

prof. dr hab. inż Czesław Bajer

Warszawa, 15 grudnia 2015

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

ul. Pawińskiego 5B

02-106 Warszawa

**Opinia o rozprawie doktorskiej mgr. inż Adama Jungowskiego
pt. "Tłumik drgań o niezależnym od temperatury poziomie dyssypacji"**

1. Charakterystyka pracy

Rozprawa liczy łącznie 122 strony tekstu. Zasadniczy tekst ujęty na 64 stronach, poprzedzony jest streszczeniami i spisem treści. W tej części literatura obejmuje 60 pozycji, informacje firm lotniczych, polskie i europejskie normy oraz trzy załączniki, w których zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych i symulacji komputerowych. Praca podzielona jest na 8 rozdziałów. Praca została wykonana na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej.

Rozprawa dotyczy tłumików drgań o niezależnym od temperatury poziomie dyssypacji. Przyjęto następujące założenia: tłumik powinien być pasywny, działający symetrycznie w kierunku ściskania i rozciągania oraz winien być przewidziany do krótkotrwałej pracy, przy której nie następuje rozgrzewanie się materiału. To ostatnie założenie dziwi, gdyż zgodnie z tytułem rozprawy, działanie tłumika winno być od temperatury niezależne. Ta kwestia już na początku zdecydowanie wymaga wyjaśnienia.

Praca ma charakter eksperymentalny. Jest uzupełniona symulacjami numerycznymi z wykorzystaniem komercyjnego pakietu obliczeniowego. Z pewnością opracowanie nowej konstrukcji tłumika o zadanych charakterystykach jest zadaniem ważnym z inżynierskiego punktu widzenia. Nowoczesne konstrukcje wymagają wyposażenia w elementy optymalnie tłumiące drgania w określonych warunkach pracy, przeznaczone do określonych zadań inżynierskich.

W rozdziale 1 podano, że praca obejmuje badania doświadczalne tłumika elastomerowo-ciernego na stanowisku badawczym, badania doświadczalne materiałów elastomerowych, badanie wrażliwości materiałów elastomerowo-ciernych na zmianę temperatury oraz opracowanie metodyki projektowania tłumików elastomerowo-ciernych wraz z zaproponowanym własnym projektem takiego urządzenia.

Rozdział 2. poświęcony jest badaniom właściwości mechanicznych materiałów używanych w budowie tłumików. Wykresy, począwszy od wykresu 2.5 są jednak niezrozumiałe. Nie wiadomo, co przedstawiają krzywe na wykresie 2.5. Wykres ten żaden sposób w tekście nie jest opisany. Krzywe oznaczone różnymi kolorami opisują próby o symbolicznych nazwach, nic nie mówiących czytelnikowi. Badano pod względem mechanicznym materiał poliuretanowy Epunit. Próby przeprowadzano w temperaturze +25 st. C i -30 st. C. Zaproponowano opis matematyczny modelu.

Rozdział 3, liczący 4 strony, to analiza wrażliwości temperaturowej tłumika elastomerowo-ciernego. Symulacja z zastosowaniem metody elementów skończonych wypełnia rozdział 4. Uproszczony model do wstępnej analizy poziomu rozpraszania energii opisany w rozdziale 5 to niewiele ponad jedna strona tekstu i dwie strony wykresów. W rozdziale 6 dokonano oceny możliwości występowania tarcia konstrukcyjnego w tłumiku. Rozdział 7 prezentuje algorytm iteracyjny projektowania tłumika o pożądanym właściwościach. Podsumowanie i wnioski w rozdziale 8 zajmują półtora strony rozprawy.

2. Uwagi krytyczne

1. Spis literatury obejmuje zdecydowanie niewystarczający zakres materiału. Zawiera głównie prace środowiska naukowego, z którego wywodzi się doktorant, publikacje współpracujących z macierzystą jednostką naukową instytucji oraz szereg podręczników i skryptów akademickich. Wiele pozycji nie wiąże się merytorycznie z tematem rozprawy, jak np. pozycja [56]. Liczne pozycje wprawdzie wiążą się tematycznie w pewien odległy sposób z tematyką badań, ale w żaden sposób nie zostały i nie mogły zostać przez autora wykorzystane merytorycznie. Są to np. pozycje od [33] do [39], dotyczące teorii metody elementów skończonych oraz podstaw matematycznych. Również pozycje dotyczące adaptacyjnych wersji metody elementów skończonych, tj. [41-43] nie mają uzasadnienia ujęcia w spisie literatury. Brak jest natomiast przeglądu literatury światowej, w której badacze omawiają bardzo szeroko zarówno metody badawcze, jak i własności materiałów zarówno polimerowych, jak i materiałów o zmiennych bądź sterowanych własnościach. Zakres omówionej w rozprawie doktorskiej literatury powinien obejmować literaturę światową i pokazywać zarówno dokonania jak i trendy badawcze. Ten zakres wiedzy nie może być obcy

doktorantowi. Z aktualnymi dokonaniemami światowymi Doktorant musi się zmierzyć, dowodząc postawionej w rozprawie tezy. Po lekturze pracy można by nabrać przekonania, że jedynie nieliczni badacze zajmowali się dotąd określaniem własności materiałów polimerowych oraz projektowaniem materiałów o określonych własnościach. Czy rzeczywiście żadne inne materiały nie wykazują własności kwalifikujących się do oceny pod kątem wykorzystania w tłumikach?

Podkreślono znaczenie zjawiska powstawania samowzbudnych ustalonych drgań typu shimmy, lecz nie wspomniano o podstawowej pracy: *Hans Pacejka "Tyre and vehicle dynamics" 2006, (ISBN 978-0-7680-1702-1)*.

2. W rozdziale pierwszym podano cel pracy. Celem naukowym rozprawy było zaprojektowanie tłumika o stałym poziomie rozpraszania energii. Z komentarza wynika, że własności mają być niezależne od temperatury. Brakuje jednak jasno postawionej tezy pracy, którą doktorant powinien udowodnić w rozprawie. Rozprawa doktorska nie jest projektem konstrukcyjnym, nawet czasem unikatowego urządzenia, lecz musi dowodzić pewnej naukowej tezy. Tej tezy w pracy dopatrzeć się nie można. Na stronie 14 omawiany jest sposób wykonywania pomiarów parametrów wytrzymałościowych w niskich temperaturach. Badania w niskiej temperaturze przeprowadzono zgodnie z opisem przebiegu eksperymentu (str. 14), tj. schładzano całość do temperatury -70 st. C w komorze MTS 651, wykorzystując ciekły azot, a następnie już na stanowisku pomiarowym czekano na podniesienie się temperatury do -30 st. C i wówczas przeprowadzano pomiary. W jaki sposób ustalano temperaturę materiału tłumika, skoro pomiarów dokonywano tylko na jego powierzchni. Temperatura wnętrza może się zdecydowanie różnić od temperatury powierzchni (jaka więc była?) i zawsze zależna jest od sposobu doprowadzenia ciepła do tłumika, w szczególności wielkości strumienia ciepła. Skoro w takim przypadku wnętrzu tłumika miało nadal temperaturę niższą od -30 st. C, a cylinder zewnętrzny tłumika -30 st. C, czyli wyższą od temperatury elastomeru, to różnica wymiarów geometrycznych w tym przypadku znacząco musiała wpływać na siły nacisku elastomeru na obudowę, a więc i na rejestrowane podczas pomiarów siły. Z tego też powodu temperatura pracy tłumika może być uznana jedynie za temperaturę pogładową, określaną i wyznaczaną z dużym przybliżeniem.

Wykresy przedstawiane w rozdziale 1.1 prezentujące cykle pracy tłumika na maszynie wytrzymałościowej mogą być dopiero podstawą wyciągania wniosków i stawiania pewnych tez. Niestety, suche skopiowanie wykresów uzyskanych w trakcie pomiarów oraz wyniki zebrane w tabeli 1.1, kończące tę część pracy, są niewystarczające. Nie wiadomo, w jaki sposób wymuszano ruch tłoczyska. Czy zadawano wielkość siły czy przemieszczenia. Czytelność wykresów pogarsza

zamiana opisu osi układu współrzędnych siła/przemieszczenie.

3. Rysunki 1.4 i 1.5 przedstawiają cykl pracy tłumika z częstotliwością 10 Hz w temperaturze -30°C i $+25^{\circ}\text{C}$. Rysunki 1.6a i b są w zasadzie powieleniem rysunków poprzednich. Charakterystyczny uśredniony cykl pracy równie dobrze można było umieścić na rysunkach poprzednich. Rysunki te odnoszą się do skoku równego 1 mm. W części tej pokazano, że wartość rozpraszanej energii zależy od temperatury. Zaobserwowano, że w tłumiku elastomerowo-ciernym, w odróżnieniu od hydraulicznego, ilość rozpraszanej energii spada wraz ze spadkiem temperatury. Tablica 1.1 pokazuje zależność rozpraszania energii od temperatury. Niestety w żaden sposób nie skomentowano trendów i zaobserwowanych charakterystycznych relacji. Zestawiono ilość rozpraszanej energii przypadającej na 1 cykl pracy w zależności od częstotliwości, skoku tłumika oraz temperatury. W żaden sposób czytelnik nie jest w stanie stwierdzić, jakie trendy prezentuje badany tłumik w zależności od 3 wybranych parametrów.

4. Jak należy rozumieć tytuł i cel rozprawy, mówiący o zaprojektowaniu tłumika charakteryzującego się niezmiennym rozpraszaniem energii przy zmianach temperatury, skoro we wszystkich rozdziałach rozprawy pokazano duży wpływ temperatury na wielkość dyssypacji?

5. W rozdziale 2 nie wiadomo, niestety, które krzywe na wykresach 2.5-2.8 odnoszą się do wskazanych temperatur. Co mówi podpis „Próba Jos_3f_o36” lub „Jos_3f_s55”? Jeżeli sięgniemy choćby do pracy P. Żach, *Selection of hyperdeformable material for a vibration. Logistyka*, 6:11439-11446, 2014, znajdziemy w niej zarówno krzywe jednoosiowego ściskania próbek poliuretanu, jak i opis przeznaczenia badań do budowy tłumików drgań typu shimmy. W cytowanej wyżej pracy autor publikacji posunął się do zaproponowania pewnej matematycznej aproksymacji własności tłumiących w równaniu ruchu, przy wzbudzeniu siłą harmoniczną.

Doktorant podjął próbę własnego opisu modelu matematycznego materiału i zaproponował model wielomianowy (2.1). W tablicach 2.1 i 2.2 podane zostały wartości współczynników. Jak zostały wyznaczone współczynniki modelu i w jaki sposób czytelnik mógłby drogę postępowania Doktoranta powtórzyć? Co oznacza funkcjonal (2.1)? Co jest jego dziedziną? Jakie są jego własności? Jak wyznaczono jednakowe wartości D1-D6 w kontekście modelu (2.1)?

Jak w kontekście pracy P. Żacha należy widzieć wkład Doktoranta?

6. Doktorant wprowadza wiele uproszczeń, zarówno matematycznych jak i nomenklaturowych. Jakie uproszczenia przyjęto w rozdziale 3? Co oznacza „wcisk w temperaturze wykonania tłumika” (str. 31) oraz „następuje wyzerowanie wcisku” (str. 32, 33)?

7. Rozdział 4 przedstawia symulację procesu pracy tłumika wykonaną metodą elementów skończonych. Sposób modelowania tłumika jest tu potraktowany bardzo ogólnikowo i ogranicza się w zasadzie do podania klasycznych związków (4.1). Opis zawarty w rozdziale 4.1 jest ogólny i w żaden sposób nie informuje o modelu numerycznym zadania. Jeżeli podjęto próby modelowania metodami przybliżonymi, to pojawiają się pytania, dlaczego zadanie kołowsymetryczne, które winno być przedstawione jako dwuwymiarowe, jest analizowane jako obiekt trójwymiarowy z zastosowaniem siatki zdegenerowanej, jak na rysunku 4.1. Co skłania do zastosowania siatki trójwymiarowej i skąd w rozwiązaniu biorą się smugi równoległe do osi tłumika, pokazane na rysunku 4.2? Skąd biorą się osobliwe punkty o małych wartościach naprężeń kontaktowych na rysunku 4.2a? Jaki jest pełny model zadania, jakie są warunki zamocowania, w jaki sposób przykładowe są siły bądź wymuszenia kinematyczne, co oznacza wartość U w zależności 4.2, skoro wcześniej wcisk opisywano małą literą u , jakie są jednostki tej wartości co oznacza sformułowanie na stronie 37: *jeśli wprowadzimy „ręcznie” kontakt?* Doktorant przyjął jeden z możliwych sposobów wykorzystania programu Abacus, ze wszelkimi tego konsekwencjami: nieznaną siatką modelu matematycznego i sposobu rozwiązywania zadania. Już pierwszy rzut oka na rysunki 4.2 pokazuje różnice w wynikach na powierzchni styku rdzenia z cylindrem, mimo że we wszystkich punktach kontaktu na obwodzie należy oczekiwać jednakowych wartości wielkości fizycznych.

Rysunki 4.5, 4.6 są nieczytelne i nie wnoszą niczego istotnego. W zupełności wystarczyłyby wykresy dwuwymiarowe, zgodnie z wcześniejszą uwagą recenzenta.

8. Nasuwa się proste pytanie: dlaczego wybrano elastomer *epunit*, skoro wiele innych materiałów wykazuje podobne lub znacznie lepsze lub inne własności:

C.L. Qin, D.Y. Zhao, X.D. Bai, X.G. Zhang, B. Zhang, Z. Jin, H.J. Niu. Vibration damping properties of gradient polyurethane/vinyl ester resin interpenetrating polymer network. *Materials Chemistry and Physics* 97, 517–524, 2006.

Dennis T. H. Wong, H. Leverne Williams. Dynamic mechanical and vibration damping properties of polyurethane compositions. *Journal of Applied Polymer Science*, 28(7):2187–2207, 1983.

8. Zamieszczanie adresów stron internetowych mówiących o turystyce motorowej i sportach motorowych w rozprawie naukowej jest niewłaściwe.

3. Zagadnienia wymagające uzupełnienia

Przed dopuszczeniem do obrony rozprawa powinna być w znacznym stopniu uzupełniona.

1. Należy jasno sprecyzować tezę pracy, którą doktorant chce udowodnić.
2. Należy przedstawić głęboką analizę literaturową i przytoczyć dorobek badaczy, którzy zajmowali się zagadnieniami zbliżonymi do poruszanych w rozprawie. Liczba tych prac jest znaczna.
3. Należy dokładnie opisać konstrukcję tłumika oraz założenia, jakie wykorzystano przy badaniu laboratoryjnym oraz przy symulacjach komputerowych, w szczególności warunki początkowe, warunki brzegowe, modele reologiczne materiału, oraz odnieść to do odpowiednich przykładów literaturowych.
4. Wyniki pomiarów należy usystematyzować oraz zaprezentować w formie końcowych wniosków. Wnioski te należy szczegółowo uzasadnić, gdyż materiał badawczy zwykle w takich przypadkach jest obszerny.
5. Należy uzasadnić powód zastosowania modelu tłumienia Rayleigha, opisanego wzorem 2. 5 oraz szczegółowo omówić dobór współczynników α i β . Dlaczego przyjęto dwuparametrowy model, skoro wiedza i narzędzia komputerowe pozwalają na większą swobodę? Zagadnienie to jest stosunkowo proste i opis jego znajduje się w niemal każdym podręczniku do metod komputerowych mechaniki konstrukcji. Z opisu na stronie 29 wynika, że przyjęto niezerowy współczynnik α oraz zerowy współczynnik β . Należy uzasadnić, dlaczego te wartości wybrano.
6. Kolejnym elementem wymagającym uzupełnienia jest uzasadnienie przyjętego modelu lepkosprężystego, w którym pominięto wiele czynników i zjawisk.

4. Wniosek końcowy

Rozprawa wymaga licznych uzupełnień i poprawek (Rozporządzenie MNiSzW z dn. 30 października 2015 r., par. 6.1 ust. 6). Wyszczególniono je w w rozdz. 3 niniejszej opinii. Należy też uwzględnić uwagi krytyczne zawarte w rozdz. 2. Po uwzględnieniu uwag krytycznych i wprowadzeniu uzupełnień rozprawa będzie mogła być dopuszczona do publicznej obrony.

