

Recenzja spełnia wymagania

Prof. dr hab. inż. Piotr LACKI
Politechnika Częstochowska

Przewodniczący Rady Dyscypliny
Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport
inż. Marcin Staniek, prof. PŚ

Częstochowa, 29 maja 2024

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Łukasza Mazurka**
Tytuł rozprawy: „**Optymalizacja ilościowej i jakościowej analizy przekładni zębatach dla
wybranych silników elektrycznych**”

Formalna podstawa recenzji

Podstawę formalną opracowania przedmiotowej recenzji, stanowiła Uchwała Nr 34/2023 Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej z dnia 25 kwietnia 2024 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej i przedstawiona w skierowanym do mnie piśmie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport PŚ dr hab. inż. Marcina Stańka.

Recenzowana praca została napisana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Bogusława Łazarza, przy udziale opiekuna pomocniczego ze strony przedsiębiorstwa dr inż. Markusa Kuestera w ramach realizacji jednego z zadań projektu pn. „Doktorat Wdrożeniowy” - II edycja, finansowanego ze środków budżetu Państwa. Id projektu: 410487, nr rej.: 0062/DW/2018.

Aktualność podjętego tematu

Analiza przekładni zębatach w kontekście silników elektrycznych wymaga kompleksowego podejścia, które uwzględnia zarówno aspekty mechaniczne, jak i akustyczne, oraz wykorzystania zaawansowanych narzędzi numerycznych i eksperymentalnych do optymalizacji ich działania. Podstawą analizy jest zbudowanie dobrego modelu dynamicznego przekładni zębatach. Współczesne trendy w modelowaniu dynamicznych zjawisk w przekładniach mechanicznych obejmują:

- Zastosowanie technik sztucznej inteligencji. AI i uczenie maszynowe są wykorzystywane do predykcji zachowań dynamicznych i identyfikacji potencjalnych problemów na wczesnym etapie.
- Modele hybrydowe. Łączące metody analityczne i numeryczne w celu uzyskania bardziej dokładnych i efektywnych wyników.
- Badania eksperymentalne i walidacja modeli. Coraz większy nacisk kładzie się na walidację modeli numerycznych za pomocą danych eksperymentalnych, co pozwala na zwiększenie dokładności symulacji.
- Symulacje czasu rzeczywistego. Wykorzystywane do monitorowania stanu przekładni i predykcji awarii w czasie rzeczywistym.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Rada Dyscypliny Inżynieria Lądowa,
Geodezja i Transport

wpłynęło dnia *10.06.2024*

nr *116* zat. *—*

- Zintegrowane podejście do projektowania. Integracja analiz dynamicznych i akustycznych na etapie projektowania, co pozwala na optymalizację konstrukcji pod kątem minimalizacji hałasu i drgań.

Modele dynamiczne przekładni zębatych są kluczowymi narzędziami do analizy ich zachowania w różnych warunkach pracy. Modele te uwzględniają parametry takie jak masa, sztywność, tłumienie oraz właściwości materiałowe elementów przekładni. Modele dynamiczne w zależności od stopnia skomplikowania i potrzeb analizy mogą być jednomasowe, dwumasowe lub wielomasowe. Istotne jest uwzględnienie efektów nieliniowych, takich jak luz międzyzębny oraz zmieniająca się sztywność zazębienia w czasie.

Wibroaktywność, czyli zdolność przekładni do generowania drgań, jest wynikiem dynamicznych interakcji między elementami przekładni. Drgania te mogą być wynikiem błędów produkcyjnych, zużycia elementów, a także ekscentryczności i nieosiowości wałów. Drgania mogą prowadzić do zmniejszenia trwałości przekładni oraz generować hałas. Analiza wibroaktywności wymaga zastosowania zaawansowanych metod pomiarowych oraz modeli matematycznych, które uwzględniają zarówno sztywność zazębienia, jak i tłumienie drgań. Akustyka przekładni zębatych jest ściśle związana z generowanymi przez nie drganiami. Hałas przekładni jest wynikiem emisji fal akustycznych, które powstają na skutek wibroaktywności. Analiza akustyczna przekładni wymaga modelowania propagacji fal dźwiękowych w otoczeniu przekładni oraz ich interakcji z obudową i innymi elementami mechanicznymi. Modele akustyczne mogą być oparte na metodach analitycznych, takich jak równania Helmholtza, oraz numerycznych, takich jak metoda elementów skończonych (FEM) lub metoda elementów brzegowych (BEM).

Modelowanie numeryczne jest nieodzownym narzędziem w analizie przekładni zębatych. Metody takie jak FEM i BEM umożliwiają dokładne odwzorowanie zachowań dynamicznych i akustycznych przekładni. Symulacje numeryczne pozwalają na analizę rozkładu naprężeń i przemieszczeń w przekładni, modelowanie drgań własnych i wymuszonych, symulację propagacji fal dźwiękowych w otoczeniu przekładni, oraz optymalizację konstrukcji pod kątem minimalizacji drgań i hałasu.

W związku z powyższym tematykę opiniowanej pracy uważam za celową i aktualną z naukowego i praktycznego punktu widzenia.

Aktualność podejmowanej tematyki potwierdzają polskie i zagraniczne doniesienia literaturowe. Wyniki z pewnością znajdą zastosowanie w praktyce przemysłowej. Mocną stroną tematyki pracy jest jej badawczy charakter oraz potencjał aplikacyjny.

Zakres opiniowanej pracy

Struktura pracy składa się z ośmiu rozdziałów głównych. Pierwsze trzy rozdziały pracy są poświęcone badaniom literaturowym. W rozdziałach tych dokonano przeglądu i analizy istniejących źródeł, co pozwala na zrozumienie dotychczasowego stanu wiedzy oraz identyfikację luk badawczych. Te rozdziały opierają się na 85 wyselekcjonowanych pozycjach literatury, które obejmują zarówno klasyczne, jak i najnowsze publikacje w omawianym

zakresie tematycznym. Kolejne pięć rozdziałów to oryginalne opracowanie tematu dysertacji, stanowiące wkład Doktoranta w rozwój badanego obszaru. Rozdziały te prezentują metodologię podejścia, wyniki badań empirycznych oraz autorskie interpretacje danych. W pracy szczególny nacisk położono na metodologię badawczą, wnioski z przeprowadzonych analiz oraz praktyczne implikacje uzyskanych wyników. Recenzowana praca liczy 135 stron. Jest bogato ilustrowana, zawierając 111 rysunków, które wspierają zrozumienie prezentowanych treści oraz wizualizują wyniki badań. Ponadto, praca zawiera 5 tabel, które porządkują dane i ułatwiają ich analizę. Tak skomponowana struktura pracy zapewnia wszechstronne i pogłębione podejście do analizowanego tematu, łącząc rzetelne badania literaturowe z oryginalnym wkładem autorskim.

Teoretyczna analiza stanu zagadnienia zawiera wprowadzenie, studium literatury oraz przedstawia stan zagadnienia w świetle analizowanej literatury oraz celu i zakresu pracy. Rozdział trzeci stanowi podsumowanie przeglądu literatury.

W literaturowej części pracy odniesiono się między innymi do problematyki modeli dynamicznych przekładni zębatych z uwzględnieniem ich wibroaktywności i akustyki. Dużo miejsca poświęcono na analizę literaturową modelowania numerycznego w zakresie symulacji zagadnień dynamicznych oraz akustycznych. Zestawiając ze sobą wady i zalety różnych modeli numerycznych Doktorant stwierdził, że Metoda Elementów Skończonych znajduje bardzo szerokie zastosowanie zarówno w pracach naukowych jak i rozwiązaniach stosowanych komercyjnie w przemyśle (wiele różnych gałęzi przemysłu). Istnieją branże przemysłowe w których odpowiednio przygotowane modele numeryczne stanowią również etap prac certyfikacyjnych umożliwiające dopuszczenie do wykorzystania (do ruchu, do lotu) maszyn i urządzeń projektowanych z wykorzystaniem tychże metod symulacyjnych.

W końcowej części opisu literaturowego Doktorant analizuje współczesne trendy w nauce i przemyśle w zakresie modelowania zjawisk dynamicznych w przekładniach mechanicznych wyraźnie wskazują na powszechne wykorzystanie Metody Układów Wieloczołnowych (Multi-Body Simulation, MBS). Metoda ta jest stosowana zarówno do modelowania pojedynczych zestawów kół zębatych, jak i kompletnych zespołów napędowych w takich gałęziach przemysłu jak motoryzacja i energetyka wiatrowa. Multi-Body Simulation, przy użyciu specjalistycznego oprogramowania jak MSC Adams, jest często stosowana do modelowania dynamicznych zjawisk w przekładniach mechanicznych, zwłaszcza w przypadku uszkodzeń poszczególnych komponentów. Program MSC Adams stanowi zaawansowane narzędzie do modelowania układów napędowych, oferując szerokie możliwości modyfikacji danych wejściowych, co pozwala na precyzyjną analizę różnych scenariuszy działania. Kluczowym etapem współczesnego procesu projektowania maszyn i urządzeń jest numeryczne testowanie wirtualnych modeli, czyli tzw. cyfrowych bliźniaków. Zastępuje ono tradycyjne eksperymenty fizyczne, umożliwiając dokładniejsze i szybsze przewidywanie zachowań maszyn w rzeczywistych warunkach pracy. Numeryczne testowanie stanowi etap poprzedzający testy fizyczne gotowego urządzenia lub jego prototypu, pozwalając na wstępne identyfikowanie potencjalnych problemów oraz optymalizację konstrukcji. Numeryczna estymacja parametrów maszyn i urządzeń zajmuje centralne miejsce w procesie projektowania produktów we współczesnym przemyśle. Wirtualne modele, zdefiniowane zgodnie

z rzeczywistymi warunkami pracy i odpowiednio zaimplementowanymi formułami wewnątrz programów, dostarczają kluczowych informacji niezbędnych do projektowania. Skorelowane modele numeryczne, potwierdzone badaniami eksperymentalnymi, pozwalają na szybkie i efektywne uzyskiwanie odpowiedzi na istotne pytania dotyczące zachowania się produktów. Proces ten jest bardziej ekonomiczny i mniej czasochłonny w porównaniu do testów stanowiskowych, co stanowi istotny argument przy podejmowaniu decyzji o wprowadzeniu nowego produktu na rynek.

Doktorant szczegółowo opisał kontekst dysertacji podsumowując że, numeryczne modelowanie i testowanie cyfrowych bliźniaków odgrywa kluczową rolę we współczesnym projektowaniu przekładni zębatych oraz innych produktów przemysłowych, umożliwiając bardziej efektywne i precyzyjne opracowanie oraz optymalizację konstrukcji.

Cel, założenia i zakres pracy przedstawiono w sposób syntetyczny. Jasno i precyzyjnie określono cel pracy doktorskiej, którym było kompleksowe określenie właściwości dynamicznych oraz akustycznych przemysłowej przekładni mechanicznej TDB 230, celem wirtualnej diagnostyki i ewentualnej redukcji niekorzystnych zjawisk wpływających na pracę i zdolności operacyjne przekładni. Dodatkowo naukowy aspekt rozprawy doktorskiej obejmuje swoim zakresem przeprowadzenie kompleksowych badań stanowiskowych obejmujących swoim zakresem zachowanie dynamiczne oraz akustyczne. Celem użytecznym rozprawy jest, oprócz budowy odpowiedniego modelu numerycznego układu napędowego wózka widłowego również optymalizacja procesu projektowania przekładni, który to proces swoim zakresem będzie obejmował również szczegółowe modelowanie numeryczne tego podzespołu oraz jego późniejszą walidację (celem określenia poprawności sposobu modelowania zachowania się przekładni).

Doktorant sformułował tezę rozprawy doktorskiej:

Przygotowanie dynamiczno-akustycznego modelu numerycznego badanej przemysłowej przekładni TDB 230 umożliwia określenie jej charakterystyk oraz parametrów pracy na etapie jej prototypowania. Kompleksowe podejście w zakresie budowy modelu numerycznego pozwala na skrócenie okresu wprowadzenia produktu na rynek poprzez redukcję testów fizycznych przekładni i ich zastąpienie odpowiednimi modelami numerycznymi: dynamicznymi oraz akustycznymi.

Zaproponowany zakres pracy właściwie odzwierciedla intencje Doktoranta zmierzające do realizacji celu i zakresu pracy, oraz udowodnienia tezy pracy:

- przygotowanie wstępnych modeli symulacyjnych (numerycznych) przemysłowej przekładni TDB 230 określających właściwości dynamiczne analizowanej przekładni.
- przygotowanie końcowego modelu numerycznego analizowanej przekładni TDB 230 określającego właściwości wibroakustyczne danego modelu.
- przeprowadzenie badań stanowiskowych przekładni mechanicznej z wyznaczeniem charakterystyk czasowych oraz częstotliwościowych wartości przyspieszeń określonych punktów obudowy przekładni TDB 230.

- przeprowadzenie badań stanowiskowych na zmodernizowanym stanowisku testowym z wyznaczeniem charakterystyk czasowych oraz częstotliwościowych wartości przyspieszeń określonych punktów obudowy przekładni TDB 230.

W ramach badań rozpoznawczych Doktorant podjął się analizy przekładni TDB firmy ABM Greiffenberger Polska Sp. z o.o., wykorzystując model TDB 230 jako główny przedmiot badań. W tej części pracy zaprezentowano autorskie analizy numeryczne dla przekładni TDB 230, która jest powszechnie stosowana w urządzeniach transportu bliskiego dzięki swojej kompaktowej budowie, dużej wytrzymałości oraz wysokim właściwościom zmęczeniowym i niezawodnościowym. Te cechy wynikają z użycia wysokiej jakości materiałów konstrukcyjnych, zaawansowanych procesów produkcyjnych oraz rygorystycznej kontroli jakości. Doktorant zbudował dokładny model CAD przekładni TDB 230, wykorzystując oprogramowanie Siemens NX. Model ten uwzględnia wszystkie komponenty oraz właściwości materiałowe i warunki brzegowe. Dzięki temu model CAD stanowi solidną podstawę do dalszych analiz numerycznych. Do oceny właściwości dynamicznych przekładni TDB 230 Doktorant wykorzystał program Ansys Mechanical. W ramach analiz numerycznych Doktorant przeprowadził dwie kluczowe analizy: modalną oraz harmoniczną. Analiza modalna pozwoliła na wyznaczenie częstotliwości drgań własnych układu oraz postaci drgań. Wyniki tej analizy posłużyły jako dane wejściowe do analizy harmonicznej, która określa odpowiedź układu na zadane obciążenia, zarówno zewnętrzne, jak i wewnętrzne. Doktorant stwierdził, że w analizowanym układzie występują drgania własne związane z poszczególnymi częściami przekładni, w tym pokrywą tylną. Dla określonych postaci drgań aktywowana jest cała obudowa przekładni, co jest szczególnie widoczne w przypadkach giętych drgań. Takie podejście pozwala na zrozumienie, które elementy przekładni są najbardziej narażone na drgania i jakie są ich charakterystyki. Analiza harmoniczna wykazała, że maksymalna wartość częstotliwości wynosi 421.5 Hz, a pozostałe istotne częstotliwości to 200 Hz, 377.97 Hz, 428.2 Hz i 429.3 Hz. Te wartości są kluczowe dla przeprowadzenia dalszej analizy wibroakustycznej, chociaż częstotliwości w okolicach 500 Hz mają mniejszy wpływ energetyczny.

Ostatnim etapem było zbudowanie numerycznego modelu akustycznego przekładni TDB 230 przy użyciu programu MSC Actran. Program ten jest szeroko stosowany w różnych branżach do analizy właściwości emisji akustycznej, wibro-akustycznych oraz aero-akustycznych. Doktorant zauważył, że wyższe wartości ciśnienia akustycznego występują, gdy przekładnia jest zamontowana nad podłogą, co wynika z odbijania się fal akustycznych od powierzchni. Na podstawie przeprowadzonych analiz wibroakustycznych Doktorant jednoznacznie stwierdził ewidentny wpływ warunku odbiciowego na charakter rozchodzenia się fal ciśnienia akustycznego. Geometria całej przekładni wymusza jej niskie położenie względem podłoża, jednakże nie ma możliwości propagacji fal poniżej poziomu przekładni. Dodatkowo dla obu przypadków obliczeniowych – przekładnia luźno zamocowana oraz przekładnia pracująca tuż nad podłogą – można zaobserwować różnice maksymalnego występującego ciśnienia akustycznego dla ściśle określonej wartości częstotliwości. Doktorant stwierdził, że przekładnia TDB 230 będzie generować większy hałas, gdy jest zamocowana na wózku widłowym blisko podłogi, w porównaniu do jej luźnego zamocowania w przestrzeni. Wyniki te mają istotne znaczenie dla praktycznego zastosowania przekładni oraz jej integracji w różnorodnych systemach transportowych.

W ramach badań zasadniczych Doktorant przeprowadził testy stanowiskowe przekładni TDB 230. Stanowisko testowe jest stanowiskiem półautomatycznym – działa niejako samodzielnie, badając, mierząc oraz rejestrując określone właściwości przekładni w ciągu pomiarowym. Wymaga jednak ingerencji operatora polegającej na odpowiednim zamocowaniu przekładni na dedykowanym dla niej wózku, zamknięciu komory (osłony) oraz ręcznym uruchomieniu testu.

Stanowisko testowe składa się z komory testowej oraz pełnego systemu kontrolno-pomiarowego. Przygotowane stanowisko służy do pomiarów zarówno mniejszego modelu przekładni z rodziny TDB (TDB 230), jak i większego modelu – TDB 254. Komora testowa działa jako mechaniczny układ zamykający, pełniąc dwie główne funkcje – stanowi podstawę dla używanego czujnika pomiarowego oraz zapewnia bezpieczeństwo, chroniąc przed ruchomymi, wirującymi elementami przekładni. W komorze znajduje się także czujnik pomiarowy, który jest jednoosiowym przyspieszeniemierzem typu JM 352C68 firmy PCB, umieszczonym w odpowiedniej pozycji podczas uruchomienia testu.

Zarejestrowane dane pomiarowe są zapisywane przez system w formie pliku dźwiękowego z rozszerzeniem WAV, co jest standardowym formatem plików dźwiękowych. Następnie generowane są dwie charakterystyki: przebiegi częstotliwościowe (FFT) oraz spektrogramy. Przebiegi częstotliwościowe przedstawiane są w pełnym zakresie częstotliwości (0 – 12000 Hz) oraz w ograniczonym zakresie (0 – 1000 Hz), z dodatkowym rozgraniczeniem dla przekładni sprawnej i uszkodzonej (z uszkodzeniami na pierwszym stopniu przekładni – uszkodzone zęby kół zębatych). Spektrogramy są również generowane w podobny sposób, zarówno w pełnym zakresie częstotliwości (do 12000 Hz), jak i w ograniczonym (do 1000 Hz), z rozróżnieniem na przekładnie sprawne i uszkodzone.

W trakcie badań Doktorant zauważył, że kluczowe jest odpowiednie zamocowanie czujnika podczas testów. Postanowił zmienić sposób mocowania czujnika, przenosząc go z ramy komory testowej bezpośrednio na obudowę analizowanej przekładni. Dodatkowo zaprojektowano dedykowany chwytak, który wspiera czujnik konstrukcyjnie i chroni go. Nowe rozwiązanie musiało być uniwersalne, aby można je było stosować zarówno dla mniejszego modelu przekładni (TDB 230), jak i dla większego modelu (TDB 254). W wyniku prac konstrukcyjnych stworzono nowy chwytak, który został wykorzystany do ponownego przeprowadzenia testów stanowiskowych. Wprowadzone zmiany w sposobie mocowania czujnika pomiarowego do obudowy przekładni TDB 230 pozwoliły uzyskać znacznie lepsze dane pomiarowe, co ułatwiło interpretację wyników analizowanych danych.

W podsumowaniu i wnioskach Doktorant stwierdził, że zaproponowana kolejność budowania modeli numerycznych oraz przeprowadzonych analiz zapewniła najlepszą jakość uzyskanych wyników oraz najmniejszą ilość błędów podczas wymiany informacji i danych wejściowych pomiędzy różnymi solverami obliczeniowymi.

Przygotowany model numeryczny umożliwił zbadanie wpływu modyfikacji parametrów konstrukcyjnych bądź materiałowych przekładni TDB 230 na jej właściwości dynamiczne oraz akustyczne. Modyfikacja geometryczna kół zębatych, rodzajów użytych w złożeniu łożysk czy też zmiany geometrycznej samej obudowy przekładni mogą zostać

w szybki i dogodny sposób zaadoptowane w modelu a ich wpływ na charakterystyki przekładni może być bardzo precyzyjnie określony. Jest to bowiem model parametryczny w którym wszystkie komponenty są ze sobą wzajemnie powiązane. Jakakolwiek ich modyfikacja czy też zamiana powodują konieczność powtórzenia procesu obliczeniowego, który odbywać się będzie automatycznie oraz z minimalnym koniecznym wpływem użytkownika.

Na podstawie modelu z wyznaczonymi postaciami drgań własnych, Doktorant zbudował model odpowiedzi częstotliwościowej układu przekładni TDB 230. W tym przypadku Doktorant rozróżnił zarówno pełne spektrum wyznaczonych wcześniej częstotliwości (od pierwszej wyznaczonej częstotliwości 429.27 Hz do ostatniej, czyli 1946.5 Hz) definiując spektrum poszukiwanych rozwiązań w zakresie 200 Hz – 2200 Hz, postępując zgodnie z sugestiami dla przeprowadzania tego typu analiz numerycznych. W tak wyznaczonym polu rozpatrywanych częstotliwości wyznaczył wartość szczytową przypadającą na wartość pokrywającą się z pierwszą postacią drgań własnych. W drugim podejściu analitycznym Doktorant zagęścił zakres poszukiwanych rozwiązań jedynie do obszaru 200 Hz – 550 Hz dodatkowo definiując wewnątrz programu Ansys Mechanical tzw. cluster points – wygładzanie wyznaczanych krzywych odpowiedzi częstotliwościowej z samym zagęszczeniem punktów pomiarowych w pobliżu wartości szczytowej. Tak przeprowadzona analiza pozwoliła wyznaczyć nie tylko wartość szczytową (429.3 Hz), ale również sąsiadujące z nią wartości około szczytowe. Wyznaczona wartość szczytowa 429.3 Hz jest wartością wysoce energetyczną emitującą jednocześnie najwyższy hałas spośród wszystkich wyznaczonych częstotliwości w rozpatrywanym zakresie 200 Hz – 550 Hz.

Uwagi redakcyjne

- W tekście można znaleźć wiele błędów wynikłych z braku liter lub pominięcia polskich znaków. Przykłady zaprezentowano poniżej.
- Str. 5 wiersz 8 i 9. Jest „*mechnicznych*” powinno być: mechanicznych
- Str. 5 wiersz 31. Jest „*pracujacych*” powinno być: pracujących
- Str. 52 wiersz 16. Jest „*kimputerowego*” powinno być: komputerowego

Uwagi dyskusyjne

- Str. 75 wiersz 13. Na jakiej podstawie określono, że liczba poszukiwanych częstotliwości to 10.
- Rys.55. - Rys. 64. W jakich jednostkach pokazano mapę przemieszczeń na rysunkach, i jak należy zinterpretować występujące wartości ekstremalne.
- Str. 88 wiersz 23. Czym kierowano się ograniczając zakres częstotliwościowy analizy harmonicznej do wartości: 200 Hz – 550 Hz.
- Str.103 Spektrogram sygnału obrazuje trzy a nie jak napisał Doktorant „...dwie dziedziny...”. Proszę omówić jaką wartość na spektrogramie reprezentuje kolor.
- W rozprawie brakuje bezpośredniego porównania wyników analiz numerycznych i doświadczalnych.

Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawione przez Doktoranta dane literaturowe dotyczą bezpośrednio problematyki przekładni zębatych rozważanej w pracy. Cytowane prace są aktualne i dobrze dobrane, w dużej części są to publikacje z renomowanych czasopism.

Praca wystarczająco przedstawia aktualny stan zagadnienia badawczego zarówno od strony sformułowanych treści jak i formy rozprawy. Struktura rozprawy w moim przekonaniu jest prawidłowa. W rozprawie nie ustrzeżono się błędów edytorskich, język pracy mógłby być bardziej formalny. Procedury badawcze użyte w pracy są w mojej opinii prawidłowe i przyjęte w pracy zgodnie z ich przeznaczeniem. Holistyczny charakter pracy Doktorant uzyskał poprzez uwzględnienie zarówno aspektów mechanicznych, jak i akustycznych, oraz wykorzystując zaawansowane narzędzia numeryczne i eksperymentalne do optymalizacji działania przekładni mechanicznych.

Za najmocniejszą stronę pracy uważam jej użyteczny charakter. Z punktu widzenia aplikacyjnego, najbardziej obiecujące są wyniki sugerujące, że model numeryczny umożliwi badanie wpływu modyfikacji parametrów konstrukcyjnych bądź materiałowych przekładni TDB 230 na jej właściwości dynamiczne oraz akustyczne. Modyfikacje geometryczne kół zębatych, rodzajów łożysk czy też zmiany geometrycznej samej obudowy przekładni mogą zostać w szybki i dogodny sposób zaadoptowane w modelu a ich wpływ na charakterystyki przekładni może być bardzo precyzyjnie określony.

Ważnym aspektem podsumowania jest zwrócenie uwagi na aspekty użyteczne. Doktorant wydobywa praktyczne zastosowania płynące z uzyskanych wyników, ukazując ich potencjalne wykorzystanie w praktyce przemysłowej. To podejście sprawia, że praca nie ogranicza się jedynie do sfer naukowych, ale również wskazuje na konkretne korzyści, jakie mogą być osiągnięte w dziedzinie optymalizacji przekładni zębatych. W konsekwencji, wnioski stanowią nie tylko zwieńczenie badawczego wysiłku, ale również otwierają perspektywę praktycznego stosowania zdobytej wiedzy.

Biorąc pod uwagę powyższe uwagi stwierdzam, że:

Postawiony cel pracy został osiągnięty a założony zakres pracy za zrealizowany i w pełni udokumentowany.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Łukasza MAZURKA zawiera samodzielne opracowanie zagadnienia naukowego. Doktorant wykazał się należyłą wiedzą oraz umiejętnościami prowadzenia badań naukowych i prezentacji wyników. Na podkreślenie zasługuje fakt, że praca została zrealizowana przy dużym nakładzie pracy i środków związanych z wykonaniem badań. Wykonanie badań wymagało od Doktoranta znajomości teorii i praktyki badawczej. Uzyskane wyniki mają unikalną wartość poznawczą i naukową, należy je uznać za wartościowe i w dużym stopniu jako oryginalne osiągnięcia Doktoranta rozprawy.

Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Mazurka pt. **„Optymalizacja ilościowej i jakościowej analizy przekładni zębatych dla wybranych silników elektrycznych„**, stanowi istotny wkład w rozwój wiedzy w zakresie Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.

Doktorant osiągnął założony cel wykazując się znajomością zagadnień z zakresu Inżynierii Lądowej, Geodezji i Transportu, oraz nowoczesnej metodyki i technik badawczych. Zaprezentował oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. **Wnioski wynikające z rozprawy stanowią oryginalny wkład naukowy Doktoranta w rozwój Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.**

W mojej ocenie przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Mazurka w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.) oraz § 24 pkt 1 Statutu Politechniki Śląskiej (Monitor Prawny PŚ z 2020 r. poz. 339, z późn. zm.)

.....
Prof. dr hab. inż. Piotr LACKI
Politechnika Częstochowska
Częstochowa, 29.05.2024