RDIMe. 512.12.2023

Kraków, 31-08-2023

Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki w Krakowie
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej
Katedra Automatyki i Informatyki E-1

dr hab. inż. Janusz Gołdasz, prof. PK

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. PAWŁA ŁOJA
pt.
"Diagnostyka eksploatacyjna pomp próżniowych"

Promotor pracy: prof. dr hab. inż. Wojciech Cholewa

Podstawa prawna oceny:
Pismo nr RDIMe.512.12.2023 Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, z dnia 31/05/2023 r.

1. CEL I ZAKRES ROZPRAWY

W Rozdziale 2.10 rozprawy Doktorant sformułował następujące tezy pracy:

- Przebieg ciśnienia generowanego przez rotacyjną pompę łopatkową może być traktowany jako sygnał diagnostyczny (nośnik informacji o stanie pompy).
- Analiza sygnału ciśnienia generowanego przez rotacyjną łopatkową pompę próżniową pozwala na wykrycie niesprawności, jej lokalizację oraz określenie jej charakteru.
- Możliwe jest zbudowanie relatywnie prostego i taniego rejestratora sygnału ciśnienia generowanego przez pompę łopatkową pozwalającego na ciągły lub okresowy monitoring stanu łopatek pompy.

Natomiast w Rozdziale 2.11 Autor wymienił następujące zaplanowane zadania badawcze:

- **Zadanie 1:** Projekt i wykonanie urządzenia badawczego celem wykonania koniecznych pomiarów ciśnienia z odpowiednią dokładnością i częstotliwością próbkowania
- **Zadanie 2**: Opracowanie metody badania i analizy rejestrowanego w czasie pomiarów sygnału ciśnienia
- **Zadanie 3**: Wytypowanie urządzeń i niesprawności do czynnego eksperymentu diagnostycznego
- **Zadanie 4**: Przeprowadzenie czynnego eksperymentu diagnostycznego polegającego na zadawaniu badanej pompie określonych niesprawności i wyodrębnienie z generowanego

Biuro Dziekana
wpłynęło dnia 05.09.2023
RDIMe/512/12/2023
nr ..... zał. .....

przez nią sygnału ciśnienia symptomów tych uszkodzeń

- **Zadanie 5**: Przeprowadzenie biernego eksperymentu diagnostycznego polegającego na rejestracji sygnału ciśnienia generowanego przez dostępne urządzenia i jego analizę
- **Zadanie 6:** Przedstawienie rezultatów badań w postaci spostrzeżeń i wniosków
- **Zadanie 7:** Zaproponowanie sposobu klasyfikacji stanów łopatkowych rotacyjnych pomp próżniowych bazujących na informacjach zawartych w sygnale ciśnienia
- **Zadanie 8:** Sformułowanie wniosków

Ogólnie, problem badawczy podjęty przez Doktoranta dotyczy opracowania bezinwazyjnej metody diagnostyki eksploatacyjnej próżniowych rotacyjnych pomp łopatkowych. Autor zamierzał m.in. przeprowadzić obszerną analizę pracy w/w pomp, zidentyfikować typowe niesprawności i towarzyszące im symptomy diagnostyczne, stworzyć model fenomenologiczny sygnału ciśnienia pompy, wykonać szereg eksperymentów diagnostycznych (także z wykorzystaniem opracowanego przez siebie rejestratora) oraz zaproponować metody analizy danych celem identyfikacji badanych niesprawności i klasyfikacji stanów pracy w/w rodzaju pomp.

Podsumowując, intencją Autora było zaproponowanie diagnostycznej metody do monitorowania stanu pomp próżniowych o charakterze prewencyjnym m.in. w celu redukcji kosztów serwisowania w/w urządzeń i skrócenia czasu napraw.

2. ANALIZA ZAWARTOŚCI ROZPRAWY I SPOSÓB JEJ MERYTORYCZNEGO PRZEDSTAWIENIA

Wyniki badań Doktoranta zostały udokumentowane na 110 stronach rozprawy zawierającej: streszczenia w j. polskim i angielskim, spis rysunków, spis tabel, 7 rozdziałów, bibliografię (78 pozycji lit.). W spisie literatury znalazły się 4 recenzowane prace (w tym 2 współautorskie) Autora, z których 2 zostały opublikowane w czasopismach z listy MEiN (łączna liczba cytowań wg bazy Scopus: 2).

W Rozdziale 1 (Wstęp) Autor zawarł m.in. przedstawienie zakresu pracy i wprowadzenie do tematyki badawczej.

W **Rozdziale 2** (Geneza pracy) Autor omawia podstawy teorii próżni oraz podciśnienia. Analizuje szczegółowo rodzaje łopatkowych rotacyjnych pomp próżniowych, ich budowę i zasadę działania oraz najczęstsze awarie i uszkodzenia. W Rozdziale 2.9 prezentuje cel pracy, a w kolejnych rozdziałach jej tezy oraz zaplanowane zadania badawcze.

Następnie, **Rozdział 3** (Model sygnału ciśnienia generowanego przez pompę próżniową) służy Autorowi do przedstawienia prostego modelu fenomenologicznego sygnału ciśnienia w łopatkowej pompy próżniowej. Przy użyciu tego modelu Doktorant analizuje charakterystyczne cechy sygnału ciśnienia występujące podczas pracy pompy sprawnej i uszkodzonej. Na podstawie otrzymanych wyników Doktorant zaproponował metodę analizy w/w sygnału, której składniki opisuje szczegółowo w Rozdziale 4.

Rozdział 4 zawiera opis zastosowanej metody badawczej i analizy sygnału ciśnienia pompy oraz podstawowe założenia metody diagnostycznej. Autor podkreśla na wstępie, iż proponowana przez niego metoda może być stosowana w warunkach, w których sygnał ciśnienia generowanego przez pompę jest stacjonarny co najmniej w szerszym sensie. Następnie, opisuje system akwizycji danych umożliwiający pozyskiwanie, rejestrację i przechowywanie sygnałów ciśnienia z badanej

pompy. W celu realizacji wspomnianych powyżej zadań badawczych Doktorant zaproponował zmianę dziedziny, w której przeprowadza uśrednianie wartości rejestrowanego ciśnienia z dziedziny czasu na dziedzinę drogi kątowej wału wirnika rotacyjnej łopatkowej pompy próżniowej. Pozostałe składniki zaproponowanej przez Autora metody stanowią: uśrednianie synchroniczne, analiza widmowa, znormalizowana funkcja autokorelacji. W Rozdziale 4.8 zawarto opis procedury przetwarzania danych pomiarowych.

W obszernym **Rozdziale 5** Autor weryfikuje zaproponowaną przez siebie metodę pozyskiwania danych na podstawie analizy sygnałów testowych (zob. Tabela 7) wygenerowanych przez zaproponowany w Rozdziale 3 model matematyczny oraz wyników dwóch rodzajów eksperymentów diagnostycznych (czynnego – przeprowadzonego na reprezentatywnym obiekcie rzeczywistym, biernego – przeprowadzonego z wykorzystaniem grupy rotacyjnych pomp łopatkowych próżniowych o różnym stopniu zużycia). Doktorant każdorazowo dokonuje weryfikacji otrzymanych wyników poprzez a) analizę cech punktowych otrzymanych sygnałów diagnostycznych, b) zastosowanie uśredniania synchronicznego, c) zastosowanie znormalizowanej funkcji autokorelacji, d) zastosowanie Transformaty Fouriera, e) zmianę dziedziny sygnału testowego. Podsumowując, analiza wyników otrzymanych przy zastosowaniu uśredniania synchronicznego, funkcji autokorelacji, FFT oraz przy zmianie dziedziny badanego sygnału pozwala zaobserwować zmiany towarzyszące określonym niesprawnościom (w relacji do danych pochodzących z pompy sprawnej). Niektóre z nich (znormalizowana funkcja autokorelacji) wydają się jednak mało wrażliwe na niewielkie uszkodzenia łopatek badanej pompy.

W oparciu o otrzymane dane Doktorant zdecydował się zmodyfikować metodę analizy przy zmianie dziedziny badanego sygnału celem zmniejszenia wpływu fluktuacji prędkości kątowej wirnika pompy na wyniki analizy. Podjął także próbę wyznaczenia minimalnej liczb obrotów wirnika w serii danych pomiarowych.

Analiza, którą Doktorant przeprowadza na podstawie cech punktowych wyznaczonych z biernego eksperymentu diagnostycznego z udziałem pomp, które klasyfikuje jako 'sprawne' i 'niesprawne' stanowi punkt wyjścia do klasteryzacji przy użyciu algorytmu *k*-średnich++. W Rozdziale podjęto próbę wyboru pary cech punktowych o wysokiej wrażliwości na zmiany stanu badanych obiektów i braku wzajemnej korelacji. Ocena ilości grup przeprowadzona jest przez Doktoranta z wykorzystaniem zaproponowanej funkcji kryterialnej (Rozdział 5.3.1). Określenie optymalnej liczby grup (N=4) dokonano stosując metodę poszukiwania punktu przegięcia wykresu zmienności tejże funkcji. Przeprowadzona analiza składowych głównych (PCA) wykazała obecność różnic w rozkładzie cech sygnałów pochodzących z maszyn sprawnych i niesprawnych. Ogólnie, wyniki badań opisanych w Rozdziale można uznać za satysfakcjonujące. W podsumowaniu Rozdziału Doktorant wskazuje na potrzebę dalszych badań w celu zebrania większej liczby przykładów.

Materiał zawarty w **Rozdziale 6** poświęcony jest praktycznemu zastosowaniu opisanej w Rozdziale 5 metody diagnostycznej. Wykonane przez Autora badania zostały przeprowadzone z wykorzystaniem pompy przed i po wykonanych pracach remontowych, a więc miały charakter porównawczy. Badania miały na celu m.in. ocenę skuteczności w/w metody, potwierdzenie postawionych we wstępie tez co do możliwości zastosowania metod analizy ciśnienia do oceny stanu technicznego rotacyjnych łopatkowych olejowych pomp próżniowych. Analiza sygnału ciśnienia została przeprowadzonych przy użyciu tych samych metod co w Rozdziale 5. Podsumowując wyniki zawarte w Rozdziale 6 można stwierdzić, iż a) wartości cech punktowych wskazują na poprawę stanu technicznego badanej pompy, b) wyniki otrzymane przy użyciu uśredniania synchronicznego, znormalizowanej funkcji autokorelacji oraz FFT są niejednoznaczne,

c) wykresy biegunowe otrzymane w dziedzinie kata obrotu wału wirnika pompy dostarczają danych istotnych dla oceny stanu badanej pompy.

Rozdział 7 zawiera uwagi końcowe i wnioski. Na podstawie przeprowadzonych badań Doktorant sformułował szereg wniosków, ogólnych i szczegółowych, które znalazły się w Rozdziałach 7.2.1 oraz 7.2.2. Podsumowując, wykazał słuszność tez postawionych we wstępie pracy. Rozdział kończy omówienie przez Autora kierunku dalszych badań.

3. OCENA MERYTORYCZNA

Oceniana rozprawa doktorska dotyczy opracowania bezinwazyjnej metody diagnostycznej próżniowych rotacyjnych pomp łopatkowych. Podjętą tematykę można uznać za cenną i wartościową nie tylko ze względów naukowych i poznawczych, ale także praktycznych.

Za najważniejsze osiągnięcia Doktoranta uważam:

- Wykazanie się zaawansowaną znajomością budowy i działania rotacyjnych łopatkowych pomp próżniowych
- Wykazanie, iż sygnał ciśnienia generowany przez pompy próżniowe jest wartościowym nośnikiem informacji diagnostycznych
- Opracowanie autorskiego rejestratora danych pomiarowych
- Wykazanie się umiejętnością planowania złożonych eksperymentów diagnostycznych (zarówno czynnych jak i biernych)
- Posługiwanie się zaawansowanym aparatem matematycznym do analizy danych z eksperymentów diagnostycznych, co udowodnił np. wykorzystując algorytmy grupowania danych w Rozdziale 5
- Techniki analizy danych wchodzące w skład zaproponowanej metody diagnostycznej wymagają relatywnie niewielkich mocy obliczeniowych, przez co w/w metoda wydaje się być relatywnie tania w potencjalnej implementacji w ramach systemu monitoringu

Należy docenić także przeprowadzenie złożonych, licznych i czasochłonnych eksperymentów diagnostycznych m.in. z udziałem dużej liczby badanych pomp próżniowych. Wnioski, które z nich wynikają, są podstawą do dalszych badań wieloskalowych i opracowania automatycznego systemu monitorującego pracę pomp.

Jednocześnie, zaskakuje w rozprawie niezwykle krótki przegląd literatury w zakresie analizy obecnego stanu wiedzy dotyczącej diagnostyki pomp próżniowych. Analiza przeprowadzona przez Autora jest bardzo powierzchowna. Może to świadczyć o nieznajomości podjętej przez niego problematyki badawczej, choć analiza zawartego w rozprawie materiału pozwala wnioskować, iż jest wręcz przeciwnie, a z treści rozprawy wynika znajomość tematyki badawczej przez Doktoranta. Można żałować też, iż Autor nie podjął prób opracowania modelu matematycznego badanego urządzenia zawierającego dynamiczne oddziaływania pomiędzy elementami obrotowymi pompy a ściśliwym medium, który mógłby pełnić rolę symulatora jej pracy i jednocześnie generatora danych diagnostycznych.

Podsumowując, struktura pracy, realizacja badań, interpretacja wyników, przygotowanie aparatury pomiarowej oraz wybór technik do analizy danych użytych do weryfikacji zaproponowanej metody diagnostycznej nie budzą zastrzeżeń jako całość.

Na podstawie wyników zawartych zwłaszcza w Rozdziałach 5 i 6 rozprawy, główne tezy pracy

można uznać za potwierdzone, a materiał za wartościowy i zawierający elementy oryginalności. Uwagi merytoryczne zawarłem w Rozdziale 4.2 niniejszej recenzji.

4. UWAGI

Uwagi co do treści rozprawy zostały podzielone na dwie zasadnicze grupy: uwagi redakcyjne oraz uwagi merytoryczne.

4.1. Uwagi redakcyjne

Rozprawa została zredagowane poprawnie. Błędy ortograficzne i interpunkcyjne są, moim zdaniem, nieliczne. Tzw. literówki są głównie w tytułach wykresów (powtarzanie wyrazu „funcja"), ale także na stronie tytułowej pracy (w nazwie wydziału) oraz w spisie literatury. Pewne zastrzeżenia można mieć do oznaczenia części zamieszczonych w rozprawie fotografii – przykładowo, moim zdaniem, Rys. 28-30 powinny zawierać odsyłacze do znajdujących się na fotografiach komponentów.

Schemat pompy próżniowej na Rys. 7 jest niskiej jakości. Fotografia z Rys. 12 jest nieczytelna.

Formatowanie wykresów jest niejednolite, np. w Rozdziale 3 względem wykresów w pozostałych rozdziałach. W opisach osi części wykresów brak polskich liter. (np. „czestotliwosc"). Biorąc pod uwagę, możliwości, jakie użytkownikowi stwarza współczesne oprogramowanie inżynierskie w zakresie graficznej prezentacji wyników, jest to niedociągnięcie. Rozmiar czcionki na wykresach zamieszczonych w rozprawie jest często zbyt mały, przez co są one nieczytelne.

4.2. Uwagi merytoryczne

Podczas lektury rozprawy nasunęły mi się wymienione niżej uwagi o charakterze merytorycznym:

- Przegląd literatury przeprowadzony przez Doktoranta (m.in. Rozdział 2.8) jest, moim zdaniem, zbyt krótki i powierzchowny; Rozdział 2.8 zajmuje mniej niż połowę strony A4. Zasadniczo, w kontekście problematyki badawczej Autor odnosi się tylko do kilkunastu pozycji, z których część stanowi dokumentację techniczną udostępnianą przez producentów pomp.
- Niemal połowa z 78 pozycji w spisie literatury, do których w rozprawie odnosi się Doktorant, została opublikowana przed 10 i więcej laty, przez co można odnieść wrażenie, iż tematyka rozprawy jest niezbyt aktualna.
- Dziwi fakt pominięcia przez Autora w przeglądzie literatury modeli matematycznych rotacyjnych łopatkowych pomp próżniowych w kontekście wykorzystania w symulacjach stanów pomp próżniowych.
- W pracy brak modelu matematycznego rotacyjnej pompy próżniowej – Doktorant nie podjął się opracowania modelu pompy lub wykorzystania znanego modelu. Model fenomenologiczny zamieszczony w Rozdziale 3 jest uproszczonym modelem sygnału ciśnienia generowanego przez pompę, którym Autor posługuje się do symulowania symptomów diagnostycznych. Uważam, iż model matematyczny pompy próżniowej zawierający dynamiczne oddziaływania pomiędzy elementami obrotowymi pompy a ściśliwym medium byłby lepszym rozwiązaniem w roli symulatora niesprawności pracy pompy.

- Czy model sygnału ciśnienia łopatkowej rotacyjnej pompy próżniowej jest oryginalnym modelem Autora? Zakładam, że tak jest. Jeśli nie, to taka informacja powinna zostać podana w Rozdziale 3 wraz z podaniem do odpowiedniej pozycji w spisie literatury.
- Ogólnie, w rozprawie brak informacji dot. oprogramowania inżynierskiego służącego Autorowi do generowania i przetwarzania uzyskanych danych.
- Podana przez Autora informacja dot. przetwarzania sygnału ciśnienia przy użyciu FFT jest niekompletna. Brakuje, m.in. danych odnośnie rodzaju i wielkości okna.
- W Rozdziale 4.1 brak schematu toru pomiarowego. Autor przedstawia jedynie schemat zbudowanego przez siebie filtra dolnoprzepustowego.
- Weryfikacja metody w Rozdziale 5.1 została przeprowadzona wyłącznie na podstawie sygnałów 'idealnych' tj. pozbawionych symulowanych zakłóceń.
- Co Autor rozumie przez sformułowania 'łopatka lekko uszkodzona' oraz 'łopatka mocno uszkodzona'?
- Jakie kryterium pozwala Autorowi rozróżnić łopatkę lekko uszkodzoną od mocno uszkodzonej?
- Większość wyników analizy przy zastosowaniu FFT jest słabo czytelna z uwagi na przyjęte przez Autora skale osi, przez co są one trudne do zinterpretowania przez czytelnika.
- Uważam, iż Autor powinien odnieść się do skuteczności innych bezinwazyjnych metod diagnostycznych działających np. w oparciu o analizę drgań pompy czy sygnałów akustycznych generowanych przez pompę podczas pracy. Taka analiza mogłaby być przeprowadzona w formie badań porównawczych z użyciem modelu matematycznego lub rzeczywistego obiektu.
- Wybór metod nieparametrycznych będących składowymi zaproponowanej przez Autora metody diagnostycznej jest, moim zdaniem, arbitralny.

5. KONKLUZJA

Moim zdaniem, omówione powyżej rezultaty rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Łoja przedstawiają oryginalny wkład Doktoranta w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna. Wymienione przeze mnie usterki i niedoskonałości nie podważają osiągnięcia przez Doktoranta założonych celów i udowodnienia postawionych tez.

Recenzowaną pracę oceniam pozytywnie.

Ogólnie, rozprawa zawiera wartościowy materiał.

Doktorant wykazał się znajomością wiedzy w zakresie działania i diagnostyki rotacyjnych łopatkowych pomp próżniowych oraz zaproponował poprawny model fenomenologiczny sygnału ciśnienia do generowania określonych symptomów diagnostycznych. Zaproponował oryginalny sposób analizy sygnału ciśnienia pompy celem oceny jej stanu technicznego, zbudował autorskie stanowisko laboratoryjne i układ pomiarowy do rejestracji sygnałów z pompy, wykonał liczne eksperymenty diagnostyczne, przeprowadził złożoną analizę otrzymanych wyników i poprawnie je zinterpretował.

Podsumowując, moim zdaniem, przedłożona rozprawa autorstwa mgr inż. Pawła Łoja spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą aktualnie **Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o**

szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 20.04.2023 r., poz. 742). Może służyć zatem za podstawę do rozpatrzenia wniosku o nadanie Autorowi stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

/Janusz Gołdasz/