

Prof. dr hab. inż. Bogdan Posiadała
Instytut Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
Politechnika Częstochowska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. **Andrzeja Andrzejuka**

pt. „**Modelowanie i badania doświadczalne
stożkowego połączenia ciernego tuleja – czop obciążanego wzdłużnie**”

wykonana dla Rady Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych
Politechniki Warszawskiej

(umowa o dzieło nr 1150/00089/2015 z dnia 11.08.2015 r.)

1. Charakterystyka pracy

Opiniowana rozprawa doktorska zawiera 160 stron i składa się z sześciu rozdziałów, które obejmują: wstęp, trzy rozdziały, gdzie opisano zasadnicze rozważania poświęcone realizacji celu pracy oraz podsumowanie i wnioski i bibliografię, która obejmuje 121 pozycji. Ponadto zamieszczono w niej wykaz ważniejszych oznaczeń oraz jednostronicowe streszczenia w językach polskim i angielskim.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym „Wstęp” Autor dokonał wprowadzenia do tematyki rozprawy, opisał zawartość poszczególnych rozdziałów oraz podał genezę powstania pracy, jej cel i zakres oraz tezę. Dokonano także przeglądu literatury obejmującej zagadnienia rozpraszania energii, w tym poprzez tarcie konstrukcyjne. Brak jest tutaj bezpośredniego wyodrębnienia zagadnień, które na podstawie literatury, stały się motywacją podjęcia badań opisanych w recenzowanej rozprawie doktorskiej.

Rozdział drugi obejmuje zagadnienia związane z analizą stożkowego połączenia ciernego tulei i czopa pod obciążeniem siłą osiową. Opierając się na równaniach równowagi, z uwzględnieniem kolejno wprowadzanych do opisu modelu zmian prowadzących do lepszego opisu zjawisk występujących w analizowanym układzie wyprowadzono zależności które pozwalają wyznaczyć: wartości nacisków na powierzchniach styku, wartości odkształceń i przemieszczeń połączenia ciernego w poszczególnych etapach obciążania, a ponadto podano zależność opisującą statyczną pętlę histerezy, która jest miarą rozpraszania energii. Zaproponowano pięć wariantów modelu i w odniesieniu do każdego z nich przedstawiono w pracy także wyniki symulacji komputerowych uzyskane na podstawie wyprowadzonych zależności oraz opracowanych program obliczeniowych.

W rozdziale trzecim opisano metodykę badań eksperymentalnych, w tym układy rzeczywiste zaprojektowane i wykonane na potrzeby tych badań oraz przedstawiono ich wyniki. Dokonano także porównania wyników badań symulacyjnych, opartych na zaproponowanych w pracy modelach obliczeniowych, z wynikami otrzymanymi eksperymentalnie.

Czwarty rozdział pracy dotyczy analizy drgań wymuszonych rozważanego w pracy układu tuleja – czop, przy czym zastąpiono taki układ modelem o jednym stopniu swobody z wymuszeniem harmonicznym. Do rozwiązania zagadnienia drgań zastosowano metodę analizy Van der Pola. Zbadano wpływ geometrycznych parametrów układu, obciążenia

zewnątrznego i nacisku, na krzywe rezonansowe drgań. Zaprezentowano wyniki symulacji komputerowych w odniesieniu do układu o wybranych jego parametrach.

W rozdziale piątym dokonano podsumowania, sformułowano wnioski końcowe oraz zaproponowano rodzaj dalszych badań w kontekście rozważanej tematyki pracy.

2. Ocena pracy

W kontekście opisu przedstawionego w punkcie pierwszym niniejszej recenzji można stwierdzić, że tematyka rozprawy doktorskiej obejmuje zagadnienia modelowania i analizy zjawisk występujących w czasie obciążenia wzdłużnego układu tuleja – czop w stożkowym połączeniu ciernym. Rozważano obciążenie statyczne oraz drgania wymuszone układu.

Wybór tak określonej tematyki badawczej, jako przedmiot rozprawy doktorskiej, w kontekście także cytowanej przez Autora literatury, uważam za w pełni uzasadniony i ponadto stwierdzam, że Autor swoją rozprawą zrealizował w pełni sformułowane w pracy cele oraz postawioną tezę.

W wyniku realizacji pracy zaproponowano opis matematyczny rozważanego układu w pięciu kolejnych wariantach, przy czym kolejny wariant stanowi modyfikację poprzedniego uzyskaną poprzez uzupełnienie opisu matematycznego o zależności reprezentujące w coraz większym stopniu zjawiska występujące w układzie rzeczywistym. Wychodząc zatem z modelu najbardziej uproszczonego – wariant I, w którym uwzględniono jedynie przemieszczenie czopa, przy założeniu jednoosiowego stanu naprężenia, oraz siłę tarcia suchego, sformułowano kolejne modele, gdzie uwzględniono w opisie:

- odkształcalność czopa przy założeniu dużej sztywności tulei – wariant II,
- odkształcalność tulei i czopa - wariant III,
- odkształcalność tulei i czopa oraz zagadnienie Lamé'go - wariant IV oraz
- odkształcalność tulei i czopa, zagadnienie Lamé'go oraz sprężystość połączenia - wariant V.

W odniesieniu do każdego z tych wariantów opisano w pracy zaproponowane modele matematyczne oraz przedstawiono wyniki badań symulacyjnych uzyskane na bazie zaproponowanych modeli przy użyciu autorskich programów opracowanych z wykorzystaniem programu Mathematica.

W ramach pracy zrealizowano także badania eksperymentalne dwóch układów mechanicznych: tulei z czopem w stożkowym połączeniu ciernym oraz porównawczego układu pary ciernej sprężyny pierścieniowej. Celem badań eksperymentalnych było przede wszystkim zarejestrowanie rzeczywistych pętli histerezy konstrukcyjnej, jako siły osiowej w funkcji przemieszczenia. Wyniki badań eksperymentalnych pozwoliły na weryfikację przyjętych modeli matematycznych. W wyniku porównania wyników badań symulacyjnych z wynikami eksperymentalnymi wytypowano model matematyczny, który uznano za najbardziej przydatny do zastosowań inżynierskich. Za taki model uznano model oznaczony jako „wariant IV”. Model ten daje możliwość uzyskania wyników wystarczająco zgodnych z wynikami eksperymentalnymi i jednocześnie odznacza się mniejszym skomplikowaniem opisu matematycznego w porównaniu z modelem oznaczonym jako „wariant V”. Pozostałe prezentowane modele, nazwane jako „warianty I, II i III”, są mniej złożone w opisie

matematycznym, ale wyniki uzyskane na ich podstawie znacznie odbiegają od wyników uzyskanych eksperymentalnie.

Badania eksperymentalne przeprowadzono w Pracowni Wytrzymałości Zmęczeniowej i Mechaniki Pękania Laboratorium Zakładu Mechaniki w Instytucie Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Warszawskiej.

Analizując zawartość ocenianej rozprawy doktorskiej można stwierdzić, że postawione i zrealizowane w rozprawie zadania mają znaczenie zarówno poznawcze, jak i praktyczne. Do opracowania modeli obliczeniowych zaproponowano autorskie metody odwzorowania określonych cech elementów obiektów rzeczywistych tj. tulei z czopem w stożkowym połączeniu ciernym, w tym poprzez uwzględnienie w kolejnych przyjętych modelach odkształcalności współpracujących elementów oraz sprężystości materiałów połączenia.

W odniesieniu do prezentowanych w pracy wyników badań stwierdzam, że wystarczająco ilustrują one badane zjawiska i stanowią podstawę oceny działania opracowanych programów i modeli obliczeniowych, a wnioski wynikające z analizy zaprezentowanych wyników są istotne w kontekście rozważanych zjawisk i w większości mogą mieć praktyczne zastosowanie.

Do najważniejszych osiągnięć zrealizowanej rozprawy doktorskiej należy zaliczyć:

- Opracowanie modeli teoretycznych i obliczeniowych stożkowego połączenia ciernego tulei z czopem pod obciążeniem siłą osiową; w pięciu wariantach o zwiększającym się stopniu złożoności, przy jednoczesnym lepszym odwzorowaniu zjawisk występujących w układzie rzeczywistym, co potwierdziły zrealizowane także w ramach pracy badania eksperymentalne.
- Opracowanie autorskich programów obliczeniowych w odniesieniu do każdego z rozważanych wariantów modeli matematycznych oraz zrealizowanie na bazie tych programów badań symulacyjnych, których wyniki dotyczą w szczególności wyznaczenia pętli histerezy konstrukcyjnej.
- Opracowanie metodyki badań oraz zrealizowanie badań eksperymentalnych dwóch układów mechanicznych: tulei z czopem w stożkowym połączeniu ciernym oraz porównawczego układu pary cierniej sprężyny pierścieniowej, co stanowiło podstawę do oceny adekwatności zaproponowanych w pracy modeli teoretycznych do opisu analizowanych układów.
- Wskazanie modelu matematycznego, który uznano za najbardziej przydatny do zastosowań inżynierskich. Wyboru modelu dokonano na podstawie kryterium kompromisu między dokładnością przewidywania odpowiedzi układu ciernego tuleja-czop, a stopniem skomplikowania użytego do uzyskania tej odpowiedzi modelu obliczeniowego.
- Dokonanie analizy drgań wymuszonych rozważanego w pracy układu tuleja – czop, w tym zbadanie wpływu geometrycznych parametrów układu, obciążenia zewnętrznego i nacisku, na krzywe rezonansowe drgań.
- Opracowanie wniosków i wytycznych konstrukcyjnych wynikających z wykonanych analiz na bazie opracowanych modeli obliczeniowych, a także wskazanie kierunków dalszych badań w kontekście rozważanej tematyki pracy .

Oceniając formę pracy chciałbym stwierdzić, że praca jest napisana starannie i przejrzysto. Zawiera wiele ilustracji graficznych, w tym wykresów, które ułatwiają

właściwą interpretację przedstawianych wyników. Można zauważyć także pewne usterki, z których najbardziej istotne wymieniłem w dalszej części niniejszej recenzji, jako uwagi szczegółowe.

Podsumowując oceniam rozprawę jednoznacznie pozytywnie, mimo uwag, które zawarte są w kolejnym rozdziale niniejszej recenzji.

3. Uwagi szczegółowe, w tym krytyczne

Do najbardziej istotnych zastrzeżeń, przede wszystkim w odniesieniu do formy pracy, na które chciałbym zwrócić uwagę Autora zaliczam te, które są związane z wystąpieniem w pracy:

- nieprecyzyjnych lub dwuznacznych określeń czy tzw. skrótów myślowych, z których jako przykładowe można wymienić:
 - str. 12 – w zdaniu „W rozdziale trzecim opisano metody i cel badań, a także modele rzeczywiste ...” lepiej byłoby użyć wyrazu „układy” lub „obiekty” zamiast „modele”, pozostawiając rozróżnienie opisywanych w pracy modeli matematycznych i fizycznych od obiektów rzeczywistych,
 - str. 14 – zdanie definiujące cel pracy tj.: „Celem niniejszej pracy, jest opracowanie, matematycznego modelu ciernego połączenia możliwie dokładnie odwzorowującego rozpraszanie energii jako miary zdolności tłumienia drgań na skutek zjawisk tarcia konstrukcyjnego, jakie występuje w układzie mechanicznym stanowiącym cierne połączenie stożkowe tulei z czopem.” jest niefortunnie sformułowane i można je przereklamować tak, aby ten cel był bardziej precyzyjnie określony np. poprzez opis celu za pomocą dwóch, a nie jednego zdania.
 - str. 15 – w zdaniu definiującym tezę pracy tj.: „Możliwe jest wyznaczenie energii rozpraszania rzeczywistego modelu ciernego połączenia stożkowego tuleja-czop przy pomocy modelu matematycznego uwzględniającego siły tarcia, odkształcenia współpracujących elementów, zagadnienie Lamé'go oraz sprężystość badanego obiektu” należałoby usunąć słowo „modelu” (podkreślone),
 - str. 20 – zdanie „W pracy do rozważań analitycznych przyjęto parę cierną, złożoną ze współdziałających powierzchni stożkowych tulei i czopa” można zmienić na „W pracy do rozważań analitycznych przyjęto parę cierną, złożoną ze stożkowych tulei i czopa współdziałających na powierzchniach ich styku”,
 - str. 29 – w zdaniu „Z rys. 2.3.9 wynika, że rozpraszanie energii jest optymalne w zakresie współczynnika tarcia $\mu = 0,14 - 0,16$ ”, co nie jest precyzyjnym określeniem, ponieważ wartości są w tym przedziale największe, a nie podano dlaczego uznaje się je za optymalne, podobnie w zdaniu na str. 46, przy czym przy podobnych wnioskach na str. 63 i 86 nie użyto wyrazu „optymalne” wartości, ale właśnie maksymalne, co jest adekwatne do treści wniosków,
 - str. 30 – w zdaniu „Zjawisko tarcia konstrukcyjnego jest procesem złożonym, głównie ze względu na:” powinno być raczej „Opis zjawiska tarcia konstrukcyjnego ...”, w kontekście wymienionych dalej przyczyn złożoności takiego opisu,
 - str. 63 – zdanie „Przewiduje się, iż takie podejście przybliży wyniki symulacji komputerowych do rzeczywistych wyników badań eksperymentalnych” było zapewne motywacją podjęcia dalszych kroków na drodze modyfikacji modelu teoretycznego,

ale w opisie zrealizowanych badań zdanie to powinno być napisane w trybie dokonanym,

- a ponadto tekst zawiera także błędy tzw. literówki lub inne (błędnie napisane wyrazy podkreśliłem) np.:
 - str. 10 – w zdaniu: „Szczególne miejsce w śród nich ...” zamiast „Szczególne miejsce wśród nich ...”,
 - str. 14 – w zdaniu „Do realizację tak sformułowanego celu ...”, zamiast „Do realizacji tak sformułowanego celu ...”,

Usterki wymienionego typu obniżają w pewnym stopniu ocenę formy pracy, ale mimo tego typu uchybień pracę należy uznać za wykonaną z dużą starannością, w szczególności także ze względu, na jakość prezentowanych schematów, opisów modeli obliczeniowych i uzyskanych wyników, także w postaci tabel i wykresów.

W celu lepszego wyjaśnienia i uzupełnienia treści merytorycznej przedstawionej w ocenianej rozprawie chciałbym postawić Autorowi następujące pytania:

- Na str. 58 napisano: „Z analizy danych wynika, że występuje duża rozbieżność pomiędzy obliczonymi przemieszczeniami i powierzchniami pół pętli histerezy przy obliczeniowym stałym i zmiennym promieniu r_0 stożka.” Jakim zdaniem Autora mogą być przyczyny rozbieżności w tym modelu, kiedy w innych przypadkach stwierdzono dużą zbieżność wyników? np. wniosek na str. 108.
- W rozdziale „Podsumowanie i wnioski” napisano zdanie: „Aby zrealizować główny cel pracy opracowano modele teoretyczne połączenia ciernego oraz zbudowano układy rzeczywiste połączeń o wysokości tulei 43 mm, 32 mm oraz 11,5 mm. Jakim były przyczyny wyboru takich, a nie innych wymiarów obiektów?”
- Podobnie jak w pytaniu drugim, proszę o komentarz w odniesieniu do przyczyn wyboru rozważanych wartości maksymalnych obciążenia, przyjmowanych wartości współczynnika tarcia oraz kątów rozwarcia powierzchni stożków w analizowanych połączeniach tulei z czopem.

4. Wniosek końcowy

Rozważania przedstawione w ocenianej pracy świadczą o szerokiej wiedzy jej Autora w zakresie budowy maszyn, mechaniki oraz wiedzy koniecznej do odpowiedniego przeprowadzenia badań symulacyjnych, z wykorzystaniem własnych i komercyjnych programów komputerowych (Mathematica) oraz badań eksperymentalnych z wykorzystaniem aparatury pomiarowej oraz odpowiednio przygotowanych stanowisk badawczych.

Uważam, że opiniowana rozprawa doktorska pt. **„Modelowanie i badania doświadczalne stożkowego połączenia ciernego tuleja – czop obciążanego wzdłużnie”**, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia w pełni warunki stawiane rozprawom doktorskim. Stanowi zatem podstawę do dopuszczenia jej Autora do publicznej obrony tej rozprawy, a po pozytywnym zakończeniu obrony do nadania **mgr. inż. Andrzejowi Andrzejukowi** stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej budowa i eksploatacja maszyn.

Częstochowa, 21 września 2015 r.

