

Gdynia, 25.11.2024 r.

Prof. dr hab. inż. Lech Murawski  
Kierownik Katedry Podstaw Techniki  
Wydziału Mechanicznego  
Uniwersytetu Morskiego w Gdyni

## **Recenzja**

### **rozprawy doktorskiej mgr. Arkadiusza Charuka**

pt.:

„Modelowanie metodą elementów skończonych właściwości dynamicznych paneli strukturalnych przeznaczonych do produkcji mebli dla jednostek pływających”

Podstawą do opracowania recenzji jest Umowa o Dzieło zawarta pomiędzy Zachodniopomorskim Uniwersytetem Technologicznym w Szczecinie a prof. dr. hab. inż. Lechem Murawskim.

#### **1. Ocena trafności doboru tematyki, celu i zakresu rozprawy**

Autor rozprawy doktorskiej przeprowadził badania mające na celu opracowanie metodyki modelowania właściwości dynamicznych kompozytów przekładkowych, przy wykorzystaniu metody elementów skończonych. Autorowi przyświecał cel polegający na opracowaniu metod modelowania, które ułatwiłyby projektowanie i budowę lekkich, nowatorskich mebli dla jednostek pływających. Meble te miałyby dobre charakterystyki dynamiczne, przy uwzględnieniu specyficznych warunków eksploatacyjnych występujących na morzu. Zdaniem recenzenta zaprezentowana w pracy metodyka modelowania wykracza poza tytułowe zastosowanie – powstała metodyka ma charakter uniwersalny, możliwy do zastosowania w innych dziedzinach techniki.

Szeroki przegląd literatury wykazał, że istnieje niewiele prac dotyczących modelowania właściwości dynamicznych paneli strukturalnych oraz modelowania połączeń tychże paneli. Ponadto nieznanne są prace związane z modelowaniem struktur konstrukcyjnych złożonych z wspomnianych paneli, definiujące ich globalne właściwości dynamiczne. Autor rozprawy podjął się więc rozwiązania oryginalnego problemu naukowego o silnym utylitarnym ukierunkowaniu.

Przedstawiona rozprawa liczy 143 stron i ujęta jest w siedmiu rozdziałach. Obszerna, trafnie dobrana i aktualna bibliografia liczy 118 pozycji. Po rozdziale wprowadzającym, autor rozprawy przedstawił szeroki i dogłębny przegląd stanu zagadnienia liczący 11 stron. Przegląd literatury obejmuje problematykę związaną z budową dostępnych na rynku

kompozytów z uwzględnieniem ich różnorodności. Głównym tematem tego rozdziału jest przegląd stosowanych metod badań eksperymentalnych oraz metod modelowania kompozytów przekładkowych; włącznie z panelami z drewna i sklejką drewnianą. Rozpoznanie metod zostało uzupełnione o zebranie trudnodostępnych danych materiałowych. We wnioskach z przeglądu literatury autor poprawnie ocenił istniejący stan wiedzy oraz istniejące nisze, w badanej dziedzinie nauki. Dzięki temu autor poprawnie określił kierunki prac badawczych, które powinny być zrealizowane w postawionym problemie naukowym.

W następnym rozdziale został omówiony cel i zakres pracy. Zostały tam też zdefiniowane dwie tezy rozprawy doktorskiej. Autor postawił sobie szeroki zakres pracy obejmujący identyfikację eksperymentalną i budowę modelu MES czterech grup kompozytów (o dużej różnorodności): wielowarstwowy kompozyt przekładkowy z włókna szklanego, kompozyt przekładkowy z rdzeniem z trójwymiarowego włókna szklanego, aluminiowy kompozyt przekładkowy z rdzeniem w kształcie plastra miodu oraz kompozyt - sklejka topolowa. Autor rozprawy opracował nie tylko szczegółową metodykę modelowania wybranych kompozytów ale również okucie mebli, połączeń paneli kompozytowych oraz metodykę modelowania całej konstrukcji czyli mebla.

Głównym merytorycznym rozdziałem rozprawy doktorskiej jest rozdział piąty i szósty, zatytułowany „Modelowanie właściwości dynamicznych paneli kompozytowych” oraz „Modelowanie właściwości dynamicznych mebli”. Pierwszy etap przedstawionej metodyki modelowania dotyczył kompozytów przekładkowych o standardowych wymiarach. Celem prac było uzyskanie zgodności strukturalnej oraz zgodności charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych pomiędzy badaniami pomiarowymi a opracowanymi modelami matematycznymi MES. Została również wykonana walidacja dla paneli tego samego typu, różniących się wymiarami. W kolejnym etapie badań opracowano modele okucie stosowanych w rozpatrywanych konstrukcjach. W trzecim etapie analiz rozwiązano niebanalny problem modelowania sposobu łączenia paneli kompozytowych pomiędzy sobą. W ostatnim, etapie zaproponowanej metodologii przedstawiono sposób modelowania kompletnego mebla, który powstał w wyniku połączenia modeli o zidentyfikowanych parametrach uzyskanych w poprzednich trzech etapach prac autora rozprawy. Przedstawione metody identyfikacji charakterystyk dynamicznych badanych paneli pozwoliły na uzyskanie wiarygodnych modeli substruktur, a następnie na budowę rzetelnych modeli całych mebli. Cennym elementem pracy jest weryfikacja opracowanej metody modelowania przeprowadzona na obiektach rzeczywistych. Przeprowadzona dla każdego przypadku walidacja eksperymentalna potwierdziła słuszność stosowanej metodologii. Osiągnięte modele numeryczne cechują się zgodnością częstotliwości i postaci drgań własnych oraz wysokim stopniem odzwierciedlenia przebiegu częstotliwościowych funkcji przejścia.

Praca kończy się podsumowaniem i wnioskami, wykazem wykorzystanej literatury spisem rysunków i tabel. Cennym elementem pracy są załączniki w których przedstawiono szczegóły badań własności materiałowych kompozytów, weryfikacji zasady wzajemności Maxwella a nawet analizy wpływu kształtów elementów skończonych, przeznaczonych do wykonania dyskretyzacji okładzin paneli, na dokładność obliczeń MES.

Reasumując dobór tematyki rozprawy doktorskiej jest prawidłowy; jest on bardzo ciekawy zarówno z punktu widzenia badań naukowych jak i użytecznych. Zakres pracy został określony poprawnie. Na wyróżnienie zasługuje rozległość badań: obok badań laboratoryjnych przeprowadzono oryginalną analizę modeli matematycznych różnych paneli kompozytowych ich połączeń, okuć oraz całych konstrukcji – mebli. Przeprowadzono weryfikację tezy rozprawy na obiektach rzeczywistych. Celem rozprawy było opracowanie uniwersalnej metodyki modelowania właściwości dynamicznych kompozytów przekładkowych i wykonanych z nich mebli. Jest to zadanie ambitne i ważne, ponieważ za pomocą względnie łatwej i taniej metodyki obliczeń numerycznych, jest możliwe zaprojektowanie lekkich i funkcjonalnych konstrukcji (również okrętowych) o dobrej odporności na drgania mechaniczne. Opracowanie nowej metodyki projektowania mebli ma również istotne znaczenie ekonomiczne. Tezy pracy mówiące o możliwości poprawy przewidywania modelowego własności dynamicznych paneli kompozytowych oraz całych mebli zostały postawione prawidłowo.

## **2. Ocena merytoryczna rozprawy**

### **2.1. Elementy oryginalne i wartościowe**

Najbardziej wartościowymi i oryginalnymi elementami pracy są następujące osiągnięcia:

- opracowanie uniwersalnej metodyki modelowania MES właściwości dynamicznych kompozytów przekładkowych różnych typów;
- przeprowadzenie badań doświadczalnych i modelowych kompozytów przekładkowych określających ich szczegółowe charakterystyki dynamiczne;
- przeprowadzenie analiz wpływu parametrów paneli na ich właściwości dynamiczne;
- opracowanie metodyki modelowania mebli kompozytowych z uwzględnieniem efektu synergii.

Należy podkreślić, że praca ma walory zarówno naukowe jak i praktyczne - użyteczne. Pierwszy z tych aspektów dotyczy głębszego zrozumienia zjawisk zachodzących w strukturach kompozytowych, możliwości synergicznego wykorzystania właściwości użytych materiałów oraz opracowania efektywnej metodyki obliczeniowej do modelowania ich właściwości dynamicznych. Drugi aspekt skupia się głównie na możliwości wpływania na projektowane, docelowe właściwości mebli wykonanych z kompozytów. Należy podkreślić, że jest to doktorat wdrożeniowy, który będzie miał bezpośrednie zastosowanie w przemyśle okrętowym.

Prawidłowa jest metodologia prowadzenia badań. Wynika to zapewne z bardzo dobrze przeprowadzonego przeglądu literatury (recenzent zdaje sobie sprawę że nie jest to jedyna przyczyna – doświadczenie autora i promotora jest wręcz ważniejsze). Szczególnie cenne jest połączenie teoretycznych analiz matematycznego modelu struktur kompozytowych z badaniami pomiarowymi rzeczywistych obiektów w laboratorium. Takie rozwiązanie postawionego problemu świadczy o dużej dojrzałości badawczej doktoranta.

Z uznaniem należy zauważyć dużą solidność i uczciwość badawczą doktoranta. W wyniku analiz autor poprawnie określa mocne i słabe strony opracowanej metodyki modelowania i badań analizowanych kompozytów. Określa również zakres stosowalności metody. Analiza wyników oraz proces dostrajania modelu numerycznego do pomiarów jest wiarygodny i bardzo rzetelny. Autor rozprawy świadomie stosuje różne modele MES badanych kompozytów. Stosuje różne typy elementów skończonych dla różnych paneli, począwszy od powłok do elementów trójwymiarowych i sztywnych powiązań wybranych stopni swobody węzłów (RGB). Bardzo ciekawa jest analiza sposobów modelowania kompozytu przekładkowego w kształcie plastra miodu zawarta w dodatku C, str. 132. Uproszczona analiza rynku SWOT przedstawiona na str. 111 jest dużym atutem pracy. Pokazuje ona to, że autor ma szersze – nowoczesne spojrzenie na zastosowania inżynierii mechanicznej w praktyce przemysłowej.

Nie bez znaczenia jest precyzja i klarowność przedstawienia założeń pracy, np. metodyki modelowania (rys. 4.1, str. 21). Docenić należy pracowitość prowadzonych badań naukowych, przykładowo szereg komercyjnych kompozytów miało niedookreślone parametry – wykonano dodatkową pracę związaną z identyfikacją poszczególnych struktur kompozytów (np. badania mikroskopowe przedstawione na str. 26). Praca zawiera bardzo dużo ciekawych danych dla konkretnych materiałów kompozytowych, często uzyskiwanych na podstawie badań własnych, np. na str. 31 (w pełni zrozumiałe jest że praca jest poufna). Załączniki do pracy (str. 128-141) są niezwykle wartościowe i mogą być ciekawym źródłem do dalszych prac autora.

Postawione zadania autor rozprawy rozwiązał poprawnie, udowadniając tym samym postawione tezy pracy. W ogólnej ocenie przedstawionej pracy, należy z uznaniem zauważyć dużą swobodę, z jaką autor rozprawy posługuje się zarówno nowoczesnymi metodami analiz numerycznych jak i współczesnymi metodami badań eksperymentalnych. Bardzo wartościowe jest zastosowanie w badaniach naukowych sprzężenia zwrotnego pomiędzy badaniami eksperymentalnymi a obliczeniami teoretycznymi.

Głównym celem pracy było opracowanie uniwersalnej metodyki modelowania MES kompozytów przekładkowych i wykonanych z nich mebli, umożliwiającej oszacowanie ich charakterystyk dynamicznych. Cel pracy należy uznać za osiągnięty a tezy stanowiące podstawę opracowanej metodyki za udowodnione.

## **2.2. Uwagi krytyczne i dyskusyjne**

Pomimo, że postawione w rozprawie zadania autor rozwiązał poprawnie to nie uniknął pewnych niedociągnięć i elementów dyskusyjnych. Praca jest obszerna, nie tyle ze względu na liczbę stron, co ze względu na zakres podejmowanych problemów. Jest to zapewne przyczyna występowania pewnych nieścisłości i drobnych elementów dyskusyjnych. Recenzowana rozprawa doktorska została poprawnie i starannie zredagowana; nie ma w niej poważniejszych błędów edytorskich. Elementy dyskusyjne oraz uwagi redakcyjne zostały wymienione w kolejności występowania:

- Zdaniem recenzenta tytuł rozprawy mógłby być bardziej klarowny: modelowanie czego i jaką metodą, np. Metodyka modelowania paneli strukturalnych metodą elementów skończonych.
- Nadmiernie podkreślane jest w tytule przeznaczenie paneli i mebli. Prezentowana metodyka może mieć szersze zastosowanie niż tylko dla jednostek pływających (można o tym powiedzieć przy opisie motywacji podjęcia pracy).
- Strona edytorska pracy jest dobra jednakże podrozdziały mogły by być lepiej wyróżnione. Występują „puste” strony (np. str. 68) a przejścia do poszczególnych podrozdziałów są ciągłe, utrudniające czytanie. Wykaz oznaczeń zastosowanych w rozprawie, zamieszczony na str. 2 jest niepełny.
- Przegląd stanu zagadnienia jest w odczuciu recenzenta zbyt publicystyczny i populistyczny. Wprowadzanie regulacji IMO i zrównoważonej energetyki do rozważanej tematyki jest nadmiarowe. Wpływ ciężaru mebli na zużycie paliwa typowych statków handlowych jest znikomy. Normy poziomów drgań na statkach są stosowane do całych pomieszczeń i urządzeń okrętowych. Tematyka pracy jest ciekawa i ważka bez konieczności nawiązywania do powyżej wspomnianych zagadnień.
- Pracę uatrakcyjniłyby liczniejsze zdjęcia z badań eksperymentalnych, np. badań przy pomocy maszyny wytrzymałościowej Autograph (str. 28).
- Równanie 5.4 na str. 32 nie jest równaniem drgań własnych. Nieściskość ta została złagodzona poprzez stwierdzenie że wektor wymuszeń jest w dalszych analizach pominięty. Jednakże dla czytelnika z innej dziedziny mogłoby to być mylące i niejasne.
- Nieprecyzyjny zapis wektora amplitud w równaniu 5.8 str. 32 (i dalszych), najczęściej pogrubienie litery już oznacza wektor (bądź macierz), dodanie strzałki nad literą jest niejasne (czy jest to już wersor?). Zwykle stosowany jest indeks zamiast dodatkowej strzałki np.  $\mathbf{q}_0$ .
- Część rozdziału 5.1.4 (str. 33) powinna być umieszczona w rozdz. 4 ponieważ zawiera metodykę modelowania.
- Pomiarzy przeprowadzono w zakresie od 0 do 1000 Hz. Typowe czujniki piezoelektryczne mają charakterystyki wyznaczone od 5 Hz (ich wiarygodność pomiarowa poniżej tej wartości jest wątpliwa); są czujniki sejsmiczne które pozwalają na pomiary nawet w okolicach 1 Hz ale są one znacznie większe (cięższe) i mogą wpływać na wyniki tego typu pomiarów. Druga wątpliwość to górny zakres częstotliwości. Normy drgań okrętowych zwykle nie przekraczają 100 Hz (wyżej to hałasy); również wymuszenia drgań okrętowych zwykle nie przekraczają 50 Hz. Liczba zidentyfikowanych przez autora postaci drgań własnych (do 1000 Hz) jest imponująca (np. 16 na str. 40, na rys. 5.14 trudno dopatrzeć się takiej ilości postaci) jednakże identyfikacja wyższych postaci może budzić wątpliwości z racji gęstości siatki pomiarowej (dla wyższych postaci powinna być znacznie gęstsza od tej zaprezentowanej na str. 35). Reasumując, ograniczenie zakresu pomiarowego do 500 Hz byłoby wystarczające. Co więcej, zdaniem recenzenta lepsze byłoby ograniczenie związane z liczbą zidentyfikowanych postaci drgań własnych. Osiem postaci byłoby wystarczające (tak jak dla modelu panelu Potma 128D na str. 66), ponieważ w praktyce okrętowej zwykle wymuszalne są pierwsze trzy do pięciu postaci.

Jednakże doktorant świadomie stosuje metody identyfikacji modeli ponieważ słusznie zawężił zakres pomiarowy do 300 Hz (11 postaci drgań) dla panelu Monocore 3D ST (str. 55) zamodelowanego w MES elementami bryłowymi (3 stopnie swobody na węzeł!).

- Ze względu na przyjęty zakres częstotliwości pomiarowych, sposób mocowania paneli przeznaczonych do pomiaru (str. 34) również jest dyskusyjny. Niemożliwe jest umocowanie linek podtrzymujących w węzłach wszystkich szesnastu postaci drgań ponieważ węzły te są różne dla każdej postaci. Niepraktyczna jest natomiast, ewentualna zmiana zamocowania dla każdej postaci, zwykle wystarczające jest mocowanie w węzłach pierwszej postaci drgań, ale również zasadne i do rozważenia jest wprowadzenie ściśle określonych więzów.
- Miara średniego błędu względnego (np. tab. 5.5 str. 40) jest dyskusyjna; więcej informacji o dostrojeniu modelu z pomiarami daje błąd maksymalny i minimalny z zaznaczeniem czy wyznaczona obliczeniowo częstotliwość jest niedoszacowana czy przeszacowana.
- Domyślnie przyjęto badania pomiarowe jako „prawdę absolutną”. Krótka, szacunkowa analiza błędów pomiarowych (np. wpływ zamocowania, masy czujników, siły i miejsca wzbudzenia – założenie o liniowości procesu ...) zwiększyłaby wartość pracy - pokazałaby że autor rozprawy ma świadomość występowania błędów zarówno po stronie numerycznej jak i eksperymentalnej.
- Pewne wątpliwości budzi dyskusja na temat wyznaczania własności tłumiących modeli zawarta w rozdz. 5.5 (str. 90). Macierz tłumienia określona na podstawie macierzy sztywności jest bardzo uproszczoną metodą (często stosuje się jeszcze powiązanie z macierzą mas). W recenzowanej pracy trudno jednak o lepsze określenie tłumienia ponieważ częstotliwości i postaci drgań własnych (mówienie o amplitudach drgań własnych jest pewną nieścisłością) są bardzo słabo wrażliwe na wielkość współczynnika strat. Dużo lepsze byłoby przeprowadzenie pomiarów wzbudnikiem drgań (drgania wymuszone) np. o stałej amplitudzie przyspieszeń tłoka. Zrozumiałe jest, że rozszerzyłoby to znacznie pracę, jednakże w dyskusji doktorant powinien zaznaczyć, że zdaje sobie z tego sprawę – że poziom ufności wyznaczenia tłumienia w tego rodzaju badaniach jest znacznie niższy od dokładności wyznaczenia częstotliwości i postaci drgań.

### **3. Wniosek końcowy**

W świetle starannego i szerokiego rozeznania aktualnej literatury przedmiotu, przeprowadzonego przez autora rozprawy doktorskiej, należy stwierdzić, że tematyka badawcza została dobrana trafnie. Cel zasadniczy, jakim było opracowanie metodyki modelowania właściwości dynamicznych kompozytów przekładkowych, posiada silny charakter zarówno poznawczy jak i użyteczny. Cel i zakres pracy został sformułowany właściwie. Uzyskane wyniki oraz opracowane metody wypełniają lukę badawczą, jaka istniała w stosowanych metodach modelowania MES kompozytów przekładkowych. Cel pracy został w pełni osiągnięty a postawione tezy badawcze udowodnione.

Zawarte w recenzji uwagi krytyczne i dyskusyjne nie umniejszają ogólnej, pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej. Zarówno zakres rozwiązywanych zagadnień naukowych jak i uzyskane wyniki, zweryfikowane doświadczalnie, stanowią o bardzo dobrym poziomie pracy. Na wyróżnienie zasługuje zakres pracy: obok badań laboratoryjnych obejmujących większość znaczących typów paneli strukturalnych przeprowadzono dokładną analizę metod modelowania MES właściwości dynamicznych tak złożonych struktur. Z powodu braku dostępności pełnych danych, badania pomiarowe zostały rozszerzone o identyfikację parametrów i własności materiałowych kompozytów. Wyniki uzyskane w pracy stanowią niewątpliwie postęp w dziedzinie inżynierii mechanicznej; w badaniach nad metodami modelowania numerycznego paneli strukturalnych.

Jestem przekonany, że rozprawa doktorska mgr. Arkadiusza Charuka w pełni spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim wg ustawy: Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.) z dnia 20 lipca 2018r. W szczególności prezentuje bardzo dobrą, teoretyczną wiedzę ogólną kandydata w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z możliwością jego zastosowania w sferze gospodarczej. W związku z powyższym stawiam wniosek o dopuszczenie mgr. Arkadiusza Charuka do publicznej obrony rozprawy.