

prof. dr hab. inż. Lucjan ŚNIEŻEK
ul. Lazurowa 185C m 122
01-476 Warszawa

Warszawa, dn. 14.07.2020 r.

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Adama KALINY
pt. „Charakterystyka elastohydrodynamicznego filmu olejowego
w zazębieniu kół przekładni falowej”

Podstawę formalną wykonania recenzji stanowiło pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, Pana dr. hab. inż. Aleksandra Mazurkowa, prof. PRz nr RM-530-12-02/2020 z dnia 14 maja 2020 r.

1. Wstęp

Przekładnie falowe zaliczane są do przekładni zębatach o konstrukcji specjalnej, umożliwiającej uzyskiwanie bardzo dużych przełożeń dzięki elastycznemu odkształceniu w kierunku promieniowym jednego z kół, powodującemu jego zazębienie z kołem współpracującym w obszarach przemieszczających się wraz z generowaną falą odkształceń. Złożoność procesów zachodzących podczas pracy przekładni tego rodzaju utrudnia ich obliczanie, stąd najliczniejsza grupa prac ukazujących się w literaturze światowej poświęconych aspektom wytrzymałościowym tego typu mechanizmów. Za niezwykle skromną należy uznać liczbę prac dotyczących istotnego zagadnienia smarowania przekładni falowych, w szczególności smarowania elastohydrodynamicznego. Wynika to przede wszystkim z dużych przełożeń uzyskiwanych w tego typu przekładniach, co wiąże się z małymi prędkościami poślizgu w zazębieniu i w konsekwencji trudnościami w uzyskaniu wymaganej wysokości filmu olejowego. Brak jest również opracowań dotyczących zastosowania teorii smarowania elastohydrodynamicznego do opisu smarowania kół zębatach przekładni falowych.

W świetle powyższego podjęcie w recenzowanej pracy doktorskiej próby kompleksowego podejścia do opisu smarowania kół zębatach przekładni falowych uwzględniającego ważne obszary, poczynwszy od analizy parametrów geometrycznych i kinematycznych oraz sił i naprężeń normalnych w zazębieniu kół, poprzez analityczne i doświadczalne badania właściwości elastohydrodynamicznego filmu olejowego generowanego w zazębieniu, kończąc na budowie i opisie charakterystyk tak wytworzonego filmu olejowego uważam za w pełni uzasadnione.

2. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Adama Kaliny składa się z 11 rozdziałów oraz wykazu literatury zawierającego 118 pozycji prac, na które Autor powołał się w tekście. Praca na 181 stronach jest bogato ilustrowana rysunkami i fotografiami stanowiska badawczego. Łącznie w notatce zamieszczono 85 rysunków i 12 tabel.

We wstępie do rozprawy Autor w ujęciu retrospektywnym przedstawia obszary zastosowań przekładni falowych i ich specyfikę oraz w sposób ogólny przedstawia tematykę, której poświęcona została recenzowana praca.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym „*Budowa i zasada działania przekładni falowych*” omówiono szczegóły konstrukcji generatorów i kół zębatach przekładni odnosząc się jednocześnie do złożoności zagadnienia ich smarowania. Rozdział zamyka zestawienie zalet i wad omawianych konstrukcji.

Analizę stanu wiedzy dokonaną na podstawie wybranych 102 publikacji przedstawiono w rozdziale drugim. Doktorant w sposób syntetyczny, w ujęciu tabelarycznym, omówił wyniki prac opublikowanych w przeważającej liczbie po roku dwutysięcznym, dotyczących zagadnień konstrukcji, badań wytrzymałościowych jak i smarowania elastohydrodynamicznego przekładni zębatach ze szczególnym uwypukleniem tematyki smarowania i zużycia przekładni falowych. Nieczęsto w rozprawach doktorskich spotyka się takie podejście do prezentacji stanu wiedzy. Mając jednak na uwadze objętość rozprawy liczącej 181 stron, taka forma opisu aktualnej tematyki, będącej przedmiotem recenzowanej rozprawy doktorskiej, wydaje się być uzasadniona. W świetle znaczącej liczby i szerokiego zakresu tematycznego przywołanych prac pewien niedosyt budzić może skromny zakres wnioskowania, ograniczający się w zasadzie jedynie do stwierdzenia braku opracowań dotyczących zastosowania teorii EHD do opisu smarowania kół zębatach przekładni falowych. Konkluzja ta legła u podstaw sformułowania w rozdziale trzecim celu pracy obejmującego zbadanie właściwości oraz opracowanie charakterystyk statycznych filmu olejowego generowanego w zazębieniu kół zębatach przekładni falowej. Przyjęto, że realizacja założonego celu będzie możliwa poprzez przeprowadzenie szeregu badań teoretycznych i doświadczalnych obejmujących: analizę parametrów geometrycznych i kinematycznych zębatej przekładni falowej, wyznaczenie wartości sił w zazębieniu i naprężeń normalnych wywołanych tymi siłami, badania właściwości elastohydrodynamicznego filmu olejowego generowanego w zazębieniu i sporządzenie charakterystyk statycznych tego filmu oraz badania stanowiskowe umożliwiające opracowanie charakterystyk temperaturowych badanej przekładni.

W oparciu o przyjęty zakres pracy, w rozdziale czwartym rozprawy, Doktorant przedstawił uproszczoną postać algorytmu przyjętego modelu matematycznego wykorzystanego podczas obliczania parametrów pracy i właściwości filmu olejowego w strefie zazębienia. W oparciu opracowany algorytm, w rozdziale piątym dokonano opisu drogi względnej zęba koła podatnego uwzględniając wartość maksymalnego przemieszczenia promieniowego koła podatnego. Analiza przemieszczeń i dróg względnych zęba umożliwiła sformułowanie szeregu wniosków odnoszących się do wpływu zmian wartości tego odkształcenia na trajektorię przemieszczeń wybranych punktów zębów koła podatnego i luzów: wierzchołkowego oraz obwodowego.

Rozdział szósty poświęcony został analizie geometrii zazębienia rozpatrywanej przekładni. Doktorant po zdefiniowaniu podstawowych pojęć związanych z luzem obwodowym dla różnych położzeń generatora i różnych wartości obciążenia przekładni przedstawił opracowaną metodę wyznaczania tego luzu, linii przyporu oraz promieni krzywizn w punkcie współpracy stykających się boków zębów w funkcji kąta obrotu generatora.

Elementy kinematyki zazębienia ze szczególnym uwzględnieniem rozkładu prędkości w punktach charakterystycznych zęba koła podatnego przedstawione zostały w rozdziale siódmym. Doktorant przedstawił w nim autorską metodę wyznaczania wartości składowych prędkości liniowej w wybranych punktach zarysu zęba koła podatnego podczas współpracy z zarysem zęba koła sztywnego. Rozważania dotyczące ekstremalnych wartości prędkości wypadkowych w punktach charakterystycznych uzębienia w funkcji kąta obrotu generatora oraz średniej prędkości strugi oleju w szczelinie międzyzębnej legły u podstaw analizy właściwości elastohydrodynamicznego filmu olejowego w zazębieniu kół przekładni falowej, przeprowadzonej w dalszej części rozprawy.

Kolejny, ósmy rozdział pracy poświęcony został metodom umożliwiającym obliczenie sił w zazębieniu kół stopnia przekładniowego oraz naprężeń normalnych powstałych w wyniku ich działania. Na szczególną uwagę w tej części pracy zasługuje analiza zależności między momentem obciążenia T_2 , liczbą zębów w obszarze zazębienia ε oraz maksymalną siłą w zazębieniu $F\varphi_{max}$, której wyniki wskazują na silną zależność między tymi wielkościami.

Niewątpliwie zasadniczą część rozprawy, ściśle korespondującą z jej tytułem i warunkującą osiągnięcie założonego celu pracy, stanowi rozdział dziewiąty, zatytułowany „*Model fizyczny i matematyczny elastohydrodynamicznego smarowania wieńców zębatych przekładni falowej*”. W rozdziale tym, na 37 stronach, po sformułowaniu założeń do opracowanego modelu elastohydrodynamicznego smarowania kół przekładni falowej,

przetawiono wyniki wieloaspektowej analizy wysokości filmu olejowego w zazębieniu kół w oparciu o charakterystyki statyczne elastohydrodynamicznego filmu olejowego ujmujące wpływ parametrów: geometrycznych, kinematycznych i związanych z obciążeniem przekładni oraz materiałów i czynnika smarnego na minimalną wysokość filmu olejowego.

Rozdział dziesiąty poświęcony został badaniom stanowiskowym z wykorzystaniem samodzielnie zaprojektowanego i zbudowanego stanowiska badawczego umożliwiającego pomiar temperatury oleju w kadzi olejowej i w kilku punktach wieńca koła sztywnego. Założono, że pomiar temperatury, przy zadanych: prędkości obrotowej wału wejściowego, sile obciążającej przekładnię i poziomie oleju w kadzi olejowej, umożliwi ocenę warunków smarowania w zespole generatora fal sprężystych odkształceń koła podatnego. Uzyskane wyniki pomiarów temperatury wskazały na brak konieczności stosowania dodatkowego układu chłodzenia obudowy i oleju, co jak sądzę, stanowi dla Doktoranta potwierdzenie na obecność filmu olejowego pozwalającego na współpracę wieńców zębatych z tarciami płynnym. Nie zamieszczono jednak w rozprawie głębszej dyskusji dotyczącej tego zagadnienia.

Przedstawione w kolejnych rozdziałach wyniki badań zapewniły możliwość bardzo rozległego wnioskowania, które Doktorant przedstawił z wykorzystaniem punktów w rozdziale jedenastym, zatytułowanym „*Podsumowanie i kierunki dalszych badań*”. W praktyce zrezygnowano z zamieszczenia w tym rozdziale opisowej formy podsumowania, co ograniczyło Doktorantowi możliwość płynnego przejścia do prezentacji wniosków końcowych z przeprowadzonych badań.

3. Ocena rozprawy

Całość pracy pod względem merytorycznym zasługuje na wysoką ocenę i nie budzi istotnych zastrzeżeń. Krytyczna ocena pracy wynika przede wszystkim z konieczności uściślenia niektórych zagadnień, pominiętych lub oszczędnie przedstawionych w rozprawie doktorskiej. Dyskusji oraz dodatkowych wyjaśnień i uszczegółowień wymagają następujące uwagi:

- 1) możliwości wnioskowania na podstawie uzyskanych wyników badań teoretycznych i doświadczalnych niewątpliwie uległyby znacznemu poszerzeniu w przypadku uwzględnienia w zakresie pracy wpływu rodzaju oleju na parametry pracy przekładni falowych,

- 2) wskazana z praktycznego punktu widzenia byłaby głębsza analiza dotycząca wpływu maksymalnego przemieszczenia promieniowego punktu charakterystycznego warstwy obojętnej koła podatnego na wyliczane parametry pracy badanych przekładni,
- 3) w rozdziale poświęconym badaniom stanowiskowym nie zidentyfikowano celu prowadzenia tych badań oraz związku uzyskanych wyników z wynikami dokonanej wcześniej, obszernych analiz teoretycznych parametrów pracy i właściwości filmu olejowego w zazębieniu.

Pewne uwagi mogą również budzić kwestie o mniejszym znaczeniu, natury edytorskiej, a dotyczące na przykład:

- 1) zastosowania jednostki KM spoza układu jednostek SI (str. 9₈).
- 2) braku konsekwencji w stosowaniu przyjętego nazewnictwa, np.:
 - w_o zdefiniowane w Wykazie oznaczeń jako „maksymalne przemieszczenie promieniowe punktu warstwy obojętnej koła podatnego” (str. 7¹² wiersz), nazywane jest w jednym miejscu „odkształceniem promieniowym koła podatnego” (str. 37, podpis pod rys. 5.2), a innym razem „parametrem” (str. 44⁵),
 - używanie pojęcia „linia przyporu” (str. 65₈) zamiennie z pojęciem „krzywa przyporu” (str. 169⁴),
- 3) stosowania skrótów myślowych, np.: „prędkość wypadkowa w punkcie G_p jest większa...” zamiast „wartość prędkości wypadkowej w punkcie G_p jest większa...”
- 4) powołania się w rozdziale jedenastym na podrozdział 6.20, zamiast na podrozdział 6.2 (str. 169⁴)

W trakcie czytania pracy zauważono również nieliczne błędy w tekście, które przekazano bezpośrednio Autorowi do wykorzystania w przygotowaniu publikacji.

Przytoczone uwagi nie wpływają na ogólnie dobrą ocenę poziomu recenzowanej rozprawy, zawierającej szereg wartościowych wyników i analiz. Autor wykazał się dużym opanowaniem występujących w pracy zagadnień teoretycznych i metodyk badawczych, a do Jego oryginalnych osiągnięć zaliczam:

- 1) opracowanie metody pozwalającej na wyznaczenie linii przyporu wraz z promieniami krzywizn w punktach styku zębów kół przekładni falowej w oparciu wartości luzu obwodowego,
- 2) opracowanie metody wyznaczania prędkości wypadkowej (wraz z jej składowymi) w punkcie współpracy w funkcji kąta obrotu generatora φG ,
- 3) opracowanie metody obliczania stykowych naprężeń normalnych,

- 4) wyznaczenie charakterystyk statycznych filmu EHD generowanego w zazębieniu kół przekładni falowej,
- 5) zaprojektowanie i zbudowanie stanowiska badawczego do pomiaru temperatur wieńca sztywnego oraz oleju w kadzi przekładni,
- 6) sformułowanie zaleceń dla konstruktorów na bazie przeprowadzonych prac badawczych,
- 7) opracowanie programów komputerowych pozwalających m.in. na graficzne przedstawienie współpracujących wieńców, linii przyporu oraz wyników przeprowadzonych analiz.

4. Wniosek końcowy

Z przedstawionej wyżej oceny rozprawy Pana mgr inż. Adam Kalina wynika, że:

- wybór tematyki pracy został przeprowadzony w sposób trafny i odnosi się do aktualnej wiedzy i praktyki,
- Doktorant posiada umiejętność zaprojektowania złożonych zadań naukowych i ich realizacji nowoczesnymi metodami,
- podjęte w rozprawie trudne zadania zostały zrealizowane na wysokim poziomie,
- przeprowadzone analizy skomplikowanych zjawisk, opracowanie wyników i forma wniosków nie budzą istotnych zastrzeżeń,
- treść rozprawy stanowi zamkniętą całość. Napisana jest poprawnym językiem technicznym i posiada starannie opracowaną szatę graficzną oraz stojącą na wysokim poziomie dokumentację z badań własnych.

Przytoczone fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria mechaniczna”, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą. Stwierdzam zatem, że praca mgr inż. Adama Kaliny pt.: „*Charakterystyka elastohydrodynamicznego filmu olejowego w zazębieniu kół przekładni falowej*” (promotor: dr hab. inż. Aleksander Mazurkow, prof. PRz, promotor pomocniczy dr inż. Stanisław Warchoń) spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu „*Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*” z dnia 14 marca 2003 roku oraz dodatkowo Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „*Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*”, jednocześnie wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza o dopuszczenie Autora do jej publicznej obrony.

