

Poznań, 18.08.2020

prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski
Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych
Instytut Technologii Mechanicznej
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
60-965 Poznań
tel.: +48 61 6653570
e-mail: michal.wieczorowski@put.poznan.pl

**Ocena rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Adama Kaliny**

Charakterystyka elastohydrodynamicznego filmu olejowego w ząbieniu kół przekładni falowej

Podstawa recenzji

Pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza numer RM-530-12-01/2020 z dnia 14 maja 2020 roku.

1. Wprowadzenie

Zaprezentowana do oceny rozprawa doktorska jest związana z przekładniami falowymi i badaniem kół zębatach pod kątem występowania filmu o cechach elastohydrodynamicznych. Tendencje światowe wskazują, że pomimo zastępowania przekładni zębatach innymi sposobami przekazywania napędu w niektórych dziedzinach przemysłu, w dalszym ciągu są gałęzie, w których różne rodzaje uzębienia są nieodzowne. Przykładowo na rynku produkcji kół zębatach dla przemysłu samochodowego odnotowywany jest stały wzrost wolumenu produkcji. Z kolei specyfika pojazdów i normy związane z ochroną środowiska wymuszają redukcję ciężaru przekładni zębatach, zwiększenie niezawodności i projektowanie konstrukcji kompaktowych. Efektami takich działań są: wysoka dokładność wykonania kół zębatach, wzrost efektywności produkcji przekładni ręcznych i automatycznych oraz zmniejszenie rozmiarów kół zębatach przy

niezmienionej wytrzymałości. To wszystko powoduje również konieczność poszukiwania innych rodzajów przekładni, wśród których ważną rolę odgrywają przekładnie falowe. Znajdują one szerokie pole aplikacyjne w układach napędowych obrabiarek, przełożeniu napędu w robotach i manipulatorach oraz urządzeniach medycznych, a najbardziej znaną aplikacją jest łaźnik marsjański. W pracy zawarto wyniki badań zębatych przekładni falowych smarowanych olejem. Przedstawiono modele matematyczne geometrii uzębienia i zazębienia, kinematykę zazębienia, analizę stanu naprężeń normalnych w zazębieniu oraz badania elastohydrodynamicznego filmu olejowego. Praca zawiera także wyniki badań stanowiskowych. Podjęta przez Doktoranta tematyka jest zatem jak najbardziej aktualna, a sama praca doskonale przy tym wpisuje się w całokształt prac od szeregu lat prowadzonych na temat elementów uzębionych w Politechnice Rzeszowskiej. W świetle przedstawionych zagadnień podjęcie tematu rozprawy należy uznać za trafne i w pełni uzasadnione, zarówno pod względem naukowym, jak i użytecznym.

2. Omówienie rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca składa się z 11 rozdziałów zasadniczych i zawiera 181 stron. Oprócz rozdziałów numerowanych w pracy znajdują się jeszcze części nienumerowane, a mianowicie Wykaz ważniejszych oznaczeń, Wstęp, Wykaz literatury i Streszczenie oraz Summary, czyli streszczenie w języku angielskim. Kolejność rozdziałów i podrozdziałów tworzy logiczny i spójny układ, kolejno przedstawiane treści rozwijają i uzupełniają myśli zawarte w częściach poprzedzających. Zawartość merytoryczna pracy jest bogato ilustrowana, co samo w sobie stanowi dużą wartość i niewątpliwie pomaga we właściwym zrozumieniu przemysłu piszącego pracę. Większość rysunków wykonana została z bardzo dużą starannością i przy ogromnym wkładzie pracy, co jest warte podkreślenia i zasługuje na uznanie.

Praca zaczyna się od Wstępu, który jest rozdziałem nienumerowanym i krótko prezentuje wybrane konstrukcje, w których zastosowano przekładnie falowe.

Rozdział pierwszy to opis budowy i zasady działania przekładni falowych. Przedstawiono podstawowe części i zespoły przekładni falowych, konstrukcje generatorów i kół zębatych przekładni falowych, a także ich smarowanie. Rozdział kończy omówienie wad i zalet tych przekładni.

Drugi rozdział obejmuje analizę stanu wiedzy. Przedstawiono w nim zakres zaprezentowany w rozprawie doktorskiej jako część wspólną różnych aspektów i zagadnień związanych z przekładniami falowymi oraz ciekawy, tabelaryczny przegląd ważniejszych pozycji literatu-

rowych. Badania literatury przeprowadzono dzieląc rozpatrywane problemy na 6 grup: przekładnie zębate, smarowanie, smarowanie elastohydrodynamiczne, przekładnie falowe, smarowanie przekładni falowych, smarowanie przekładni. W wyniku badań stwierdzono brak opracowań zastosowania teorii elastohydrodynamicznej do opisu smarowania przekładni falowych.

Rozdział trzeci to cel i zakres pracy. Jako cel Autor postawił sobie analizę charakterystyk statycznych filmu olejowego, który jest generowany w zazębieniu kół zębatach przekładni falowej. Do realizacji został przyjęty szeroki zakres badań.

Kolejny, czwarty rozdział poświęcono współpracy wieńców koła podatnego i sztywnego. Jest to krótka prezentacja zastosowanych elementów zębatach, po której następuje pięć rozdziałów szczegółowo omawiających algorytmy i modele przyjęte do określania wielkości związanych z geometrią, kinematyką, rozkładami sił i naprężeń normalnych oraz właściwościami elastohydrodynamicznego filmu olejowego w zazębieniu kół przekładni falowej.

Rozdział piąty przedstawia zagadnienia związane z drogą względną zęba koła zębatego. Autor przedstawił w nim opracowany model matematyczny drogi względnej zęba koła podatnego oraz przeanalizował wpływ maksymalnego przemieszczenia promieniowego na drogę względną zęba koła podatnego.

Szósty rozdział Autor poświęcił geometrii zazębienia. Sporo miejsca przeznaczono w nim na charakterystykę luzu obwodowego, zarówno z punktu widzenia definicji, jak i metody wyznaczania. Rozdział uzupełnia omówienie linii przyporu w zazębieniu kół przekładni falowej wraz ze zmianami wartości promieni krzywizn.

Kolejnym rozdziałem związanym z zazębieniem przekładni falowej jest rozdział siódmy, w którym zaprezentowano kinematykę zazębienia. Omówiono w nim rozkład prędkości w punktach charakterystycznych zęba koła podatnego wraz z przebiegami funkcyjnymi i analizą zmian wartości składowej obwodowej. Prezentując metodę wyznaczania prędkości w punkcie współpracy zarysu zęba koła podatnego z zarysem zęba koła sztywnego Autor proponował algorytm dla prędkości wypadkowej i składowych w kierunku obwodowym, promieniowym, stycznym i normalnym oraz wyprowadził zależności funkcyjne. Tą część pracy kończy krótki podrozdział poświęcony wyznaczeniu średniej prędkości strugi oleju w szczelinie międzyzębnej.

Rozdział ósmy przedstawia rozkład sił i naprężeń normalnych w zazębieniu. Zaprezentowano w nim metodę wyznaczania rozkładu sił w zazębieniu wraz z algorytmem działania podprogramu do wykreślania fragmentów współpracujących kół zębatach przekładni falowej. Analizę stanu naprężeń stykowych przeprowadzono przyjmując do rozważań teorię Hertza. Ba-

dając wpływ liczby zębów w obszarze zazębienia oraz momentu obciążenia na siły w zazębieniu Autor omówił zależność między siłami obciążającymi zęby a liczbą zębów w przyporze. Wyznaczył także naprężenia normalne pochodzące od sił w zazębieniu.

Kolejny, dziewiąty rozdział, zawierający model fizyczny i matematyczny elastohydrodynamicznego smarowania wieńców zębatych przekładni falowej jest kwintesencją teorii poruszanego zagadnienia. Autor szczegółowo omówił w nim zagadnienia o charakterze matematycznym, w tym: równania rozkładu temperatury i ciśnienia w filmie olejowym w strefie kontaktu wieńców oraz model matematyczny deformacji powierzchni pod wpływem nacisków. Model matematyczny stanowią równania; rozkładu ciśnienia i temperatury w filmie smarnym, deformacji powierzchni pod wpływem nacisków w strefie kontaktu wieńców zębatych, właściwości termofizycznych olejów przekładniowych. Rozwiązanie układu równań Doktorant przedstawił w postaci zależności Dowsona – Higginsona. Dalej zaprezentował także właściwości termofizyczne olejów przekładniowych, wyznaczył minimalną wysokość elastohydrodynamicznego filmu olejowego w zazębieniu kół przekładni zębatych, a także zaprezentował jak wpływa na nią temperatura. Przedyskutował również dopuszczalną wysokość elastohydrodynamicznego filmu olejowego zakładając wystąpienie tarcia płynnego w obszarze krzywej Striebecka dla liczby Hersey'a wynoszącej 3. Ten rozdział kończą charakterystyki statyczne elastohydrodynamicznego filmu olejowego generowanego w zazębieniu kół przekładni falowej, przedstawiające wpływ różnych czynników na minimalną wysokość filmu olejowego. Wyznaczenie charakterystyk zostało przeprowadzone dla parametrów zadanych w taki sposób, aby można było określić warunki prawidłowej pracy przekładni. Wykazano istotny wpływ momentu obciążenia, rodzaju oleju, średniej prędkości strugi oleju i zastępczego promienia krzywizny na minimalną wysokość filmu olejowego.

Dziesiąty rozdział Autor poświęcił badaniom stanowiskowym. Omówił stanowisko badawcze (konstrukcja autorska) wraz z jego elementami i zaprezentował wyniki badań stanowiskowych. Do badań wykorzystano jednofalową przekładnię z generatorem krzywkowym o nieruchomym kole sztywnym. Takie rozwiązanie umożliwiło umiejscowienie termopar w wieńcu zębatym. Ponadto mierzono temperaturę oleju na wlocie do przekładni a także w kadzi olejowej. Wielkościami pomiarowymi były także moment obciążenia oraz prędkość obrotowa na wale silnika oraz poziom oleju w przekładni. Przykładowe wyniki wielkości mierzonych przedstawiono na wykresach.

Rozdział jedenasty zawiera podsumowanie i sugerowane kierunki dalszych badań. Przedstawiono w nim zadania zrealizowane w pracy i wynikające z nich wnioski, przedstawiono również zalecenia projektowe dla konstruktorów przekładni falowych.

Wykaz literatury będący rozdziałem nienumerowanym zawiera 118 pozycji, w tym współautorskie doktoranta.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawioną rozprawę oceniam pod kątem jej zawartości merytorycznej i umiejętności edytorskich. Zaczynając od tego pierwszego zagadnienia należy docenić interesujące dokonania oraz znaczący wkład pracy wykonanej przez Autora. Bardzo wartościowe są prace teoretyczne dotyczące zagadnień elastohydrodynamicznych. Można tutaj dostrzec bardzo dojrzałe podejście do modelowania matematycznego omawianych zagadnień. W rozprawie zawarto zatem ciekawy materiał teoretyczny, wyniki badań i dobrze umotywowane wnioski. Cel pracy przyjęty przez Autora został w pełni zrealizowany.

Zapoznając się z treścią manuskryptu nasunęły mi się pewne uwagi w stosunku do treści, które mogą być dla Doktoranta punktem wyjścia do ciągłego doskonalenia warsztatu naukowego i edytorskiego, a także punktem wyjścia do dyskusji z Recenzentem. Wśród takich uwag są następujące:

- 1) Tematem i podstawowym zagadnieniem poruszonym w pracy są charakterystyki statyczne. Warto poświęcić kilka zdań temu, jak Autor rozumie to pojęcie. Tym bardziej, że standardowe metrologiczne podejście jest trochę inne i dotyczy wskazań wartości rzeczywistych do wartości odniesienia bez zmian wynikających z czasu. Charakterystyki ponadto się wyznacza, a nie buduje (strona 29).
- 2) Godna podkreślenia jest ciekawa, tabelaryczna forma przeglądu literatury. Rozwiązanie to jest niespotykane, ale - szczególnie w przypadku takiej pracy - zawiera bardzo praktyczne pogrupowanie tematyczne publikacji.
- 3) Strona 25 - Autor podaje jako jedną z nowszych publikacji pozycję wydaną w roku 2011. Na tle dynamicznie zmieniającej się rzeczywistości technologicznej, dziesięcioletnia publikacja do najnowszych raczej zaliczana nie jest. Może przy tym sugerować, że w przeglądzie literatury niewiele jest pozycji mniej wiekowych, co podważałoby aktualność pracy i co - jak wynika z lektury spisu literatury - nie jest prawdą.
- 4) Strona 127. Krzywa przedstawiona na rysunku jest raczej określana krzywą Stribecką, natomiast obszary określane są liczbami Hersey'a.
- 5) Strona 128 i sąsiednie. Autor wprowadził parametry chropowatości współpracujących powierzchni jako np. Ra1 i Ra2. Tymczasem zgodnie z oznaczeniami (ISO 1302) Ra1 to Ra na jednym odcinku elementarnym, a Ra2 na dwóch. Analogicznie przedstawia się parametr Rz. Warto pomyśleć o innych oznaczeniach.

Oceniając stronę edytorską należy podkreślić, że praca napisana została bardzo poprawnym językiem polskim. Autor ma dużą swobodę pisania i "lekkość pióra" popartą bardzo dobrym stylem, dzięki czemu zapoznawanie się z treścią manuskryptu jest bardzo wciągające. Poświęcił ponadto sporo czasu i uwagi części rysunkowej (praca zawiera 86 rysunków), które wykonane są bardzo starannie i profesjonalnie, z zastosowaniem wielu przemyślanych i wyróżniających się kolorów. Nieliczne uwagi do tego obszaru dotyczą jedynie tego, że niektóre rysunki zostały nadmiernie zmniejszone i teksty na nich zawarte są trochę nieczytelne.

Wśród uwag edytorskich warto zwrócić uwagę na następujące:

- 1) Strona 16, rysunek 1.6. Jeśli rysunek występuje w wielu publikacjach, to powołując się na niego warto znaleźć tę źródłową, maksymalnie dwie. Przywołanie dziewięciu pozycji jest przywołaniem wtórnym. Jeśli natomiast każda z tych pozycji w jakiś sposób zmienia lub modyfikuje rysunek, to potrzebny jest opis.
- 2) W pracy występuje wiele tzw. tekstów wiszących, czyli tekstów znajdujących się np. pomiędzy tytułem rozdziału głównego a tytułem podrozdziału. Zasady edytorskie stanowią, że przy numeracji cyfrowej wielorzędowej np. po tytule rozdziału 5 powinien od razu następować tytuł podrozdziału 5.1. a tuż np. po tytule podrozdziału powinien być tytuł podrozdziału kolejnego rzędu itd. Między nimi nie powinno być żadnych tekstów (zwanych wiszącymi). Teksty te to z reguły ogólne wprowadzenia do rozdziałów, omówienia czy streszczenia. Jeżeli tekst wiszący jest cennym i niezbędnym wprowadzeniem do tematu – powinien mieć numer i tytuł, natomiast jeśli zawiera ogólniki lub omówienie dalszej części rozdziału – powinien zostać usunięty przez Autora. Szczególnie jest to widoczne w rozdziale 10, gdzie tekst wiszący ma 14 stron i zawiera cały opis stanowiska. Lepsze byłoby przekształcenie go na podrozdział 10.1, a Wyniki badań stanowiskowych na 10.2.
- 3) Jak już wspomniano za bardzo zmniejszono niektóre rysunki, przez co ich czytelność uległa wyraźnemu pogorszeniu. Większy rysunek co prawda zajmuje więcej miejsca i wydłuża całość manuskryptu, ale pozwala łatwiej zinterpretować treść. Dotyczy to np. rysunków 6.1., 6.6, oraz 9.10-9.20.
- 4) Omawiając wartości pewnej wielkości lepiej nie odnosić się do pojęć wysokościowych i pisać duży, mały zamiast wysoki, niski (np. strona 28).
- 5) W tekście przed tabelą 9.1 podano pozycję literaturowe, na które Autor powołuje się w samej tabeli. Pominięto w niej pozycję [106].

Uwagi stylistyczne i literowe:

Strona 13. Jest [29]' powinno być [29]

- Strona 14. Jest *warianty konstrukcje kół* powinno być *warianty konstrukcyjne kół*
- Strona 15. Jest *poprzez zwiększenia liczby* powinno być *poprzez zwiększenie liczby*
- Strona 18, rysunek 1.8. Jest *platyczny* powinno być *plastyczny*
- Strona 28. Jest *filmu olejowego* powinno być *filmu olejowego*.
- Strona 28. Jest *przekładni falowych* powinno być *przekładni falowych*.
- Strona 35, rysunek 5.1. Jest *tajektoria* powinno być *trajektoria*.
- Strona 42 (trzykrotnie). Jest *wierszach* powinno być *w wierszach*
- Strona 44. Jest *przyjęych* powinno być *przyjętych*
- Strona 53. Jest *plaskim* . powinno być *plaskim*.
- Strona 76. Jest *ze względu* powinno być *ze względu*
- Strona 103, rysunek 8.7. Jest *obszasze* powinno być *obszarze*
- Strona 110. Jest *Natomiast rys. 8.12* powinno być *Natomiast na rys. 8.12*
- Strona 118. Jest *kierunki obwodowym* powinno być *kierunku obwodowym*
- Strona 118. Jest *na drodze przewodzenie* powinno być *na drodze przewodzenia*
- Strona 123. Jest *ISO VG 46* powinno być *ISO VG 46*.
- Strona 127. Jest *przy możliwe malej* powinno być *przy możliwie malej*
- Strona 129. Jest *prędkość obrotową wału* powinno być *prędkość obrotowa wału*
- Strona 173. Jest *relativeto* powinno być *relative to*

Naturalnie przedstawione powyżej uwagi w żadnym stopniu nie umniejszają wartości opiniowanej pracy, a część z nich ma charakter zagadnień i tematów do dyskusji.

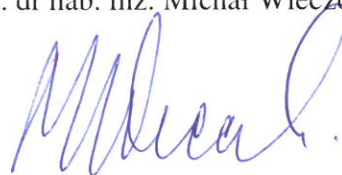
4. Wnioski

W rozprawie Autor poruszył temat bardzo szeroki, wykazując się wiedzą i determinacją by poprawnie zmieścić go w ramach pracy doktorskiej. Ponadto praca napisana jest w sposób jasny i przejrzysty. Wynika to z czytelnego podziału poszczególnych rozdziałów na podrozdziały, bogatego i znakomicie przygotowanego materiału rysunkowego oraz bardzo komunikatywnego i dojrzałego stylu pisania Autora. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzam, że tematyka pracy została wybrana w sposób trafny, a zakres przedstawionego manuskryptu spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Formalny układ pracy jest prawidłowy. Dysertacja odnosi się do aktualnej wiedzy, a w wielu elementach wnosi treści nowe. Praca zawiera część teoretyczną i badawczą, wraz z opracowanym stanowiskiem badawczym. Cel pracy został osiągnięty w zakresie przyjętym przez Autora. Powyższe fakty świadczą o Jego kompetencjach w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne.

5. Podsumowanie

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Adama Kaliny pt. *Charakterystyka elastohydrodynamicznego filmu olejowego w zazębieniu kół przekładni falowej*, spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i może być dopuszczona do publicznej obrony.

prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski



Politechnika Poznańska