

O c e n a

rozprawy doktorskiej mgr. Arkadiusza Charuka pt. „Modelowanie metodą elementów skończonych właściwości dynamicznych paneli strukturalnych przeznaczonych do produkcji mebli dla jednostek pływających”

1. Podstawa oceny

Podstawę do oceny rozprawy doktorskiej stanowi Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie z dnia 29 października 2024 roku oraz pismo przewodniczącego Rady, dr. hab. inż. Krzysztofa Danileckiego, z dnia 12 listopada 2024 roku, wraz z nadesłanym egzemplarzem rozprawy doktorskiej.

Ponadto podstawę do oceny stanowią wymagania ustawy (art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, Dz.U., 2018, poz. 1668 z późniejszymi zmianami), zgodnie z którą: „rozprawa doktorska powinna wykazać ogólną wiedzę kandydata w dyscyplinie naukowej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a jej przedmiotem powinno być oryginalne rozwiązanie problemu naukowego albo oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej”.

2. Treść i zawartość pracy

Opiniowana rozprawa doktorska, zrealizowana w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy”, liczy 143 strony wraz z obszernym dodatkiem (spis rysunków, spis tabel oraz 6 załączników). Część zasadnicza (120 stron) składa się z 7 rozdziałów. Zamieszczono w niej 60 rysunków, 53 tablice i przywołano 118 pozycji bibliograficznych.

Doktorant zajmuje się modelowaniem i analizą dynamiki mebli przeznaczonych dla jednostek pływających, ze szczególnym uwzględnieniem ich złożonej struktury i własności części składowych, którymi są wielowarstwowe panele strukturalne, ich połączenia oraz okucia. Do modelowania wykorzystuje klasyczną metodę elementów skończonych oraz standardowe narzędzia obliczeniowe. Stosowane są dwu i trójwymiarowe elementy

skończone, uwzględniające między innymi ortotropowość materiału. Praca zrealizowana została we współpracy z Morską Stocznia Remontową Gryfia S.A. w Szczecinie.

Za cel pracy Doktorant przyjął „opracowanie uniwersalnej metodyki modelowania właściwości dynamicznych kompozytów przekładkowych i wykonanych z nich mebli przeznaczonych dla jednostek pływających”. Przyjął także dwie tezy: 1) poprawę dokładności przewidywania właściwości dynamicznych paneli kompozytowych można uzyskać dzięki modelowaniu ich makrostruktury oraz identyfikacji (na drodze dostrojenia) parametrów ją opisujących, oraz 2) zidentyfikowane modele paneli kompozytowych i połączeń występujących między nimi umożliwiają uzyskanie jakościowo wiarygodnych modeli mebli z nich zbudowanych.

Rozdz. 1 rozprawy stanowi wprowadzenie, w którym Doktorant podkreśla znaczenie transportu morskiego, jego zalet i wad (te związane są przede wszystkim z emisyjnością spalin) oraz potrzebę ich ograniczania. Dla ograniczania emisyjności znaczenie ma zmniejszanie masy konstrukcji jednostki pływającej i jej wyposażenia, w tym mebli. Rozdz. 2 zawiera przegląd stanu prowadzonych dotychczas badań oraz analizę literatury z tym związanej. W konkluzji Doktorant stwierdza, że proces projektowania mebli wymaga użycia specjalistycznych narzędzi obliczeniowych umożliwiających ocenę ich właściwości dynamicznych, a takie są niewystarczające. W rozdz. 3 Doktorant przedstawia cel prowadzonych badań oraz przyjęte dwie tezy wraz z ich uzasadnieniem. W rozdz. 4 wyjaśnia, co rozumie pod pojęciem metodyki modelowania paneli strukturalnych, którymi są: kompozytowe płyty przekładkowe, połączenia paneli, okucia mebli oraz mebel, jako całość. Konkluduje, że osiągnięcie zgodności strukturalnej jest warunkiem niezbędnym uzyskania zadawalającej dokładności jakościowej i ilościowej odwzorowania. Rozdz. 5 Doktorant poświęca modelowaniu właściwości dynamicznych paneli kompozytowych. Składają się one z okładziny górnej, okładziny dolnej i rdzenia. W rozważaniach uwzględnia 4 rodzaje paneli: 1) wielowarstwowy kompozyt wykonany z tkanin z włókna szklanego z żywicy fenolowej, 2) kompozyt z tkanin z włókna szklanego z rdzeniem wykonanym z ciągłych włókien tworzących strukturę przestrzenną, 3) aluminiowy kompozyt przekładkowy z rdzeniem w kształcie plastra miodu oraz 4) wykonany ze sklejki topolowej. Korzystając z danych katalogowych, a także z wyników przeprowadzonych badań wytrzymałościowych oraz obrazowania z użyciem mikroskopu cyfrowego, określa parametry geometryczno-masowo-sprężyste części składowych badanych paneli. Do dyskretyzacji układu Doktorant wykorzystuje klasyczną metodę elementów skończonych,

korzystając z programu komputerowego *Midas NFX 2023 R1*. Wykorzystuje w szczególności czworoboczne, czterowęzłowe, izoparametryczne płaskie elementy skończone (*CQUAD4*, liniowe funkcje kształtu, 6 stopni swobody w węźle). Do opisu własności materiałowych poszczególnych komponentów panelu (okładzin, płyt wewnętrznych i ścianek) zastosował liniowy model materiału ortotropowego MAT8. Zakłada ponadto, że tłumienie materiałowe jest proporcjonalne do sztywności, przyjmując stosowny współczynnik strat. Doktorant poddaje próbki badaniom eksperymentalnym (analiza modalna), wykorzystując do wzbudzenia drgań (test impulsowy) dwa rodzaje młotków modalnych. Wyznacza częstotliwości i postaci drgań własnych, korzystając z częstotliwościowych funkcji przejścia (FRF – *frequency response functions*). Natomiast do estymacji parametrów modelu modalnego stosuje algorytm *Polymax*, wspomagając się analizą diagramu stabilizacyjnego do wyboru biegunów modelu. Estymowane parametry modelu modalnego określa na podstawie dwóch niezależnych realizacji eksperymentu, różniących się zastosowaną końcówką młotka. Doktorant przeprowadza walidację modelu modalnego poprzez wykorzystanie kryterium *AutoMAC* (*Auto Modal Assurance Criterion*). Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i badań eksperymentalnych wyznacza błąd zgodności modeli. W przypadku nie uzyskania satysfakcjonujących wyników przeprowadza dostrajanie modelu elementów skończonych, poprzedzone analizą wrażliwości dla określenia wpływu zmienności parametrów modelu na częstości i postaci drgań własnych. Parametrami uwzględnianymi w analizie wrażliwości są: grubości okładzin oraz płyt wewnętrznych, grubość ścianek rdzenia, kąt pochylenia włókien ścianek rdzenia, gęstości włókna szklanego okładzin, płyt oraz ścianek rdzenia, moduł sprężystości podłużnej ścianek rdzenia oraz moduł sprężystości poprzecznej okładzin, płyt wewnętrznych i ścianek rdzenia. Analizę wrażliwości przeprowadził przy zmienności tych parametrów w zakresie $\pm 10\%$. Za kryterium dostrojenia przyjmuje minimalizację kwadratu odchylenia funkcji przyspieszenia (akcelerancji). Dla tak dostrojonego modelu Doktorant przeprowadza jego walidację, przeprowadzając badania na modelu o zmienionych wymiarach jego panelu. W konkluzji rozdziału Doktorant porównuje błędy oraz czasy obliczeń dla 4 rodzajów badanych paneli: *Monocore 3D FP*, *Monocore 3D ST*, *Potma 128D* oraz *sklejka topolowa*. Rozdz. 6 Doktorant poświęca modelowaniu właściwości dynamicznych mebla (szafki) jako całości. Szafka składa się z paneli kompozytowych (formatek) oraz okuć (uchwyty z zamkiem, zawiasy drzwi, łączniki, nóżki). W badanej szafce nie uwzględnia jej pleców, gdyż mocuje się ją bezpośrednio do ściany za pomocą specjalnych złączy. Do modelowania okuć i połączeń Doktorant wykorzystuje również

klasyczną metodę elementów skończonych, a także sztywne elementy skończone. Natomiast połączenia stykowe modeluje za pomocą zaproponowanego elementu dodatkowego, tzw. zastępczego elementu stykowego, którego parametry identyfikuje na podstawie eksperymentalnej analizy modalnej i doświadczalnie wyznaczonych charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych. W badaniach nie uwzględnia połączenia szafki ze ścianą, a więc sztywności ściany oraz pochodzących stąd źródeł wymuszeń. Rozdz. 7 stanowi podsumowanie, w którym do swoich osiągnięć Doktorant zalicza: opracowanie metodyki metody modelowania, przeprowadzenie badań doświadczalnych i modelowych, przeprowadzenie analizy wpływu parametrów paneli na właściwości dynamiczne oraz opracowanie metodyki modelowania mebli kompozytowych przeznaczonych dla jednostek pływających.

Ponadto w rozprawie Doktorant zamieścił: Bibliografię, Spis rysunków, Spis tabel oraz Załączniki, liczące 6 podpunktów. Na końcu rozprawy zamieścił krótkie streszczenia w języku polskim i angielskim.

3. Ocena pracy

Pracę doktorską mgr. Arkadiusza Charuka oceniam ogólnie pozytywnie. Doktorant zajął się aktualnym i ważnym problemem projektowania złożonych struktur mechanicznych, uwzględniając w szczególności właściwości dynamicznych mebli dla jednostek pływających. Zaproponował metodę (metodologię) modelowania i analizy numerycznej takich struktur, wykorzystując standardowe metody dyskretyzacji (metoda elementów skończonych, metoda sztywnych elementów skończonych) oraz proponując dodatkowy element zastępczy do modelowania połączeń stykowych paneli. Parametry modeli dyskretnych dostraja, uzyskując model, którego właściwości dynamiczne (częstości i postaci drgań własnych) są wystarczająco zgodne z rzeczywistością. Może to prowadzić do utworzenia systemowej bazy bibliotecznej, z której można pobierać modele różnych części składowych mebli, by utworzyć model numeryczny mebla jako całości. Ma to duże znaczenie aplikacyjne. Podejście takie można uznać za oryginalny wkład Doktoranta w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w firmach zajmujących się projektowaniem, budową i wyposażaniem jednostek pływających, a więc w sferze gospodarczej. Doktorant wykazał się przy tym ogólną wiedzą teoretyczną niezbędną do modelowania złożonych struktur mechanicznych, badania wrażliwości, dostrajania i walidacji modeli, a także doświadczeniem związanym z samodzielnym prowadzeniem

badania doświadczalnych. Są to zagadnienia należące do dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

Szeroki jest zakres rozprawy, który obejmuje zarówno podstawy teoretyczne, opracowanie metodyki badań, symulację komputerową oraz badania eksperymentalne. Badania eksperymentalne realizowane były we współpracy z Morską Stocznia Remontową Gryfia S.A., co potwierdza duże znaczenie użytkowe prowadzonych badań.

Obok wymienionych wyżej istotnych zalet rozprawy doktorskiej, nasuwają mi się również uwagi krytyczne, które mogą być częściowo dyskusyjne. Są to uwagi o charakterze ogólnym i szczegółowym.

Uwagi ogólne:

1. Proponowane modele z założenia mają być stosowane do modelowania mebli dla jednostek pływających. Doktorant analizuje właściwości dynamiczne mebli (geometryczno-masowo-sprężysto-tłumiące), czego wyrazem są analizowane częstotliwości i postaci drgań swobodnych. Nie uwzględnia jednak mocowania mebli do ściany, a przede wszystkim wymuszeń generowanych w warunkach morskich (wymuszenia siłowe i kinematyczne, falowanie, wiatr, które zresztą wymienia na str. 17). Mają one istotny wpływ na dynamikę badanego układu. Jest to istotny mankament pracy.
2. Stosowane modele dyskretne, otrzymane przy wykorzystaniu klasycznej metody elementów skończonych, mają ogromną liczbę stopni swobody, liczoną w milionach (np. aż 1,8 mln!), przy uwzględnianiu do 20 częstotliwości i postaci drgań swobodnych. Czy model taki jest optymalny? Czy Doktorant badał możliwość analizy dynamiki układu przy znacznie mniejszej liczbie stopni swobody? Jaki jest wpływ błędów numerycznych na wyniki?
3. W stosowanym procesie dostrajania modelu, analizując jego wrażliwość, Doktorant dopuszcza możliwość zmian nawet tych parametrów, które są dobrze rozpoznane i określone (np. grubość okładzin i ich parametry wytrzymałościowe). Uzyskany model „przesuwa się” w kierunku coraz bardziej wirtualnego, a więc mniej uniwersalnego. Czy nie lepiej byłoby za zmienne decyzyjne przyjąć tylko te wielkości, o których najmniej wiemy?
4. We wprowadzeniu potrzebę prowadzonych badań Doktorant argumentuje znaczeniem transportu morskiego, jego zaletami i wadami. Zaznacza, że ma on również istotny, negatywny wpływ na środowisko. Z tego wynika potrzeba minimalizacji masy

jednostki. Rozważania ogranicza do mebli jednostek pływających. Czy Doktorant badał, jaki jest udział masy mebli w masie całej jednostki? Jakie będą korzyści z ograniczenia masy mebli, np. o 50%?

5. Efekty uzyskane z dostrojenia modelu porównywane są za pomocą błędu względnego uśrednionego (np. tabl. 5.9), w której błąd względny zmniejszył się (z 12% do 4,3%), ale dla niektórych postaci drgań zwiększył się on znacząco (np. 6-ta postać – z 3,3% do 11,4%). Co zrobić z przypadkiem, w którym jest to postać istotna z punktu widzenia występujących na jednostce wymuszeń drgań?
6. Doktorant z upodobaniem używa w rozprawie błędnych określeń: „niska gęstość”, „wysoka sztywność”, „wysoka zdolność”, „wysoki stosunek”, „niska masa”, „wysoka zgodność”, „niska zgodność”, „niska amplituda”, „niższa wartość błędu średniego”, „wysoka wymiarowość”, „wyższa dokładność”, a także „ilość” zamiast „liczba” dla wielkości policzalnych.

Uwagi szczegółowe:

nr str. *uwaga:*

- 0 - w tytule rozprawy mowa jest o „panelach strukturalnych”, a potem w p. 5 o „panelach kompozytowych”, zaś w p. 6 o „meblach”, jako obiekcie finalnym?
- 2⁹ - „przyspieszeń” – liczba mnoga, jak przy innych opisywanych wielkościach
- 5² - transport jest raczej „działem” gospodarki, a nie „elementem”
- 5⁵ - „jeden z najważniejszych” – brak „z”
- 5⁹ - podane dane liczbowe dotyczą 2017 roku, czy nie ma świeższych danych?
- 7¹⁵ - „trwałość” jest elementem „ekonomicznej opłacalności”
- 10⁷ - „być” zamiast „ten”
- 10¹⁵ - co oznacza „satysfakcjonująca” dokładność?
- 11¹ - przy takim opisie warto zamieścić rysunek
- 11¹⁴ - „tak”, zamiast „ta”
- 11¹ - „różnica”, zamiast „równica”
- 12¹⁰ - „z aluminiowych”, zamiast „aluminiowych”
- 13¹⁷ - „zawartości”, zamiast „zawartością”
- 15¹¹ - styl
- 16¹ - „trzy płyty”, zamiast „płyty trzy”
- 16⁶ - „im”, zamiast „uch”

- 16¹¹ - „Doświadczalna”, zamiast „Doświadczalnia”
- 16₁₀ - jak rozumieć „odnosi się wrażenie, iż w literaturze przedmiotu często pomija się”, które jest mało konkretne
- 17₃ - jak rozumieć „obecnie stosowane narzędzia i metody charakteryzują się często niewystarczającą dokładnością”, jak często i co z tego wynika?
- 18⁶ - „prowadzi nadal do znacznych rozbieżności”, to zbyt daleko idące uogólnienie
- 19⁵ - a co z „ilościową” wiarygodnością?
- 19₇ - „tez”, zamiast „też”; „wymagało”, zamiast „wymagała”
- 23⁹ - powinno być „W związku z faktem, że wpływ”
- 24⁴ - zaproponowana metodologia mogłaby być stosowana nie tylko do mebli jednostek pływających, tym bardziej że pominięto mocowanie mebla do ściany jednostki
- 25¹⁰ - „trzy”, czy „cztery” jak na rys. 5.1?
- 25 - podpis pod rys. 5.1, powinno być „wykonanym z ciągłych”
- 27¹⁰ - powinno być „które je tworzą”
- 30₄ - styl
- 32₁₂ - „wektora”, zamiast „wektor”
- 32₁ - „do”, zamiast „z”
- 33₈ - bez „w”
- 41₆ - jakie jest kryterium „satysfakcji”?
- 47₄ - „w” zbędne
- 49 - drugi akapit – szkoda, że tego zweryfikowano przyczyny różnicy
- 49¹³ - „współautorem”, a nie „współtwórcą”
- 58₉ - „są” zbędne
- 61₁₂ - „w pracy”, zamiast „na łamach pracy”
- 61₇ - wyraz „znaleziony” sugeruje przypadkowość
- 61₇ - „unikatową”, zamiast „unikalną”
- 67₁ - „przyjęte”, zamiast „przejęte”
- 75₄ - jak 67₇
- 78⁶ - „obracane było 90° wokół” - styl
- 81₄ - są błędy w symbolach
- 81₂ - brak kropki
- 83₃ - „kształt”, zamiast „przebieg”, bo przebieg wiąże się z czasem
- 94¹ - w zadaniu brak podmiotu

96⁸ - styl

97 - drugi akapit, przydałby się rysunek

104¹⁵ - „po”, zamiast „do”.

Przytoczone uwagi ogólne mają w większości charakter dyskusyjny, a błędy szczegółowe są na ogół typowe dla tego typu rozpraw. Nie mają one zasadniczego wpływu na ocenę końcową rozprawy doktorskiej.

4. Wniosek końcowy

W podsumowaniu oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że Doktorant:

- 1) zajął się ważnym z teoretycznego i aplikacyjnego punktu widzenia problemem modelowania dynamiki złożonych struktur mechanicznych;
- 2) zaproponował oryginalną metodę modelowania właściwości dynamicznych tych struktur, uwzględniając badanie ich wrażliwości, dostrajanie i walidację;
- 3) osiągnął przyjęte cele pracy;
- 4) wykazał się dużą wiedzą i umiejętnościami w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

W związku z powyższym wyrażam pogląd, że mgr Arkadiusz Charuk jest dobrze przygotowany do prowadzenia samodzielnych prac naukowo-badawczych, a jego rozprawa doktorska pt. „Modelowanie metodą elementów skończonych właściwości dynamicznych paneli strukturalnych przeznaczonych do produkcji mebli dla jednostek pływających” spełnia wymagania art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, Dz.U., 2018, poz. 1668 z późniejszymi zmianami. Stawiam więc wniosek o dopuszczenie mgr. Arkadiusza Charuka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.