



POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA  
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I INFORMATYKI  
INSTYTUT MECHANIKI I PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN

42-201 Częstochowa, ul. J.H. Dąbrowskiego 73, tel. 34 32 50-632, [✉ jacek.pr@imipkm.pcz.pl](mailto:jacek.pr@imipkm.pcz.pl)

---

Częstochowa, 15.02.2019r.

**Prof. dr hab. inż. Jacek Przybyłski**

**RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej pt.: "*Redukcja drgań skrętnych belek przy zastosowaniu elementów piezoelektrycznych*" autorstwa Mgr inż. Elżbiety Augustyn**

Recenzja została opracowana na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej Prof. dr. hab. inż. Jerzego A. Śladka oraz uchwały Rady Wydziału z dnia 12 grudnia 2018 r.

I. Wstęp

Badanie i kontrola drgań mechanicznych lekkich konstrukcji i elementów konstrukcyjnych stanowi jedno z podstawowych zadań inżynierii mechanicznej, jak również powiązanych z nią inżynierii budowlanej i lądowej. Drgania takie mogą być przyczyną hałasu, obniżenia trwałości, zmęczenia materiału, a nawet utraty stateczności danego komponentu lub całego układu mechanicznego. Wśród różnych elementów konstrukcyjnych, belki cienkościenne mają szczególne zastosowanie w przemyśle lotniczym i sektorze kosmicznym, czyli tam gdzie oderwanie od pola startowego i uniesienie w przestrzeń ma swoje ograniczenia związane z masą i objętością danego obiektu. Łopatkę śmigła głównego i stabilizującego helikopterów, wiropłatów, turbin wiatrowych, anteny, panele solarne, ramiona robotów są przykładami układów o dużej podatności, stąd aktywne, semi-aktywne i pasywne tłumienie drgań takich elementów stanowi przedmiot badań wielu ośrodków naukowych. Pasywne tłumienie drgań mechanicznych jest łatwiejsze i tańsze w zastosowaniu, ma natomiast wąskie pasmo skutecznego oddziaływania i redukcji drgań. Tłumienie aktywne, stosowane coraz powszechniej, charakteryzuje szerokie pasmo częstości i zdolność do adaptacji przy obciążeniach zmiennych w czasie. Semi-aktywne systemy kontroli drgań generują pasywnie siły tłumiące lub siły w elementach sprężystych, które są modulowane zgodnie z zakładaną procedurą w niewielkim zakresie sterowania. Układy te redukują drgania

zgodnie z oczekiwanymi charakterystykami przy relatywnie małym zapotrzebowaniu na energię zewnętrzną.

Od lat osiemdziesiątych XX w. obserwuje się stały rozwój tzw. materiałów inteligentnych, które mogą być przeznaczane na samodzielne elementy pomiarowe i wykonawcze lub stanowić komponenty struktur konstrukcyjnych lub funkcjonalnych. Jednym z wielu zastosowań takich materiałów, a wśród nich materiałów piezoelektrycznych, jest tłumienie drgań mechanicznych. Ścisła korelacja między polem elektrycznym a odkształceniem czyni je uniwersalnymi sensorami i aktuatorami, które w układzie z systemem sterującym mogą realizować zadania aktywnej redukcji drgań.

Mając powyższe na uwadze, stwierdzam jednoznacznie, że tematyka przedmiotowych badań w zakresie redukcji drgań skrętnych belek, a szczególnie przeprowadzone przez Mgr inż. Elżbietę Augustyn badania eksperymentalne i symulacyjne są aktualne i ważne zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia.

## 2. Opis formalny i omówienie struktury rozprawy doktorskiej

Przedstawiony do recenzji maszynopis dysertacji jest złożony z ośmiu zasadniczych rozdziałów, załącznika, spisu tabel, ilustracji i cytowanych pozycji literaturowych oraz streszczenia w języku polskim o łącznej objętości 91 stron. W spisie treści pojawia się dodatkowo informacja o streszczeniu w języku angielskim, którego nie zamieszczono w przedmiotowym maszynopisie. Praca zawiera 48 rysunków, w tym 7 fotografii oraz 9 tablic z zestawieniami wzorów, wyznaczonych parametrów redukcji oraz częstości i postaci drgań. W bibliografii uwzględniono 59 pozycji literaturowych obejmujących zarówno wydawnictwa zwarte, jak i artykuły naukowe. Układ pracy jest właściwy dla tego rodzaju opracowań.

We wprowadzeniu Autorka dokonała przeglądu literatury w zakresie teorii belek cienkościennych, drgań skrętnych oraz tłumienia drgań przy zastosowaniu elementów piezoelektrycznych, a następnie określiła cel, tezę i zakres pracy. Rozdział 2 poświęcono na omówienie podstawowych założeń teorii drgań skrętnych belek pryzmatycznych na bazie piśmiennictwa własnego i innych autorów. W rozdziale 3 zdefiniowano zakresy drgań nisko- i wysokoczęstotliwościowych w odniesieniu do zasadniczej tematyki badań. Na przykładzie belki wspornikowej z dwiema parami elementów piezoelektrycznych, przy zastosowaniu pakietu oprogramowania inżynierskiego, zidentyfikowano dziewięć pierwszych postaci drgań tej belki wskazując na występowanie w spektrum odpowiedzi zarówno form drgań giętych,

jaki i skrętnych. W rozdziale 4 przypomniano teorię zjawisk piezoelektrycznych, zaprezentowano równania konstytutywne materiałów z uwzględnieniem sprzężenia elektromechanicznego oraz omówiono ideę tłumienia drgań skrętnych na podstawie opracowanego modelu MES belki wspornikowej z dwiema parami elementów piezoceramicznych.

Podstawy teoretyczne metod różnic skończonych i elementów skończonych wraz z przykładami zastosowań do redukcji drgań skrętnych płaskiej belki z aktuatorami piezoceramicznymi zawarto w rozdziałach 5 i 6, pt. odpowiednio "*Symulacja redukcji drgań skrętnych belek metodą różnic skończonych*" i "*Symulacja redukcji drgań skrętnych belek metodą elementów skończonych*". Stanowisko badawcze, poszczególne elementy toru pomiarowego oraz wyniki badań eksperymentalnych zostały przedstawione w rozdziale 7 zatytułowanym: "*Doświadczalna weryfikacja metody redukcji drgań skrętnych belek*". Zaprezentowano tam szeroki zakres wyników badań poprzecznych i skrętnych wspornikowej belki laminowanej uzyskanych przy zastosowaniu elektronicznych systemów sterowania oraz zaawansowanej aparatury pomiarowej. Syntetyczna analiza wyników wraz z płynącymi z niej wnioskami wieńczy część eksperymentalną pracy.

Dysertację kończy rozdział 8 "*Podsumowanie i wnioski*", w ramach którego dokonano rekapitulacji sformułowania problemu, przeprowadzonej analizy oraz wyników badań numerycznych i eksperymentalnych wraz ze wskazaniem dalszych działań w zakresie problematyki redukcji drgań skrętnych.

### 3. Ocena merytoryczna i uwagi ogólne

Praca dotyczy zagadnienia tłumienia mechanicznych drgań skrętnych belek cienkościennych, a więc problemu istotnego ze względu na powszechność zastosowań tego typu elementów konstrukcyjnych. Doktorantka zaprezentowała szerokie spektrum analizy zagadnienia przy zastosowaniu właściwych teorii do jego opisu i metod rozwiązania, zamieszczając odpowiednie wprowadzenia teoretyczne w zakresie: teorii skręcania i zginania prętów, teorii skręcania belek cienkościennych, teorii piezoelektryczności oraz metody różnic skończonych i elementów skończonych. Wykazała się umiejętnością zastosowania tychże do rozwiązania zagadnienia wymuszonych drgań skrętnych dwuteowej belki cienkościennej, a na tej podstawie do opisu drgań niskoczęstotliwościowych. W zakresie tym przeprowadziła analizę parametryczną w odniesieniu do monolitycznych belek o przekrojach okrągłym i prostokątnym. W dalszej części dokonała symulacji drgań skrętnych belki o przekroju

prostokątnym i ich tłumienia przez wprowadzenie przeciw-momentu skręcającego, którego źródłem są elementy piezoelektryczne. Podstawowe badania teoretyczne Doktorantka skoncentrowała na drganiach belki cienkościennej o przekroju prostokątnym z dwiema parami elementów piezoceramicznych przyklejonych symetrycznie do górnej i dolnej powierzchni belki. W ramach obliczeń MFS określała poziom napiecia niezbędnego do aktywacji piezoelektryków celem redukcji przemieszczeń kontrolnych punktów belki. Symulacje te prowadzono przy różnych położeniach elementów piezoceramicznych względem głównej osi symetrii belki.

Jedną z najważniejszych części pracy stanowi rozdział 7 zawierający opis badań eksperymentalnych w zakresie drgań utwierdzonej belki cienkościennej. Przygotowanie zaawansowanego stanowiska badawczego wraz z układami do wzbudzenia, rejestracji, jak również aktywnego tłumienia drgań przy zastosowaniu elementów piezoceramicznych jest istotnym osiągnięciem tej pracy. Uzyskanie szerokiego spektrum wyników z zasadniczym potwierdzeniem eksperymentalnym poprawności założeń metody i jej głównego rezultatu jakim było zredukowanie drgań układu, jest kluczową przesłanką dowodzącą dojrzałości naukowej Doktorantki.

Oprócz niewątpliwych walorów pracy wskazanych powyżej, ma ona słabą stronę, do której należy przede wszystkim język rozprawy doktorskiej. W pracy pojawiają się błędy terminologiczne oraz usterki o charakterze merytorycznym, jak również błędy edycyjne, co utrudnia percepcję i w efekcie niepotrzebnie deprecjonuje osiągnięcia rozprawy.

Poniżej przedstawiam kilka uwag ogólnych, które poddaję pod dyskusję w trakcie obrony doktoratu.

1. Przypominając równania drgań skrętnych zgodnie z teorią belek cienkościennych, na str. 13 opisano warunki brzegowe jakie muszą spełniać rozwiązania ogólne równania ruchu w odniesieniu do fizycznych podpór. Określenie "*belka zamocowana*" w rozumieniu podpory wspornikowej (utwierdzenia) jest dalekim uogólnieniem nie oddającym istoty odbieranych stopni swobody. Ewentualnym określeniem nawiązującym do podanego w tekście mogłoby być "*szttywne zamocowanie*". Kolejne określenia "*belka swobodna*" lub "*belka swobodnie podparta*" nie powinny być stosowane do opisu konkretnego warunku brzegowego, ponieważ mają swoje znaczenie w mechanice i nawiązują do pojęcia bryły sztywnej oraz określonego sposobu zamocowania belki związanego z dwiema podporami przegubowymi.

2. W warunkach brzegowych odnoszących się do konkretnych sposobów podparcia skręcanej belki cienkościennej błędnie oceniono możliwość wystąpienia deplanacji przekroju (str. 13). Użyto określeń: "*brak spaczenia przekroju*" w odniesieniu do podparcia przegubowego i swobodnego końca belki oraz "*zablokowane spaczenie przekroju poprzecznego*" w odniesieniu do podpory wspornikowej. Proszę o wyjaśnienie i ustosunkowanie się do tej uwagi w trakcie dyskusji podczas obrony pracy.
3. Przedostatnie zdanie na str. 24 dotyczy warunków brzegowych w zadaniu drgań skrętnych cienkościennego pręta dwuteowego formułowanego w metodzie elementów skończonych. Jest ono następujące: "*Ze względu na ilość stopni swobody zastosowanych elementów, warunki brzegowe na obu końcach belki są modelowane jako swobodny przestiw wzdłuż osi belki i zablokowane przemieszczenie dla wszystkich węzłów w płaszczyźnie jej końców*". **Liczba** stopni swobody przyjętego elementu skończonego nie ma bezpośredniego związku ze sposobem podparcia układu w określonym miejscu. To zastosowana podpora determinuje liczbę i rodzaj odbieranych stopni swobody w węzłach wybranego elementu. Podana informacja jest nieklarowna, przez co uniemożliwia odczytanie intencji badacza. Stopnie swobody dotyczą **przemieszczeń** wzdłuż osi (najczęściej globalnego układu współrzędnych) i **kątów obrotu** względem tych osi. Notacja dotycząca warunków brzegowych powinna jednoznacznie opisywać które ze stopni swobody zostały odebrane.
4. W rozdziale 2.5.2 porównywano wyniki częstości drgań uzyskanych na podstawie modeli przekroju cienkościennego MES i otrzymanego na podstawie modelu Własowa oraz modelu monolitycznego wału. W jaki sposób model cienkościenny był sprowadzany do modelu wału? Istotne byłoby porównanie własności własnych otrzymanych z modelu MES i Własowa obok zaprezentowanego wykresu dotyczącego modeli MES i modelu litego wału. Str. 26 - w jaki sposób "*teoria litych przekrojów*" umożliwia oszacowanie błędu obliczanych wartości własnych?
5. W rozdziale 3 dotyczącym możliwości wystąpienia skrętnych drgań niskoczęstotliwościowych wzięto pod uwagę dwuteową belkę o przekroju cienkościennym z zamocowanymi elementami piezoceramicznymi, dla której opracowano model MES i wyznaczono numerycznie dziewięć pierwszych wartości i postaci drgań własnych. Z opisu własności materiału piezoceramicznego, który

pojawia się dopiero w rozdziale 4.2. oraz geometrii belki i piezoceramików wynika, że sumaryczna grubość elementów piezoelektrycznych wynosi 1.2 [mm], przy grubości belki rodzimej 0.8 [mm]. Niestety w pracy nie jest podana wartość masy właściwej materiału piezoceramicznego, ale na podstawie danych producentów wiadomo, że jest ona bliska wartości gęstości stali, przyjętej w modelu jako materiał belki macierzystej. Naklejenie dwóch par elementów piezoceramicznych na belkę powoduje skokową zmianę jej przekroju, wskutek czego można wyróżnić wzdłuż jej długości trzy segmenty, spośród których pierwszy i trzeci są pryzmatyczne i jednorodne materiałowo, a drugi - środkowy jest pryzmatyczny i złożony z dwóch materiałów. Taki model nadaje się znakomicie do rozważań drgań poprzecznych i skrętnych na podstawie odpowiednich równań ruchu zastosowanych w rozdziałach 3.3.1 i 3.3.2. Przyjęcie tego modelu i wykonanie odpowiednich umożliwiłoby przeprowadzenie porównania wyników w zakresie wartości częstości drgań własnych i odpowiadających im postaci z tymi, jakie uzyskano przy zastosowaniu modelu MES.

6. Prezentując główną ideę redukcji drgań za pomocą aktuacji piezoelektrycznej (rozdział 4.2) nie podano liczby elementów skończonych zastosowanych w procesie obliczeniowym. Nie wiadomo także czy przeprowadzono analizę optymalizowania liczby elementów. Biorąc pod uwagę fakt, że ten sam model był stosowany w rozdziale 6.2, który jest rozdziałem zasadniczym ze względu na cel i zakres pracy, w związku z czym liczba symulacji aktywnego tłumienia drgań była znacząca, czas obliczeń numerycznych jest podstawowym czynnikiem determinującym kosztocłonność i zakres badań.
7. Zasadnicze badania eksperymentalne zaprezentowano w rozdziale 7.2, w którym opisując układ badawczy wymieniono dwa sposoby wzbudzania drgań belki. Nie podano natomiast który z nich został zastosowany - czy za pomocą dodatkowej pary piezoceramików (nie pokazanych na rys. 7.5), czy też przy użyciu wzbudnika elektrodynamicznego?
8. Z punktu widzenia eksperymentatora bardzo ważne informacje dotyczą podłączenia zasilania do elektrod elementów piezoelektrycznych. Czy były to elementy z tzw. wywniętą elektrodą? Wymiary elementów na str. 64 zostały wymienione błędnie ( $0.001 \times 0.001$  [m]) - nie podano także grubości tych elementów.

9. W pracy powinno zostać podane który z efektów piezoelektrycznych był efektem dominującym z punktu widzenia zastosowanej metody redukcji drgań ( $d_{31}$ ,  $d_{33}$ ,  $d_{15}$ ). Najlepiej jest to uzasadnić prezentując kierunek wektora pola elektrycznego w stosunku do wektora polaryzacji elementu piezoceramicznego. Informacja na ten temat jest istotna zarówno dla modelującego zjawisko w MES, jak również dla wykonującego badania doświadczalne.
10. Czy istnieje powód, przez który nie zidentyfikowano w eksperymencie drugiej częstotliwości skrętnej? Mówi o tym Tabela 7 i rys. 7.15, jakkolwiek widmo z rys. 7.14 prezentowane w skali logarytmicznej wskazuje na możliwy pik w okolicach 300 [Hz]. Bardzo interesujące byłoby porównanie wyników badań eksperymentalnych z wynikami badań symulacyjnych przy zastosowaniu modelu MES odzwierciedlającego układ doświadczalny.

#### 4. Uwagi redakcyjne

Początkowe rozdziały pracy są napisane z większą starannością niż pozostałe, w których pojawia się więcej błędów natury edycyjnej. Poniżej wymieniono zauważone usterki redakcyjne:

- str. 9 - w celu pracy z uwagi na kontekst lepiej użyć formy "*opracowanie metody*" zamiast "*sformułowanie metody*".
- str. 19 - niefortunny opis: "*...powyższe całki istnieją i po prawej stronie równają się zero*".
- str. 24 - nie "*ilość*", a "*liczba*" stopni swobody.
- str. 31 - niepoprawna forma: "*...drgań skrętnych*", "*typu skrętnego*".
- str. 47 - jednostką częstotliwości jest here [Hz].
- str. 56-57 - zupełnie nieczytelne oznaczenia skal na rys. 6.4-6.6.
- str. 57 - niepoprawny tytuł rozdziału 5.3.
- str. 65 - niepoprawne sformułowanie: "*Wzbudniki te służą do reprodukcji...*".
- str. 66 - niepoprawny opis działania kontrolera elementów piezoelektrycznych.
- str. 68 - zamiast odniesienia do Tabeli 6 powinna być do Tabeli 7.
- str. 69 - błędny sens zdania: "*Pomiary przemieszczenia poprzecznego belki związanego z jej drganiami skrętnymi był punktem powierzchni zewnętrznej belki...*".

## 5. Wniosek końcowy

Uwagi merytoryczne przedstawione w punkcie 3 opinii o pracy nie zmieniają ogólnej pozytywnej oceny recenzowanej dysertacji. Stwierdzam, że Mgr inż. Elżbieta Augustyn opracowała interesujące naukowo i oryginalne modele drgań skrętnych belek cienkościennych i prętów pryzmatycznych z elementami piezoceramicznymi oraz wykazała na drodze badań teoretycznych przydatność aktuacji piezoelektrycznej do redukcji drgań takich układów. Założenia modelu opracowanego przy zastosowaniu metody elementów skończonych uzyskały potwierdzenie w wynikach przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Mając powyższe na uwadze, stwierdzam jednoznacznie, że dysertacja pt.: *"Redukcja drgań skrętnych belek przy zastosowaniu elementów piezoelektrycznych"* autorstwa Mgr inż. Elżbiety Augustyn spełnia warunki ustawowe stawiane pracom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie Autorki do dalszego toku przewodu doktorskiego.

