

Katedra Inżynierii Systemów Technicznych i Informatycznych
Wydział Mechaniczny
Politechnika Koszalińska
ul. Raławicka 15-17
75-620 Koszalin

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Stanisława Pabiszczaka pt.:

Projektowanie, technologia i badania tocznej przekładni mimośrodowej

Recenzję wykonano na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Olafa Ciszaka, profesora Politechniki Poznańskiej zgodnie z pismem z dnia 31.03.2021 roku.

1. Przedmiot recenzji

Rozprawa doktorska mgr inż. Stanisława Pabiszczaka pt. „*Projektowanie, technologia i badania tocznej przekładni mimośrodowej*” została opracowana pod nadzorem promotora prof. dr hab. inż. Romana Stańka oraz promotora pomocniczego dr inż. Adama Myszkowskiego. Praca składa się z wprowadzenia, 9 rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz spisu literatury. Rozprawa zawiera łącznie 130 rysunków, 17 tabel i 69 wzorów. Bibliografia zawiera 177 publikacji źródłowych (w tym 9 w których współautorem jest Doktorant) na które składają się: publikacje w międzynarodowych i krajowych czasopismach naukowych, referaty publikowane w materiałach konferencyjnych, monografie naukowe oraz patenty.

2. Tematyka rozprawy, jej cele i struktura

Przedmiotem rozprawy doktorskiej było przeprowadzenie analizy geometrycznej, kinematycznej i wytrzymałościowej oraz opracowanie konstrukcji, technologii jak również przeprowadzenie badań eksperymentalnych prototypu nowej przekładni mechanicznej ruchu obrotowego z elementami tocznymi pośredniczącymi w przekazywaniu napędu.

W pracy Autor nie zdefiniował w sposób jawny tez czy też hipotez naukowych. Jednakże rozprawa zawiera jasno sformułowane cele pracy oraz jej zakres. Cele pracy, zdefiniowane w rozdziale 3, obejmują:

- opracowanie podstaw teoretycznych umożliwiających analizę oraz projektowanie przekładni mechanicznej według nowej koncepcji objętej ochroną patentową,
- opracowanie konstrukcji, technologii oraz wytworzenie funkcjonalnego prototypu analizowanej przekładni,
- przeprowadzenie analiz symulacyjnych i eksperymentalnych w celu weryfikacji analiz teoretycznych.

Zakres pracy zawiera liczny, ząbębiający się i komplementarny zbiór zadań prowadzący do realizacji wcześniej zdefiniowanych celów rozprawy. Struktura rozprawy odzwierciedla jej zakres. W rozdziale 1 omówiono zjawiska tarcia w przekładniach mechanicznych oraz dokonano analizy jego wpływu na ich właściwości eksploatacyjne i użytkowe. Rozdział 2 zawiera przegląd przekładni mechanicznych ruchu obrotowego, ze wskazaniem ich zalet, wad oraz zakresu zastosowań. W rozdziale 3 Autor przedstawił koncepcję tocznej przekładni mimośrodowej oraz wskazał cel i zakres pracy. Rozdział 4 zawiera analizę geometryczną i kinematyczną, zaś rozdział 5 analizę wytrzymałości i sprawności tocznej przekładni mimośrodowej. W rozdziale 6 zostały przedstawione wyniki badań symulacyjnych analizowanej przekładni, z zastosowaniem metody elementów skończonych. Rozdział 7 zawiera opis konstrukcji oraz technologii wytworzenia elementów przekładni wraz z algorytmem jej projektowania. W rozdziale 8 Autor opisuje i podsumowuje wyniki badań eksperymentalnych prototypu przekładni. Rozprawę kończy rozdział 9 zawierający wnioski ogólne i szczegółowe jak również wskazanie kierunków dalszych badań.

Przedstawiona w rozprawie mgr inż Stanisława Pabiszczaka tematyka, cele, jej zakres oraz treść bezsprzecznie wskazują, że mieści się ona w *dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych* i obejmuje zagadnienia związane z *dyscypliną inżynieria mechaniczna*.

3. Merytoryczna ocena rozprawy

Przedmiotem analiz teoretycznych oraz badań eksperymentalnych Doktoranta była toczna przekładnia mimośrodowa, chroniona patentem PL 233658, którego Doktorant jest współautorem. Przekładnia według przedstawionej w rozprawie koncepcji jest przekładnią o równoległych nie pokrywających się osiach wałów. W założeniach przedstawionego rozwiązania przeniesienie napędu dokonywane jest w wyniku sprzężenia kształtowego elementów tocznych osadzonych mimośrodowo na wale wejściowym i kół krzywkowych osadzonych współosiowo na wale wyjściowym.

3.1. Ocena poprawności analizy materiałów źródłowych

Doktorant, przystępując do realizacji rozprawy, dokonał analizy zjawiska tarcia w przekładniach mechanicznych oraz analizy wpływu tego zjawiska na właściwości mechaniczne i użytkowe tych przekładni. Ważnym i istotnym elementem przeprowadzonych analiz źródłowych jest dokonanie przeglądu istniejących rozwiązań przekładni mechanicznych, ze szczególnym uwzględnieniem przekładni wyposażonych w elementy toczne pośredniczące w przekazywaniu napędu. Autor dokonał charakterystyki oraz zestawienia porównawczego wybranych przekładni uwzględniając ich sprawność, osiągalne wartości mocy, predkości obrotowe i liniowe jak również maksymalne przełożenia.

Analiza literatury zawiera publikacje poprawnie dobrane do tematyki realizowanej rozprawy doktorskiej oraz przedstawiające aktualny stan wiedzy w tym obszarze (ponad 50% z nich stanowią publikacje wydane w okresie ostatnich 10 lat). Znaczna część źródeł literaturowych pochodzi z renomowanych czasopism o zasięgu międzynarodowym oraz, co wynika z podjętej tematyki rozprawy, z baz patentowych.

Analizę źródeł przedstawioną w rozdziale 1 i 2 rozprawy oceniam pozytywnie. Zwłaszcza w zakresie analiz dotychczasowych rozwiązań konstrukcyjnych wskazuje ona na dobrą orientację Autora w podjętej tematyce. Wartościowym podsumowaniem przeprowadzonych analiz byłoby podjęcie przez Autora próby zdefiniowania obszaru aplikacyjnego w który wpisywać się może proponowane nowe rozwiązanie i/lub wskazanie potencjalnych efektów synergii wynikających z połączenia rozwiązań konstrukcyjnych znanych z innych przekładni w proponowanej koncepcji nowej przekładni.

3.2. Ocena stopnia realizacji założonych celów rozprawy

Opis realizacji celów rozprawy Doktorant zawarł w rozdziałach do 4 do 8. W rozdziale 4 Autor przeprowadził analizę geometryczną i kinematyczną tocznej przekładni mimośrodowej. Przeprowadzone rozważania umożliwiły określenie zarysu kół krzywkowych dla przyjętych parametrów użytkowych i geometrycznych przekładni. Wartościowym uzupełnieniem powyższych analiz było zdefiniowanie warunków geometrycznych określających zakres dopuszczalnych przełożeń analizowanej koncepcji przekładni. Doktorant przeprowadził również analizę prędkości obwodowych i obrotowych dla kół krzywkowych i elementów tocznych wchodzących w skład zespołów mimośrodowych.

Powyższe analizy Autor rozszerzył w rozdziale 5 wyznaczając rozkład sił i naprężeń w miejscu styku powierzchni zewnętrznej mimośrodowego elementu tocznego z powierzchnią czynną koła krzywkowego. Autor rozprawy opracował model naprężeń kontaktowych, zgodnie z teorią Hertza, uwzględniając zmienność promienia krzywizny koła kształtowego. Zarówno w przypadku analizy rozkładu sił jak i naprężeń Doktorant opracował odrębne modele dla wyodrębnionych zakresów położenia kąтового wału wejściowego. Opracowane zależności stanowiły podstawę do analizy wpływu wymiarów elementów tocznych w zespołach mimośrodowych, wartości mimośrodów, przełożenia oraz obciążenia przekładni na wartość średnich naprężeń kontaktowych.

Wyniki przeprowadzonych analiz geometrycznych, kinematycznych oraz wytrzymałościowych oparte są na jasnych i zdefiniowanych założeniach. Doktorant posługując się poprawną metodyką określił podstawowe parametry i zależności pomocne na etapie projektowania przekładni. Wartościowym uzupełnieniem tych analiz było wyznaczenie rozkładu obciążeń w przekładni oraz opracowanie modelu analitycznego rozkładu naprężeń w miejscu styku elementów przenoszących napęd, co umożliwiło Autorowi rozprawy określenie podstawowych warunków wytrzymałościowych koniecznych do uwzględnienia w procesie konstruowania przekładni.

W rozdziale 6 Doktorant przeprowadził badania symulacyjne tocznej przekładni mimośrodowej z zastosowaniem metody elementów skończonych. Celem przeprowadzonej symulacji było wyznaczenie naprężeń kontaktowych w strefie styku współpracujących elementów przekładni oraz weryfikacja założeń przyjętych przy opracowaniu zależności analitycznych opisanych w rozdziale 5.

Wyniki badań symulacyjnych naprężeń w miejscu styku łożyska zespołu mimośrodowego z kołem krzywkowym dla przekładni o jednej współpracującej parze charakteryzują się wysoką zgodnością z wynikami wcześniej uzyskanymi z zastosowaniem opracowanych modeli analitycznych. W przypadku symulacji zachowania przekładni o trzech parach zespołów mimośrodowych uzyskane wyniki wskazują na pewne rozbieżności w wybranych przedziałach położenia kąтового wału wejściowego; co Doktorant wyraźnie zaznacza i poprawnie uzasadnia.

Proponuję, by w przyszłych pracach Doktorant opisując założenia, model oraz warunki brzegowe symulacji z zastosowaniem metody elementów skończonych podawał również informacje o zastosowanym modelu konstytutywnym i jego parametrach oraz szczegółowe informacje na temat typu elementów skończonych z wyszczególnieniem ich kształtu oraz stopni swobody. W przypadku badań z zastosowaniem metody elementów skończonych warto również przeprowadzić analizę wpływu wielkości zastosowanej siatki dyskretyzacji na zbieżność wyników symulacji.

Autor podsumowując wyniki przeprowadzonych analiz dokonuje ich syntetycznego zestawienia i przedstawia wieloetapowy algorytm projektowania tocznej przekładni mimośrodowej (rozdział 7). Opracowany algorytm umożliwia uwzględnienie na etapie projektowania przekładni jej oczekiwanych parametrów użytkowych oraz ograniczeń wynikających z warunków geometrycznych, kinematycznych oraz wytrzymałościowych. W kolejnym etapie Doktorant opracowuje konstrukcje głównych komponentów tocznej przekładni mimośrodowej wraz z jej korpusem oraz technologię ich wytworzenia. Doktorant kompleksowo weryfikuje opracowaną technologię oraz jakość wykonania istotnych elementów projektowanej przekładni z zastosowaniem systemu skanowania przestrzennego, jak również wprowadza niezbędne poprawki w opracowanej konstrukcji korpusu oraz technologii wytwarzania i montażu elementów przekładni.

Badania eksperymentalne wykonanego prototypu przekładni zostały przeprowadzone na zaprojektowanym stanowisku badawczym umożliwiającym rejestrację prędkości i momentów obrotowych na poszczególnych wałach przekładni. Autor rozprawy opracował metodykę oraz program badań eksperymentalnych mając na celu określenie równomierności przenoszenia napędu oraz sprawności przekładni. W rezultacie przeprowadzonych badań określono wpływ: przełożenia, wielkości mimośrodu, prędkości obrotowej wału wejściowego oraz obciążenia wału wyjściowego na wcześniej wymienione parametry oceny. Wyniki poszczególnych etapów badań eksperymentalnych Doktorant opracował statystycznie jako i graficznie oraz sformułował wnioski i spostrzeżenia z nich płynące.

Pozytywnie oceniam sformułowane przez Doktoranta wnioski płynące z badań eksperymentalnych oraz wnioski końcowe i kierunki dalszych badań.

Podsumowując, należy stwierdzić, że zdefiniowane w rozprawie cele naukowe zostały przez Doktoranta osiągnięte. Merytoryczną część rozprawy oceniam bardzo dobrze. Należy podkreślić fakt, że Autor podjął się zagadnienia wielowątkowego o szerokim zakresie. Realizując poszczególne etapy pracy Doktorant wykazał się umiejętnością prowadzenia analiz teoretycznych, zastosowań metod komputerowych jak i prowadzenia badań eksperymentalnych.

3.3. Oryginalne osiągnięcia pracy

Do szczególnych osiągnięć Doktoranta wynikających z realizacji podjętego problemu badawczego zaliczam:

- Przeprowadzenie analizy geometrycznej, kinematycznej i wytrzymałościowej tocznej przekładni mimośrodowej umożliwiającej określenie podstawowych parametrów i zależności wymaganych na etapie projektowania przekładni ze szczególnym uwzględnieniem opracowanych modeli naprężeń kontaktowych;
- Syntetyczne zestawienie wyników prowadzonych analiz w formie algorytmu projektowania tocznej przekładni mimośrodowej oraz opracowanie na tej podstawie jej projektu z uwzględnieniem ograniczeń konstrukcyjnych oraz technologicznych;
- Opracowanie konstrukcji, technologii oraz wytworzenie funkcjonalnego prototypu nowej przekładni jak również budowę stanowiska do badań eksperymentalnych umożliwiającego ocenę sprawności prototypu przekładni dla różnych konfiguracji;
- Przeprowadzenie badań funkcjonalnego prototypu nowej, tocznej przekładni mimośrodowej w wyniku których określono wpływ wybranych parametrów przekładni na równomierność przenoszenia napędu i jej sprawność.

3.4. Ocena redakcyjna i edycyjna pracy

Struktura rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Stanisława Pabiszczaka jest logiczna, przemyślana i jasno przedstawia etapy realizacji celów rozprawy. Praca jest starannie opracowana pod względem edycyjnym i językowym. W tekście rozprawy rzadko można natrafić na drobne nieścisłości czy też błędy redakcyjne bądź literowe. Poniżej przytaczam niektóre z nich, na które warto zwrócić uwagę zwłaszcza w kontekście późniejszej publikacji wyników rozprawy:

- Na stronie 16 zastosowano błędną numerację w odwołaniu do źródeł literaturowych.
- Proponuje zmianę podpisu pod rysunkiem 2.8 (str. 29) na: „Przekładnia planetarna o jednym stopniu swobody (a), dwóch stopniach swobody (b), gdzie: 1 - koło słoneczne, 2 - koło planetarne, 3 - koło pierścieniowe, 4 - jarzmo.”
- Rys 4.3 (str. 67) przedstawia krzywe zakreślane przez środek elementu tocznego dla danych wejściowych ujętych w tabeli 4.1. Weryfikacji wymaga część b rysunku (przełożenie $i=10$?).
- Wzór 4.3 przedstawiający równanie ruchu dla zgodnych kierunków obrótów wałów przekładni wymaga określenia współzależności między kątami α i ϕ .
- Wzór 4.5 (str. 67) brak definicji zastosowanych symboli \dot{x}_s, \dot{y}_s .
- Rys. 4.2 (str. 67) jest „układnie”, powinno być „układzie”.
- Wzór 4.10 (str. 69) brak definicji zastosowanych symboli $\ddot{x}_0, \ddot{y}_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0$.
- Rys. 4.11 (str. 74) w tekście nad rysunkiem znajduje się informacja, że wykres sporządzono dla zakresu $\alpha \in \langle 0, 180^\circ \rangle$ tymczasem wykres jest dla zakresu $\alpha \in \langle 0, 360^\circ \rangle$.
- Str. 90 (ostatni wiersz pierwszego akapitu) jest „możliwe”, powinno być „możliwie”.
- Str. 93 (piąty wiersz licząc od dołu strony) jest „zastała określona na 1.45 mm”, powinno być „została określona na 1,45 mm”.

4. Uwagi szczegółowe do pracy

Lektura rozprawy nie nasuwa wielu istotnych uwag wymagających szczegółowego wyjaśnienia. Poniżej przedstawiam kilka spostrzeżeń i uwag szczegółowych na które warto zwrócić uwagę w dalszych pracach naukowych Autora rozprawy:

- Zaproponowany przez Autora jeden z warunków ograniczających dopuszczalne przełożenie przekładni dotyczy wartości promienia krzywizny dla minimum lokalnego funkcji opisującej zarys koła krzywzkowego. W rozprawie znajduje się stwierdzenie, że „warunek ten jest niewystarczający, ponieważ dopuszczalne przełożenie przekładni dla przyjętych danych wejściowych było znacznie większe niż to wynikające z analizy” geometrii elementów współpracujących.

W rozprawie brak jest informacji o metodzie wyznaczenia pochodnych niezbędnych do określenia promienia krzywizny (wzór 4.10). Czy zdaniem Autora wybór metody numerycznego wyznaczenia przybliżonych wartości pochodnych oraz założony krok dyskretyzacji dziedziny funkcji mógł mieć istotny wpływ na wielkość błędów różniczkowania numerycznego skutkujących przyjęciem powyższego ograniczenia za niewystarczające?

- Zdefiniowany warunek geometryczny (wzór 4.11 oraz odpowiednio 4.12 i 4.14) został wykorzystany do określenia maksymalnego przełożenia tocznej przekładni mimośrodowej i_{max} (rys. 4.8 i 4.9) dla przyjętego zakresu parametrów geometrycznych (tabela 4.2).

Proces projektowania przekładni wymaga spełnienia licznych ograniczeń (zdefiniowanych przez Autora w algorytmie projektowania przekładni) oraz uwzględnienia aspektów konstrukcyjnych i technologicznych (na co Autor zwraca uwagę i ilustruje przykładem na stronie 91). Czy Doktorant rozważał zastosowanie zależności 4.14 do wyodrębnienia zakresu rozwiązań niedopuszczalnych dla których długość odcinka CD przyjmuje wartości z dziedziny liczb zespolonych (przykładowo dla $R_b = 12$ mm, $a = 50$ mm, $e = 1$ mm, $i = 8$) i dla których otrzymane kształty koła krzywzkowego uniemożliwiają poprawne działanie przekładni?

- Zjawisko tarcia w przekładniach mechanicznych ruchu obrotowego ma istotny wpływ na ich właściwości eksploatacyjne i użytkowe. Autor rozprawy wskazuje ważność tych zagadnień w rozdziale 1. Definiując model numeryczny na etapie badań z zastosowaniem elementów skończonych Doktorant przyjął „beztarciowy” typ kontaktu między współpracującymi powierzchniami. Przyjęcie tego uproszczenia wynikało najpewniej z przyjętego celu symulacji jakim była weryfikacja opracowanych modeli analitycznych. Jednakże opracowana symulacja z zastosowaniem elementów skończonych umożliwia uwzględnienie wielu zjawisk, które w opracowanych modelach analitycznych pominięto.

Opracowując modele analityczne oraz numeryczne w celu analizy zaproponowanej koncepcji tocznej przekładni mimośrodowej Autor rozprawy zdefiniował szereg uproszczeń. Które z nich, w opinii Doktoranta, miały największy wpływ na dokładność uzyskiwanych wyników oraz które z nich najłatwiej usunąć w toku dalszych prac?

- W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych prototypu tocznej przekładni mimośrodowej określono jej parametry użytkowe uwzględniające równomierność przenoszenia napędu, obciążenie nominalne oraz sprawność przekładni. Parametry te uwzględnił Doktorant w analizie porównawczej badanej przekładni i wybranych przekładni mechanicznych dostępnych na rynku podejmując próbę określenia potencjału wdrożeniowego analizowanej przekładni.

Zważywszy na zakres prac prowadzący do opracowania funkcjonalnego prototypu przekładni oraz ich szczegółowy opis zawarty w rozdziale 7 (konstrukcja i technologia przekładni) zasadnym wydaje się podjęcie próby zdefiniowania dodatkowych kryteriów oceny przekładni uwzględniających technologię wytworzenia jej elementów oraz jej koszt. Kryteria te mogłyby wzmocnić ocenę potencjału wdrożeniowego przekładni.

Powyższe uwagi i spostrzeżenia nie mają charakteru krytycznego i nie wpływają na ogólną, pozytywną ocenę rozprawy.

5. Podsumowanie oceny pracy oraz wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska podejmuje istotną problematykę związaną z nowymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi przekładni mechanicznych. Mgr inż. Stanisław Pabiszczak zaprezentował kompleksowy algorytm postępowania przy projektowaniu nowej, tocznej przekładni mimośrodowej uwzględniający wyniki wcześniej przeprowadzonych analiz geometrycznych, kinematycznych i wytrzymałościowych. Opracował funkcjonalny prototyp przekładni oraz przeprowadził jej badania wyznaczając parametry użytkowe przekładni oraz określając jej obszar aplikacyjny.

Rozprawa jest prawidłowo wykonana pod względem metodologicznym, a jej Autor wykazał się umiejętnościami i kompetencjami do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej. Na uwagę zasługuje fakt, że Autor wykazał się umiejętnością wykorzystania wiedzy w przedmiocie rozprawy zarówno do prowadzenia analiz teoretycznych, zastosowań komputerowych metod symulacji jak i prowadzenia badań eksperymentalnych. Badania i analizy przeprowadzone przez Autora rozprawy mają dużą wartość poznawczą i aplikacyjną.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Stanisława Pabiszczaka **spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim** przez ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. W związku z powyższym **stawiam wniosek o skierowanie** rozprawy doktorskiej mgr inż. Stanisława Pabiszczaka **do publicznej obrony**.

Równocześnie uwzględniając fakt, że recenzowana rozprawa doktorska cechuje się kompleksowym i szerokim zakresem, wnikliwością przeprowadzonych rozważań analitycznych jak i badań eksperymentalnych oraz potencjałem aplikacyjnym **wnoszę wniosek o jej wyróżnienie**.

Tariusz Opus