

Rzeszów, 09.09.2023

prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Katedra Konstrukcji Maszyn
Al. Powstańców Warszawy 12
35-959 Rzeszów

Recenzja rozprawy doktorskiej
pt. WPŁYW WYBRANYCH MODYFIKACJI ZASTOSOWANYCH NA DRODZE STREFA
ZAZĘBIENIA – KORPUS PRZEKŁADNI NA DRGANIA PRZEKŁADNI ZĘBATEJ
Autor: mgr inż. Michał Juzek
promotor: dr hab. inż. Grzegorz Wojnar, prof. PŚ
promotor pomocniczy: dr hab. inż. Tomasz Haniszewski

Podstawa recenzji

Pismo dr hab. inż. Marcina Stańka, prof. PŚ Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Lądowej Geodezji i Transportu Politechniki Śląskiej numer RDILGT.512.2023 z dnia o wyznaczeniu na recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr inż. Michałowi Juzkowi w oparciu o dysertację pt. Wpływ wybranych modyfikacji zastosowanych na drodze strefa zazębienia – korpus przekładni na drgania przekładni zębatej.

1. Wprowadzenie

Zagadnienia przedstawionej do recenzji dysertacji dotyczą badań i analizy wpływu wybranych modyfikacji konstrukcyjnych zastosowanych na drodze strefa zazębienia – korpus przekładni na drgania przekładni zębatej.

Przekładanie zębate stosowane są w różnych obszarach techniki przez człowieka od wielu dziesięcioleci w celu przeniesienia momentu obrotowego, zwiększania lub zmniejszania prędkości obrotowej oraz zmiany kierunku ruchu i obrotów a także zamiany ruchu obrotowego na postępowy. Mimo dynamicznego rozwoju systemów przeniesienia napędu sterowanych komputerowo, na obecnym etapie rozwoju techniki nie jest możliwe całkowite wyeliminowanie przekładni zębatych z układów przeniesienia napędu. Dodatkowo przekładnie te podlegają pracom rozwojowym, których celem jest zwiększenie ich nośności, trwałości eksploatacyjnej w warunkach zmiennych obciążeń. Jednym z czynników eksploatacyjnych mających wpływ na trwałość przekładni są drgania układu wymuszającego np. silnika spalinowego, czy elektrycznego lub turbiny wiatrowej czy wodnej. Dodatkowo sama przekładnia może być źródłem drgań powstających

podczas jej pracy wynikających m.in. z błędów zarysu czy niewyważenia elementów wirujących. Biorąc powyższe aspekty pod uwagę uważam, że przedstawiona w rozprawie tematyka dotycząca możliwości wprowadzania modyfikacji na drodze strefa zazębienia – korpus przekładni w celu analizy i docelowej redukcji drgań przekładni zębatej jest aktualna, a jej podjęcie jest w pełni uzasadnione z punktu widzenia rozwoju nauki, aplikacji przemysłowych i tendencji rozwoju konstrukcji oraz technologii produkcyjnych układów przeniesienia napędu.

2. Charakterystyka ogólna rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca liczy wraz z załącznikami 236, stron zawiera na początku spis treści, wykaz ważniejszych oznaczeń, składa się z dziesięciu numerowanych rozdziałów, bibliografii streszczenia i słów kluczowych w języku polskim i angielskim oraz załączników. Rozdziały i podrozdziały ułożone są w odpowiedniej kolejności, tworząc spójny i logiczny układ, pozwalający na właściwe zapoznanie się z zawartością merytoryczną. Bibliografia zawiera 176 pozycji ułożonych w kolejności cytowania, w jej skład wchodzi aktualne i odpowiednie do tematyki dysertacji opracowania monograficzne, artykuły, źródła internetowe, patenty.

Pracę rozpoczyna wprowadzenie, w którym opisane jest na wybranych przykładach znaczenie przekładni zębatach w układach przeniesienia napędu począwszy od środków transportu, takich jak samochody osobowe, koleje szynowe, statki wodne wyposażone w silniki napędowe, poprzez układy wytwarzania energii elektrycznej oraz przetwarzania energii wiatrowej czy wodnej.

Rozdział drugi przedstawia źródła drgań przekładni zębatach, ze szczególnym uwzględnieniem kół zębatach o zębach prostych, których współpraca jest odpowiedzialna w dużej mierze za generowanie drgań. Dodatkowo drgania mogą wynikać ze zmiennej w czasie sztywności łożyskowania, niedokładności wykonania kół zębatach, niedokładności wykonania wałów i korpusów oraz uszkodzeń powstałych w wyniku eksploatacji przekładni. Opisano również zagadnienia związane z możliwością zmniejszenia drgań, poprzez wprowadzenie odpowiednich rozwiązań konstrukcyjnych korpusów przekładni a także samych kół zębatach.

W trzecim rozdziale zawarty jest cel i zakres oraz teza pracy oparta na analizie literatury zawartej w poprzednich rozdziałach, która odnosi się do możliwości zmniejszenia drgań powstających podczas pracy przekładni zębatej walcowej poprzez modyfikację jej konstrukcji w strefie zazębienia i modyfikacji korpusu przekładni. Przedstawiono szczegółowo zakres, który obejmuje badania symulacyjne, badania doświadczalne, opracowanie konstrukcji zębatego koła dzielonego, badania drgań wybranych elementów przekładni, pomiary tych drgań oraz analizę otrzymanych wyników. Realizacja badań i analiz ma na celu opracowanie rozwiązań pozwalających na ograniczenie drgań przekładni oraz ich negatywnego wpływu na pracę przekładni podczas eksploatacji i wydłużenie jej trwałości.

Rozdział czwarty opisuje wstępne badania dotyczące analizy wybranych czynników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych mających wpływ na pracę przekładni do których można zaliczyć: modelowanie chwilowego śladu styku zębów kół

współpracujących, badania wpływu nierównoległości osi wałów przekładni oraz mocowania kół zębatych na przebieg drgań. Przeprowadzono tu szereg doświadczeń i opracowano analizę wyników badań.

W rozdziale piątym przedstawiono konstrukcję koła zębatego, będącego obiektem badawczym, które to rozwiązanie zostało poddane ochronie w ramach zgłoszenia patentowego P.435585, założenia konstrukcyjne przedmiotowego koła mają powodować ograniczenie transmisji drgań wynikających z pracy przekładni, co jest również elementem analiz dysertacji.

Rozdział szósty dotyczy wyznaczania widmowych funkcji przejścia FRF na drodze głowa zęba – piasta koła – wał przekładni w celu określenia wpływu opracowanych zmian konstrukcyjnych koła zębatego na charakterystykę drgań wynikających z współpracy kół podczas zazębienia. Zastosowano do badań metodę wyznaczania widmowych funkcji przejścia, która jest również stosowana w diagnostyce drganiowej obiektów technicznych.

W rozdziale siódmym Autor opisuje modyfikacje przekładni zębatej wprowadzone w celu realizacji badań doświadczalnych na stanowisku testowym dla określenia rzeczywistego wpływu wprowadzonych rozwiązań konstrukcyjnych na drgania układu napędowego. Wprowadzono do przekładni modyfikacje polegające na zmianie elementu dystansującego zwiększającego rozstaw łożysk przekładni, zmianie tulei do osadzania łożysk oraz preselekcji kół zębatych na podstawie pomiarów współrzędnościowych ich geometrii.

Rozdział ósmy zawiera informacje dotyczące badań wyznaczania widmowych funkcji przejścia FRF na drodze głowa zęba – korpus przekładni. Do realizacji wymuszenia podczas badań zastosowano młotek modalny Dytran 5800B2, ze względu na gabaryty jego głowicy przeprowadzono modyfikację koła zębatego polegającą na usunięciu jego części zęba, symetrycznie dla badanego koła. Wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów oraz zestawień tabelarycznych wartości lokalnych maksimów funkcji EFR dla wybranych kierunków pomiarowych.

W rozdziale dziewiątym przedstawiono badania przekładni zębatej dla różnych wartości prędkości obrotowych. Do tego celu zastosowano specjalne stanowisko badawcze składające się z silnika napędzającego przekładnię o mocy 37kW, układu przeniesienia napędu do dwóch układów hamujących o mocy 22kW każdy. Stanowisko badawcze pozwalało na płynną regulację momentu hamującego w zakresie od około 0 do 144Nm oraz na pomiar i rejestrację parametrów pracy, szczególnie drgań wybranych elementów przekładni. Badania przeprowadzono dla różnych wariantów obciążeń i prędkości obrotowej. Wyniki przedstawiono w postaci szeregu wykresów, które dodatkowo opisano w formie podsumowania kolejnych etapów zmian parametrów badawczych.

Rozdział dziesiąty zawiera podsumowanie i wnioski końcowe odnoszące się do całości prac badawczych w zakresie analizy rozwiązań konstrukcyjnych wprowadzonych w wyniku realizacji dysertacji a także analizy ich wpływu na drgania poszczególnych elementów układu przeniesienia napędu. Sformułowano również kierunki dalszych zadań badawczych.

W końcowej części pracy znajduje się bibliografia, streszczenia i załączniki w postaci specyfikacji modułów badawczych oraz wykresów pomiarów geometrycznych badawczych kół zębatych.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji rozprawa zawiera istotną z punktu widzenia naukowego analizę źródeł drgań przekładni zębatych, co stanowi podstawę realizacji badań mających na celu poznanie mechanizmów powstawania drgań, określenie sposobów ich minimalizacji przy zastosowaniu specjalnych rozwiązań konstrukcyjnych, stanowiących oryginalne rozwiązanie autorskie Doktoranta.

Głównym użytecznym celem pracy było opracowanie konstrukcji koła zębatego dzielonego pozwalającego na zmniejszenie przenoszenia drgań na drodze strefa ząbienia – wał napędowy, przy jednoczesnym zachowaniu ciągłości przeniesienia momentu obrotowego. Dodatkowym celem było opracowanie, przebadanie i wdrożenie rozwiązań konstrukcyjnych w przekładni, które pozwolą na zmniejszenie propagacji przenoszenia drgań przez poszczególne elementy układu napędowego. W mojej ocenie przedstawione cele zostały w wyniku realizacji pracy osiągnięte.

Doktorant przeprowadził szereg badań i testów wykorzystując odpowiednio dobraną aparaturę badawczą, obiekty badawcze oraz prawidłowo opracowaną metodykę. Realizacja zadań skupia się na osiągnięciu głównego celu badawczego, występują w pracy dodatkowo zagadnienia konstrukcyjne związane z zaprojektowaniem obiektu badawczego, modeli badawczych i wykonania ich modyfikacji oraz stanowiska badawczego w postaci analizowanej przekładni i zespołu napędowo – hamującego z systemem czujników i rejestracji parametrów pracy.

Można zauważyć, że Doktorant dość pobieżnie potraktował kwestie konstrukcyjne w zakresie szczegółów, praca zawiera wiele szkiców i uproszczonych rysunków. Jest to zrozumiałe w odniesieniu do opisu patentowego, gdzie przedstawia się koncepcję rozwiązania, jednak stanowisko badawcze wymaga już sformułowania określonych parametrów konstrukcyjnych. W mojej opinii powinny znajdować się w pracy rysunki kół zębatych stosowanych do badań oraz samej przekładni z podanymi wymiarami. W pracy przedstawiono w tabeli 4.1 na stronie 54 wybrane parametry przekładni, służące do wykonania modeli numerycznych w środowisku Matlab oraz modeli badawczych. Pewne elementy dokumentacji technicznej podawane na rysunku wykonawczym czy złożeniowym dają pogląd na szczegóły dotyczące konstrukcji przekładni, dokładności wykonania, stosowanych procesów technologicznych, materiałów czy obróbki cieplno - chemicznej. Trudno na podstawie zdjęcia jednoznacznie określić jaka jest grubość warstwy materiału podatnego, co jest istotne z punktu widzenia tłumienia drgań oraz zużycia eksploatacyjnego. Informacje tego typu i parametry technologiczne często odpowiadają za pacę samej przekładni jako źródła drgań mechanicznych, co jest związane tematyką pracy. Autor opisuje pewne elementy procesu wykonania badawczego koła zębatego ogranicza się jednak do sposobu wykonania wycięciu rowka na materiał podatny w kole badawczym. Z punktu widzenia przygotowania próbek ważny jest również sposób wypełnienia rowka materiałem podatnym, tak aby zachować

jednorodność i ciągłość wypełnienia, co ma wpływ na tłumienie drgań i trwałość konstrukcji. Podano w pracy, że wypełnienie rowka zostało wykonane gumą olejoodporną o twardości 65ShA, wydaje się, że istotne byłoby podanie, dlaczego wybrano ten właśnie materiał i czy rozważono użycie innych materiałów.

W pracy przeprowadzono również modyfikacje konstrukcyjne przekładni wprowadzając tuleje łożyskowe z wkładkami tłumiącymi drgania. Poglądowo pokazane jest to na rysunku 7.10 na stronie 136, który nie spełnia wymagań rysunkowej informacji technicznej. W tym przypadku można zauważyć również pewną skłonność zbytniego uproszczenia kwestii konstrukcyjnych i technicznych zawartych w pracy.

Poddano analizie wyniki pomiarów dla siedmiu wartości momentu hamującego, w czterech punktach i kierunkach pomiarowych, dla dwóch prędkości obrotowych zębniaka. Realizacja badań pozwoliła na uzyskanie szeregu informacji dotyczących wpływu przedmiotowego koła badawczego na przebieg drgań podczas zadawania zmiennych obciążeń. Poddano badaniom szereg zmiennych, w przypadku badanej przekładni pochodzących od wymuszeń układu napędowego i modyfikacji konstrukcji. Ciekawą informacją badawczą mogłaby być zmiana wartości drgań w czasie dłuższej eksploatacji przekładni, szczególnie w odniesieniu do trwałości i zachowania właściwości tłumiących gumowych wkładek. Nie było to jednak celem pracy, a może być zagadnieniem do analizy w kolejnych etapach realizacji badań.

Przedstawione powyżej kwestie mają charakter uwag, rozważań i dyskusji, które mogą stanowić dla Autora pewne wskazówki do przemyśleń w zakresie kontynuacji badań związanych z konstrukcją i eksploatacją przekładni zębatych. Możliwe, że kwestie te były rozwiązane na etapie realizacji procesu badawczego i pominięto niektóre szczegóły w treści pracy. Uwagi te nie zmieniają mojej pozytywnej oceny pracy, która przedstawia bardzo ciekawy materiał badawczy i analizę naukową zagadnienia, jednocześnie stanowi oryginalny wkład w obszary naukowo-badawcze i wdrożeniowe.

Przeprowadzone analizy wyników pozwoliły na weryfikację wpływu wybranych modyfikacji na drodze strefa zazębienia – korpus przekładni na drgania przekładni zębatej, uzyskując zmniejszenie poziomu drgań analizowanego rozwiązania o ok. 30%, co stanowi oryginalny wkład Autora w obszar konstruowania i eksploatacji układów napędowych a zarazem dyscypliny inżynieria lądowa geodezja i transport.

4. Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji dysertacja dotyczy bardzo istotnych zagadnień, odnoszących się do analizy procesów powstawania i redukcji drgań w układach napędowych. Tematyka ta analizując trendy panujące w nauce i przemyśle z pewnością jest przyszłościowa, ze względu na rozwój konstrukcji przekładni i jej elementów w celu podwyższenia ich trwałości oraz niezawodności. Temat pracy został wybrany w sposób przemyślany i trafny, a jej zakres spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie inżynieria lądowa geodezja i transport. Układ formalny pracy jest zgodny z wytycznymi dla dysertacji doktorskich, zawiera odpowiednią bibliografię i odsyłać do materiału ilustracyjnego. Praca odnosi się do aktualnej wiedzy, wnosi treści nowe w obszarze badań naukowych a także ich możliwości aplikacji przemysłowych. Pracę

rozpoczyna części teoretyczna będąca jednocześnie analizą stanu zagadnienia, sformułowane cele badawcze zostały osiągnięte a opracowana analiza wyników badań stanowi istotne osiągnięcie naukowe wprowadzające nowe treści stanowiące oryginalny wkład w obszarze dyscypliny naukowej, której Doktorant realizuje dysertację. Powyższe fakty świadczą o kompetencjach Autora w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne pozwalające na prowadzenie prac badawczych o charakterze naukowym i wdrożeniowym.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. „Wpływ wybranych modyfikacji zastosowanych na drodze strefa zazębienia – korpus przekładni na drgania przekładni zębatej” autorstwa mgr inż. Michała Juzka, spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z późniejszymi zmianami w zakresie dyscypliny inżynieria lądowa geodezja i transport, w mojej ocenie może być dopuszczona do publicznej obrony.

Gregorz Budni