

prof. dr hab. inż. Krzysztof Jamroziak  
Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej  
i Biomedycznej  
Politechnika Wroclawska,  
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

Wrocław 4.01.2025 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. Arkadiusza Charuka

pod tytułem

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

**Opis identyfikacyjny:** praca papierowa w twardej oprawie, stron 143 wraz z załącznikami, pozycji literatury 118.

Promotor rozprawy doktorskiej: dr hab. inż. Paweł Dunaj, prof. ZUT.

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Piotr Pawełko, prof. ZUT.

**Zlecniodawca:** Przewodniczący Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, dr hab. inż. Krzysztof Danilecki, prof. ZUT.

## INFORMACJE WSTĘPNE

Rozprawa zawiera wykaz oznaczeń zastosowanych w rozprawie, spis treści, 7 numerowanych rozdziałów z podrozdziałami, bibliografię, spis rysunków, spis tabel, załączniki oraz streszczenie w j. polskim i angielskim. Przedstawione do oceny opracowanie naukowe stanowi praca pisemna w j. polskim (zgodnie z art. 187.3. Ustawy), która powstała w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy”, współfinansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. W ocenie recenzenta, ubiegający się o nadanie stopnia doktora przedstawił zgodnie z art. 186.1. ust. 3 lit. a Ustawy co najmniej jeden artykuł naukowy oraz pracę pisemną, w której zaprezentował oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego modelowania paneli strukturalnych przeznaczonych do budowy mebli dla jednostek pływających.

## OCENA WYBORU TEMATYKI I ZAKRESU PRACY

Doktorant, jako cel pracy postawił sobie opracowanie uniwersalnej metodyki modelowania właściwości dynamicznych kompozytów przekładkowych i wykonanych z nich mebli przeznaczonych dla jednostek pływających. Zauważył, że w tym obszarze prace koncentrują się na poszukiwaniu lekkich przekładkowych struktur kompozytowych, które badano w zakresie ich statycznych i dynamicznych charakterystyk wytrzymałości. Doktorant z dużą precyzją podaje całą paletę tych struktur, przytaczając ich wspólne cechy, zalety i wady. Po czym zawęża je do potrzeb w zakresie budowy mebli przeznaczonych na jednostki pływające. Zauważa także, że dominującym podejściem do rozwiązania problemu są metody numeryczne odniesione do metody elementów skończonych. W przypadku charakterystyk statycznych metody te przynoszą oczekiwane rezultaty, a już w zakresie dynamicznym muszą zawierać dodatkowe procedury dostrojenia modelu. Autor nadmieniał, że w znacznej mierze inni badacze upraszczają cały proces identyfikacji pomijając obszar doświadczalnej weryfikacji odpowiedzi badanej konstrukcji (obiektu) w postaci funkcji przejścia (z ang. frequency response function (FRF)). Zakres tych badań w tym przypadku jest dominujący, ponieważ na podstawie charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych można zweryfikować częstości drgań własnych, postaci drgań oraz wartości współczynników tłumienia, a tym samym uniknąć zjawiska rezonansu mechanicznego.

Autor rozprawy podkreśla wagę tego zagadnienia i w swojej dysertacji koncentruje uwagę na kompleksowej analizie właściwości dynamicznych wyselekcjonowanych przekładkowych struktur kompozytowych z przeznaczeniem na meble w zabudowie jednostek pływających. Podkreśla, że meble tego typu szczególnie muszą być poddane weryfikacji, aby uniknąć niekorzystnych częstotliwości charakterystycznych dla określonych pasm tercjowych wynikających z oddziaływania jednostki pływającej, generującej drgania od sił zewnętrznych w postaci: fal morskich, pracy określonych urządzeń pokładowych itp. na obiekty techniczne, jakim są meble. Słusznie formułuje postulat, że już na etapie projektowania takich mebli należy dążyć do ukształtowania zarówno struktury, jak i parametrów układu masowo-dyssypacyjno-sprężystego w taki sposób, aby spełnić określone założenia funkcjonalne. Postulat ten można zrealizować na drodze poprawy dokładności modelowania zarówno wyizolowanych paneli kompozytowych jak i zbudowanych z nich konstrukcji.

Na podstawie określonego postulatu Doktorant formułuje dwie tezy:

- 1) Poprawę dokładności przewidywania właściwości dynamicznych paneli kompozytowych można uzyskać dzięki modelowemu odwzorowaniu ich makrostruktury oraz identyfikacji (na drodze dostrojenia) parametrów ją opisujących.
- 2) Zidentyfikowane modele paneli kompozytowych i połączeń występujących

między nimi umożliwią uzyskanie jakościowo wiarygodnych modeli mebli z nich zbudowanych.

Słuszność tez dowodził na przykładzie opracowanej autorskiej metodyki modelowania, składającej się z czterech etapów obejmujących kolejno modelowanie panela kompozytowego, modelowanie okuć i połączeń pomiędzy panelami oraz modelowanie mebli. W tym celu zastosował następujące metody jak: metodę elementów skończonych (MES), eksperymentalną analizę modalną (EAM) oraz procedury dostrojenia modelu. W ramach zastosowanych technik skoncentrował się na eksperymentach numerycznych i empirycznych z wykorzystaniem odpowiedniego oprogramowania oraz jednostki obliczeniowej, a także aparatury badawczej powszechnie wykorzystywanej w eksperymentalnej analizie modalnej. Zaprezentowana innowacyjność badań wpłynęła pozytywnie na końcowy rezultat pracy.

Rezultat ten wynikał z logicznego chronologicznie następujących po sobie rozdziałów pracy pomijając wstęp, a mianowicie:

*Rozdział 2.* zawierający ocenę stanu wiedzy i nowość wynikająca z badań zawartych w dysertacji w ujęciu analizy literatury przedmiotu.

*Rozdział 3.* odnosi się do przyjętego celu i tez pracy wraz z dowodzeniem ich słuszności w ujęciu ilościowym oraz jakościowym, a także zawartych ograniczeń.

*Rozdział 4.* zawiera metodykę modelowania paneli strukturalnych, w tym prezentację graficzną autorskiej metodyki modelowania kompozytów przekładkowych, opartej na czterech etapach jej realizacji.

*Rozdział 5.* najobszerniejszy element kompozycji pracy związany z modelowaniem właściwości dynamicznych paneli kompozytowych. W rozdziale tym Doktorant analizował wpływ parametrów modeli na określone wartości częstotliwości w zakresie postaci własnych z wykorzystaniem MES i EAM. Został także zrealizowany zakres zagadnienia własnego w ujęciu klasycznej mechaniki wyznaczania częstotliwościowych funkcji przejścia. Autor dokonał szacowania właściwości dynamicznych dla różnego typu paneli przyjętych w niniejszym opracowaniu.

*Rozdział 6.* dotyczy modelowania właściwości dynamicznych kompleksowego obiektu w postaci określonego mebla. Przeanalizowano różne warianty formatek składających się na geometrię szafek w wyniku, których powstało wiele wariantów modeli numerycznych. Rozdział ten stanowi sedno rozprawy opisującej wyniki przebiegu funkcji akceleracji dla analizowanych szafek w wybranych punktach. Doktorant przeprowadza szeroką dyskusję uzyskanych przebiegów

w zakresie wad i zalet uzyskanych wyników w kontekście przeprowadzonych prac modelowania.

*Rozdział 7.* odnosi się do podsumowania pracy. Autor przedstawia w sposób esencjonalny podsumowanie osiągniętych wyników i konkluzje. Precyzuje ograniczenia zaprezentowanej metodyki oraz podaje kierunki dalszych prac.

Wybór tej tematyki oceniam jako trafny i ważny naukowo. Dysertacja wpisuje się w zakres dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna” o dużych walorach naukowych i aplikacyjnych z ukierunkowaniem na aspekty projektowe w odniesieniu do określania charakterystyk dynamicznych mebli wykonanych z kompozytów z przeznaczeniem dla transportu zbiorowego. Zdaniem recenzenta Autor pracy znakomicie spełnił założenia doktoratu wdrożeniowego rozwiązując problem badawczy wygenerowany u partnera przemysłowego jednej z morskiej stoczni remontowej.

#### **UWAGI O ROZPRAWIE, PYTANIA MERYTORYCZNE I ZAGADNIENIA DYSKUSYJNE**

Rozprawa jest napisana poprawnym, zrozumiałym językiem o bardzo wysokim poziomie edytorskim. Nie dostrzeżono większych usterek, zaś niektóre z nich przedstawiono w dalszej części recenzji. Na szczególne podkreślenie zasługuje bogata dokumentacja graficzna. Rysunki oraz tabele są wykonane bardzo starannie i odzwierciedlają szeroki program badań.

Literatura jest poprawnie dobrana, tylko w niewielkim ułamku są to pozycje polskojęzyczne. Jej zawartość stanowią w przeważającej części najnowsze pozycje, co jest zrozumiałe ze względu na tematykę zagadnienia. Dużym plusem pracy są zamieszczone własne prace w spisie bibliograficznym.

Zdaniem recenzenta, rozprawa wyróżnia się ze względu na podjęcie pracochłonnej tematyki i wykorzystanie nowoczesnych interdyscyplinarnych narzędzi badawczo-obliczeniowych.

W rozprawie zaprezentowano nowatorski sposób modelowania właściwości dynamicznych paneli oraz modelowania połączeń paneli będących składowymi złożonych struktur kompozytowych. Autor pracy wzorowo zaprezentował istotę poznania naukowego w ujęciu sprawdzenia empirycznego w sposób pragmatyczny i prognostyczny realizując metodami MES i EAM identyfikację paneli, jako elementów składowych mebla pokładowego jednostek pływających. Lektura rozprawy doktorskiej nasuwa również szereg pytań i zagadnień o charakterze dyskusyjnym, które zaprezentowane są poniżej.

Uwagi krytyczne, polemiczne i komentarze:

1. W pracy Autor używa pojęć częstość drgań własnych i częstotliwość drgań własnych. Studiując zakres rozprawy w tym ujęciu czytelnik ma wrażenie niebezpieczeństw nieporozumienia, gdyż Autor ujmuje te zwroty w sposób nieczytelny. Zdaniem recenzenta te dwa terminy nie mogą być używane naprzemiennie i należy ich znaczenie rozgraniczyć. Proszę o komentarz.
2. Idąc tym tokiem również proszę o komentarz do wyjaśnienia oznaczeń zawartych w wykazie oznaczeń zastosowanych w rozprawie (dotyczy wiersza 1 oraz 15 i 16), jak i powyższego akapitu nad równaniem (5.16) s. 44 oraz pod równaniem (5.10). Czym różni się  $\omega$  definiowana pod równaniem (5.10) s. 33 a definiowana na s. 44?
3. W pracy Doktorant stosuje naprzemiennie termin własności (np. s. 30) i właściwości (np. tytuł pracy). Proszę o ustosunkowanie się Doktoranta.
4. Na s. 29. Tabela 5.2, kolumna 2. od prawej Autor pominął wynik.
5. Równanie 5.4 i 5.5 – dlaczego czas został zapisany w postaci wektora? Należy pamiętać, że odpowiednia forma równania może być różnie interpretowana, co ma miejsce w tym przypadku. Kontynuując dalej myśl komentarz oznaczeń pod tym równaniem wcale nie skazuje, że  $f$  jest wektorem, a raczej częstotliwością.
6. Równanie 5.7 – zdaniem Pana poprawnie są przyjęte warunki początkowe?
7. Na s. 62. Autor stawia hipotezę iż zmiana sposobu przeprowadzenia eksperymentu (...). W jakim celu postawiono tą hipotezę i co w tym kierunku zrobił Doktorant?
8. Na s. 104. Autor odnosi się do uzyskanych wartości błędów względnych i przytacza przykład dla wartości częstotliwościowych 4 Hz i 8 Hz. Skąd wynikają takie duże różnice, czy może spowodowane są to zbyt dużym uproszczeniem w modelu?
9. Na s. 112. ostatnie akapity posumowania są polemiczne. Zdaniem Autora właściwe jest stawianie hipotezy, czy raczej odniesienie się do problemu badawczego?
10. Doktorant w pracy zaprezentował na rysunkach porównanie wybranych postaci drgań własnych wyznaczanych doświadczalnie i numerycznie dla paneli: Monocore 3D FP; Monocore 3D ST; Potma 128D oraz sklejki topolowej. Przyjęte numery postaci dla poszczególnych paneli (Rys. 5.13; 5.22; 5.29 i 5.37) są różne. Czy wskazane byłoby pokazanie ich postaci poprzez przyjęcie konsekwentnie zadeklarowanej numeracji? Proszę o ustosunkowanie się Doktoranta.

Drobne uwagi o charakterze redakcyjnym:

1. Doktorant w pracy na s. 88. i 142. użył terminu metodologia. Zdaniem recenzenta jest to pomyłka pisarska. Raczej tutaj powinno użyć się terminu metodyka.
2. Zaprezentowany Rys. 5.3 z zaprezentowanymi wymiarami powinien być wykonany czytelnie.
3. Na s. 27. opis próbek do rozciągania należy ująć w poprawnym zapisie.

Pozostałe drobne uwagi redakcyjne zostały zaznaczone w tekście i przekazane Autorowi.

Recenzent podkreśla, że wyżej wymienione uwagi mają jedynie charakter dyskusyjny i w żaden sposób nie umniejszają pozytywnego odbioru wyników pracy oraz osiągniętego celu przez Doktoranta. Są one w zgodzie z sentencją *nemo sine vitiiis est*.

## PODSUMOWANIE

Istotny i twórczy wkład mgr. Arkadiusza Charuka w rozwój inżynierii mechanicznej, w jej część numeryczną, eksperymentalną i określoną metodykę polega na tym, że przedstawił rozwiązanie postawianych problemów w rękopisie o tytule: *Modelowanie metodą elementów skończonych właściwości dynamicznych paneli strukturalnych przeznaczonych do produkcji mebli dla jednostek pływających*, na podstawie którego można sformułować następujące wnioski i osiągnięcia:

1. Kluczowy dobór tematu i kierunku badań, którego potrzeba została wygenerowana przez czynniki zewnętrzne wpływające na zainteresowania Autora.
2. Opracowanie autorskiej oryginalnej metodyki modelowania kompozytów przekładkowych z przeznaczeniem do produkcji mebli jednostek pływających.
3. Opracowanie planu eksperymentu w ramach badań statycznych i dynamicznych przy uwzględnieniu możliwości zaplecza badawczego jednostki naukowej i partnera przemysłowego.
4. Przeprowadzenie badań doświadczalnych i modelowych dla kompozytów przekładkowych stanowiących opis ich właściwości dynamicznych.
5. Umiejętne optymalizowanie modeli MES i ich dostrajanie na podstawie analizy wrażliwości przy zadanych wartościach częstotliwości ( $f = \omega/2\pi$ ) drgań.
6. Umiejętne posługiwanie się przez Doktorantka metodami i narzędziami w zakresie numerycznej i eksperymentalnej analizie modalnej.
7. Bogaty dobór rysunków i zestawień uzyskanych wyników w postaci odpowiednich wykresów i tabel w ujęciu jakościowym i ilościowym.

8. Aplikacyjność uzyskanych wyników pracy w odniesieniu do potrzeb partnera przemysłowego.

Reasumując Doktorant udowodnił swoją dojrzałość naukową i jest w stanie podjąć się wyzwań, które według opinii recenzenta będą kończyć się sukcesami. Oceniając sylwetkę Autora dysertacji podkreślam, że jest on ambitnym i aktywnym naukowcem. Na podstawie informacji o Doktorancie (dostarczonej razem z pracą) podkreślam, że jest doświadczonym menadżerem, który przeszedł szereg stanowisk w wielu firmach, w których związany był z branżą meblarską i widząc określone problemy postanowił przyjrzeć się im bliżej, zrealizował to zadanie w ramach projektu „Doktorat wdrożeniowy”. Zadanie to zostało wykonane wzorowo, czego wyrazem jest tekst tej recenzji. Dodatnim walorem tej aktywności są także działania naukowe w postaci artykułów, gdzie na dzień sporządzenia recenzji w swoich zasobach Doktorant legitymuje się 3. publikacjami o łącznym IF 7.8 (źródło: <https://orcid.org/0000-0002-9957-6178>).

Wobec powyższej argumentacji na temat opinii o dysertacji pana mgr. Arkadiusza Charuka wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

**WNIOSEK**  
**o dopuszczenie do publicznej obrony**

Biorąc powyższe pod uwagę, recenzent stwierdza, że rozprawa doktorska Pana mgr. Arkadiusza Charuka spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2021 poz. 478 ze zm.) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

