

TŁUMACZENIE UWIERZYTELNIONE Z JĘZYKA ANGIELSKIEGO

RECENZJA

rozprawy mgr. inż. Joanny Rekas,

przedstawionej w celu uzyskania stopnia naukowego doktora

Temat rozprawy: **“WPŁYW PROTEZY ZE STOPU Z PAMIĘCIĄ KSZTAŁTU O CHARAKTERYSTYCE NIELINIOWEJ NA DRGANIA W UCHU ŚRODKOWYM PO REKONSTRUKCJI”**

Recenzent: Profesor Emil Manoach,

Instytut Mechaniki – Bułgarska Akademia Nauk, Sofia, Bułgaria

I. OPIS OGÓLNY PRZEDSTAWIONEJ ROZPRAWY

Rozprawa przedstawiona przez inż. J. Rekas, kandydatkę do uzyskania stopnia naukowego doktora, liczy 122 stron, na których zawarte zostały wstęp, sześć rozdziałów, wnioski, wykaz piśmiennictwa obejmujący 99 cytowanych prac, spis rycin i spis tabel. Głównym celem rozprawy jest wypracowanie metod określania dynamicznych zachowań ucha środkowego zrekonstruowanego z zastosowaniem protezy wykonanej ze stopu z pamięcią kształtu. W dążeniu do osiągnięcia głównego celu pracy rozwiązano szereg różnych problemów natury matematyczno-liczbowej oraz przeprowadzono interesujące badania eksperymentalne mające na celu uzyskanie charakterystyki zdrowego ucha środkowego.

W naukowej bazie danych SCOPUS odnalazłem cztery prace autorstwa Joanny Rekas. Wszystkie z nich dotyczą dziedziny związanej z tematem rozprawy. W trzech z nich pani Rekas jest wymieniona jako drugi autor, a w jednej jako czwarty autor. W rozprawie pojawia się jednak odniesienie wyłącznie do artykułu „Rusinek, R., Rekas, J., and Kecik, K. *Vibration analysis of a shape memory oscillator by harmonic balance method verified numerically. International Journal of Bifurcation and Chaos* 29, 03 (2019), 1930007”

II. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW

Rozprawa Pani Joanny Rekas poświęcona jest ważnemu zagadnieniu z zakresu biomechaniki związanemu z leczeniem ubytku słuchu. U podstaw tego problemu zdrowotnego może leżeć szereg przyczyn, jednak autorka, w swoich badaniach, skupiła się na uszkodzeniach biomechanicznych struktury ucha. W wielu przypadkach omawiany problem zdrowotny wiąże się z koniecznością zastąpienia uszkodzonej części ucha protezą.

W rozprawie proponuje się zastosowanie protezy wykonanej ze stopu z pamięcią kształtu. Wybór protezy mającej zastąpić tkankę biologiczną jest niezmiernie istotny ze względu na złożone właściwości materiałowe tkanki biologicznej.



Proteza wykonana ze stopu z pamięcią kształtu ma pewne zalety, niemniej oczywiste jest również ryzyko związane z jej stosowaniem.

Stopy z pamięcią kształtu mają silne i złożone właściwości nieliniowe, które mogą prowadzić do nieprawidłowości i zaburzeń w przekazywaniu dźwięku.

Powyższe fakty potwierdzają znaczenie teoretycznego badania procesów zachodzących w zrekonstruowanym uchu.

Budowa ucha jest dość złożona, przy czym w swojej pracy autorka ogranicza się do modeli i badań dotyczących protezy ucha środkowego.

W rozprawie szczegółowo przedstawiono stan badań poświęconych: modelom ucha środkowego człowieka, wariantom protez ucha środkowego, zrekonstruowanemu łańcuchowi kosteczek słuchowych. Osobno poddano krytycznemu przeglądowi prace poświęcone teoretycznemu modelowaniu stopów z pamięcią kształtu (SMA) oraz konstrukcjom wykonanym z takich materiałów.

Moim zdaniem przedstawiony w Rozdziale 2 przegląd wnosi duży wkład i znacznie pomaga w doprecyzowaniu analiz przeprowadzonych w kolejnych rozdziałach.

W Rozdziale 3 zaproponowano i opisano modele matematyczne ludzkiego ucha środkowego, protezy ze stopów z pamięcią kształtu oraz protezy ucha środkowego. Stworzony model jest układem masa-sprężyna, w którym masy połączone są z wykorzystaniem materiałów Kelvina-Voigta. Przedstawiono szczegółowe objaśnienie modelu matematycznego ze wskazaniem: które części ucha są modelowane przez masy, a które przez sprężyny i elementy tłumiące. W oparciu o właściwości różnych elementów ucha środkowego i badania innych badaczy, stworzono model zdrowego ucha środkowego jako model o trzech stopniach swobody składający się z trzech mas połączonych siedmioma sprężynami i elementami tłumiącymi. Ten matematyczny model zdrowego ucha środkowego został zapisany w formie macierzy i jest w pełni liniowy. Następnie, w oparciu i piśmiennictwo, autorka przyjmuje nieliniowość sześcienną więzadła obrączkowego.

Kolejnym krokiem jest stworzenie modelu protezy z pamięcią kształtu. Pani Rekas wykorzystała dobrze rozwinięty model wielomianowy zaproponowanym przez Falka w 1980 r. i zaadaptowała go na potrzeby rozważanego problemu.

Następnie autorka posłużyła się innym modelem stopu z pamięcią kształtu, uwzględniającym prędkość odkształcenia. Autorka posługuje się terminem „szybkość przemieszczenia” (ang. displacement velocity), jednak naukowcy powszechnie stosują termin „prędkość odkształcenia” (ang. strain rate), gdy naprężenia zależą nie tylko od odkształceń, ale również od prędkości odkształcenia. Takie modele są powszechnie stosowane w teorii plastyczności oraz w modelach ze stopów z pamięcią kształtu. Zastosowane w pracy równanie konstytutywne składa się z członu sześciennego prędkości odkształcenia, członów liniowego, kwadratowego i sześciennego odkształcenia oraz członów kwadratowego i sześciennego temperatury.

Następnie autorka stosuje te dwa modele (zależny od prędkości odkształcenia i niezależny od prędkości odkształcenia) do modelu o dwóch stopniach swobody (2 DoF) zrekonstruowanego ucha środkowego.

Aby uprościć analizę oraz uwzględniając fakt, że pierwszy mod rezonansowy jest najważniejszy, autorka sprowadza model do modelu o jednym stopniu swobody (1 DoF) - oscylatora nieliniowego z elementem ze stopu z pamięcią kształtu. Pod względem matematycznym model ten został przedstawiony jako równanie różniczkowe zwyczajne rzędu piątego.



Autorce udało się przeprowadzić eksperymentalne badanie struktury imitującej ucho środkowe z wykorzystaniem próbek ludzkiej kości skroniowej. Do pomiaru drgań posłużono się dopplerowskim skaningowym wibrometrem laserowym. Eksperyment umożliwił autorce poprawne określenie parametrów modelu.

W Rozdziale 5 pani Rekas przestudiowała opracowany w Rozdziale 3 model o jednym stopniu swobody (1 DoF). Najpierw poprawnie przeanalizowała stabilność punktów stałych w różnych temperaturach. Następnie zastosowała metodę równowagi harmonicznych, ograniczając się do jednej harmonicznej w celu znalezienia rozwiązań okresowych. Otrzymano krzywe rezonansowe dla trzech różnych temperatur. Następnie nieliniowe równanie różniczkowe zwyczajne zostało rozwiązane za pomocą oprogramowania MATLAB i Simulink. Skonstruowała wiele diagramów fazowych i diagramów bifurkacyjnych oraz wyciągnęła wnioski na temat ryzyka niepożądanych drgań chaotycznych.

W Rozdziale 6 przeprowadzono badanie numeryczne przedstawionego w Rozdziale 3 modelu o dwóch stopniach swobody (2 DoF). Przedstawiono szczegółowy schemat numeryczny Simulink. Parametry modeli zaczerpnięto z badań eksperymentalnych oraz z piśmiennictwa. W pkt. 6.2. przedstawiono obliczenia numeryczne dla modelu stopu z pamięcią kształtu niezależnego od prędkości odkształcenia, a w pkt. 6.3 obliczenia dla modelu stopu z pamięcią kształtu zależnego od prędkości odkształcenia. Uwzględniono przypadki modeli stopów z pamięcią kształtu opracowane przy zastosowaniu wielomianu rzędu 5 oraz wielomianu rzędu 3. Wykreślono krzywe rezonansowe, diagramy fazowe i diagramy bifurkacyjne. Na zakończenie przytoczono istotne wnioski dotyczące stosowalności różnych podejść w zależności od poziomu wzbudzenia, temperatury i tłumienia.

W przypadku modelu ze stopu z pamięcią kształtu zależnego od prędkości odkształcenia, algorytm numeryczny jest nieco bardziej złożony, a parametrami wpływającymi na odpowiedź zrekonstruowanego ucha środkowego są większe liczby. W związku z tym wyniki są ciekawsze i dają możliwość wyciągnięcia ważnych wniosków. W tym przypadku, główny rezonans jest przesunięty w stosunku do modelu ze stopu niezależnego od prędkości odkształcenia, przy czym przed głównym rezonansem dodatkowo pojawiają się niewielkie piki. Autorka dokonała szczegółowej analizy otrzymanych diagramów fazowych i bifurkacyjnych oraz wyciągnęła istotne z praktycznego punktu widzenia wnioski. Zmieniając wzbudzenie oraz inne parametry, autorka zidentyfikowała obszary, w których mogą występować drgania regularne i nieregularne, co jest niezmiernie ważne z medycznego punktu widzenia.

Przeprowadzone badanie stabilności punktów stałych jest w tym przypadku całkowicie adekwatne.



Na koniec, pani Rekas słusznie podzieliła wnioski na dwa rodzaje: naukowe i praktyczne. Dotyczą one głównie protez wykonanych ze stopów z pamięcią kształtu. Podzielam słuszność wniosków sformułowanych w Rozdziale 7.

III. UWAGI I ZALECENIA.

Ogólnie praca jest dobrze napisana, ma bardzo dobrą strukturę, a wyniki są bardzo dobrze zilustrowane. W moim przekonaniu główną wadą jest brak precyzji terminologicznej polegający na użyciu terminu „prędkość ugięcia” (ang. velocity of deflection) zamiast powszechnie ustalonego terminu „prędkość odkształcenia”(ang. strain rate). Ponadto, przedstawione w pkt. 3.23 i 3.25 rozprawy równania konstytutywne wyraźnie wskazują na zależność od prędkości odkształcenia.

Kolejną małą uwagę jest zastosowanie skrótu SMP przed jego wprowadzeniem na stronie 20.

Występują także inne bardzo drobne niedociągnięcia w niektórych wyrażeniach, ale są one znikome na tle dobrej ogólnej prezentacji rozprawy.

Uwagi te nie dotyczą meritum pracy i nie umniejszają wyników osiągniętych w toku rozprawy.

IV. PODSUMOWANIE

Rozprawa przedstawiona przez Panią Rekas dotyczy istotnego zagadnienia z zakresu biomechaniki. W niniejszej pracy naukowej pani Rekas wykazała się wiedzą i zrozumieniem wielu tematów z zakresu mechaniki, takich jak dynamika nieliniowa, wytrzymałość materiałów, mechanika eksperymentalna, czy biomechanika. Uzyskane wyniki mają oryginalny charakter, a także naukowe i praktyczne znaczenie. Zastosowane podejścia do modelowania rzeczywistego obiektu i szczegółowego badania jego zachowań dynamicznych dowodzą, że autorka posiada wystarczającą wiedzę, umiejętności i profesjonalizm, aby uzyskać stopień naukowo-dydaktyczny doktora w dziedzinie Inżynierii Mechanicznej.

Powyższe skłania mnie, aby gorąco rekomendować szanowanej Radzie Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna przy Politechnice Lubelskiej głosowanie za nadaniem mgr inż. Joannie Rekas stopnia naukowego doktora.

01.06.2022

Recenzent:

[podpis nieczytelny]

/Prof. Emil Manoach /

[W nawiasach kwadratowych kursywą przedstawiono uwagi tłumacza]

Repertorium nr 377/2022

Ja, Marek Niedźwiecki, tłumacz przysięgły języka angielskiego, wpisany na listę tłumaczy przysięgłych prowadzoną przez Ministerstwo Sprawiedliwości pod nr TP/36/09, poświadczam niniejszym zgodność powyższego tłumaczenia z treścią oryginału dokumentu w języku angielskim.

Chełm, 14 czerwca 2022 r.



Łódź, 10 czerwca 2022 r.

Dr hab. inż. Dariusz Grzelczyk
Politechnika Łódzka
Katedra Automatyki, Biomechaniki i Mechatroniki
ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR INŻ. JOANNY RĘKAS

„Influence of nonlinear shape memory prosthesis on middle ear vibrations after reconstruction”

(Wpływ nieliniowej charakterystyki protezy z pamięcią kształtu na drgania zrekonstruowanego ucha środkowego)

Uwagi wstępne

Podstawę formalną opracowania niniejszej recenzji rozprawy doktorskiej stanowi pismo Pana dr hab. inż. Jarosława Bieniasia, Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej, z dnia 25 marca 2022 roku, dotyczące wyznaczenia mnie przez Radę Dyscypliny na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Joanny Rękas. Wyrażam podziękowanie Wysokiej Radzie za powierzenie mi tego odpowiedzialnego zadania, którego podjąłem się w związku z moimi zainteresowaniami naukowymi związanymi zarówno z biomechaniką jak i dynamiką układów nieliniowych.

Recenzowana rozprawa doktorska napisana została w języku angielskim. Składa się ze spisu treści, streszczenia (napisanego również w języku polskim), siedmiu rozdziałów, bibliografii, spisu rysunków i spisu tabel. Praca zrealizowana została w Katedrze Mechaniki Stosowanej Politechniki Lubelskiej pod opieką naukową promotora Pana dr hab. inż. Rafała Rusinka, prof. uczelni. Praca współfinansowana była przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach projektu „Mechanics – international PhD study on Lublin University of Technology” nr POWR.03.02.00-00-I017/16.

Opisowa część rozprawy

Poruszana w niniejszej rozprawie doktorskiej tematyka badań dotyczy zagadnień związanych z rekonstrukcją uszkodzonego narządu słuchu człowieka. Istnieje kilka głównych przyczyn uszkodzenia aparatu słuchowego w zależności od miejsca uszkodzenia ucha, które jest dość skomplikowanym narządem. Niniejsza praca dotyczy przypadku uszkodzenia tzw. kowadełka – jednej z kosteczek ucha środkowego – i zastąpienia go protezą wykonaną ze stopu z pamięcią kształtu. Do tej pory w praktyce klinicznej jako materiał na protezę ucha środkowego stosowano głównie tytan i jego stopy. Zastosowanie w tej pracy na protezę materiału z pamięcią kształtu i zbadanie dynamiki ucha środkowego stanowić może postęp w tej dziedzinie i dać nadzieję na lepsze implanty osobom cierpiącym na schorzenia narządu słuchu.

Badania eksperymentalne prowadzone na kościach czy tkankach ludzkich są trudne i wymagają zachowania odpowiednich procedur badawczych. W związku z tym opracowane w niniejszej rozprawie odpowiednie modele matematyczne i symulacyjne wydają się być dobrą alternatywą do uzyskania odpowiedniej wiedzy przydatnej do leczenia schorzeń, projektowania oraz implementacji nowych protez fragmentów ucha środkowego. Zastosowany materiał z pamięcią kształtu charakteryzuje się możliwością kontroli własności mechanicznych w zależności od temperatury i naprężenia. Z drugiej jednak strony, nieliniowość charakterystyk mechanicznych tego typu materiałów może prowadzić do powstawania niepożądanych i szkodliwych zachowań chaotycznych kosteczek zrekonstruowanego ucha środkowego. Stąd też Autorka tej pracy postawiła sobie za główny cel zbadanie wpływu nieliniowej charakterystyki protezy wykonanej z materiału z pamięcią kształtu na drgania (i przenoszenie dźwięku) zrekonstruowanego ucha środkowego człowieka, co dobrze oddaje tytuł niniejszej rozprawy.

W pracy opracowane zostały modele dynamiczne układów mechanicznych o jednym i dwóch stopniach swobody odzwierciedlające kosteczki słuchowe ucha środkowego, a następnie przeanalizowane głównie numerycznie przy użyciu odpowiednich modeli symulacyjnych zaimplementowanych w środowisku Matlab-Simulink. Nieliniowość wspomnianych modeli wynika przede wszystkim z zastosowania materiału z pamięcią kształtu o nieliniowej charakterystyce opisującej zależność generowanej siły od odkształcenia i dlatego też podczas modelowania matematycznego uwaga została skupiona szczególnie na tym elemencie. Oprócz zależności siły od odkształcenia, uwzględniono też zależność siły od prędkości odkształcenia, co wskazane zostało przez Doktorantkę jako oryginalność tej pracy.

Na potrzeby obliczeń numerycznych wartości parametrów występujących w modelach matematycznych zaczerpnięte zostały z innych prac naukowych. Jednakże w ramach pracy wykorzystano również wyniki badań eksperymentalnych pozwalające uzyskać referencyjne charakterystyki ucha zdrowego (nieuszkodzonego). Wspomniane badania przeprowadzono na kościach skroniowych człowieka przy użyciu dopplerowskiego wibrometru laserowego, realizując w Katedrze Doktorantki grant naukowy przyznany przez Narodowe Centrum Nauki. W rezultacie opracowanych modeli matematycznych i symulacyjnych uzyskano wiele interesujących wyników numerycznych, głównie w postaci krzywych rezonansowych, portretów fazowych czy diagramów bifurkacyjnych, dla różnych wartości parametrów odzwierciedlających otoczenie i oddziaływania zewnętrzne działające na zrekonstruowane ucho środkowe człowieka. Analiza ta pozwoliła wyciągnąć wiele ważnych wniosków, zarówno czysto naukowych związanych z dynamiką układów nieliniowych, jak i praktycznych dotyczących projektowania protez ucha środkowego człowieka. I chociaż problem rekonstrukcji ucha środkowego jest znany i badany był w literaturze, to jednak z reguły analizowane były numerycznie lub eksperymentalnie modele wykorzystujące klasyczne protezy wykonane z tytanu lub jego stopów, których własności nie można zmieniać. Protezy wykorzystujące materiały z pamięcią kształtu mogą być w łatwiejszy sposób dopasowywane do indywidualnych potrzeb i pacjentów.

Ocena oryginalności rozwiązania problemu naukowego przedstawionego w rozprawie

Analiza podjętego w rozprawie problemu inżynierskiego poprzedzona została dość wnikliwym przeglądem literatury, w szczególności obecnym stanem wiedzy dotyczącym modeli

matematycznych ucha środkowego człowieka dostępnych w literaturze, a także stosowanych obecnie protez ucha środkowego. Jednym z najważniejszych kryteriów podziału opisanych modeli matematycznych była liczba stopni swobody układu mechanicznego modelującego ten narząd. Innym ważnym zagadnieniem podlegającym wnikliwej analizie literaturowej był przegląd materiałów z pamięcią kształtu i ich modeli, stosowanych też do zmiany własności dynamicznych innych układów biomechanicznych pod wpływem temperatury. Elementem stanowiącym w głównej mierze o nieliniowości rozważanych modeli matematycznych jest wspomniany materiał z pamięcią kształtu, i to jego zastosowanie wnosi istotny wkład na możliwości pojawienia się w tym układzie różnego rodzaju drgań nieliniowych. Do celów porównawczych własności materiału protezy ucha opisano przy użyciu funkcji wielomianowej trzeciego stopnia oraz funkcji wielomianowej piątego stopnia. Modelując materiał protezy uwzględniono zależność generowanej siły nie tylko od odkształcenia materiału, ale także od szybkości tego odkształcenia. To właśnie takie podejście do modelowania materiału z pamięcią kształtu w modelu o dwóch stopniach swobody ucha środkowego stanowi o oryginalności oraz innowacyjności tej pracy. Oba wspomniane powyżej modele przetestowane zostały dla dwóch zestawów parametrów, tj. dla parametrów odpowiadających zdrowemu narządowi (uzyskanych częściowo na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych), oraz parametrów dobranych z literatury i odpowiadającym uszkodzonemu narządowi słuchu (mniejsze wartości współczynników tłumienia). Ponadto, ważnym aspektem podnoszącym znacznie wartość tej pracy jest też wykorzystanie wyników badań eksperymentalnych jako wzorcowych charakterystyk określających własności dynamiczne nieuszkodzonego ucha. Wobec powyższych uwag można stwierdzić, że niniejsza rozprawa doktorska spełnia wymagania dotyczące oryginalności rozwiązania problemu naukowego.

Ocena ogólnej wiedzy teoretycznej Doktorantki w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Rozważany w recenzowanej rozprawie doktorskiej problem naukowy o charakterze utylitarnym stanowi kombinację zagadnień z zakresu biomechaniki i dynamiki układów nieliniowych. W ogólności układ pracy i jej strona formalna są poprawne. Informacje dobrane z literatury zostały dobrze zintegrowane i zinterpretowane, a wyciągnięte wnioski prawidłowo sformułowane. W mojej ocenie proporcje między częścią teoretyczną (opisową) pracy oraz badaniami własnymi są dobrze wyważone. Wstęp teoretyczny nie jest długi, ale zawarte tam informacje są wystarczające do dobrego zrozumienia dalszej części pracy. Takie zwarte przedstawienie najistotniejszych informacji wprowadzających do rozważanego problemu świadczy o dobrej wiedzy i przygotowaniu Doktorantki z tej dziedziny. Rozdział 3 rozprawy dotyczy modelowania matematycznego układów mechanicznych wielociałowych odwzorowujących strukturę kosteczek słuchowych ucha środkowego. Opis proponowanych modeli matematycznych oraz ich zapis w postaci bezwymiarowej świadczy o umiejętnościach dotyczących tworzenia i przekształcania modeli matematycznych. W kolejnym rozdziale 4 Autorka pracy przedstawia wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na kościach skroniowych człowieka zgodnie z otolaryngologiczną procedurą przy użyciu dopplerowskiego wibrometru laserowego. Najistotniejsze umiejętności i największa wiedza Doktorantki z zakresu dyscypliny Inżynieria Mechaniczna ujawniły się w rozdziałach 5 i 6. W rozdziałach

tych modelowano charakterystykę materiału z pamięcią kształtu, wyznaczono punkty stałe układu, znaleziono przybliżone rozwiązania okresowe, opracowano modele symulacyjne analizowanych układów w środowisku Matlab-Simulink oraz przeprowadzono zakrojoną na szeroką skalę analizę numeryczną wybranych układów dynamicznych. Jeśli chodzi o wspomnianą analizę numeryczną, przeprowadzona została ona przy wykorzystaniu standardowych narzędzi stosowanych do analizy układów nieliniowych takich jak krzywe rezonansowe, portrety fazowe czy diagramy bifurkacyjne. Na uwagę zasługuje również prawidłowy dobór parametrów kontrolnych charakteryzujących środowisko i oddziaływania zewnętrzne działające na zrekonstruowane uch środkowe człowieka w normalnych warunkach. Odpowiednio dobrane wartości parametrów analizowanych układów dynamicznych pozwoliły w zwięzły sposób przedstawić różnorodność rodzajów drgań tych układów. Zwieńczeniem przeprowadzonych przez Autorkę rozprawy badań numerycznych były: sprawdzenie wpływu różnych wielkości fizycznych (głównie wymuszenia zewnętrznego i temperatury) na odpowiedzi badanych układów; wykazanie istotnego wpływu zmian parametrów opisujących protezę na działanie całego układu (bifurkacje rozwiązań); pokazanie jakościowej różnorodności uzyskiwanych odpowiedzi dynamicznych układu o dwóch stopniach swobody w zależności od uwzględnienia bądź nieuwzględnienia zależności siły generowanej przez materiał z pamięcią kształtu od prędkości jego odkształcenia.

W dniu opracowania niniejszej recenzji na podstawie informacji zawartych w bazie Scopus Doktorantka była współautorką 5 artykułów naukowych tematycznie związanych z rozprawą doktorską, w tym 4 artykułów opublikowanych w renomowanych i wysoko punktowanych czasopismach posiadających wskaźnik *Impact Factor*, a Jej indeks Hirscha (bez auto cytowań) był równy 3. Wobec powyższych uwag dotyczących rozprawy doktorskiej i aktualnego dorobku naukowego można stwierdzić, że na tym etapie kariery naukowej Doktorantka posiada szeroką wiedzę i bardzo dobre umiejętności przydatne w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna, które pozwalają na samodzielne prowadzenie pracy naukowej.

Uwagi edytorskie

Pomimo wysokiej oceny pracy jako całości, Autorka nie ustrzegła się drobnych błędów edytorskich, które nie zmniejszają wartości merytorycznej tej rozprawy, ale ich uwypuklenie może pomóc uniknąć podobnych niedociągnięć w przyszłej pracy naukowej. I tak na przykład zauważyć można niejednolity sposób cytowania pozycji literaturowych, np. na str. 9, 10 i 15. Na stronie 44 znajduje się niezrozumiały zwrot „main equation R”. Nieprawidłowa jest anglojęzyczna forma liczby mnogiej odnoście macierzy i wartości maksymalnych (powinno być raczej: „matrices” zamiast „matrixes” – str. 22, oraz „maxima” zamiast „maximums” – str. 41). W niektórych miejscach w pracy brak jest spacji między wartościami liczbowymi parametrów a ich jednostkami (np. str. 64, 70, 82). W równaniu (3.1) dla formalności po prawej stronie tego równania powinien być wektor zerowy a nie zwykłe zero jako skalar. Na stronie 47 niepoprawny matematycznie skrót myślowy: $\sin=0$ i $\cos=0$. Na stronie 100 brak jednostki wymuszenia Q . W tabeli 5.1 zapis wartości parametru γ może być mylący. Wartość tego parametru podana jest jako 4.710^5 , przy czym zapewne chodziło tutaj o wartość równą $4.7 \cdot 10^5$. W równaniu (3.38) powinno być α zamiast α_1 .

Drobne uwagi merytoryczne

- Zgodnie z rys. 3.1 sztywność k_{ISJ} i tłumienie c_{ISJ} reprezentują połączenie między kowadełkiem i strzemiączkiem, a nie między młoteczką i strzemiączkiem jak podano w opisie na stronie 21. Na rysunku zaznaczone są parametry k_{AL} i k_{AL3} , a w równaniu (3.6) są parametry k_{AL} , k_{AL2} i k_{AL3} . Dla formalności zatem na tym rysunku również powinien być zaznaczony parametr k_{AL2} , który występuje w (3.6) i (3.7). Ponadto, amplituda wymuszenia harmonicznego oznaczona jest symbolem Q , podczas gdy we wzorze (3.7) jest oznaczona symbolem Q_0 . Jeszcze inne pewne nieścisłości w indeksach występują we wzorze (3.7), np. w części opisującej nieliniową zależność siły od przemieszczenia. We wzorze (3.8) również znaleźć można drobne nieścisłości, np. brak znaku \sim przy k_{32} lub też niepotrzebny indeks górny M przy innym parametrze.
- We wzorze (3.13), w celu jego uproszczenia, wprowadzony został współczynnik e , którego znaczenia nie trudno się domyślić, jednakże który dla formalności powinien być jasno zdefiniowany.
- W równaniu (3.31) brak jest członu nieliniowego ze zmienną x_2 w trzeciej potęgze.
- Na rysunku 5.1 (str. 41) w legendzie nie ma podanej poprawnej jednostki temperatury. Podobnie, na stronie 53, Autorka pisze o temperaturze 40 stopni (co odpowiada temperaturze ciała człowieka podczas gorączki), ale należało jasno napisać, że chodzi o temperaturę wyrażoną w stopniach Celsjusza.
- Rysunek 3.5 przedstawia model o dwóch stopniach swobody odzwierciedlający zrekonstruowane ucho środkowe przy pomocy protezy (której masę pominięto) z materiału z pamięcią kształtu. W równaniach ruchu (3.29) opisujących ten model nie zdefiniowano w sposób jasny zmiennej X oznaczającej względne przemieszczenie między masą m_M i masą m_S . Ponadto, amplituda wymuszenia harmonicznego oznaczona jest symbolem P_0 , podczas gdy w modelu opisującym przedstawiony układ dynamiczny amplituda wymuszenia oznaczona jest symbolem Q .
- We wzorach (3.32) symbol m został wykorzystany jako stosunek masy m_S do masy m_M (liczba bezwymiarowa). Z kolei, w uproszczonym modelu zrekonstruowanego ucha środkowego o jednym stopniu swobody (rys. 3.6) m oznacza masę w kilogramach. W jednym opracowaniu naukowym (artykuł, rozdział itp.) należy unikać oznaczania różnych wielkości fizycznych za pomocą tych samych symboli matematycznych.
- Brak wyjaśnienia symboli $v_0^* - v_5^*$ na str. 43, wspomnianych bezpośrednio po wzorach (5.2).

Główne uwagi merytoryczne

- Równania (3.7) przedstawiają model matematyczny nieuszkodzonego ucha środkowego człowieka zapisany w postaci wymiarowej. Równania (3.10) przedstawiają ten sam model matematyczny zapisany w postaci bezwymiarowej. Jedną z zalet zapisu modeli matematycznych układów dynamicznych w postaci bezwymiarowej jest redukcja ilości parametrów opisujących układ, która przy umiejętnym doborze odpowiednich współczynników może być znaczna. Z postaci równań (3.10) widać, że liczba parametrów opisujących układ w postaci bezwymiarowej zmniejszyła się tylko o jeden. Tak więc korzyści płynące z przejścia do postaci bezwymiarowej nie zostały tutaj w pełni wykorzystane. Z drugiej strony, jeśli ten model był wykorzystany tylko do

walidacji wybranych parametrów za pomocą eksperymentu, to czy przejście do postaci bezwymiarowej było potrzebne? Podobne uwagi można wysunąć do modelu zrekonstruowanego ucha środkowego o dwóch stopniach swobody przedstawionego w postaci wymiarowej w (3.29) oraz w postaci bezwymiarowej w (3.31).

- W rozdziale 4 opisana została procedura badań eksperymentalnych własności dynamicznych ucha środkowego zdrowego człowieka w celu uzyskania charakterystyki odniesienia do dalszych celów porównawczych. Wspomniane badania realizowane były w ramach grantu OPUS nr 2014/13/B/ST8/04047 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki, którego kierownikiem był promotor pracy doktorskiej, dr hab. inż. Rafał Rusinek. Jaki był udział Doktorantki w tych badaniach z wykorzystaniem dopplerowskiego wibrometru laserowego? Czy Doktorantka była współwykonawcą wspomnianego projektu badawczego, czy skorzystała z uzyskanych i opracowanych wcześniej wyników badań eksperymentalnych?
- W podrozdziale 6.1 Autorka przeprowadza symulację numeryczną modelu zrekonstruowanego ucha środkowego o dwóch stopniach swobody opracowanego i sprowadzonego do postaci bezwymiarowej w rozdziale 3. Nasuwa się zatem pytanie w jakim celu dokonywano zapisu tego modelu do postaci bezwymiarowej, jeśli wyniki symulacji numerycznych przedstawiane są w postaci wymiarowej? Podobnie w podrozdziale 6.3 Autorka bada numerycznie model zrekonstruowanego ucha środkowego podając wartości parametrów bezwymiarowych użytych do symulacji, natomiast wyniki przedstawione są w postaci wymiarowej.

Wniosek końcowy

Wobec wszystkich przedstawionych powyżej uwag stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Joanny Rękas spełnia warunki określone w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jednolity Dz. U. z 2016 r. poz. 882 ze zmianą; Dz. U. z 2016 r. poz. 1311) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26 września 2016 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2016 r. poz. 1586) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej o dopuszczenie Pani mgr inż. Joanny Rękas do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

RECENZENT

Dariusz Grelczyk

REVIEW

on the dissertation of Msc. Eng. Joanna Rekas,
for obtaining the scientific degree "Doctor"

Dissertation topic: " **INFLUENCE OF NONLINEAR SHAPE MEMORY PROSTHESIS ON MIDDLE EAR VIBRATIONS AFTER RECONSTRUCTION**"

Reviewer: Professor Emil Manoach,

Institute of Mechanics – Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

I. General description of the presented dissertation

The presented dissertation for obtaining the scientific degree "Doctor" from the candidate Eng. J. Rekas has a volume of 122 pages, including an introduction, six chapters, a conclusion and literature from 99 cited works, lists of figures and list of tables. The main goal of the dissertation is to develop approaches for determining the dynamic behaviour of the middle ear reconstructed with a prosthesis made of a shape memory alloy. In pursuit of this main goal, various problems of the mathematical and numerical character have been solved and interesting experimental study to get the intact middle ear characteristic have been conducted.

I found four papers listed in the scientific database SCOPUS with Joanna Rekas's authorship. All of them are in the field of the dissertation topic. In 3 of them Mrs Rekas is second author and in one is forth author. In the dissertation however is referenced only to the paper "*Rusinek, R., Rekas, J., and Kecik, K. Vibration analysis of a shape memory oscillator by harmonic balance method verified numerically. International Journal of Bifurcation and Chaos 29, 03 (2019), 1930007*"

II. GENERAL CHARACTERISTICS OF THE ACHIEVED RESULTS

The dissertation of Mrs Joanna Rekas is dedicated to an important biomechanical problem concerning treatment of hearing loss. This disease can be provoked by many reasons, but the author has studied the one caused by damaged in biomechanical structure of the ear. In many case this medical problem requires to replace the damaged part of the ear with a prosthesis.

The use of prosthesis made of shape memory alloy is suggested in the dissertation. The choice of the prosthesis which will replace a biological tissue is very important because the biological

oscillator with a SMA element. The mathematically this model is presented as an ODE with nonlinearity of 5th degree.

The author of the thesis has managed to perform an experimental study of a structure imitating the middle ear using specimens of the human temporal bone. Scanning laser Doppler vibrometer is used to measure the vibrations. The experiment allows the author to identify correctly the parameters of the model.

In *Chapter 5* Mrs Rekas has studied the developed in Chapter 3 1 DoF model. First, she correctly has analysed the stability of the fixed points at different temperatures. Then she has applied the Harmonic balance method limited to one harmonic in order to find periodic solutions. The resonance curves for three different temperatures are obtained. Then the nonlinear ODE is solved by using MATLAB and Simulink software. She constructed a lot of phase diagrams and bifurcations diagrams and made conclusions about the risks of the undesired chaotic vibrations.

The 2 DoF model presented in Chapter 3 was numerically explored in *Chapter 6*. Detailed Simulink scheme of the numerical procedure is given. The parameters of the models are taken from the experimental research and from the literature. In *Section 6.2*. are presented the numerical calculation for strain rate independent SMA and in *Section 6.3* - the ones for strain rate dependent SMA. Successfully are considered the cases when the SMA is modelled with polynomial of 5th order and with polynomial of 3th order. Resonance curves, phase diagrams and bifurcation diagrams are plotted. At the end important conclusions are invoked concerning the applicability of the different approach depending on the level of excitation, the temperature and damping.

In the case of strain rate dependent SMA the numerical algorithm is a little more complex and the parameters which influence the response of the reconstructed middle ear are bigger number. Correspondingly, the results are more interesting and they give possibility for important conclusions. In this case, the main resonance is shifted in comparison with the strain rate independent case, but in addition, small peaks appear before the main resonance. The author has made detailed analysis of the obtained phase and bifurcations diagrams and has drawn important from the practical point of view conclusions. Varying the excitation and other parameters the author has found areas where regular and irregular vibration can occur which is very important from the medical point of view.

Completely adequate is the study of the stability of the fixed points conducted for this case.

tissues has complex material properties. The prosthesis made of shape memory alloy could have some advantages but the risks of use of such prosthesis is also obvious.

The shape memory alloys have strong nonlinear properties and these complex properties could lead to irregularities and chaos in the sound's transferring.

These facts show the importance of the theoretical study of the processes arising in the reconstructed ear. The structure of the ear is rather complex, but the author's work is limited to the modelling and studying the **middle ear** having a prosthesis.

The dissertation presents in detail the state of research on the problem: Human middle ear models, possible prosthesis in the middle ear, reconstructed ossicular chain. Separately the works devoted to theoretical modelling of shape memory alloys (SMA) and structures made of such materials are critically reviewed.

In my opinion the presented review in Chapter II is a contribution and helps a lot to clarify the analyses made in the next Chapters.

In Chapter III mathematical models are proposed and described of the human middle ear, a shape memory prosthesis and a prosthetic middle ear. The created model is a masses-springs model - connected masses by Kelvin–Voigt materials. A detailed explanation of the mathematical model is given: which parts of the ear are modelled by masses and which ones by springs and damping elements. Based on the properties of the different elements of the middle ear and the studies of the other researchers the intact middle ear is modelled as a 3 degree of freedom model consisted of three masses connected with seven springs and damping elements. This mathematical model of intact middle ear is written in matrix form and it is fully linear. Then, based on the references, the author accepts a cubic nonlinearity of annular ligament.

The next step is to model the shape memory prosthesis. Mrs Rekas uses the well-developed polynomial model proposed by Falk, 1980 and adopted it to the considered problem.

Then, the author of the thesis adopted another model of SMA considering the strain rate. The author uses term „displacement velocity”, but usually the scientists use the terms “strain rate” when the stresses depend not only on the strains but from the rate of the strain . Such models are widely used in theory of plasticity and in the models of SMA. The constitutive equation used in the thesis consist of cubic term of strain rate, linear, quadratic and cubic terms of the strain and quadratic and cubic terms of the temperature.

Then the author applies these two models (strain rate dependent and strain rate independent) to 2 DoF model of the reconstructed middle ear.

In order to simplify the analysis and considering the fact that the first resonance mode is the most important, the author reduces the model to 1 DoF model - a non-linear

Finally, Mrs Rekas correctly has divided conclusions to two types: scientific and practical. They are focussed mainly on the SMA prosthesis. I agree with conclusions defined in *Chapter 7*.

III. NOTES AND RECOMMENDATIONS.

Generally, the thesis is well written, very well organized and the results are very well illustrated.

The main shortcoming for me is the terminological inaccuracy using “velocity of deflection” instead of the established term “strain rate”. Moreover, the constitutive equations used in the thesis (3.23) and (3.25) clearly show the dependence on the strain rate.

Another small remark - the abbreviation SMP is used before its introduction on page 20.

There are also other very small shortcomings in some expressions, but they are negligible against the background of the good overall presentation of the dissertation

These remarks are not on the merits of the work and do not detract from the results achieved by the dissertation.

IV. CONCLUSION

The presented dissertation of Ms. Rekas treats important biomechanical problem. In this study Mrs Rekas show knowledge and understanding in several topics in mechanics as nonlinear dynamics, mechanics of material, experimental mechanics, biomechanics. The obtained results are original and they have scientific and practical significance. The implemented approaches for modelling a real object and studying its dynamic behaviour in details shows that the author has mastered enough knowledge, skills and professionalism to obtain the educational and scientific degree "Philosophy Doctor" in the field of **Mechanical Engineering**.

All this gives me reason to strongly recommend to the respected Scientific Discipline Council of Mechanical Engineering at Lublin University of Technology to vote for the award of the scientific degree "Doctor" to master-engineer Mrs Joanna Rekas.

01.06.2022

Reviewer:



/Prof. Emil Manoach /

Mgr inż. Joanna Rękas

Tytuł rozprawy w języku angielskim: „Influence of nonlinear shape memory prosthesis on middle ear vibrations after reconstruction”.

Tytuł rozprawy w języku polskim: „Wpływ nieliniowej charakterystyki protezy z pamięcią kształtu na drgania zrekonstruowanego ucha środkowego”.

Streszczenie w języku polskim

W pracy pt. „Wpływ nieliniowej charakterystyki protezy z pamięcią kształtu na drgania zrekonstruowanego ucha środkowego” dokonano analizy dynamiki układów ucha środkowego z protezą wykonaną z materiału z pamięcią kształtu. Przeanalizowano różne modele protez, biorąc pod uwagę podstawowe ich parametry. Modele ucha przedstawione w pracy to modele o jednym stopniu swobody (1-DOF) i dwa modele o dwóch stopniach swobody (2-DOF). W pierwszym proteza opisana jest funkcją wielomianową 5-tego rzędu, gdzie siła zależy tylko od ugięcia. W drugim natomiast, siła zależy również od prędkości odkształcenia. Wyprowadzono różniczkowe równania ruchu dla wszystkich modeli, a na podstawie tych równań wykonano symulacje numeryczne oraz obliczenia analityczne. Sprawdzone wpływ różnych parametrów na przedstawione modele, głównie wpływ temperatury i zewnętrznego wymuszenia, ale także innych parametrów protezy. Badanie wpływu temperatury na przedstawione modele jest bardzo istotne ze względu na wykorzystanie materiału z pamięcią kształtu. Zmiany w takim materiale zachodzą głównie przy zmianie temperatury i odkształcenia. Okazało się, że parametry protezy mają ogromny wpływ na odpowiedź badanego układu. Zaobserwowano zarówno odpowiedzi: regularne (zwłaszcza przy niskich wartościach zewnętrznego wymuszenia) oraz nieregularne (przy wyższych wartościach). Drgania regularne są bardzo pożądane z punktu widzenia wykorzystania badanej protezy w otolaryngologii. Na podstawie wykonanych obliczeń numerycznych wykazano, że temperatura nie ma wpływu na układ w przypadku niskich zakresów zewnętrznego wymuszenia. Ponadto, sprawdzono również zachowanie ucha, w którym wykorzystano model protezy uwzględniający prędkość odkształcenia. Jest to nowatorski przypadek zastosowania w modelu zrekonstruowanego ucha środkowego o dwóch stopniach swobody. W celu uogólnienia wyników badań porównano efekt wymuszenia od małej i dużej

amplitudy wymuszenia. Aby uzyskać charakterystyki referencyjne ucha zdrowego przeprowadzono badania eksperymentalne na kościach skroniowych człowieka zgodnie z otolaryngologiczną procedurą przy użyciu Dopplerowskiego Wibrometru Laserowego. Na podstawie badań eksperymentalnych, numerycznych i analitycznych pokazano ciekawe zjawiska dynamiczne zachodzące w zrekonstruowanym uchu środkowym, takie jak: harmoniczne, okresowe i chaotyczne drgania kosteczek słuchowych w zależności od parametrów układu.

Mgr inż. Joanna Rękas

Tytuł rozprawy w języku angielskim: „Influence of nonlinear shape memory prosthesis on middle ear vibrations after reconstruction”.

Tytuł rozprawy w języku polskim: „Wpływ nieliniowej charakterystyki protezy z pamięcią kształtu na drgania zrekonstruowanego ucha środkowego”.

Streszczenie w języku angielskim

In the dissertation entitled "Influence of nonlinear shape memory prosthesis on middle ear vibrations after reconstruction", the dynamics of the middle ear with the prosthesis made of shape memory alloy (SMA) has been analysed. Different models of prostheses has been proposed taking into account different aspects of the systems. The models of reconstructed middle ear, presented in this paper, are 1-DOF (one degree of freedom) and two models of 2-DOF. In the first one, the prosthesis is described by 5-th order polynomial where the force depends only on deflection of the shape memory prosthesis. In the second one, the prosthesis characteristic depends also on deflection velocity. The differential equations of motion for all models has been derived and based on these equations, numerical simulations and analytical calculations has been performed. The influence of various parameters on the models has been checked, mainly the influence of temperature as well as external excitation. The study of the influence of temperature on the system is very important due to the use of the middle ear prosthesis material made of shape memory alloy. Changes in such a material occur mainly when temperature changes. It turned out that the given parameters have a huge influence on the response of the system. Both regular (especially at low values of external excitation) and irregular (at higher values of external excitation) responses have been observed. As far as the regular response has been concerned, it was very desirable from the point of view of using such a prosthesis in the otolaryngology. Based on the numerical calculations performed, it has been shown that the temperature has no effect on the system for low ranges of external excitation. Furthermore, the behaviour of the model in which the middle ear prosthesis has been used, taking into account the external excitation and main prosthesis parameters, has also been checked. This is a novel case study in terms of the research scope that contains a new idea of prosthesis described mathematically by the polynomial velocity

dependence. In order to compare the results low and high values of the external excitation and applied. Moreover, experimental studies have been also carried out to obtain reference characteristics of the healthy ear, that has been compared to numerical outcomes. The experiment has been prepared for the human temporal bone according to the otolaryngological procedure. The frequency response function (FRF) of the intact ear has been obtained from the Laser Doppler Vibrometry. The experimental, the numerical and analytical research have shown rich dynamics of the reconstructed middle ear where harmonic, regular and chaotic behaviour of the ossicles are found depending on system parameters.