, w.11_g, powinno być: ... pomiarowym ...
 s.23, podpis rys.6, powinno być: ... Świętokrzyskiej ...
 s.23, w.3_d, styl: ... czujniki te zaczytują ...
 s.24, w.5^g-7^g oraz s.67, w.1_d-5_d: informacje oczywiste
 s.34, w.6^g, styl: ... ogólny stan zdrowia maszyn ...
 s.35, styl: opis wzoru (9) w tekście
 s.36, 37 i 40, zbędne informacje: pkt. 1-4
 s.37, 38 i 39, zbędne informacje: pkt. 1-3
 s.38, w. 1^g-3^g i s.44, w.11_d-8_d: zdania zbędne
 s.39, w.1_d, zbędne: ... stosowana do oceny „spiczastości” sygnału ...
 s.41, w.6^g-11^g i s.44, w.1^g-5^g: zbędne informacje
 s.46, w.4_d, powinno być: ... Parametr BCU ...
 s.47, w.14^g, lepiej: ... Parametr VL ...
 s.48, brak powołania się w tekście na wzór (19)
 s.48, w. 4^g, co oznacza określenie: ... w ocenie kondycji ...
 s.48, w.2_d, lepiej: ... tabelarycznie ...
 s.50, w.1_d-3_d, co oznacza: ... w różnych warunkach operacyjnych ...
 s.52, w.16_d, określenie: ... imponującą dokładność diagnozowania ...
 s.53, w.17_d, określenie: ... przełożenie na ich wydajność ...
 s.57, w.4^g, lepiej: ... archiwizację ... (podobnie s.68, w.6^g i s.69, w.2_d)
 s.57, w.8_d i 9_d, co oznacza: ... pozyskania w warunkach FŁT - Kraśnik ...
 s.59, w.1_d, zbędne: ... umocowanych w owalnych kanałkach ...
 s.60, w.1_d oraz s.98, w.1_d i s.75, podpis rys.44, w.2_d: zbędny przecinek
 s.61, w.1_d, lepiej: ... poprawnie ...
 s.63, w.8^g-9^g, określenie: ... realizowany jest w systemie czysto sprężynowym ...
 s.63, w.1_d i s.64, w.1^g-2^g: lepiej jako odrębne zdanie
 s.64, w.8^g, zapis: ... Drobne, mierzone w mikronach ...
 s.64, w.4_d-5_d, określenie: ... wydaje się mało pewne ...
 s.65, w.1_d, powinno być: ...30 i 31.
 s.67, w.2^g, powinno być: ... silnik ...
 s. 68, w.3_d, powinno być: ... w rozwiązaniach stosowanych ... i przez innych ...
 s.69, w.4_d, powinno być: ...Do korpusu mocowane ...
 s.70 i 71: rys. 34 i 36 są identyczne
 s.76, w.2^g-10^g: informacje zbędne
 s.77, w.12_d-14_d: stwierdzenie oczywiste
 s.79, w.6_d, powinno być: wykorzystano

s.85, w.3^g, powinno być: ... kulkowe ...
s.90, w.3^g, powinno być: ... przy zachowaniu wszystkich możliwości jakie posiada okno poprzednio omawiane, ...
s.94, w.2^g-5^g: zdanie zbędne
s.98, w.3^g, zbędne: pudła
s.102, w.3_d-12_d: stwierdzenie oczywiste
s.103, w.1_d-6_d: zdanie zbędne
s.103 i 104, brak powołanie się na wzór (20) i (21)
s.110, w.4_d, powinno być: ... upoważnienia ...
s.114, w.1_d do s.115, w.3^g – zdanie zbędne, mając na uwadze informacje podane na s.114, w.1_d-6_d
s.114, w tabeli 4, powinno być: hydrodynamiczne
s.116, objaśnienie wzoru (22), powinno być: liczba
s.117 i dalsze, w tytułach tabel 5-7, 11-16 i 20 nie podano jakiej wielkości dotyczą pomiary
s.116, w.4_d, jakie k przyjęto?, we wzorze (22) k oznacza też liczbę przedziałów histogramu
s.133, w.1_d, powinno być: ... w tabelach 14, 15 i 16.
s.146, w.1_d-6_d, powtórzenie informacji
s.151, w.5_d, powinno być: %R&R
s.164, poz. [7], powinno być: nr 8-9
s.172, poz. [68] oraz s.175, poz. [97]: brak stron
s.172, poz. [69], powinno być: ... Tribology ...

Reasumując stwierdzam, że szczegółowe uwagi jakie nasunęły mi się podczas czytania rozprawy nie umniejszają jej wartości merytorycznej, zaś mogą zostać wykorzystane przez Doktoranta w dalszej pracy i publikacjach. Autor rozwiązał postawione cele i problem badawczy. Wykazał się wiedzą ogólną z zakresu analizowanej tematyki i zastosowanych metod naukowych. Udowodniona została postawiona hipoteza pracy. Autor rozprawy udowodnił, zdaniem recenzenta, że jest dobrze przygotowany do realizacji kolejnych prac badawczych i wdrożeń w przyszłości.

W moim przekonaniu, rozprawa doktorska pt. „Systemy oceny stanu dynamicznego łożysk tocznych za pomocą ustalenia poziomu drgań generowanych przez łożyska”, której Autorem jest mgr inż. Grzegorz Piotrowicz, spełnia wymagania ustawowe stawiane pracom kwalifikacyjnym na stopień doktora nauk technicznych. Rozprawa zawiera się tematycznie w obszarze dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna, wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

