dr hab. inż. Jacek Dziurdź, prof. uczelni
Instytut Podstaw Budowy Maszyn
Politechnika Warszawska

Warszawa, 30.07.2019 r.

Recenzja pracy doktorskiej
Pana mgr. inż. Adama Czabana
pt.: „Analiza hydrodynamicznego smarowania ferroolejami stożkowego łożyska ślizgowego”
(promotor: dr hab. inż. Andrzej Miszczak, prof. UMG)

Podstawą wykonania recenzji była uchwała Rady Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni z dnia 23.05.2019 r., przekazana pismem z dnia 11.06.2019 r.

1. Wprowadzenie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy zagadnień związanych z teorią stacjonarnego, hydrodynamicznego smarowania ferroolejem stożkowego łożyska ślizgowego. Zawiera autorską propozycję modelu zjawiska, na podstawie którego opracowano program obliczeniowy w środowisku MATLAB firmy MathWorks. Zaprezentowano wyniki obliczeń numerycznych przeprowadzonych dla różnych parametrów geometrycznych i fizycznych kilku przykładowych łożysk.

Zastosowanie ferrocieczy umożliwia wykorzystanie pola magnetycznego do sterowania, w pewnym zakresie, parametrami pracy łożyska ślizgowego np. generowanych sił nośnych, sił tarcia, momentów powstających na czopie, rozkładów ciśnień itp. Wynika to ze zjawiska, w którym wartości indukcji magnetycznej wywołują wzrost lepkości dynamicznej ferrocieczy w stosunku do przypadku gdy nie występuje zewnętrzne pole magnetyczne.

Temat podjęty w pracy jest jak najbardziej aktualny i mimo wielu publikacji dotyczących łożysk ślizgowych oraz ferrocieczy, pozostaje jeszcze wiele zagadnień do rozwiązania. Należy do nich m.in. problem opisu teoretycznego i badań zjawisk zachodzących w łożyskach ślizgowych stożkowych. Autor podjął się rozwiązania trudniejszego zagadnienia, gdzie występuje wiele problemów niespotykanych w łożyskach walcowych.

Stosowanie łożyska stożkowego jest też ciekawym zagadnieniem technicznym, gdyż umożliwia zastąpienie dwóch łożysk: poprzecznego i wzdłużnego działających w jednej podporze łożyskowanego wału.

2. Ogólne omówienie pracy

Przedstawiona do oceny praca doktorska liczy 180 stron tekstu głównego wraz z bibliografią i odwołaniem do stron internetowych (278 stron z załącznikami oraz spisem rysunków i tablic), na których zawarto treść pracy podzieloną na 5 rozdziałów: wprowadzenie, model matematyczny, metoda numeryczna, wyniki symulacji oraz podsumowanie i wnioski. W każdym rozdziale znajduje się kilka podrozdziałów. Tekst poprzedzono kilkustronnicowym streszczeniem napisanym w językach polskim i angielskim. Na początku zawarto wykaz najważniejszych oznaczeń, a po tekście głównym umieszczono dodatki oraz spis rysunków i tabel. Na końcu znajduje się bibliografia zawierająca 204 pozycje. Tekst rozprawy został uzupełniony 129 rysunkami (plus 95 rysunków w dodatkach) i 16 tabelami z danymi liczbowymi. Podział pracy można uznać za poprawny, choć uważam, że spis literatury powinien znaleźć się za tekstem głównym, a przed dodatkami. Liczbę pozycji w bibliografii uważam zdecydowanie za wystarczającą, a dobór trafny.

Praca zaczyna się obszernym wprowadzeniem, w którym zawarto podstawowe informacje na temat ferrocieczy, opis ich składu (ciecz bazowa i cząstki magnetyczne o właściwościach ferro- lub ferrimagnetycznych), opis ich właściwości lepkosprężystych i opis zmian lepkości dynamicznej ferrocieczy w zależności od udziału objętościowego ferrocząstek oraz od wartości indukcji magnetycznej pola. W oparciu o przegląd literatury opisano ogólne zjawisko smarowania hydrodynamicznego łożysk ślizgowych oraz smarowania łożysk ślizgowych ferrocieczami. W dalszej części pracy Autor przedstawił charakterystykę stożkowych łożysk ślizgowych, gdzie zwrócił uwagę na brak, w dostępnej literaturze, prac eksperymentalnych dotyczących smarowania ferrocieczą stożkowych łożysk ślizgowych. Przegląd literatury dotyczącej prezentowanych zagadnień został uzupełniony dorobkiem Doktoranta w tej tematyce (10 publikacja autorskich i współautorskich). Najważniejszą częścią wstępu jest podrozdział 1.5 „Geneza, teza i cele pracy", gdzie Autor przedstawia zalety stosowania łożysk ślizgowych stożkowych przy przenoszeniu obciążeń poprzecznych i wzdłużnych. Zastosowanie dodatkowo ferrocieczy jako czynnika smarnego umożliwia sterowaniem parametrami przepływowymi i eksploatacyjnymi. Postawiona w rozprawie doktorskie teza brzmi:

Zastosowanie ferrooleju jako czynnika smarującego w stożkowym łożysku ślizgowym stwarza możliwość regulacji i sterowania parametrami przepływowymi i eksploatacyjnymi łożyska oraz wpływania na wartość mimośrodowości, poprzez oddziaływanie na ferroolej zewnętrznym polem magnetycznym.

Podstawowym celem jaki przyjął Doktorant było przeprowadzenie analizy teoretyczno-numerycznej, dotyczącej hydrodynamicznego smarowania ferroolejami stożkowych łożysk ślizgowych, na podstawie której został napisany program do obliczeń numerycznych służący do wyznaczania parametrów przepływowych i eksploatacyjnych. Cel główny uzupełniony został opisem celów szczegółowych. Przyjęta teza i cele pracy nie budzą zastrzeżeń. Na zakończenie zamieszczono informacje dotyczące ograniczeń przyjętej metody.

Rozdział 2 zawiera wyprowadzenia modelu matematycznego, opisującego stacjonarne, nieizotermiczne i laminarne smarowanie hydrodynamiczne stożkowego łożyska ślizgowego przy założeniu, że środkiem smarnym jest nieściśliwa ferrociecz, której lepkość jest zależna od temperatury, prędkości ścinania, ciśnienia oraz od wartości indukcji magnetycznej pola zewnętrznego. W podrozdziale 2.1 przedstawiono geometrię łożyska stożkowego wraz z opisem podstawowych wymiarów. W celu opisu procesu hydrodynamicznego wprowadzono stożkowy układ współrzędnych oraz przedstawiono wzory, na podstawie których można wyznaczyć współrzędne (X, Y, Z) związane z osią obrotu czopa łożyska stożkowego. W podrozdziale 2.2 Autor przedstawił podstawowe równania wynikające z zasady zachowania pędu, zasady zachowania ilości substancji i zasady zachowania energii oraz z równań Maxwella opisujących pole magnetyczne. W następnym podrozdziale równania podstawowe i równania Maxwella zostały przedstawione we współrzędnych stożkowych i uzupełnione warunkami brzegowymi. W podrozdziale 2.4 wprowadzone zostały wielkości opisujące bezwymiarową postać równań dla cienkiej warstwy ferrocieczy w stożkowym łożysku ślizgowym wraz z warunkami brzegowymi dla równań w postaci bezwymiarowej. Podrozdział 2.5 zawiera bezwymiarowe składowe wektora prędkości w cienkiej warstwie ferrocieczy, w kierunku obwodowym, wzdłużnym i poprzecznym. W celu wyznaczenia sił nośnych łożyska ślizgowego, generowanych w szczelinie smarnej, w podrozdziale 2.6 Autor przedstawił wyprowadzenie zmodyfikowanego równania Reynoldsa na podstawie równania ciągłości strugi. Rozkład temperatury w szczelinie smarnej został wyznaczony przez analityczne całkowanie równania energii, co zostało zaprezentowane w podrozdziale 2.7. Przedstawione równania zostały uzupełnione, niezbędnym modelem lepkości ferrocieczy (podrozdział 2.8), gdyż lepkość dynamiczna cieczy smarującej jest jednym z podstawowych parametrów projektowych hydrodynamicznych łożysk ślizgowych. W modelu tym uwzględnione zostały wpływy temperatury, parametrów pola magnetycznego, ciśnienia oraz prędkości ścinania. W podrozdziale 2.9 zawarto obliczenia podstawowych parametrów eksploatacyjnych: siły nośnej, siły tarcia oraz wartości umownego współczynnika tarcia. Podsumowanie zagadnień poruszonych w rozdziale 2 zawiera podrozdział 2.10.

Rozdział 3 został poświęcony metodzie numerycznej. Zawarto w nim opis przyjętej metody rozwiązywania z wykorzystaniem metody różnic skończonych. Przedstawiono także schemat obliczeniowy będący podstawą do wykonania oprogramowania. Przeprowadzone obliczenia zostały wykonane dla jednej wybranej ferrocieczy. Jej parametry przedstawiono w podrozdziale 3.2. Podrozdział 3.3 zawiera rozważania dotyczące zbieżności wyników obliczeń oraz kryteria zakończenia: tempo zbieżności i residuum. W podrozdziałach 3.4 i 3.5 przedstawiono opis wpływu gęstości siatki obliczeniowej oraz liczby przedziałów całkowania na otrzymane wyniki. W celu sprawdzenia poprawności rozważań teoretycznych i prawidłowości działania stworzonego programu komputerowego Autor przeprowadził porównanie wyników ze znanymi rozwiązaniami analitycznymi równania Reynoldsa dla łożyska walcowego o nieskończonej długości (podrozdział 3.6), gdzie dla różnych wartości mimośrodowości względnej różnica wyniosła poniżej 1% już przy względnej długości łożyska wynoszącej 5. Podobnie postąpił w przypadku „krótkiego" łożyska walcowego, o bardzo małej długości bezwymiarowej (podrozdział 3.7). W tym wypadku wykorzystał przybliżone rozwiązanie równania Reynoldsa. Rozdział 3.8 zawiera weryfikację wyników obliczeń przeprowadzonych dla łożysk stożkowych. W tym celu dokonano porównania wyników obliczeń programem własnym z wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem programu CFD Fluent ze środowiska Ansys Workbench. Ze względu na dużą liczbę przypadków w tabeli 3.1 przedstawiono różnice między uzyskanymi wartościami. Podrozdział 3.9 stanowi podsumowanie rozdziału 3.

Główną część pracy zawiera rozdział 4, w którym Doktorant przedstawił wyniki przeprowadzonych symulacji hydrodynamicznego smarowania stożkowego łożyska ślizgowego ferroolejem o 2% stężeniu objętościowym cząstek magnetycznych. Obliczenia przeprowadzono dla różnych parametrów geometrycznych: bezwymiarowych długości oraz kątów definiujących stożek czopa i panewki łożyska. W kolejnych podrozdziałach zamieszczono analizy wpływu jednorodnego pola magnetycznego na parametry przepływowe i eksploatacyjne, gdzie w tabeli 4.1 przedstawiono zbiorcze wyniki dla różnych przypadków oraz wpływu niejednorodnego pola magnetycznego na parametry pracy, gdzie w tabeli 4.9 zawarte zostały zbiorcze wyniki porównawcze. W podrozdziale 4.3 zawarto analizę wpływu członów nieliniowych w stosowanych równaniach oraz wpływu pominięcia właściwości płynów nienewtonowskich na uzyskane wyniki. Następnie zamieszczono podsumowanie rozdziału 4.

Rozprawę doktorską kończy rozdział 5 „Podsumowanie i wnioski", gdzie Autor, na podstawie wyciągniętych wniosków, stwierdza osiągniecie głównego celu pracy

i potwierdzenie postawionej tezy. W ostatnim podrozdziale Autor umieścił opis planowanych kierunków dalszych prac, będących kontynuacją przedstawionych rozważań dotyczących zjawisk związanych z hydrodynamicznym smarowaniem ślizgowych łożysk stożkowych.

3. Uwagi krytyczne i zapytania

Staranna lektura rozprawy skłania do zgłoszenia kilku uwag, uwzględnienie których mogło by poprawić jakość pracy lub ją uzupełnić:

- Na stronie 27 Autor definiuje wielkość ω jako wartość prędkości obrotowej czopa wyrażonej w jednostce [1/s]. W fizyce tę wielkość nazywa się prędkością kątową i zgodnie z przyjętym układem SI wyraża się jednostką [rad/s]. Wymiar [1/s] jest w tym układzie zarezerwowany dla jednostki częstotliwości wyrażonej w [Hz]. W konsekwencji kąt pełny powinien być określony jako 2π rad. Nie wpływa to jednak na wyniki obliczeń.
- Na stronie 28 opisano przyjęty układ współrzędnych stożkowych. Czy niezbędne jest przyjęcie „osi” φ w postaci przedstawionej na rysunku 2.2? Formalnie kąt φ jest kątem położenia ruchomego układu współrzędnych (x, y) związanych z analizą procesu hydrodynamicznego wokół czopa łożyska, względem nieruchomego układu współrzędnych (X, Y, Z), co zresztą wynika ze wzorów 2.1.4–2.1.6. Oczywiście takie podejście nie wpływa na wynik rozwiązania.
- Rozumiem, że podana na stronie 41 wielkość R_0 = 0,025 [mm] jest błędem literowym. Natomiast nie rozumiem dlaczego wartość lepkości η_0 na stronie 42 wynosi 0,0265 [Pa·s], a na stronie 66 wynosi 0,263 [Pa·s] przy tych samych innych parametrach? Ponadto na stronie 68 występują wartości 0,0263 [Pa·s] i 0,0265 [Pa·s]. Która wartość jest właściwa?
- Jak zwykle dyskusyjne jest sformułowanie „szybkość ścinania” zdefiniowana na stronie 60 i wyrażona w jednostce [1/s]. Moim zdaniem może lepiej użyć zwrot „prędkość ścinania” i jednostkę [rad/s]?
- W przeprowadzonych rozważaniach brakuje mi informacji dotyczących stosowanych w stożkowych łożyskach ślizgowych wartości kąta rozwarcia stożka γ oraz wyznaczenia teoretycznego kąta granicznego wykorzystując stworzony model matematyczny i oprogramowanie.

- Wśród wielu podanych definicji brakuje przedstawienia bardzo ważnego parametru jakim jest stosowny w pracy współczynnik mimośrodowości względnej λ.
- W pracy uwzględniono wpływ obciążenia poprzecznego w postaci wprowadzenia współczynnika mimośrodowości względnej, natomiast nie znalazłem analiz związanych z wpływem obciążenia wzdłużnego.

Przedstawione uwagi skłaniają do zadania następujących pytań:

1. Jaka może być wartość graniczna kąta rozwarcia stożka γ wynikająca z obliczeń teoretycznych?
2. Czy na podstawie przedstawionych badań można sformułować zalecenia dotyczące wyboru kąta rozwarcia stożka w projektowaniu stożkowych łożysk ślizgowych? Jak mogły by one wyglądać?
3. Czy wpływ obciążenia wzdłużnego jest istotny dla pracy łożysk ślizgowego stożkowego? Jeżeli tak to w jaki sposób można go uwzględnić w przedstawionym modelu?

Poza tym praca napisana i zredagowana starannie, zawiera niewielką liczbę drobnych błędów np. „literówek". Myślowy tok wyprowadzeń równań jest przejrzysty i nie budzi zastrzeżeń.

4. Ocena końcowa

Przedstawione uwagi mają głównie znaczenie formalne, mogą być częściowo dyskusyjne, ale nie zmieniają faktu, że Autor wykazał się umiejętnością posługiwania się aparatem matematycznym w celu rozwiązania zadania badawczego. Doktorant poprawnie przeprowadził analizę wyników oraz wykazał się wiedzą z zakresu badanych zjawisk fizycznych. Praca ma duże znaczenie naukowe i aplikacyjne.

Uważam zatem, że recenzowana praca doktorska Pana mgr. inż. Adama Czabana spełnia wymogi Ustawy o Tytule i Stopniach Naukowych dla dyscypliny naukowej budowa i eksploatacja maszyn. Stawiam wniosek o dopuszczenie Autora do publicznej obrony pracy doktorskiej.