

Dr hab. inż. prof. uczelni Jan Zwolak
Instytut Techniczny
Uczelnia Państwowa im. Jana Grodka
w Sanoku

Kraków, dnia 16 .09.2021 roku

RECENZJA
pracy doktorskiej
mgr. inż. Karola Musiałka
p.t.: Sprzęgło hydrauliczne z magnetoreologiczną cieczą roboczą
i wirującym polem magnetycznym

Podstawa opracowania recenzji

Recenzję opracowano na podstawie Uchwały nr 000-12/5/2021 Senatu Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu z dnia 30 czerwca 2021 roku.

1. Struktura pracy doktorskiej

Recenzowana praca doktorska łącznie zawiera 126 stron. Tekst pracy jest wspomagany i objaśniany za pomocą 184 rysunków, 22 tabel i 56 wzorów matematycznych. W spisie literatury znajduje się 93 pozycje, w tym 32 książek w większości wydawnictw zagranicznych, 47 artykułów specjalistycznych czasopism krajowych i zagranicznych, 5 opracowań materiałów konferencyjnych, 4 broszurek, 4 patenty i jedna strona internetowa. Całość pracy podzielona jest na 5 rozdziałów. Rozdział pierwszy ma charakter przeglądu literaturowego i zawarty jest na 41 stronach, co stanowi 32.5 % całości pracy. W rozdziale drugim i trzecim Doktorant opisał badania cieczy magnetoreologicznych oraz ruch cząstek stałych w tej cieczy, a więc te dwa rozdziały mają charakter metodologiczny. Zajmują 48 stron i stanowią 38.1 % objętości pracy. Rozdział czwarty zawiera badania eksperymentalne sprzęgła hydraulicznego z zamieszczonymi wynikami i liczy 11 stron, dając 8.7 % łącznej objętości pracy. W rozdziale piątym zamieszczono ocenę wyników badań sprzęgła hydraulicznego oraz wnioski końcowe na 16 stronach, co daje 12.7 % pełnej pracy. Pozostałe 10 stron mające 8 % pracy wypełnia spis literatury, streszczenie w języku polskim i angielskim oraz załącznik. Układ pracy jest tradycyjny: teoria – metoda – doświadczenie – dyskusja wyników i wnioski. Praca jako całość ma charakter teoretyczno-doświadczalny, a proporcja między tymi częściami jest zachowana. Struktura wewnętrzna pracy jest prawidłowa i logicznie ułożona.

2. Problematyka badawcza i zakres pracy

Przedstawiona do opinii praca dotyczy wieloaspektowego zastosowania sprzęgła hydraulicznego z cieczą magnetoreologiczną. Częściowo praca powiązana jest z projektem międzynarodowym o tytule „Innowacyjne zastosowanie cieczy inteligentnych w chwytaku

robota przemysłowego”. Realizację projektu prowadzono w Uniwersytecie Technologiczno-Humanistycznym w Radomiu we współpracy z Tajwanem, a wśród wykonawców tego projektu był także Doktorant. Szkoda, że Doktorant nie rozbudował szerzej opisu zakończonego projektu, przez podanie elementów o charakterze poznawczym, które mogły stać się inspiracją do dalszych badań.

Tematyka opiniowanej pracy wpisuje się w obszar badań dotyczących zastosowań cieczy magnetoreologicznych i elektroteologicznych w urządzeniach technicznych, jak na przykład tłumiki, amortyzatory, sprzęgła, hamulce. Chociaż wybrane do badań cieczy i większość zastosowanych technik badawczych są opisane w literaturze, to Doktorant potraktował kompleksowo badania samych cieczy w powiązaniu ich z zaletami i wadami występującymi w zastosowaniu do sprzęgieł z wirującym polem magnetycznym.

Zakres badawczy pracy doktorskiej obejmuje badania właściwości reologiczne cieczy magnetoreologicznych wytworzonych w niemieckim Instytucie Fraunhofera w Wurzburgu oraz cieczy przygotowanych we własnym zakresie. Doktorant badał również przemieszczanie się cząstek stałych w cieczy magnetoreologicznej podczas pracy sprzęgła z wirującym polem magnetycznym i stwierdził, że zachodzi niekorzystne ich oddzielanie się od cieczy z równoczesnym powstawaniem kolonii połączonych ze sobą cząstek stałych. Koroną pracy nadającą jej oryginalność mogą być badania doświadczalne sprzęgła hydraulicznego z cieczą magnetoreologiczną, a szczególne walory poznawcze obejmuje analiza i interpretacja wyników badań.

3. Ocena merytoryczna pracy doktorskiej

3.1. Ocena przeglądu literatury

Przegląd literatury jest dobrze dobrany pod względem merytorycznym, który został zapisany na 41 stronach. Treści poszczególnych pozycji literatury koncentrują się wokół problematyki cieczy magnetoreologicznych stosowanych w wielu urządzeniach technicznych. Daje się jednak zauważyć, że w przeglądzie literatury nie ma przynajmniej jednej pracy doktorskiej o tematyce zbliżonej do tej opiniowanej. Kolejność pozycji literaturowych zamieszczonych w spisie literatury odpowiada porządkowi ich cytowania w tekście, co ułatwia ewentualne sprawdzenie, czy do wszystkich pozycji jest odniesienie. I tu pojawia się brak odniesienia do pozycji występującej w spisie literatury pod numerem [67].

W przeglądzie literatury, zarówno w opisie pola magnetycznego, jak i właściwości cieczy magnetoreologicznych występuje wiele jednostek fizycznych, których symbole nie są zgodne z zamieszczonym na stronie 4 wykazem najważniejszych oznaczeń. Dla przykładu, na stronie 14 i 21 pojawia się indukcja magnetyczna, której jednostką jest Tesla oznaczana dużą literą T, a w wykazie na stronie 4 litera T oznacza czas. W innym miejscu na stronie 27 literą T oznaczono temperaturę bezwzględną. Jeszcze w innym na stronie 29 litera T oznacza moment obrotowy, a w wykazie oznaczeń na stronie 4 moment obrotowy występuje pod literą M.

Przywołam zdanie ze strony 32, które brzmi: „Moment obrotowy działający na elementarną objętość, gdy występuje wirujące jednorodne pole magnetyczne wynosi:” i tu jest wzór (1.21) na stronie 33. Jednak wzór ten nie wyraża momentu obrotowego, a wyraża wektor magnetyzacji.

Dość bogaty przegląd literatury w zakresie badań cieczy magnetoreologicznych, także przy wirującym polu magnetycznym wskazuje, że problematyka sprzęgieł hydraulicznych z cieczą magnetoreologiczną jest aktualna i ma w sobie odpowiednio duży potencjał badawczy.

3.2. Ocena metodyki badawczej

Metodyka badań, jaką zastosował Doktorant w swojej pracy jest w całości spójna, poczynając od badań samych cieczy magnetoreologicznych do badań funkcjonalnych w sprzęgle hydraulicznym. Wykonał sześć rodzajów cieczy magnetoreologicznych ze zróżnicowanym udziałem masy cząstek Fe. Przygotował odpowiednie stanowiska do badań i następnie dobrał właściwe techniki badawcze. Zauważa się tu dobre połączenie pracy doświadczalnej i metodycznej przy wykonywaniu poszczególnych etapów rozprawy, gdzie badano: właściwości reologiczne cieczy magnetoreologicznej i jej zachowanie się w obecności wirującego pola magnetycznego.

3.3. Ocena wyników badań i ich dyskusji

Badania nad sprzęgłami hydraulicznymi z wirującym polem magnetycznym Doktorant słusznie rozpoczął od badania cieczy magnetoreologicznych, jako czynnika roboczego. W rozdziale drugim Doktorant zaprezentował wykresy przedstawiające zależność momentu obrotowego od indukcji magnetycznej dla wszystkich przygotowanych typów cieczy i dla sześciu stopni prędkości obrotowych. Znając zależności jakie występują między momentem obrotowym, a prędkością obrotową Doktorant wyznaczył krzywe płynięcia, które potwierdzają, że badane cieczy magnetoreologiczne są cieczami nieniutonowskimi. Wielkości geometryczne występujące we wzorach (2.3), (2.4), (2.6) i (2.7) na stronie 69 powinny być pokazane na odpowiednio wykonanym rysunku, a nie tylko opisane słownie.

Dzięki przeprowadzonym badaniom cieczy magnetoreologicznych w rozdziale drugim, Doktorant w dyskusji wyników przedstawia wpływ zawartości cząstek żelaza w cieczy w powiązaniu z indukcją magnetyczną i prędkością obrotową, na wartość momentu obrotowego. Wyjaśnia też rozbieżności wyników jakie otrzymał w badaniach wielu cieczy (w pracy oznaczone jako A, B i B^{*}). Rozdział ten zawiera bardzo dużo materiału ilustracyjnego w postaci wykresów i tabel, co utrudnia konsekwentne i spójne prezentowanie kompletnych wyników badań.

W rozdziale trzecim Doktorant badał zachowanie się cieczy magnetoreologicznej będącej w naczyniu z przyłożonym polem magnetycznym i wykonującym ruch obrotowy. Tak przeprowadzone badania odzwierciedlają pracę sprzęgła z wirującym polem magnetycznym, w którym cząstki stałe mogą oddzielać się od cieczy i łączyć się ze sobą, tworząc samodzielne bryły, które są przeszkodą w pracy rzeczywistego sprzęgła. Wykonane badania rozkładu gęstości cieczy pod wpływem siły odśrodkowej i sił magnetycznych mogą służyć do oceny jej stopnia skłonności do niepożądanego rozwarstwienia. Doktorant w badaniach wykazał, że podczas ruchu obrotowego w obecności pola magnetycznego cząstki stałe cieczy magnetoreologicznej przemieszczają się zgodnie z kierunkiem siły odśrodkowej, co powoduje miejscowe zmiany gęstości cieczy. Ruch obrotowy bez obecności pola magnetycznego sprawia, że ciecz magnetoreologiczna ma większą gęstość przy ściankach naczynia, gdzie

promień obrotu jest największy. Dowiódł też, że w zasięgu pola magnetycznego ciecz uzyskuje największą gęstość w tym miejscu, gdzie jest największa indukcja magnetyczna.

W rozdziale czwartym zatytułowanym „Badania eksperymentalne sprzęgła hydraulicznego z cieczą magnetoreologiczną” należałoby oczekiwać przedstawienia modelu konstrukcyjnego sprzęgła oraz opisu jego budowy i zasady działania. Tego tu brakuje. Natomiast pokazano na rysunku 4.1 jedno stanowisko do badań sprzęgła z wirującym polem magnetycznym zlokalizowanym w płaszczyźnie prostopadłej do osi sprzęgła oraz drugie na rysunku 4.2 z wirującym polem magnetycznym zlokalizowanym na obwodzie sprzęgła. Przedstawione na rysunkach 4.6 – 4.14 wykresy momentu obrotowego w zależności od prędkości obrotowej naczynia przy stałej prędkości obrotowej pola magnetycznego odnoszą się do wybranych cieczy magnetoreologicznych stosowanych w rzeczywistych sprzęgłach hydraulicznych. Wybrane ciecze różniły się zawartością cząstek stałych, które znacząco wpływają na wzrost wartości momentu obrotowego. Doktorant także analizuje i przedstawia graficznie na rysunkach 4.15 – 4.18 zależności wpływu prędkości obrotowej pola magnetycznego i samej cieczy na wartość momentu obrotowego.

Cenną informacją dającą wskazówki do eksploatacji sprzęgieł hydraulicznych jest wykres zależności momentu obrotowego od prędkości obrotowej pola magnetycznego dla cieczy o różnych masach, co zostało przedstawione na rysunku 4.19. Na wykresie tym daje się zauważyć, że dla każdej masy cieczy, począwszy od prędkości obrotowej pola magnetycznego $n_p = 600 \text{ min}^{-1}$, zachodzi wzrost momentu obrotowego, który trwa do prędkości $n_p = 2400 \text{ min}^{-1}$, przy której osiąga swoje maksimum. Tak samo dla każdej masy cieczy przy wzroście prędkości pola magnetycznego od $n_p = 2400 \text{ min}^{-1}$ do $n_p = 3000 \text{ min}^{-1}$ następuje spadek momentu obrotowego, ale tego zakresu Doktorant nie zinterpretował.

Rozdział piąty rozprawy w dużej części zawiera wiedzę literaturową oraz znacznie mniej pracy własnej, na którą składają się obliczenia pracy sprzęgła z wirującym polem magnetycznym, schemat budowy sprzęgła i jego charakterystyka. Moim zdaniem część literaturową można było włączyć do rozdziału pierwszego, a część z pracą własną do rozdziału czwartego. Wówczas można byłoby zamieścić podsumowanie zamiast rozdziału piątego.

W końcowej części pracy Doktorant zamieszcza wnioski ogólne, które wynikają z przeprowadzonych badań i wyeksponowanych bądź też domyślnych w poszczególnych rozdziałach. Ostatni wniosek nr 7 jest zapowiedzią, że zrealizowane zadania badawcze przez Doktoranta i przedstawione w rozprawie doktorskiej otwierają kolejny etap prac zmierzających do projektu konstrukcyjnego sprzęgła, budowy i badania prototypu oraz doboru cieczy magnetoreologicznej.

4. Uwagi do dyskusji i uwagi szczegółowe

Pracę doktorską mgr. inż. Karola Musiałka ogólnie oceniam pozytywnie. Jednak podczas jej czytania nasuwają się pewne pytania, które można określić jako uwagi do dyskusji i uwagi szczegółowe.

Uwagi do dyskusji:

Sprzęgło z cieczą magnetoreologiczną i z wirującym polem magnetycznym ma cechy sprzęgła podatnego i jest sterowalne. O tym w dużej mierze decydują właściwości cieczy. A

zatem istotne byłoby badanie, jak zmieniają się właściwości cieczy w funkcji cykli obciążeń (obrotów) rzędu 10×10^6 w warunkach eksploatacyjnych sprzęgła. W rozprawie doktorskiej nie podjęto tego problemu.

Uwagi szczegółowe:

- W wykazie ważniejszych skrótów i oznaczeń na stronie 4 jest moment bezwładności, a powinno być masowy moment bezwładności,
- W tym samym wykazie dużą literą T oznaczono czas, a w wielu miejscach tekstu i we wzorach litera T wyraża moment obrotowy i temperaturę, także literą T oznacza się jednostkę indukcji magnetycznej (Tesla), podobnych niekonsekwencji w tekście pracy jest więcej.
- Na stronie 27 we wzorach i w tekście dużą literą T oznaczono temperaturę, a w tabeli 1.3 małą literą t.
- Na stronie 32 w dwóch ostatnich wierszach jest informacja, że moment obrotowy oblicza się według wzoru (1.21), a wzór ten wyraża wektor magnetyzacji.
- Na stronie 52 tytuł podrozdziału zapisano jako 3.3, a powinno być 2.3.
- Na stronie 79 we wzorze (3.16) występuje duża litera S, a w opisie jest małe s.
- Na stronie 80 w podpisie rysunku 3.8 pozycja literatury jest na końcu tego podpisu, a powinna być wcześniej, tak jak to jest w przypadku rysunku 3.6.
- Na stronie 91 w podpisie rysunku 4.2 jest: Stanowisko do badania przekładnia....., a powinno być: Stanowisko do badania sprzęgła.....
- W całości pracy jest wiele błędów literowych systematycznie powtarzanych, na przykład przestawki zamiast przystawki.

Przytoczone uwagi mają głównie charakter dyskusyjny oraz porządkowy, przez co nie pomniejszają mojej pozytywnej oceny pracy doktorskiej jako całości.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Opiniowana praca doktorska ma charakter teoretyczno-doświadczalny z dużym potencjałem do zastosowania praktycznego. Doktorant w swoich badaniach ukierunkował się na poszukiwanie rozwiązań problemów praktycznych, mających duże znaczenie poznawcze. W stosowanych metodach badawczych opierał się o bogate doniesienia literaturowe, jak też o własne przemyślenia. Problem sprzęgieł hydraulicznych z cieczą magnetoreologiczną i z wirującym polem magnetycznym, jaki podjął Doktorant jest zagadnieniem złożonym pod względem badawczym i bardzo ważnym ze względów praktycznych. Przedstawione w pracy wyniki badań mogą posłużyć konstruktorom zespołów napędowych ze sprzęgłami hydraulicznymi z cieczą magnetoreologiczną. Zastosowane metody badawcze i techniki pomiarowe w badaniach cieczy magnetoreologicznych, praktyczna budowa stanowisk badawczych i prowadzenie badań zespołu sprzęgłowego świadczy o dużych umiejętnościach i doświadczeniu Doktoranta w zakresie budowy maszyn w połączeniu z elementami mechatroniki. Uzyskane i przedstawione w pracy wyniki badań potwierdzają, że Doktorant mgr inż. Karol Musiałek posiada szeroką wiedzę w zakresie teorii i badań eksperymentalnych cieczy magnetoreologicznych i ich zastosowań w urządzeniach technicznych oraz

umiejętności w konfigurowaniu warsztatu badawczego, prowadzeniu eksperymentu i formułowaniu właściwych wniosków.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że praca doktorska mgr. inż. Karola Musiałka pod tytułem „Sprzęgło hydrauliczne z magnetoreologiczną cieczą roboczą i wirującym polem magnetycznym” spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w zakresie Sztuki” (Dz.U. Nr 65, poz. 595 z dnia 16 kwietnia 2003 z późniejszymi zmianami) i stanowi podstawę dopuszczenia do publicznej obrony.

Uważam, że część wyników badań, a zwłaszcza zawartych w rozdziale czwartym i piątym w opiniowanej rozprawie doktorskiej, skonfigurowanych według wymagań odpowiednio wybranego czasopisma z listy A i może być przesłana do publikacji.

Wolny