

dr hab. inż. Grzegorz Klekot, prof. uczelni
Politechnika Warszawska
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych

Warszawa, 25.07.2023 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Łoja
pt. „Diagnostyka eksploatacyjna pomp próżniowych”

Podstawy formalne opracowania recenzji:

Recenzję pracy doktorskiej mgr inż. Pawła Łoja opracowano zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej z dnia 31 maja 2023 roku.

1. Uwagi o wyborze tematyki pracy

Procesy eksploatacji współczesnych obiektów technicznych wymagają ciągłego doskonalenia narzędzi pozwalających przewidywać potencjalne awarie, lokalizować uszkodzenia i monitorować parametry eksploatacyjne poszczególnych zespołów. Dotyczy to w szczególności rotacyjnych łopatkowych pomp próżniowych, które są wrażliwe na zużycie współpracujących elementów. Konsekwencją takiego zużycia są zmiany kształtu stykających się powierzchni, a w efekcie – przecieki czynnika roboczego i utrata funkcjonalności. Postulat poprawy niezawodności pomp próżniowych jest istotny ze względu na ich dość szerokie stosowanie w różnych gałęziach przemysłu, transporcie, medycynie.

Biorąc pod uwagę powyższe uważam, że tematyka pracy jest aktualna, a badania nad nieinwazyjnym diagnozowaniem pomp próżniowych mają znaczenie użytkowe i naukowe.

Biuro Dziekana

2. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do oceny praca liczy 110 stron. Główna część merytoryczna zawiera 94 strony tekstu łącznie z rysunkami i tabelami; resztę stanowią: licząca 78 pozycji bibliografia, strona tytułowa, podziękowania, spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim, oraz spis rysunków i tabel.

W pierwszym rozdziale zatytułowanym „Wstęp” Autor zwraca uwagę na celowość wykorzystania narzędzi diagnostyki technicznej na potrzeby zapewnienia właściwej eksploatacji urządzeń technicznych, oraz omawia układ pracy.

Rozdział drugi zawiera informacje dotyczące technicznego pojęcia próżni, wykorzystania podciśnienia w procesach technologicznych, oraz charakterystykę pomp próżniowych. Szczegółowo, z uwzględnieniem aspektów eksploatacyjnych, omówiono działanie rotacyjnych pomp łopatkowych, zaprezentowano przykładowe reprezentatywne uszkodzenia konkretnych elementów takich pomp i powszechnie stosowane (opisane w literaturze) metody ich diagnozowania. Zaprezentowanie faktycznych uszkodzeń eksploatacyjnych rzeczywistych obiektów uważam za mocną stronę pracy.

Jako cel rozprawy wskazano opracowanie koncepcji bezinwazyjnej metody diagnostycznej do monitorowania stanu łopatek rotacyjnej łopatkowej pompy próżniowej bazującej na sygnale ciśnieniowym. Autor sformułował trzy tezy pracy związane z wykorzystaniem zmieniającego się ciśnienia do diagnostyki rotacyjnych łopatkowych pomp próżniowych, oraz wypunktował zaplanowane i zrealizowane zadania badawcze.

W kolejnym rozdziale Doktorant zaprezentował własną propozycję modelowania zmian ciśnienia w komorze ssania rotacyjnej łopatkowej pompy próżniowej, która umożliwia uwzględnienie wpływu zużycia (lub uszkodzenia) poszczególnych łopatek; przedyskutował przykładowe przebiegi czasowe uzyskane jako rezultat takiego modelowania.

Zagadnieniom realizacji układu pomiarowego, rejestracji i analizy sygnału ciśnienia poświęcono rozdział czwarty. Omówiono szczegóły konstrukcyjne urządzenia pomiarowego, podano definicje potencjalnie użytecznych do rozwiązywania zadań diagnostycznych jednoliczbowych miar amplitudowych oraz wyróżników funkcyjnych (w dziedzinach czasu, częstotliwości i kąta obrotu wirnika), przedstawiono tryb prowadzenia obliczeń takich deskryptorów diagnostycznych.

Piąty rozdział zatytułowany „Weryfikacja metody” zawiera dyskusję wyników obliczeń przeprowadzonych dla przebiegów czasowych sygnałów ciśnieniowych uzyskanych z wykorzystaniem modelowania oraz zarejestrowanych podczas czynnego eksperymentu diagnostycznego; ponadto zaprezentowano rezultaty biernego eksperymentu diagnostycznego zrealizowanego na populacji 47 różnych łopatkowych pomp rotacyjnych (27 sprawnych i 20 niesprawnych). Przedstawione tu wyniki badań i analiz mają kluczowe znaczenie dla zaproponowanej metody oceny stanu łopatkowych rotacyjnych pomp próżniowych.

Szósty rozdział na przykładzie konkretnego egzemplarza rotacyjnej próżniowej pompy łopatkowej ilustruje skuteczność wnioskowania o stanie technicznym poprzez porównanie deskryptorów diagnostycznych uzyskanych dla sygnałów ciśnieniowych zarejestrowanych bezpośrednio przed remontem (stan przedawaryjny) z analogicznymi deskryptorami po wykonaniu naprawy. Wykazano, że metodyka umożliwia ocenę ogólnego stanu technicznego obiektu, a nawet ustalenie uszkodzenia konkretnej łopatki.

Podsumowanie uzyskanych efektów badań Autor przedstawił w ostatnim, siódmym rozdziale. Przeprowadzone badania dowiodły, że przebieg ciśnienia na króćcu ssawnym rotacyjnej łopatkowej pompy próżniowej zawiera informacje diagnostyczne, a analiza tego sygnału pozwala określić i zlokalizować niesprawność. Poprzez opracowanie i zastosowanie urządzenia pomiarowego pokazano narzędzie umożliwiające monitorowanie stanu łopatek rotacyjnej olejowej pompy próżniowej. Osiągnięte rezultaty zachęcają do rozwijania opracowanej metody wykorzystującej ciągły pomiar ciśnienia w kierunku diagnostyki pomp bezolejowych.

3. Ocena pracy

Przedstawiony przegląd literaturowy jest opracowany właściwie. Odzwierciedla aktualny stan wiedzy, nawiązuje do dotychczasowych badań związanych z problematyką rozprawy prowadzonych w ośrodkach zagranicznych i krajowych. Wybór literatury przedstawiony przez Autora jest trafny a sposób cytowania poprawny, co świadczy o umiejętności posługiwania się materiałem bibliograficznym. Autor jako cel rozprawy wskazuje „opracowanie koncepcji bezinwazyjnej metody diagnostycznej, która może być zastosowana do ciągłego monitorowania stanu

łopatek w rotacyjnej łopatkowej pompie próżniowej, jak i pozwalającej na okresową ocenę ich stanu". Osiągnięcie tak sformułowanego celu wymagało zrealizowania ośmiu zadań obejmujących: zaprojektowanie i wykonanie urządzenia badawczego do pomiaru i rejestracji sygnału ciśnienia, opracowanie metody badania i analizy zarejestrowanego sygnału, zaplanowanie i przeprowadzenie czynnego eksperymentu diagnostycznego z wyodrębnieniem symptomów zadanych uszkodzeń, przeprowadzenie biernego eksperymentu diagnostycznego, opracowanie rezultatów badań, zaproponowanie sposobu klasyfikacji stanów łopatkowych pomp próżniowych na podstawie wybranych deskryptorów sygnału ciśnienia, oraz sformułowanie wniosków z przeprowadzonych badań.

Dla osiągnięcia postawionego celu Doktorant zaproponował modelowy opis zmian ciśnienia na wejściu łopatkowej rotacyjnej pompy próżniowej oraz opracował układ pomiarowy do rejestracji ciśnienia z synchronicznym zapisem impulsów reprezentujących początek kolejnych obrotów pompy. Podczas czynnego eksperymentu diagnostycznego zarejestrował przebiegi zmian ciśnienia w króćcu wlotowym pompy łopatkowej sprawnej oraz po wprowadzeniu czterech zadanych niesprawności, następnie porównał deskryptory diagnostyczne określone na bazie pomiarów z analogicznymi uzyskanymi symulacyjnie z wykorzystaniem opracowanego modelu; przeprowadzone analizy wskazały podobieństwo wybranych deskryptorów obiektu rzeczywistego i modelu. Wkład w opracowanie metody wniósł również bierny eksperyment diagnostyczny na populacji 47 różnych rotacyjnych łopatkowych pomp próżniowych o różnych parametrach technicznych (27 sprawnych i 20 niesprawnych), podczas którego analizowano rezultaty grupowania obiektów na podstawie różnych cech punktowych zarejestrowanych przebiegów ciśnieniowych. Bazując na przebiegach ciśnieniowych konkretnego egzemplarza rotacyjnej próżniowej pompy łopatkowej w stanie przedawaryjnym i po wykonaniu naprawy pokazano, że z wykorzystaniem opracowanej metodyki możliwa jest ocena stanu technicznego pomp próżniowych.

Praca została zakończona poprawnym podsumowaniem i wskazaniem kierunków rozwojowych; zaakcentowano użyteczność opracowanej metodyki do diagnozowania łopatek.

Zrealizowano cel pracy i uzasadniono trzy związane z tym celem tezy, a opracowana metodyka ma znaczenie użytkowe, stanowiąc wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna.

Całość działań przedstawionych w pracy oceniam pozytywnie pod względem merytorycznym i metodycznym. Autor zaproponował poprawny opis zmian ciśnienia w komorze ssania łopatkowej rotacyjnej pompy próżniowej, zaplanował i przeprowadził cykl badań eksperymentalnych, oraz opracował narzędzie pozwalające wykrywać usterkę i z dobrą skutecznością klasyfikować stan techniczny obiektów na podstawie zarejestrowanych przebiegów zmian ciśnienia – co powinno usprawnić procesy eksploatacyjne tych pomp.

4. Szczegółowe uwagi krytyczne

W trakcie czytania pracy nasuwają się następujące uwagi i pytania:

- Niezbyt staranna korekta redakcyjna rozprawy poskutkowała błędną definicją transformaty Fouriera: „df” zamiast „dt” we wzorze (31) to błąd „literowy” o istotnym merytorycznym znaczeniu.
- Nie rozszyfrowano pojęcia amplitudy pierwiastkowej użytej w zależności opisującej współczynnik luzu (tabela 6).
- Dyskusyjne wydaje się równoważne stosowanie pojęcia „generowanie sygnału” dla przebiegów symulowanych i rzeczywistych.
- Niewiele uwagi Autor poświęcił kwestiom zachowania spójności pomiarowej dla przetwarzanych sygnałów ciśnieniowych. Jak zrealizowano dobrą praktykę laboratoryjną w tym obszarze?
- Dlaczego zrezygnowano z oszacowania niepewności pomiarów ciśnienia realizowanych z wykorzystaniem rejestratora zaprojektowanego i wykonanego na potrzeby pracy? Czy i (ewentualnie) jakie znaczenie dla wnioskowania diagnostycznego ma niepewność odwzorowania chwilowych wartości amplitudy ciśnienia na wejściu pompy próżniowej?

5. Uwagi o stronie edytorskiej rozprawy

Praca pod względem edytorskim nie została opracowana zbyt starannie, zwracają uwagę liczne błędy „literowe”. Poniżej kilka innych przykładów pomyłek nie wyeliminowanych podczas prac redakcyjnych.

- Strona 11, tytuł rysunku 1: „funcki” zamiast „funkcji”;

- Strona 11, podpis rysunku 1: „ciśnienie” zamiast „ciśnienia”;
- Strona 12, ostatni wiersz tekstu: „zapewniani” zamiast „zapewnienia”;
- Strona 16, rysunek 5, opis osi poziomej: „ciśnienie” zamiast „ciśnienia”;
- Strona 16, podpis rysunku 5: „ciśnieni” zamiast „ciśnienia”;
- Strona 16, wiersz 6/5 nad rysunkiem 8: „przeprowadzanym okresowo przeglądom” zamiast „przeprowadzanych okresowo przeglądów”;
- Strona 21, podpis rysunku 15: „wirniku” zamiast „wirnika”;
- Strona 27, podpis rysunku 22: „generowane” zamiast „generowanego”;
- Strona 28, pierwszy wiersz od góry i trzeci od dołu: „generowane” zamiast „generowanego”;
- Strona 28, jedenasty wiersz od dołu: „powstają” zamiast „powstaje”;
- Strony 28, 42, 54, tabele 6, 8, 14: „odchylenie sztandarowe” zamiast „odchylenie standardowe”;
- Strona 40, dwunasty wiersz od góry: „zaczynał się kończył się” zamiast „zaczynał się i kończył”;
- Strona 49, szósty wiersz od dołu: „opisana” zamiast „opisaną”;
- Strona 90, tabela 25: „Opia” zamiast „Opis” oraz „bark” zamiast „brak”;
- Strona 90, pierwszy akapit tekstu: „sztandarowego” zamiast „standardowego”;
- Strona 92, trzeci wiersz od dołu: „dziecinie” zamiast „dziedzinie”.

Zrozumienie niektórych zdań utrudnia nie w pełni właściwe pozycjonowanie separatora „,” (przecinek). Niemniej sygnalizowane mankamenty stylistyczne i edytorskie nie komplikują odbioru istoty pracy ani nie obniżają jej czytelności.

6. Wnioski końcowe

Wymienione przeze mnie uwagi krytyczne nie obniżają pozytywnej całościowej oceny pracy. Uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa jest wartościowa pod względem poznawczym i utylitarnym, zawiera nowatorskie spojrzenie na wykorzystanie informacji zawartych w sygnale ciśnienia do monitorowania stanu technicznego łopatkowej rotacyjnej pompy próżniowej.

Mgr inż. Paweł Łój wykazał się umiejętnością postawienia i samodzielnego rozwiązania problemu naukowego, jakim jest opracowanie opisu modelowego zmian analizowanego parametru, właściwe zaplanowanie cyklu badań eksperymentalnych

oraz wykorzystanie rezultatów do poprawnego formułowania wniosków; uznanie budzi zaproponowana nowatorska metoda diagnostyczna. Doktorant wykazał, że ma odpowiedni zasób wiedzy teoretycznej i umiejętności praktycznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz, że potrafi samodzielnie prowadzić pracę naukową.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana praca doktorska mgr inż. Pawła Łoja nt „Diagnostyka eksploatacyjna pomp próżniowych” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim przez ustawę z dnia z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2018 r. poz. 1668 z późn. zm) i może zostać dopuszczona do publicznej obrony.

Prof. Grzegorz Klekot

/podpis odręczny/

*wytęczenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)