

Dr hab. inż. Roland Pawliczek, prof. PO  
Politechnika Opolska  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn

Opole, 10.06.2024

## RECENZIA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Jacka Haraziña  
pt. „Synteza i analiza złożonych układów piezoelektrycznych  
z uwzględnieniem metod klasycznych i nieklasycznych”  
wykonanej pod kierunkiem  
dra hab. inż. Andrzeja Wróbla, prof. PŚ

### 1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Formalną podstawę opracowania niniejszej recenzji stanowi pismo z dnia 3.04.2024 o sygnaturze RDIME.512.1.2024 wystosowane przez Prof. dr hab. inż. Ewę Majchrzak, Przewodniczącą Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej a informujące o powołaniu Uchwałą Rady w dniu 27.03.2024 na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Jacka Harazina pt. „Synteza i analiza złożonych układów piezoelektrycznych z uwzględnieniem metod klasycznych i nieklasycznych”.

## II. Ocena pracy doktorskiej

## 1. Wprowadzenie

Tematyka pracy doktorskiej koncentruje się na zagadnieniach związanych z modelowaniem i oceną własności tzw. stosów piezoelektrycznych a jako utilityarny cel pracy określono opracowanie metody syntezy modeli matematycznych układów piezoelektrycznych.

Efekt piezoelektryczny i badania nad materiałami go wykazującymi mają już długą historię, jednakże z powodu skali zjawiska na poziomie struktury materiału, konieczności korzystania z dostępnych zasobów naturalnych materiałów piezoelektrycznych oraz trudności w kontrolowaniu procesu stanowiły istotny problem aplikacyjny. Dopiero rozwój technik materiałowych pozwalających w sposób efektywny wytwarzać materiały o pożądanych właściwościach piezoelektrycznych oraz możliwości nowoczesnych systemów sterowania cyfrowego w odniesieniu do bardziej precyzyjnego kontrolowania pracy takich układów wpłynęły na coraz to szersze zastosowanie materiałów piezoelektrycznych w konstrukcji czujników, mikroaktuatorów. Istotnym staje się zagadnienie projektowania układów już nie tylko pod kątem uzyskiwanych sił czy deformacji, ale ważnym jest kontrolowanie dynamiki układów piezoelektrycznych. Poznanie, już na etapie projektowania, odpowiedzi dynamicznej układu jako cechy konstrukcji poza właściwościami materiału piezoelektrycznego daje możliwość właściwej oceny pracy i dobór właściwych metod pomiaru i sterowania pracą układu. Kontrolowanie drgań układów piezoelektrycznych może być wykorzystane jako element aktywnych układów tłumiących redukujących niepożądane wibracje konstrukcji.

Biorąc pod uwagę powyższe, fakt podjęcia przez doktoranta tematu modelowania zjawiska przy uwzględnieniu interakcji szeregu komponentów piezoelektrycznych wpisuje się w aktualną problematykę projektowania układów piezoelektrycznych. Praca badawcza nad modelowaniem dynamiki pracy i badań symulacyjnych układów piezoelektrycznych służyć opracowaniu algorytmu

Biuro Dziekana

420.178

wpłynęło dnia 13.06.2024  
2003 42110615112004  
nr ..... zał. ....



dla komputerowych metod wspomagania projektowania systemów wykonawczych opartych na materiałach piezoelektrycznych wpisuje się w dyscyplinę inżynierii mechanicznej i dziedzinę nauk inżynieryjno-technicznych.

## 2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Doktorant do recenzji przedstawił pracę w zwartej formie książki w twardych okładkach formatu A4 oraz dodatkowo wersję elektroniczną spójną z pracą drukowaną. Praca zawiera 189 stron. Treść pracy została podzielona na 7 rozdziałów z podrozdziałami. Na początku znajduje się spis treści i wykaz ważniejszych oznaczeń. W pracy zamieszczono 102 rysunki oraz 22 tabel. Spis literatury zawiera 102 pozycje z czego 5 publikacji, których współautorem jest doktorant.

Rozdział 1 pracy poświęcony jest przeglądowi aktualnego stanu wiedzy, gdzie doktorant scharakteryzował stan wiedzy odnośnie fizyki zjawiska piezoelektrycznego oraz najważniejszych koncepcji jego modelowania matematycznego. W oparciu o badania literaturowe autor zaproponował koncepcję integracji wybranych metod syntezy i analizy układów mechanicznych oraz ich zastosowanie pod kątem modelowania matematycznego układów piezoelektrycznych o różnych wymiarach i właściwościach materiałowych płytek.

Treść rozdziału 2 dotyczy zjawiska piezoelektrycznego i zawiera szczegółowy opis w odniesieniu do efektów zachodzących w materiale jak i struktur oraz konstrukcji przetworników piezoelektrycznych. Uzupełnieniem są zamieszczone równania konstytutywne wiążące bazowe parametry efektu piezoelektrycznego związane z deformacją materiału, obciążeniem i wielkościami pola elektrycznego w ujęciu przestrzennym.

W rozdziale 3 doktorant zamieścił sposób zapisu przyjętego kaskadowego układu mechanicznego o nieskończonej liczbie stopni swobody w postaci grafu. Zamieszczone krok po kroku przekształcenia pozwalają na szczegółową analizę procesu. Opis uzupełniono podstawami algebry liczb strukturalnych jako metody zapisu oddziaływań w układzie mechanicznym zapisanym w postaci grafu.

Rozdział 4, stanowiący zasadniczą, naukową część dysertacji, zawiera proces syntezy układu kaskadowego elementów piezoelektrycznych oraz ich analizę, gdzie doktorant wykorzystał i porównał skuteczność obliczeń dla metody macierzowej (traktowanej później jako referencyjną) oraz proponowanej metody opartej o grafy i liczby strukturalne. Doktorant przedstawił budowę modeli obliczeniowych od najprostszych postaci układów mechanicznych o dwóch stopniach swobody zawierających tylko elementy inercyjne i sprężyste. Dla takich układów uzyskano porównywalne parametry i charakterystyki dla obu metod: metody grafów i liczb strukturalnych z referencyjną metodą macierzową. Uwzględniając dodatkowo elementy tłumiące w układzie z wykorzystaniem liniowego modelu Rayleigh'a uwzględniającego wpływ tłumienia elementów inercyjnych i sprężystych, uzupełniono algorytm budowania modelu numerycznego o te elementy. Wyznaczono w ten sposób wartości współczynników tłumienia do dalszych obliczeń. Jako alternatywę dla metody macierzowej do wyznaczenia charakterystyki amplitudowej dla układu z tłumieniem doktorant opracował autorską metodę modyfikując metodę grafów i liczb strukturalnych z wydzieleniem składowych w równaniach związanych z funkcjami trygonometrycznymi sinus i cosinus, co pozwoliło na uproszczenie obliczeń w stosunku do klasycznej metody. Autor uzyskał pozytywne wyniki porównania proponowanego algorytmu w odniesieniu do metody referencyjnej dla układów o dwu- i więcej stopni swobody. Ponieważ obliczenia wykonywano w wykorzystaniu technik komputerowych doktorant porównał efektywność nowej metody uzyskując dobrą korelację do metody macierzowej dla układów o 2 i 3 stopniach swobody ale już znacznie gorsze dla większej liczby stopni swobody układu.



Podrozdziały 4.5 oraz 4.6 stanowią kompleksowy opis modelu numerycznego przetwornika piezoelektrycznego uwzględniającego zależności opisujące właściwości materiału piezoelektrycznego oraz opracowany model mechaniczny układu. Na podstawie tych zależności wyznaczono wzory pozwalające na wyznaczenie parametrów materiałowych lub geometrycznych syntetyzowanego układu piezoelektrycznego w zależności od parametrów wejściowych do obliczeń w postaci przyjętych częstotliwości rezonansowych.

Rozdział 5 przedstawia opracowany autorski program do obliczeń projektowych układu piezoelektrycznego. Doktorant zamieścił i opisał algorytmy syntezy oraz analizy układu piezoelektrycznego a następnie szczegółowo opisał procedurę postępowania przy projektowaniu parametrów geometrycznych płytek stosu piezoelektrycznego z uwzględnieniem własności materiałowych i wymaganych częstotliwości rezonansowych. W programie każda płytka stosu może być traktowana jako kolejny stopień swobody układu i możliwe jest obliczenie jej parametrów stosownie do modelu mechanicznego. Program zawiera także funkcje weryfikacji zsintetyzowanego układu poprzez analizę odpowiedzi amplitudowej przemieszczenia i napięcia.

Rozdział 6 zawiera opis badań eksperymentalnych wykonanych przez doktoranta. Do badań opracowano własne stanowisko, przedstawiono jego elementy składowe, metody generacji wymuszeń oraz pomiarów drgań stosów piezoelektrycznych. Jako dodatkowy cel badań przedstawiono uzyskanie z pomiarów odpowiedzi układów piezoelektrycznych co pozwoliło doktorantowi zweryfikować poprawność działania stanowiska pomiarowego oraz poznać rzeczywiste zachowanie się stosów piezoelektrycznych, co było przydatne przy walidacji modeli obliczeniowych w odniesieniu do aspektów konstrukcji stosów piezoelektrycznych nie uwzględnianych w modelach obliczeniowych, np. warstw izolacyjnych i kleju. Próbki układów piezoelektrycznych przygotowano z myślą o możliwości weryfikacji zaproponowanych w pracy algorytmów i programu obliczeniowego.

Badania wstępne charakterystyk wykazały częstotliwości drgań oraz amplitudy nieco odmienne od deklarowanych przez producenta – doktorant przeprowadził analizę pod kątem możliwych efektów wpływających na odpowiedź układu.

Właściwe badania walidacyjne modeli opisanych przez doktoranta w pracy obejmowały zamodelowanie użytych do eksperymentu układów piezoelektrycznych w programie zaprezentowanym w pracy, co pozwoliło określić parametry modelu mechanicznego piezoelektryku i przeprowadzeniu syntezy układu w programie. Następnie przeprowadzono analizę i porównano wyniki obliczeń z wynikami uzyskanymi eksperymentalnie. Dla wszystkich analizowanych przypadków uzyskano dobrą zgodność pod względem charakterystyki częstotliwościowej dla częstotliwości rezonansowej, natomiast porównanie wielkości przemieszczeń obliczonych z uzyskanymi eksperymentalnie wykazały znaczące różnice.

W rozdziale 7 stanowiącym wnioski i uwagi końcowe doktorant wskazał, że zaproponowany przez niego model syntezy układów piezoelektrycznych bazujący na metodzie grafów w połączeniu z metodą liczb strukturalnych daje dobrą zgodność z referencyjną metodą macierzową z błędem nie przekraczającym 1% w odniesieniu do częstotliwości rezonansowej. Zaproponowane rozwiązanie zastosowano w algorytmie obliczeń komputerowych a opracowana autorska metoda analizy układu na bazie liczb strukturalnych wykazała częściową zgodność wyznaczonych parametrów geometrycznych i właściwości materiałowych układu piezoelektrycznego w odniesieniu do badanych elementów rzeczywistych. Doktorant ponownie wskazał możliwe efekty wpływające na wyniki pomiarów oraz obliczeń i w oparciu o te analizy wskazał możliwe lub konieczne obszary badań na przyszłość.

Na stronach 183-189 zamieszczono spis literatury



### 3. Ocena osiągnięcia

Rozprawa doktorska pt. „Synteza i analiza złożonych układów piezoelektrycznych z uwzględnieniem metod klasycznych i nieklasycznych” opracowana przez mgra inż. Jacka Harazina dotyczy aktualnych problemów projektowania układów z przetwornikami piezoelektrycznymi. Rozwiązanie problemu oceny zachowania się układu piezoelektrycznego na etapie projektowania z uwzględnieniem wymaganej geometrii przetwornika lub właściwości materiałów piezoelektrycznych zastosowanych np. w stosie, stanowi istotny wkład w obszarze aplikacji tego typu układów.

#### 3.1. Ocena ogólnej wiedzy teoretycznej

W pracy doktorant przedstawił przegląd stanu wiedzy zarówno w odniesieniu do metod modelowania matematycznego jak i zjawiska piezoelektrycznego. Opis zagadnień modelowania matematycznego z uwzględnieniem metod standardowych opartych na analizie dynamiki układów mechanicznych i rozwiązywaniu zagadnień metodą macierzową jak i przedstawienie alternatywnej metody grafów wspartej algebrą liczb strukturalnych pozwoliło doktorantowi ocenić istniejące metody jak również zaproponować autorską metodę łączącą przedstawione sposoby modelowania. Na podstawie szerokiego opisu podstaw fizykalnych zjawiska piezoelektryczności, właściwości materiałów piezoelektrycznych oraz modeli matematycznych opisujących zjawisko możliwe było zbudowanie modelu numerycznego przetwornika piezoelektrycznego i jego aplikacja w postaci programu komputerowego wspomagającego proces projektowania. Przegląd aktualnego stanu wiedzy autor udokumentował listą 102 publikacji.

Stwierdzam, że w odniesieniu do obszaru badań zawartych w pracy doktorant wykazał się wiedzą adekwatną do postawionego celu pracy.

#### 3.2. Ocena umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Opiniowana praca zawiera wszystkie elementy właściwe dla publikacji o charakterze pracy naukowej. Doktorant dokonał analizy aktualnego stanu wiedzy lokując problem badawczy w zakresie zagadnień modelowania matematycznego zjawisk fizycznych przy projektowaniu przetworników piezoelektrycznych. Literatura została dobrana stosownie do zdefiniowanego problemu i celu, który doktorant chciał osiągnąć i w stosownym zakresie wykorzystana w sposób poprawny. Autor pracy zdefiniował przedmiot własnych dociekań naukowych określając cele pracy i stawiając tezy. Przedstawił również w koniecznym zakresie wykorzystywane metody badawcze, identyfikację parametrów niezbędnych w zamieszczonych obliczeniach, aparaturę do badań eksperymentalnych i procedurę badań, w sposób poprawny przedstawił wyniki badań i zamieścił niezbędne analizy tych wyników. Przedstawiona analiza wyników była podstawą sformułowania wniosków. Doktorant sformułował obszernie wnioski odnoszące się do wyników przeprowadzonych analiz, wnioski są właściwe i kompletne, uzupełnione również odniesieniami do wiedzy pozyskanej z literatury. Autor pracy zamieszcza własne uwagi, komentarze i wnioski częściowe również w całym toku prowadzenia rozprawy.

Przedstawiona rozprawa spełnia tok procesu badawczego, należy stwierdzić właściwe przygotowanie doktoranta do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

#### 3.3. Ocena oryginalnego rozwiązania problemu naukowego będącego osiągnięciem w pracy

W ogólności projektowanie jakiegokolwiek części jest zwykle pierwszym krokiem realnego tworzenia wyrobu końcowego po tzw. pracach koncepcyjnych. Konieczne jest zdefiniowanie założeń do projektu i zebranie wszelkich niezbędnych danych określających parametry geometryczne i właściwości



materiałów użytych do budowy części. Następnie należy powiązać ze sobą w procesie projektowania te informacje tak, aby uzyskany efekt końcowy, czyli produkt, realizował oczekiwane czynności z wymaganymi parametrami. W tym ujęciu proces projektowania przetworników piezoelektrycznych również zawiera te wszystkie elementy i jak dla wielu tego typu zagadnień nie można powiedzieć, że zasadniczo procedury projektowania są znane i nie ma potrzeby ich rozwijać. Podjęte przez doktoranta działania wpisują się w potrzebę tworzenia nowych narzędzi projektowania i analizy pracy przetworników piezoelektrycznych, a fakt złożonych relacji wewnątrz struktury materiału oraz interakcji komponentów przetworników piezoelektrycznych w postaci stosów jest zagadnieniem trudnym wymagającym znajomości fizyki połączonych ze sobą fenomenów mechanicznych i elektrycznych.

*Teza i cel pracy:* Opierając się na przeprowadzonym przeglądzie aktualnego stanu wiedzy dotyczącym zarówno samego zjawiska piezoelektrycznego jak i modelowania oddziaływań mechanicznych, doktorant potrafił sformułować tezę pracy przyjmując, że możliwe jest utworzenie nowej metody syntezy (czyli tworzenia bardziej złożonych części z prostszych elementów) służącej modelowaniu dowolnych układów piezoelektrycznych o strukturze kaskadowej, gdzie dane wejściowe reprezentują oczekiwane częstotliwości rezonansowe przy dysponowaniu ograniczoną liczbą danych określających właściwości piezoelektryczne materiału oraz geometrii przetwornika. Jako cel pracy określono zbudowanie algorytmu analizy pracy układów bazującego na metodzie grafów i tzw. liczb strukturalnych. Podjęto również badania eksperymentalne służące weryfikacji wyników obliczeń według zaproponowanego algorytmu w celu potwierdzenia tezy. Sformułowaną tezę i cel pracy uważam za oryginalny wkład doktoranta w przedmiocie badań.

W toku pracy doktorant przedstawił kilka aspektów, które uważam za oryginalne osiągnięcia autora pracy:

- 1) w rozprawie przedstawiono metodę budowy modelu mechanicznego układu kaskadowego w oparciu o teorię grafów i liczb strukturalnych wykazując jej zgodność z metodą referencyjną opartą o standardowe procedury analizy dynamiki układów mechanicznych bazujących na równaniach Lagrange'a II rodzaju i ich rozwiązaniu metodą macierzową;
- 2) zaproponowano nową metodę uproszczającą metodę obliczeń dla układów mechanicznych z uwzględnieniem tłumienia poprzez rozdzielenie grafów układu tłumionego na składowe zawierające funkcje sinus oraz cosinus. Doktorant zaproponował zaczerpnięcie procedury obliczeniowej z metody macierzowej w odniesieniu do układów mechanicznych z tłumieniem i zastosowanie jej w odniesieniu do zaproponowanej metody grafów i liczb strukturalnych opracowanych wcześniej dla układów bez tłumienia. Model został zweryfikowany w odniesieniu do metody referencyjnej, gdzie uzyskano pozytywne wyniki weryfikacji proponowanego modelu numerycznego dla układów z tłumieniem o 2, 3, 4, 5 i 6 stopniach swobody. Jako niedogodność metody wskazano brak możliwości oceny przesunięć fazowych;
- 3) oryginalnym dorobkiem doktoranta jest również zastosowanie opracowanego modelu matematycznego do syntezy parametrów układu mechatronicznego z przetwornikiem piezoelektrycznym w celu osiągnięcia pożądaných parametrów projektowanego układu według dwóch ścieżek: a) przyjmując jako założenia początkowe parametry geometryczne poszczególnych elementów piezoelektrycznych projektowanego stosu i dobór na tej podstawie właściwości materiałów użytych do budowy układu lub b) przyjmując jako założenia materiał dla poszczególnych elementów układu, w procesie syntezy dobierane są parametry geometryczne elementów piezoelektrycznych. Doktorant w rozdziałach 4.5 i 4.6 przedstawił model przetwornika piezoelektrycznego i procedurę syntezy parametrów układu opisując przykładowe układy;



4) opracowanie autorskiego programu komputerowego – na bazie przyjętych modeli obliczeniowych opracowano algorytmy numeryczne obliczeń dla syntezy oraz analizy układu piezoelektrycznego. Na podstawie algorytmów opracowano program komputerowy do syntezy układów piezoelektrycznych o wielu stopniach swobody z możliwością syntezy właściwości poszczególnych płytek w stosie lub określenie wymiarów elementów piezoelektrycznych dla zadanych właściwości materiałów użytych w stosie. Wyniki syntezy układów piezoelektrycznych i analizy ich odpowiedzi uzyskanych w programie zostały poddane weryfikacji wynikami badań eksperymentalnych;

5) wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych – doktorant kompleksowo zaplanował, przygotował aparaturę i przeprowadził eksperyment w celu weryfikacji proponowanych algorytmów syntezy i analizy odpowiedzi układów piezoelektrycznych.

Badania eksperymentalne dotyczyły stosów piezoelektrycznych z płytkami wykonanymi z różnych materiałów i o różnych parametrach geometrycznych, co jak wskazuje doktorant, nie jest standardową procedurą badań układów piezoelektrycznych. Stosownie do nowo postawionego problemu opracowano procedurę badań, zbudowano stanowisko do wzbudzania drgań badanych układów oraz ich pomiarów. Jako pierwsze zadanie doktorant określił rozpoznanie problemów związanych z przygotowaniem próbek do badań, stosowaniem określonych wymuszeń i pozyskanie materiału badawczego do wstępnej analizy pracy takich układów. Takie podejście wydaje się słuszne w sytuacji, gdy badania literaturowe wskazały niewystarczającą ilość informacji odnośnie badań tego typu. Przyjęte rozwiązania techniczne eksperymentu i procedura badań są właściwe do postawionego problemu badawczego.

W drugim etapie doktorant przeprowadził weryfikację eksperymentalną odpowiedzi układów piezoelektrycznych syntezyzowanych i analizowanych za pomocą zaproponowanych przez siebie modeli obliczeniowych zaimplementowanych w autorskim programie komputerowym. Weryfikacja polegała na wykorzystaniu programu komputerowego do zamodelowania i wykonania obliczeń dla układów rzeczywistych przygotowanych do badań eksperymentalnych obejmujących przetworniki piezoelektryczne PA4FEW THORLABS o wymiarach 10x10x2 mm i 5x5x2 mm jako układy pojedyncze i zespolone w układ o 2 stopniach swobody. Badania elementów wykazały różnicę w częstotliwościach rezonansowych płytek uzyskanych na stanowisku w porównaniu do danych katalogowych. Przy ocenie jakości obliczeń projektowych uzyskanych z programu komputerowego i wyników badań eksperymentalnych doktorant uzyskał zadowalającą zgodność częstotliwości rezonansowych z wynikami uzyskanymi eksperymentalnie, natomiast dla porównania przemieszczeń przetwornika uzyskane różnice pomiędzy obliczeniami i eksperymentem są znaczące.

Należy jeszcze podkreślić szeroki zakres badań oraz badania wstępne na każdym z etapów służących weryfikacji metod badawczych.

#### **4. Uwagi szczegółowe i pytania do pracy**

Analiza treści rozprawy doktorskiej nasuwa także pewne uwagi odnoszące się do poruszanych zagadnień i w związku z tym pojawiają się pytania i uwagi, czasem o charakterze dyskusyjnym:

1. W strukturze treści pracy nie wyróżniono rozdziału z celem, tezami i zakresem pracy. Informacje te są zawarte w treści rozdziału 1 Wstęp i podrozdziału 1.1 zatytułowanego „Wprowadzenie” i czytelnik musi je wyfusiwać z treści. Ponadto teza i cele pracy powinny wynikać z przeglądu aktualnego stanu wiedzy w obszarze problemu badawczego. Właściwy przegląd ogólny jest przedmiotem rozdziału 1.2 i później rozdziałach 2 i 3, gdzie autor opisuje fenomen zjawiska piezoelektrycznego oraz podstawy metody grafów i liczb strukturalnych. W ocenie recenzenta



niewłaściwe jest również zamieszczenie omówienia treści pracy w rozdziale 1.3, który jest w zasadzie streszczeniem pracy.

2. Istotnym osiągnięciem doktoranta jest opracowanie autorskiej metody modelowania dynamiki układów piezoelektrycznych z zastosowaniem metody grafów i liczb strukturalnych. Uzyskano nawet bardzo dobrą zgodność nowej metody modelowania z metodą referencyjną – macierzową. W rozdziale 4 w tabelach 4.9 i 4.10 autor przedstawił porównanie efektywności obliczeń numerycznych pod względem czasu trwania obliczeń i obciążenia pamięci wskazując, że sumarycznie nowy, zaproponowany własny model wypada gorzej w odniesieniu do metody referencyjnej przy ocenie wyników analizy odpowiedzi układu. Na stronie 96 autor rozprawy rezygnuje z metody analizy opartej na własnym algorytmie na rzecz analizy metodą macierzową. Czy ta ocena jest konieczna i właściwa na tym etapie weryfikacji metody i czy efektywność „informatyczna” ma znaczenie przy ocenie jakości obliczeń? Co skłoniło doktoranta do podjęcia takiej decyzji. Moim zdaniem doktorant powinien skupić się na dokładności metody pozostawiając kwestię optymalizacji „informatycznej” jako zadanie na przyszłość. Tym bardziej, że w dalszej części pracy do syntezy (projektowania) układów doktorant w dalszym ciągu używa własnej metody zaimplementowanej w programie komputerowym *Piezoelectric model synthesier*.

3. Uwagi w odniesieniu do badań eksperymentalnych:

- stosowanie napięcia sygnału wymuszającego 1Vpp wynika z zakresu układu pomiarowego przemieszczenia, jednak to napięcie stanowi zaledwie 0,7% zakresu napięć dla przyjętego przetwornika. Czy większa wartość napięcia sterowania nie spowoduje, że efekt wpływu np. sposobu klejenia będzie mniej znaczący?
- w badaniach eksperymentalnych przedstawionych na rysunkach 6,32, 6,33 i 6,34 widoczne są dwa lub kilka pików na wykresach odpowiedzi, z czego one mogą wynikać?
- w celu oceny poprawności modeli użytych do syntezy układów piezoelektrycznych wykorzystano dwie ścieżki projektowania wspomniane wcześniej. Przy porównaniu obu metod w odniesieniu do wyników pomiarów eksperymentalnych uzyskano dobrą zgodność co do częstotliwości jednak, jak wskazał sam doktorant, przemieszczenia charakteryzowały się błędami obliczeń w stosunku do wyników pomiarów. Autor zamieszcza zresztą dokładną analizę tych błędów. W uzasadnieniu doktorant wskazuje na niedoskonałości modelu w doniesieniu do rzeczywistych efektów związanych z masami elementów, ich sztywnościami czy efektem tłumienia. Czy możliwe jest wykorzystanie opracowanego programu jako systemu do wykonania obliczeń symulacyjnych np. poprzez oszacowanie (dobór) wartości własności materiału tak, aby uzyskać lepsze dopasowanie odpowiedzi układu syntetyzowanego do wyników eksperymentu. Możliwa była by wtedy obserwacja / analiza zmian np. w tłumieniu układu i poszukiwaniu lepszego modelu tłumienia.

## 5. Uwagi redakcyjne

Ogólnie rozprawa doktorska jest dobrze opracowana pod względem redakcyjnym, jest staranna i czytelna. Treść rozprawy jest spójna i ułożona logicznie, język pracy właściwy do problematyki pracy. Literatura opisana właściwie i poprawnie wykorzystana w treści pracy. Podział na części i rozdziały nie budzi zastrzeżeń z wyjątkiem sformułowanych wcześniej uwag do rozdziału 1. Rozprawa zawiera elementy oczekiwane w tego typu opracowaniach naukowych jak przegląd literatury, opis własnych rozwiązań, program badań, opis wykorzystanych materiałów i aparatury badawczej, prezentację i analizę wyników badań. Rysunki i opisy na nich są czytelne, informacje w tabelach proste w interpretacji.

W Tabeli 4.1 i Tabeli 4.2 (i niektórych dalszych) doktorant przeoczył błąd typowy dla prezentacji obliczeń uzyskiwanych metodami numerycznymi, prawdopodobnie kopiowanych z programów obliczeniowych. Stosowanie 5 miejsc znaczących po separatorze dziesiętnym w sytuacji gdy wartość parametru wynosi np. 138230,00000.

## 6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawioną rozprawę doktorską mgr inż. Jacka Haraziña pt. „Synteza i analiza złożonych układów piezoelektrycznych z uwzględnieniem metod klasycznych i nieklasycznych” oceniam pozytywnie.

Praca dotyczy zagadnień projektowania i analizy pracy przetworników piezoelektrycznych. Autor zaprezentował swoje oryginalne rozwiązanie postawionego problemu, gdzie jako rezultat powstał program komputerowy wspomagający obliczenia według zaproponowanych algorytmów. W pracy zaprezentowano bardzo dobrze przygotowane badania eksperymentalne oraz rzetelnie je przedstawiono i przeanalizowano. Dokonano również matematycznego modelowania zjawisk zachodzących w obiekcie badań. Autor rozprawy rozpoznał i zdefiniował problem badawczy, wykazał się stosowną wiedzą i umiejętnościami planowania badań i przeprowadzenia eksperymentu. Analizę i wnioski przeprowadzono i sformułowano w sposób poprawny, adekwatny do zagadnienia.

Jako najważniejsze osiągnięcie należy uznać opracowany model obliczeniowy do syntezy i analizy odpowiedzi przetworników piezoelektrycznych oraz obszerny zakres badań przeprowadzonych przez doktoranta.

Uważam, że zakres pracy został przez doktoranta wypełniony potwierdzając postawioną w pracy tezę przez co osiągnięto cel pracy.

Mając na uwadze przedstawione w recenzji aspekty stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Jacka Haraziña spełnia wymagania stawiane przez Ustawę „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. z 2018r., poz. 1668) i może być podstawą do nadania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna, dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych. Jednocześnie wnoszę o podjęcie dalszych działań w postępowaniu o nadanie stopnia doktora nauk technicznych i dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.

Prof. Roland Pawliczek

/podpis odręczny/

\*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)

Opole, 10.06.2024