

dr hab. inż. Ksenia Ostrowska, Prof. PK
Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej (M10)
Wydział Mechaniczny
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Piotrowicza pt.:
„SYSTEMY OCENY STANU DYNAMICZNEGO
ŁOŻYSK TOCZNYCH
ZA POMOCĄ USTALENIA POZIOMU DRGAŃ
GENEROWANYCH PRZEZ ŁOŻYSKA”

Podstawa opracowania:

Uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 17.04.2025 na zlecenie Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej dr hab. inż. Sławomira Błasiaka, Prof. PŚk o znaku: MAA-511/64/024

1. Charakterystyka ogólna

Łożyska toczne to precyzyjne elementy maszyn umożliwiające obrót wałów przy minimalnym tarciu. Ich główną funkcją jest przenoszenie sił promieniowych i osiowych przy jednoczesnym zapewnieniu cichej i stabilnej pracy. Są mechanizmami precyzyjnymi, co jednak nie zmienia tego, iż są podatne na uszkodzenia mechaniczne, nawet drobne defekty mogą prowadzić do poważnych awarii. Systemy oceny stanu dynamicznego łożysk tocznych, oparte na analizie poziomym drgań, służą do wczesnego wykrywania uszkodzeń zanim dojdzie do zatrzymania maszyny. Wykorzystują do tego zadania różne metody pomiarowe.

Tego typu systemy są szczególnie ważne w przypadku maszyn krytycznych, ponieważ awaria jednego łożyska może doprowadzić do poważnych przestojów i kosztownych napraw. Umożliwiają one planowanie konserwacji, zapobiegają nieoczekiwanym awariom, zwiększają efektywność energetyczną i wydłużają żywotność maszyn. Współczesne systemy diagnostyczne są często zintegrowane z technologiami przemysłu 4.0 i opierają się na podejściu predykcyjnym (predictive maintenance). Łożyska toczne są kluczowymi komponentami maszyn, a systemy do oceny ich stanu na podstawie drgań stanowią podstawę nowoczesnego utrzymania ruchu, zapewniając

AT

niezawodność, bezpieczeństwo i optymalizację kosztów eksploatacyjnych.

Z tego powodu praca doktorska mgr inż. Grzegorza Piotrowicza pt.: „Systemy oceny stanu dynamicznego łożysk tocznych za pomocą ustalenia poziomu drgań generowanych przez łożyska” wpisuje się w dyscyplinę inżynierii mechanicznej, jako jej ważny aspekt.

2. Układ i obszar merytoryczny monografii:

Recenzowana praca liczy 191 stron i składa się z 10 rozdziałów, w tym spisu treści, spisu pojęć oraz osobno streszczenia w języku polskim i angielskim jak również bibliografii, w której zamieszczono 105 pozycji publikacji naukowych, 2 patenty, 9 norm, 5 instrukcji i 9 stron internetowych.

Rozdział 1 – Spis najważniejszych oznaczeń, który niekoniecznie powinien być osobnym rozdziałem, zawiera jak sama nazwa wskazuje spis wszystkich oznaczeń użytych w rozprawie.

Rozdział 2 – Wstęp, zawiera krótką genezę łożysk kulkowych i motywację do podjęcia niniejszej rozprawy udowadniając, iż łożyska kulkowe odgrywają kluczową rolę w konstrukcji współczesnych maszyn, wpływając bezpośrednio na ich wydajność, niezawodność i trwałość. Autor opisuje związek pomiędzy budową oraz kryteriami doboru łożysk kulkowych w stosunku do optymalizacji ich zastosowania w aplikacjach, co z kolei przyczynia się do wydłużenia żywotności tych maszyn oraz redukcji kosztów operacyjnych.

Rozdział 3 – Aktualny stan wiedzy, jest częścią pracy, w której doktorant przedstawia aktualny stan wiedzy na temat konstrukcji, modeli matematycznych czy badań łożysk tocznych. Zawarł opisy dotyczące metod pomiaru drgań łożysk w warunkach przemysłowych i laboratoryjnych, pomiaru przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia. Dokonał podziału na pomiary stykowe i bezstykowe. W tej części pracy opisał również właściwości metrologiczne przyrządów pomiarowych oraz opisał analizy, którym poddawane są łożyska toczne wraz z parametrami sygnałów.

Rozdział 4 – Cel pracy, przedstawia problem badawczy jakim jest „Ocena właściwości metrologicznych oryginalnego systemu pomiaru stanu dynamicznego łożysk tocznych za pomocą oceny drgań i szumów”. Zakładam, iż celem pracy jest opisany tu problem badawczy, gdyż nie jest to jednoznacznie wyartykułowane. Hipoteza badawcza, którą stawia doktorat brzmi: Uwzględniając właściwości

metrologiczne zbudowanego systemu pomiarowego istnieją teoretyczne i praktyczne przesłanki do jego zastosowania w warunkach przemysłowych w celu podniesienia jakości wyprodukowanych wyrobów. Niestety nie jest wprost napisane czy urządzenie do pomiaru zostało zaprojektowane do niniejszej pracy czy powstało wcześniej. Jeżeli powstało przy pracach do niniejszej dysertacji, należało podać zakres w jakim uczestniczył doktorant.

Do tak przedstawionego zagadnienia doktorant sformułował cele pomocnicze swojej pracy, podyktowane wymaganiami firm:

- przeprowadzenie oceny zrealizowanych dotychczas prac teoretycznych i eksperymentalnych oraz ocena stosowanych systemów pomiarowych stanów dynamicznych łożysk tocznych;
- przeprowadzenie analizy stosowanych parametrów wykorzystywanych do pomiarów drgań i szumów łożysk tocznych;
- ocena dotychczas zbudowanego systemu pomiarowego dla potrzeb przemysłu łożyskowego na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych z wykorzystaniem statystyki matematycznej;
- określenie właściwości użytkowych i metrologicznych nowo zbudowanego stanowiska pomiarowego oraz analiza dotychczas stosowanych procedur i instrukcji ustalenia stanu dynamicznego łożysk;
- wdrożenie zbudowanego systemu w warunkach produkcji oraz opracowanie nowych procedur i instrukcji badawczych.

Rozdział 5 – Rozwiązania konstrukcyjne urządzeń badawczych do pomiaru drgań łożysk kulkowych, gdzie mgr inż. Grzegorz Piotrowicz opisuje jak producenci łożysk do badań drgań stosują najczęściej stanowiska badawcze własnej konstrukcji. Urządzenie te mają podobną budowę, natomiast rozwiązania konstrukcyjne najważniejszych podzespołów różnią się między sobą. Autor dokonał podziału najważniejszych zespołów na: wrzeciono, głowicę pomiarową, czujnik drgań, zespół docisku badanego łożyska, napęd wrzeciona, korpus stanowiska i osprzęt, zespół sterowania, kontroli i monitoringu, oprogramowanie umożliwiające kolekcjonowanie i obróbkę zebranych danych, ich wizualizację, analizę i ocenę uzyskanych wyników. W dalszej części przeprowadza analizę powyższych podzespołów stosowanych u innych badaczy czy producentów.

Rozdział 6 – Rozwiązania konstrukcyjne systemu do pomiaru drgań łożysk kulkowych, doktorant w niniejszym rozdziale po przeanalizowaniu istniejących rozwiązań konstrukcyjnych systemów do pomiaru drgań łożysk produkowanych przez czołowych producentów, opracował wstępne konstrukcje, które zostały poddane dalszej weryfikacji. Zaprojektował urządzenie tworząc niejako „cyfrowego bliźniaka” oraz jego poszczególne elementy. Proces ten objął zarówno symulacje komputerowe, jak i testy laboratoryjne. Symulacje umożliwiały sprawdzenie, jak zaprojektowane urządzenie będzie się zachowywać w różnych warunkach, bez konieczności budowania fizycznego prototypu, a wybierając tylko przetestowane rozwiązania. Autor do budowy stanowiska zastosował wrzeciono hydrodynamiczne własnej konstrukcji, które w tym zastosowaniu pozwoliło na zwiększenie dokładności pomiarów, redukcję zakłóceń, wydłużenie żywotności komponentów oraz umożliwiło pracę w szerokim zakresie prędkości obrotowych. Opracował czujnik drgań, którego gabaryty zewnętrzne są kompatybilne z przetwornikiem drgań stanowiącym wyposażenie systemów pomiarowych produkowanych przez firmę FAG. Zasada jego działania, oparta była na indukowaniu się prądu w cewce drgającej w polu magnetycznym. Zespół docisku został opatentowany przez doktoranta (wspólnie z zespołem projektowym : Adamczak S., Piotrowicz G., Pietrusiński L., Wrzochal M., Domagalski R.: Mechanizm dociskowy obciążenia osiowego łożysk tocznych, zwłaszcza w urządzeniach do pomiaru szumów i drgań. P.434731 A1, 21.07.2020 r.). System ten opiera się na wykorzystaniu elektrycznego siłownika, umożliwiającego płynną regulację siły docisku w zależności od rozmiaru badanego łożyska. Siłownik ten jest programowalny, pozwalając na zautomatyzowanie dostosowania parametrów docisku. Głowica pomiarowa, konstrukcja nośna oraz reszta elementów konstrukcyjnych urządzenia są wynikiem analiz i zostały odpowiednio dostosowane do założeń projektowych opisanych w niniejszej pracy. Oprogramowanie zostało opracowane w środowisku *DELPHI*, gdzie wykorzystane zostały biblioteki *Advantech DAQNav* oraz komponenty *SDL Component Suite* firmy Epina GmbH. Forma protokołów z pomiarów oraz sposób archiwizacji czy udostępniania wyników pomiarów w sieci został dostosowany do wymogów użytkownika, z możliwością dalszego rozwijania i modernizowania.

Rozdział 7 – Przenośny system do oceny poziomu drgań łożysk, przedstawia genezę zaprojektowania własnego systemu do oceny poziomu drgań łożysk, a

następnie krok po kroku elementy jego budowy oraz innowacyjne rozwiązania. Doktorant opisał zastosowaną głowicę pomiarową oraz zespół wzmacniacza sygnału pomiarowego, który ze względu na konieczność zmniejszenia masy i wymiarów urządzenia, zastosowano zaadaptowane moduły AD CPU karty sieciowej i przetwornika SAR oraz zasilacza, gdzie całość zespołu zamontowano w obudowie aluminiowej, na podwieszanej do pokrywy konstrukcji opartej na płycie montażowej. Dobrano komputer w wersji wzmocnionej, przeznaczonej do pracy w trudnych warunkach otoczenia i o odpowiednich parametrach, gdzie zaimplementowano oprogramowanie „PBF NOISE”.

Rozdział 8 – **Wstępne testy systemu pomiarowego**, doktorant opisuje testy wstępne przeprowadzone jako porównanie wyników testów na łożyskach kulowych typu 6208, na zbudowanym stanowisku MDL-54. Jako system odniesienia wykorzystano urządzenie MVH-200C firmy SKF, które było dostępne w firmie gdzie prowadzony był doktorat wdrożeniowy. Badania podzielono na 2 etapy: pierwszy koncentrował się na analizie drgań pojedynczego łożyska, drugi obejmował badanie drgań 51 różnych łożysk tego samego typu. Mgr inż. Grzegorz Piotrowicz zastosował szereg metod statystycznych, takich jak testy porównania średnich i wariancji, współczynnik korelacji Pearsona oraz współczynnik dokładności analizowanych metod DP. Rezultaty badań analizowanego systemu pomiarowego okazały się niezadawalające i doktorant uznał iż system należy poddać następującym działaniom: przeprowadzić badania na większej ilości systemów pomiarowych, zbadać wpływ różnic w konstrukcji systemów pomiarowych i dokonać oceny możliwości wprowadzenia korekt minimalizujących ich wpływ na uzyskiwane wyniki pomiarów, wybrać najlepszy system referencyjny do przeprowadzenia badań porównawczych i opracowanie ewentualnych współczynników korekcyjnych dla porównywalnych stanowisk pomiarowych oraz spróbować określić poziom drgań tła, który może wpływać na ostateczny wynik pomiaru poziomu drgań generowanych przez łożyska toczne.

Rozdział 9 – **Statystyczne badania porównawcze systemów pomiarowych**, przedstawia trudności w porównywaniu wyników pomiarów drgań łożysk na różnych systemach, gdyż nie ma łożysk wzorcowych, do określania poziomu drgań generowanych przez łożysko. Doktorant wykonuje więc pomiar porównawczy na kilku dostępnych systemach tj.: opisane powyżej MDL-54, dwa inne systemy używane przez FŁT Kraśnik: MGG-11, GPW-8 oraz urządzenie STPPD będące na wyposażeniu

laboratorium badawczym Politechniki Świętokrzyskiej. We wszystkich tych systemach mgr inż. zamontował ten sam czujnik pomiaru drgań oraz ten sam trzpień pomiarowy we wrzecionie obrotowym do mocowania łożysk. Przeprowadził pomiary i za pomocą odpowiednich analiz statystycznych sprawdzał poprawność wskazań w trzech pasmach częstotliwości. Jako podstawę przyjął normy, które zostały już zastąpione i używane przez Niego określenia parametrów są bardzo mylące, gdyż są już używane tylko w starej nomenklaturze. W kolejnym kroku doktorant wyznaczył powtarzalność i odtwarzalność każdego z 4 systemów i w różnych częstotliwościach. Do zadania tego wykorzystał znaną metodę R&R (ang. Repeatability and Reproducibility), która jest częścią grupy metod i narzędzi nazywanych MSA – analiza systemu pomiarowego (*Measurement System Analysis*). Zastosowanie niniejszej metody pozwala na ocenę zdolności systemu pomiarowego do wykonywania danego zadania pomiarowego.

Rozdział 10 – **Wnioski z badań nad systemami pomiarowymi**, stanowi podsumowanie rozprawy, w którym stwierdzono, że sformułowane wnioski pozwalają na udowodnienie wstępnie ustalonej hipotezy badawczej: *Uwzględniając właściwości metrologiczne zbudowanego systemu pomiarowego istnieją teoretyczne i praktyczne przesłanki do jego zastosowania w warunkach przemysłowych w celu podniesienia jakości wyprodukowanych wyrobów*. W rozdziale tym autor wyznacza też kierunki dalszych prac.

Układ pracy, język oraz sposób prezentacji treści merytorycznych w niej zawartych jest zrozumiały. Stronę graficzną i edytorską należy ocenić dobrze. Autor jednak nadużywa pewnych skrótów myślowych i nieco miesza pojęcia metrologiczne, traktując je zbyt luźno wysuwając niekiedy nie do końca poprawne wnioski. Ponad to zastosował normę, która została zastąpiona inną, a terminy zaciągnięte z Niej są już nieaktualne i niewykorzystywane obecnie, co wprowadzało sporą dezinformację. Są to jednak niedociągnięcia spowodowane zapewne nieco innym podejściem doktoranta ze względu na pracę poza Uczelnią, co jednak w żadnej mierze nie umniejsza jego dużej wiedzy praktycznej.



Uwagi edytorskie:

- kilka literówek np. dokładność -powinno być dokładności (str.149), opisany jest instrukcji -powinno być opisany jest w instrukcji (str.100), się trzech pasmach- powinno być się w trzech pasmach (str.119) itd.;
- niektóre pozycje literatury przypisane niepoprawnie np. pozycja 76 (Ren L., Sun Y., Wang H., Zhang L.: Prediction of bearing remaining useful life with deep convolution neural network. *IEEE Access* 2018, vol. 6, s. 13041–13049) przy opisie metody R&R (str. 157), czy pozycja 23.

3. Ocena przyjętej przez Autora koncepcji naukowej oraz sposobu jej realizacji

Łożyska toczne, będące kluczowym ogniwem wielu układów mechanicznych, odgrywają fundamentalną rolę w przenoszeniu obciążeń i minimalizacji tarcia pomiędzy współpracującymi elementami maszyn. Ich rozwój technologiczny, obejmujący zarówno udoskonalanie konstrukcji, jak i stosowanych materiałów, wpłynął na poprawę niezawodności i efektywności mechanizmów w każdej gałęzi przemysłu. Od najprostszych form stosowanych w przeszłości, po nowoczesne, wysoko precyzyjne rozwiązania, łożyska toczne są nieustannie przedmiotem badań i innowacji, które umożliwiają ich adaptację do coraz bardziej wymagających warunków eksploatacyjnych.

Praca Pana mgr inż. Grzegorza Piotrowicza skupia się na potwierdzeniu hipotezy badawczej, która zakładała, że zbudowany system MDL-54 do monitorowania stanu dynamicznego w łożyskach, z uwzględnieniem jego właściwości metrologicznych, posiada zarówno teoretyczne, jak i praktyczne przesłanki do zastosowania w przemyśle.

Analizując jednak opracowane przez autora zagadnienia i ich możliwe wykorzystanie praktyczne, narzuciły się recenzentce pewne kwestie polemiczne, które wymagają wyjaśnienia:

- Pokazanie wyników testów nie jest wystarczające. Czy spotkał się Pan z walidacją metody pomiarowej, np. za pomocą testu modelu statystycznej spójności czy modelu normalnej spójności i miar rozbieżności "Birge'a" lub najprostszego wskaźnika En opisanego w normie PN-EN ISO/IEC 17043:2011? Czy próbował Pan porównania z systemami, które są zwalidowane? Brakuje mi tu testów z rozwiązaniami, które

posiadają certyfikat o danej dokładności wg. Norm, które Pan wielokrotnie przywołuje lub chociaż z systemami, które mają dane katalogowe o dokładności i pomiarów porównawczych czy walidacyjnych z takim systemem.

– Opisuje Pan porównania pomiędzy systemami i twierdzi, iż nie ma wzorców łożysk. Jednak według literatury są możliwe do uzyskania pewne referencyjne łożyska, które posiadają certyfikaty producenta lub laboratorium, które dokumentuje charakterystyki wibracyjne łożyska referencyjnego. W literaturze można również znaleźć wiele prac udowadniających korelację błędów/ odchylek kształtu z charakterystykami wibracyjnymi łożysk. Może to być pewien punkt wyjścia do dalszych Pana prac.

– W pracy wielokrotnie podkreśla Pan, że powtarzalność wyników jest miarą dokładności. System może być bardzo powtarzalny i stabilny, a jednak nie dokładny, to jest tylko część warunku.

– Czy wyznaczał Pan jak duży wpływ na wynik pomiaru ma to, iż tylko w urządzeniu zamodelowanym do niniejszej pracy jest czujnik ruchomy, a w 3 pozostałych czujnik jest nieruchomy oraz jak duży błąd jest generowany przy przeliczaniu sygnałów jeżeli tylko w jednym jest sygnał cyfrowy, a w reszcie rozwiązań analogowo-cyfrowy, który może mieć straty na filtrach i przekształceniach sygnałów?

– Porównuje Pan trzy inne systemy pokazując, że są gorsze od zamodelowanego i poprzez wykazanie braku korelacji stawia Pan tezę, że zamodelowany system jest dokładny czy lepszy? Jest to nadinterpretacja;

– Dlaczego nie sformułował Pan jasno celu w pracy? W rozdziale pod tytułem „Cel pracy” jest postawiony problem badawczy, cele pomocnicze i hipoteza?

– Jakie widzi Pan możliwości zastosowania w swojej pracy, obecnie szybko rozwijającej się sztucznej inteligencji, przykładowo do predykcji?

Mimo wyrażonych przez recenzentkę wątpliwości wymagających wyjaśnienia, praca doktorska Pana mgr inż. Grzegorza Piotrowicza zasługuje na pozytywną ocenę, ponieważ:

- doktorant sformułował problem badawczy polegający na ocenie właściwości metrologicznych oryginalnego systemu pomiaru stanu dynamicznego łożysk tocznych za pomocą oceny drgań i szumów.
- przeprowadził analizy stosowanych parametrów wykorzystywanych do pomiarów drgań i szumów łożysk tocznych;

- opracował koncepcję oceny dotychczas zbudowanych systemów pomiarowych dla potrzeb przemysłu łożyskowego na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych z wykorzystaniem statystyki matematycznej;
- opracował koncepcję wdrożenia zbudowanego systemu w warunkach produkcji oraz opracowanych nowych procedur i instrukcji badawczych;
- opracował koncepcję stanowiska, gdzie zastosował wrzeciono hydrodynamiczne własnej konstrukcji, które w tym zastosowaniu pozwoliło na zwiększenie dokładności pomiarów, redukcję zakłóceń, wydłużenie żywotności komponentów oraz umożliwiło pracę w szerokim zakresie prędkości obrotowych;
- opracował czujnik drgań, którego gabaryty zewnętrzne są kompatybilne z przetwornikiem drgań stanowiącym wyposażenie systemów pomiarowych produkowanych przez firmę FAG;
- wspólnie z zespołem projektowym: Adamczak S., Piotrowicz G., Pietrusiński L., Wrzochał M., Domagalski R. **opatentował zespół docisku** „Mechanizm dociskowy obciążenia osiowego łożysk tocznych, zwłaszcza w urządzeniach do pomiaru szumów i drgań”. P.434731 A1, 21.07.2020 r.;
- w 2021 roku opatentowany mechanizm docisku osiowego zdobył pierwszą nagrodę w konkursie „Student - Wynalazca”, organizowanym przez Politechnikę Świętokrzyską, a także otrzymał dwa srebrne medale na międzynarodowych targach wynalazków w Genewie i w Warszawie;
- zaimplementował opisane koncepcje w realnych urządzeniach oraz aplikacjach i przeprowadził testy poprawności ich działania, co jest wpisane w założenia doktoratów wdrożeniowych.

Powyższe dokonania dowodzą, że doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia prac badawczych, oraz że rozwiązał postawiony w pracy doktorskiej problem i sformułował kierunki dalszych badań nad rozwojem zaproponowanych rozwiązań:

- udoskonalenie systemu MDL-54, szczególnie w kontekście jego zdolności pomiarowej w wysokim paśmie częstotliwości;
- opracowanie wzorcowego łożyska o znanym poziomie drgań, które mogłoby stanowić
- punkt odniesienia w przyszłych badaniach;
- wdrożenie rozwiązań od projektów pilotażowych do kolejnych procedur testowych.

Zadania te powinny być zatem przedmiotem dalszych prac nad doskonaleniem proponowanych metod przez autora.

4. Podsumowanie i wnioski końcowe

Na podstawie analizy przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że:

- autor dokonał trafnego wyboru tematyki swojej pracy, a jej zakres spełnia stawiane doktoratom wdrożeniowym wymagania;
- zasadnicza hipoteza pracy została osiągnięta, w zakresie przyjętym przez Doktoranta, a prezentowane wyniki są uzyskane w zazwyczaj poprawnie przeprowadzonych studiach i eksperymentach i mogą służyć do dalszych prac;
- formalny układ pracy jest prawidłowy;
- dysertacja dobrze nawiązuje do aktualnej wiedzy i praktyki;
- znaczna akumulacja należycie ustalonych faktów sprawia, że zostało spełnione kryterium logicznej poprawności pracy.

Powyższe fakty świadczą o kompetencjach doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na jego dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria Mechaniczna”, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

Podsumowując ocenę rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Piotrowicza pt.: „Systemy oceny stanu dynamicznego łożysk tocznych za pomocą ustalenia poziomu drgań generowanych przez łożyska” stwierdzam, zatem, że praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w myśl Ustawy z dnia 20 lipca 2018- Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2020 r., poz.85 z późniejszymi zmianami) i stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie Autora do publicznej obrony.

Kraków 15.06.2025

dr hab. inż. Ksenia Ostrowska, prof. PK