

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusz Wrzochala  
pt.

**„Ocena właściwości metrologicznych przemysłowych systemów pomiarowych  
drgań łożysk tocznych”**

**Promotor pracy : prof. dr. hab. inż. Stanisław Adamczak, dr h.c.**

**Promotor pomocniczy : dr inż. Paweł Zmarzły**

Podstawa prawna oceny : Pismo Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna dr hab.  
inż., prof. PŚk Izabeli Krzysztofik, z dnia 06.07.2020 r.

### **1. Ocena problematyki rozprawy.**

Problemy badawcze związane z budową systemów pomiarowych drgań łożysk tocznych; istotne w procesach kontroli jakości łożysk tocznych na ich liniach produkcyjnych; należą do grupy zagadnień badawczych ciągle rozwijanych i będących w kręgu zainteresowań w różnych ośrodkach przemysłowych i badawczych w kraju i zagranicą. Mają duży obszar aplikacyjny rozpoznania badawczych istotnych dla zapewnienia ich jakości i niezawodnego funkcjonowania ich użytkowników, a także możliwości prowadzenia diagnostyki i identyfikacji określonych wad i uszkodzeń łożysk pracujących w określonych węzłach łożyskowych maszyn i urządzeń mechanicznych.

W obszarze tym problematyka rozpoznania istotnych poznawczo i aplikacyjnie uwarunkowań kształtujących właściwy pomiar i ocenę drgań łożysk tocznych na liniach produkcyjnych związanych z : modelowaniem drgań generowanych przez łożyska toczne, analizą metrologiczną sygnałów i wyborem estymatów właściwie je reprezentujących, a także poszukiwaniami właściwych rozwiązań instrumentalizacji pomiarowej i przyporządkowanych jej algorytmów pomiaru i analizy zmienności sygnału dla potrzeb kontroli w warunkach przemysłowych - należy zaliczyć do istotnych i aktualnych. Mają one swoje ważne miejsce w rozwoju dziedzin inżynierii mechanicznej i zagadnień związanych budową i eksploatacją maszyn. Definiują zadania poszukiwawcze związane z opracowaniem zaleceń dla budowy porównywalnych metrologicznie, przemysłowych systemów pomiarowych drgań łożysk tocznych. Mają swoją specyfikę, w tle ogólnej problematyki metrologicznej związanej z pomiarem i analizą drgań maszyn wirnikowych posadowionych na tocznych łożyskach, z jakimi mamy do czynienia w diagnostycznych badaniach eksperymentalnych, szeroko opisywanych w literaturze badawczej.

Podjęte z tego obszaru w rozprawie przez Doktoranta zadanie badawcze - ukierunkowane na opracowanie wzorcowego systemu do kontroli drgań łożysk tocznych w warunkach przemysłowych należy zaliczyć do ważnych poznawczo, o dużym ładunku wiedzy istotnej dla procesu konstruowania innowacyjnych systemów diagnostycznych wdrażanych w systemach produkcyjnych dla poprawy jakości produkowanych wyrobów.

Związane z nimi badania podjęte przez Doktoranta; mają dostarczyć narzędzi i wskazań projektowych do weryfikacji poprawności działania systemu wzorcowej konstrukcji dedykowanej pomiarowi drgań łożysk tocznych w warunkach przemysłowych ich produkcji, a także wygenerować

nowy przekaz wiedzy eksperymentalnej określającej problemy metrologiczne związane z badaniami przemysłowych systemów pomiarowych drgań łożysk tocznych. Z nimi są bowiem związane potrzeby licznych aplikacji, jakie są obecne w praktyce kontroli jakości produkcji łożysk.

Z punktu widzenia walorów poznawczych i praktycznych recenzowana praca doktorska i jej problem badawczy, jest poznawczo aktualny i ważny.

Spełnia oczekiwania jakie wiązać można z tematem pracy doktorskiej. Jest on atrakcyjny aplikacyjnie i naukowo, dobrze wkomponowując się w współczesne potrzeby i trendy badawcze, związane z poszukiwaniami nowych rozwiązań dla monitorowania drgań łożysk tocznych na liniach produkcyjnych.

## 2. Analiza zawartości rozprawy.

Przechodząc do ogólnej charakterystyki rozprawy mgr inż. Mateusza Wrzochala stwierdzam, że opiniowana praca stanowi *bardzo obszerne analityczno-eksperymentalne studium problemu* budowy przemysłowych systemów pomiarowych drgań łożysk tocznych wraz z oceną ich własności funkcjonalnych. Ma ono udokumentowanie na 157 stronach opracowania monograficznego pracy doktorskiej, wydanego przez Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej (Seria: Rozprawy doktorskie). Jej postać jest określona: 7 rozdziałami, 54 ilustracjami rysunkowymi, 29 tabelami. Całość uzupełnia wykaz 135 odnośników literaturowych do treści pracy, streszczenia (w jez. polskim i angielskim), spis oznaczeń oraz suplementem w postaci nośnika CD na którym umieszczony dane dotyczące wykonanych pomiarów.

Tradycyjnie **rozdział 1** pracy, kreśli perspektywę dla podjętych w rozprawie zadań. Umiejscawiają ideę programową rozprawy w tle zadań i potrzeb obecności w liniach produkcyjnych łożysk tocznych - systemów pomiaru ich charakterystyk drganiowych. Punktuje obecność ich rozwiązań w przemyśle międzynarodowym, opisuje ich struktury wykonawcze oraz reguły przemysłowej realizacji diagnostyki drganiowej łożysk tocznych.

Zawarty w tym rozdziale przekaz w sposób przekonujący umiejscawia potrzebę realizacyjną podjętej pracy z istotnym nakierowaniem uwagi na zadania produkcyjne Fabryki łożysk Tocznych w Kraśniku, w tym na narzędzia dla badaczy i praktyków zajmujących się diagnostyczną oceną jakości łożysk tocznych.

**Rozdział 2** skupia uwagę na analizie stanu wiedzy opisującej warunki pomiaru drgań łożysk tocznych z określającymi ich realizację trudnościami pomiarowymi i kwestiami interpretacyjnymi. Omawia modele generacji drgań przez łożyska toczne wymuszane różnymi defektami, sposoby pozyskiwania sygnałów pomiarowych wraz z charakterystykami przyporządkowanych sensorom pomiarowych, ich budową i działaniem. Dokonuje analizy estymat drganiowych stosowanych w ocenach drgań łożysk tocznych wraz z oceną wymaganych właściwości metrologicznych instrumentalizacji pomiarowej użytej do budowy wzorcowego systemu pomiaru drgań łożysk tocznych. Prezentowany w tym rozdziale materiał nawiązuje ponadto do przedstawień różnych rozwiązań dedykowanych ocenie stanu łożysk tocznych zabudowanych w określonych obiektach mechanicznych, z wykorzystaniem współczesnych zaawansowanych algorytmów analizy sygnałów drganiowych.

Treści tego rozdziału zawierają dobrze wybrane prezentacje i analizy pomocne w zadaniach porównawczych przemysłowych systemów pomiaru drgań łożysk tocznych na podstawie ich charakterystyk metrologicznych. Stanowią bazę dla poszukiwań autorskiego rozwiązania dedykowanego wyborowi i budowie wzorcowego systemu kontroli drgań łożysk tocznych w warunkach przemysłowych. W istotnym zakresie prezentowane w nim treści są syntezą licznych prac, w których uczestniczył Doktorant.

**Rozdział 3;** (w perspektywie treści analiz i problemów omówionych w poprzednich rozdziałach); punktuje potrzebę realizacyjną podjętej pracy, formułuje przyjętą tezę o istnieniu

teoretycznych i praktycznych przesłanek; *(w analizie właściwości metrologicznych dostępnych przyrządów pomiarowych)*; wyboru wzorcowego systemu kontroli drgań łożysk tocznych w warunkach przemysłowych. Omawia zadania pracy oraz sposób realizacji wytyczonych celów. Nakreślony w tym rozdziale cel i sformułowana w nim tezę uważam za istotną z aplikacyjnego i naukowego punktu widzenia, a także niezbędną w poszukiwaniach uniwersalnych konstrukcji systemów pomiaru drgań łożysk w warunkach przemysłowych..

**Rozdział 4** zawiera przegląd konstrukcyjnych rozwiązań przemysłowych systemów pomiaru drgań łożysk tocznych z ich głównymi zespołami konstrukcyjnymi na które składają się układy : wrzeczona pomiarowego, napędu, docisku (*obciążeń osiowych łożysk*), instrumentalizacji pomiarowej tj. czujników do pomiaru drgań łożysk, bloku przetwarzania danych pomiarowych zabezpieczającego transfer sygnału od czujnika do panelu prezentującego wyniki. Dokonane prezentacje i analizy ich własności funkcjonalnych; *(uwzględniające rozwiązania konstrukcyjne systemów pomiarowych produkowanych przez różnych producentów z całego świata)*; ukierunkowane zostały na wskazanie pożądanych ich modyfikacji, związanych z przyporządkowaniem im potrzeby realizacji dodatkowych funkcji, w niewielkim stopniu ingerujących w charakter dotychczasowo prowadzonych eksperymentów.

Zawarte w tym rozdziale komentarze i analizy zalet i ograniczeń obecnych na rynku rozwiązań służą właściwemu wyartykułowaniu celu podjętego zadania badawczego, wypunktowaniu potrzeby poszukiwań autorskich ich modyfikacji.

**Rozdział 5** zawiera analizy głównych problemów jakie towarzyszą pomiarom drgań łożysk tocznych związanych z systemem na którym łożysko jest badane, jak i prezentację uwarunkowań na które ma wpływ osoba realizująca proces kontrolny. Powiązано je ściśle z opisem procesu wytwórczego łożysk. Zaprezentowano autorskie badania analizujące skalę ich wpływu na wynik pomiaru związanego z wyborem usytuowaniem w procesie kontroli strony badanego łożyska, jak i lokalizacji punktu pomiarowego na obwodzie pierścienia zewnętrznego. Wypunktowano; *(na bazie szerokich badań eksperymentalnych wykonanych przez Doktoranta)*; różnice jako otrzymano przy pomiarach tego samego łożyska, badanego trzema różnymi systemami pomiarowymi drgań łożysk tocznych. Mają one autorskie wskazania odnoszące się do porównań obecnych na rynku systemów pomiarowych drgań łożysk tocznych.

W miejscu tym miejscu rozprawy ma miejsce prezentacja **nowej bazy wiedzy** pomocnej w procesie konstrukcji przemysłowych systemów pomiaru drgań łożysk tocznych.

Kolejny **rozdział 6** rozprawy zawiera właściwą część eksperymentalną rozprawy doktorskiej i ujmuje materiał; *(licznych autorskich badań eksperymentalnych)*; istotnych do wypracowania reguł budowy wzorcowego, przemysłowego systemu kontroli drgań łożysk tocznych. Punktuje trudności analiz porównawczych ich własności funkcjonalnych. Prezentuje opis zastosowanych metod, ich kwantyfikacji, powiązany z przedstawieniem charakterystyki wytypowanych do badań systemów kontroli drgań łożysk tocznych i szczegółowym opisem ich najważniejszych podzespołów. W metodach porównywania wszystkich badanych systemów względem siebie Doktorant korzystał z kryterium najmniejszego rozstępu, a także odniesień względem bezstykowego wzorcowego czujnika odniesienia. Te badania Doktoranta określiły uzyskane przez niego, nowe informacje konstruktorskich wskazań, które są istotnym rezultatem rozprawy i określają jej walory poznawcze.

Kończący pracę **rozdział 7** zawiera podsumowanie dokonań rozprawy. Przedstawia wnioski wynikające z szerokich omówionych w rozprawie autorskich analiz i badań eksperymentalnych; *(wykonanych według dobrze zdefiniowanych i zaprogramowanych w doktoracie rozpoznawczych)*; a które mają wyraźnego adresata i mogą być pomocne w procesach projektowego wyboru rozwiązania kontroli drgań łożysk tocznych w warunkach przemysłowych. Punktuje gamę problemów metodologicznych towarzyszących ocenie przemysłowych systemów pomiarowych; *(w tym oceny wybranych do badań systemów)*; warunkowane posiadanymi przez nie rozwiązaniami konstrukcyjnymi. Konkluduje uzyskane rezultaty badań porównawczych z omówieniem autorskich wyników otrzymanych dla każdej z badanych

metod, stanowiących przesłankami dla wyboru systemu wzorcowego. Formułuje również pole dla kierunków dalszych badań

Podsumowując ten punkt recenzji można stwierdzić, że zrealizowane i udokumentowane w rozprawie doktorskiej poszukiwania badawcze Autora związane z: ich aplikacyjną potrzebą, skalą złożoności związanych z nimi zadań oraz realizacją wykonanych prac analitycznych i eksperymentalnych, a także przekazem nowych idei budowy przemysłowego systemu kontroli drgań łożysk tocznych- w pełni wypełniają wymogi stawiane rozprawom doktorskim.

### 3. Ocena merytoryczna.

Temat pracy można uznać za rozwiązany; (na etapie zadania doktorskiego); z oczekiwaną od niego problemową dociekliwością. Poszczególne rozdziały rozprawy referują - w sposób w pełni akceptowalny - tok myślowy nakreślony przez Doktoranta, prowadzący do rozwiązania nakreślonego przez niego zadania badawczego.

Ich treści przekazują **nowe** wskazania metodyczne oraz informacje wykonawcze dla procesów budowy przemysłowego systemu pomiaru drgań łożysk tocznych. Mają one **istotną wartość poznawczą** dla dziedziny wiedzy jaką jest diagnostyka techniczna w procesach przemysłowych.

Na podkreślenie w ocenie realizacji pracy doktorskiej zasługuje dobre przygotowanie zawodowe Doktoranta związane z umiejętnościami analizy modelowanych procesów i wykonywania złożonych analiz i badań eksperymentalnych - integrujących liczne techniki badawcze przydatne przy opracowaniu i budowie wzorcowego systemu kontroli drgań łożysk tocznych w warunkach przemysłowych.

Do istotnych rezultatów rozprawy doktorskiej zaliczam :

- zasługujący na wyróżnienie poziom edytorski opracowanej rozprawy- cechujący się : logicznością przekazu, syntetycznym i bogatym w zawartość informacyjną układem treści poszczególnych rozdziałów, z reprezentatywnym dla nich materiałem badawczym, a zwłaszcza opracowany przez Autora liczny materiał analityczny i pomiarowy, ilustrujący identyfikowane relacje ;
- stworzenie nowej bazy wiedzy konstruktorskiej, z obszernego, autorskiego materiału eksperymentalnego, dedykowanego rozwojowi konstrukcji systemów kontroli drgań łożysk tocznych w warunkach przemysłowych;
- podanie wskazań metodycznych i wzorców wykonawczych dla budowy innowacyjnych rozwiązań pomiaru drgań łożysk tocznych w warunkach przemysłowych, jakie mogą być pomocne w procesie diagnostyki łożysk tocznych;
- wprowadzenie do palety narzędzi diagnostyki procesów przemysłowych reguł porównawczych odnoszących się do analizy konstrukcji i oceny funkcjonowania przemysłowych systemów kontroli drgań łożysk tocznych.

Te wyróżniki rozprawy doktorskiej, mogą być inspiracją do dalszych ich aplikacji w wielu procesach kontroli jakości produkcji łożysk tocznych. Zaproponowane przez Autora podejście może być uznane za czynnik stymulujący rozwój metod dedykowanych rozwojowi diagnostyki procesów przemysłowych, a jego naukowe wyznaczniki mają istotne przełożenia na zwiększenie bezpieczeństwa i niezawodność produkowanych wyrobów, oraz na racjonalizację ponoszonych na ich produkcję kosztów.

Mam świadomość, że w prezentacji obszernego materiału badawczego zawsze może pojawić się pewien niedosyt u recenzenta, pomimo wysokiej oceny walorów rozprawy. Związać go byłoby można z mało widoczną w realizowanych rozpoznaniach badawczych Kandydata oceny możliwych błędów, z pełniejszą analizą niepewności uzyskanych rezultatów. Uwaga ta dotyczy kwestii: zarówno

oceny błędów w odniesieniu do realizowanych eksperymentów pomiarowych, jak i stosowanych przetworzeń numerycznych, czy też składników niepewności charakteryzowanych budżetem niepewności typu A i B. Nie znalazły one pełnego wyeksponowania w pracy. *(W szczególności można by tutaj przywołać problem wykorzystania wibrometru laserowego w kontroli drgań łożysk tocznych w warunkach różnych wymuszeń zaburzających pracę tego systemu pomiarowego)*. Taka edycja rodzić może pytania, czy Doktorant zwracał należyta uwagę na te kwestię, oraz czy dokonywał w realizowanych badaniach szczegółowej analizy budżetu niepewności typu A z przypisanymi jej uwarunkowaniami obliczeniowymi, jak i niepewności typu B jakie pojawić się mogły w realizowanych rozpoznaniach badawczych. Mam nadzieję, że Autor weźmie tą kwestię pod uwagę w swoich dalszych pracach badawczych, a podniesione uwagi zainteresują go, i pozwolą pogłębić dalsze Jego poszukiwania badawcze. Nie rzutują one na moją wysoką ocenę przedstawionej do recenzji rozprawy.

**Podsumowując opinię stwierdzam, że rezultaty rozprawy są wartościowym przekazem nowej wiedzy pomocnej w konstrukcji przemysłowych systemów kontroli drgań łożysk tocznych.**

**Zdaniem moim, zarówno wyniki poznawcze, jak i związane z nimi praktyczne wskazania zasługują na wysoką, bardzo pozytywną opinię. Dotyczą one zagadnień aktualnych, i zawierają istotne rozpoznania konstrukcyjne pomocne w budowie innowacyjnych systemów diagnostyki przemysłowej.**

**Możną tym samym uznać, że rezultaty rozprawy stanowią pewien wkład mgr inż. Mateusza Wrzochala, w bazę i rozwój aktualnej wiedzy z zakresu inżynierii mechanicznej w obszarze zadań badawczych diagnostyki procesów przemysłowych dedykowanych budowie systemów kontroli drgań łożysk tocznych, a także diagnostycznej oceny poprawności ich funkcjonowania.**

#### **4. Konkluzja.**

Biorąc pod uwagę, omówione i ocenione wyżej rezultaty rozprawy doktorskiej pracy mgr inż. Mateusza Wrzochali stwierdzam, że rozwiązał pewien istotny obszar ważnych aplikacyjnie i naukowo zadań badawczych z zakresu diagnostyki technicznej procesów przemysłowych dedykowanych – procesom kontroli stanu drganiowego łożysk tocznych, o wyraźnym polu szerokiej aplikacji. Pozwala to na stwierdzenie, że Jest on Twórcą pewnego nowego przekazu wiedzy diagnostycznej dotyczącej budowy przemysłowych systemów pomiarowych kontroli drgań łożysk tocznych, która może być pomocna w konstruowaniu innowacyjnych systemów monitorującego jakość produkowanych łożysk tocznych. Wyniki te w pełni spełniają wymagania stawiane przez obowiązującą *Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r (Dz. nr 65, poz.595 z późniejszymi zmianami)*, co upoważnia mnie do przedłożenia Radzie Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna wniosku o dopuszczenie Jego do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę przedstawione w recenzji istotne osiągnięcia do których zaliczyłem :

- wprowadzenie do palety procedur diagnostyki procesów wytwórczych łożysk tocznych, autorskiej procedury budowy przemysłowego systemu wzorcowego kontroli poziomu ich drgań ;
- stworzenie nowej bazy wiedzy diagnostycznej; *(z obszernego, różnorodnego, analitycznego i eksperymentalnego autorskiego materiału)*; dającej wskazówki dla konstrukcji przemysłowych systemów pomiaru drgań łożysk tocznych ;
- wyróżniający poziom edytorski opracowanej rozprawy cechujący się : logicznością przekazu, syntetycznym i bogatym w zawartość informacyjną układem treści poszczególnych rozdziałów, z reprezentatywnym dla nich materiałem badawczym analityczny i pomiarowy, ilustrujący poszukiwane wskazania budowy przemysłowych systemów pomiarowych drgań łożysk tocznych

**stwierdzam, że w sposób wyróżniający** artykułują one osiągnięcia Doktoranta i poziom rozprawy. Jej wynik tworzą i rozszerzają bazę rezultatów nowej wiedzy konstruktorskiej dotyczącej budowy

diagnostycznych systemów przemysłowych. Są atrakcyjne naukowo i aplikacyjnie. Generują **perspektywiczne wskazanie** dla procesu poszukiwania nowych innowacyjnych rozwiązań dedykowanych procesom monitorowania drgań łożysk tocznych na liniach produkcyjnych .

W mojej opinii, wypracowany przez Doktoranta przekaz nowej wiedzy **nie miał** dotychczas należytego miejsca w przekazie literaturowym. Kandydat swoimi badaniami raportowanymi w rozprawie przedstawił rozwiązanie ważnego dla przemysłu łożysk tocznych problem kontroli jakości ich produkcji, ocenianej w wymiarze kontroli poziomu cechujących je drgań .

Wymienione wyżej wyróżniki związane z wynikami aplikacyjnymi i naukowymi Jego rozprawy doktorskiej **skłaniają mnie do wystąpienia z wnioskiem o jej wyróżnienie.**

Dojcieh Borko