Dr hab. inż. Adam Cenian, prof. IMP PAN
80-952 Gdańsk, ul. Fiszera 14

Gdańsk, 4 maja 2020

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Do Van Doan

„Influence of the numerical modelling methods on dispersion and errors of analysis results in chosen marine machines and structures"

(pl. Wpływ metod modelowania numerycznego na rozrzuty i błędy analiz obliczeniowych wybranych urządzeń i konstrukcji okrętowych"

Opinia została opracowana na zlecenie Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni: Umowa z dnia 11 marca 2020, nr. 115/20

Promotor rozprawy doktorskiej: dr hab. inż. Lech Murawski
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Hoang Nguyen

I. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 202 strony w jednym tomie; składa się z następujących części: streszczenia, wstępu, czterech rozdziałów, podsumowania, spisu literatury, spisu rysunków oraz tablic. Zawartość poszczególnych rozdziałów obejmuje:

1. **Streszczenie** (w języku angielskim i polskim), w którym Autor przedstawia zakres pracy oraz uzyskane wyniki.
2. **Wstęp** omawia przedmiot pracy oraz motywację, tezę, cel i zakres pracy oraz metodologię badań, w tym metodę obliczeń numerycznych oraz badań eksperymentalnych. Wstęp kończy podsumowanie wyników oraz krótki opis struktury pracy.
3. **Ship safety hazards and their prevention** (pl. Zagrożenia bezpieczeństwa statku oraz ich prewencja). Rozdział przedstawia:
    - zagadnienia obciążeń strukturalnych, elementy konstrukcji oraz ich wytrzymałość;
    - generacji wibracji w kadłubie statku jak i innych strukturach oraz układzie napędowym;
    - uproszczone wzory fenomenologiczne określające parametry drgań, w tym częstotliwości;
    - rodzaje oraz charakterystykę awarii oraz
    - nieniszczące metody diagnostyki elementów konstrukcji, ze szczególnym uwzględnieniem metody monitoringu i diagnozowania stanu konstrukcji (Structural Health Monitoring – SHM)
4. **Numerical modelling for some of the local hull structures** (pl. Modelowanie numeryczne wybranych struktur kadłuba). Pierwsza część rozdziału trzeciego rozprawy poświęcona jest zagadnieniu drgań belki (wg. teorii Eulera-Bernoulliego) oraz belki uszkodzonej za pomocą metody numerycznej z wykorzystaniem komercyjnego software'u Patran – Nastran oraz własnej metody eksperymentalnej (dla belki nieuszkodzonej). W następnej części Autor omawia wyniki porównania rezultatów symulacji (dla tej samej metody numerycznej) oraz eksperymentu dla wibracji generowanych w cienkiej płycie oraz płycie wzmocnionej teownikiem.
5. **Numerical modelling of ship hull and superstructure** (pl. Modelowanie numeryczne kadłuba oraz superstruktur statku) gdzie przedstawiono wyniki badań wibracji dwóch kontenerowców o wielkości 2000 TEU oraz 11400 TEU. Określono w oparciu o metodę numeryczną (jak wyżej) oraz uproszczonych wzorów eksperymentalnych (na podstawie

wieloletnich badań) mody drgań kadłuba oraz superstruktur (nadbudówka) oraz ich częstotliwości.

6. **The operating parameter characteristics of the drive system** (pl. Charakterystyki operacyjne układu napędowego). W rozdziale Doktorant przedstawił wyniki badań sztywności kadłuba oraz wpływu ułożenia linii wałów układu napędowego na drgania kadłuba i układu napędowego.
7. **Conclusions and objectives of further research** (pl. Wnioski i zadania dla dalszych badań). W rozdziale tym w sposób syntetyczny podsumowano uzyskane w rozprawie wyniki oraz sformułowano najistotniejsze wnioski i plany dla dalszych badań wynikające z przeprowadzonych analiz.
8. **Bibliografia** zawiera 120 pozycji literatury i obejmuje najnowsze monografie i publikacje w renomowanych czasopismach i z konferencji międzynarodowych; 24 cytowanych prac pochodzi z ostatnich 10 lat. Doktorant cytuje 6 prac własnych.

II. Cel, teza i zakres rozprawy

Celem rozprawy jest „rozwój metod numerycznych dla analizy stanu istotnych elementów konstrukcji statku i ich bezpieczeństwa ze względu na ich wibracje oraz wybór i optymalizacja tych metod dla wybranych elementów konstrukcji biorąc pod uwagę błędy oraz rozrzut wyników analiz obliczeniowych".

Autor formułuje tezę:
"It is possible to decrease dispersions and to reduce a number of errors in the numerical modelling of a ship hull and superstructure and significant marine machines to the level that is both acceptable and in accordance with empirical tests" (pl. Możliwym jest ograniczenie rozrzutu oraz liczbę błędów obliczeń numerycznych kadłuba statku, jego superstruktur oraz istotnych maszyn do poziomu akceptowalnego zgodnie z testami empirycznymi.)

Zakres rozprawy został przedstawiony we wstępie i obejmuje:

- badania numeryczne struktur kadłuba statku takich jak belki, cienkie płyty, cienkie płyty wzmocnione z wykorzystaniem metod elementów skończonych oraz porównanie rezultatów z wynikami badań eksperymentalnych;
- optymalizacja modeli numerycznych do analizy kadłuba (w tym superstruktur oraz silnika) w zakresie determinacji drgań własnych i wymuszonych oraz rezonansu dla różnych warunków brzegowych;
- optymalizacja metody elementów skończonych dla badań drgań układu napędowego (wał korbowy, linia wałów, śruba napędowa). Analiza wpływu ułożenia linii wałów układu napędowego na drgania kadłuba i układu napędowego w aspekcie rozrzutu i błędów obliczeniowych;
- weryfikacja rozwijanych metod w oparciu o wyniki eksperymentów dla różnych maszyn oraz struktur statku w aspekcie rozrzutu wyników i błędów metod.

Cel rozprawy jest sformułowany w sposób jasny i precyzyjny, a zawarty w recenzowanej rozprawie doktorskiej materiał badawczy w postaci kompleksowo przeprowadzonych badań i analiz w pełni odpowiada sformułowanemu celowi oraz zakresowi rozprawy.

III. Treść rozprawy

W **Streszczeniu** przedstawionym w języku angielskim i polskim, Autor omawia zakres pracy oraz uzyskane wyniki.

W Rozdziale 1. **Wstęp**, Doktorant omawia przedmiot pracy, motywację, tezę, cel i zakres pracy oraz metodologię badań, w tym metodę obliczeń oraz badań eksperymentalnych.

W podrozdziale 1.1 przedstawiono zagadnienie bezpieczeństwa konstrukcji morskich oraz działań podjętych przez przemysł stoczniowy na świecie, organizacje/towarzystwa klasyfikacyjne, jak Germanischer Lloyd oraz znane gremia fachowców zorganizowane wokół konferencji International Ship and Offshore Structures Congress (ISSC). Przedstawiono m.in. ważne wyniki badań rozrzutu rezultatów obliczeń amplitud prędkości wymuszonych drgań konstrukcji (dla metody FEM – finite element method) – rozrzut przedstawionych wyników (Rys. 1.3 i 1.4) wynosi nawet 3 rzędy wielkości co stanowi ważny motyw dalszego prowadzenia prac w tym zakresie.

W podrozdziale 1.2 autor przedstawia tezę, cel oraz zakres pracy – co omówiono w poprzednim rozdziale recenzji.

W podrozdziale 1.3 omówiono metodologię badań polegającą na wykonaniu badań numerycznych w oparciu o metodę elementów skończonych (FEM) z wykorzystaniem MSC software (Apex, Patran, Nastran) oraz ich weryfikacji w oparciu o wyniki eksperymentu, wieloletnich doświadczeń zebranych w formie równań towarzystw klasyfikacyjnych oraz rezultaty teorii belki Euler–Bernoulli'ego. W podrozdziale przedstawiono podstawy metody i interfejs programu z przykładem zastosowania oraz zaprojektowany układ eksperymentalny wraz z oprzyrządowaniem.

W podrozdziale 1.4 omówiono otrzymane wyniki, w tym:

- model matematyczny wibracji elementów konstrukcji kadłuba takich jak belki, cienkie płyty oraz cienkie płyty ze wzmocnieniem. W pracy wykonano analizę faktorów wpływających na wielkości rozrzutów i błędów, w tym warunków brzegowych, gęstości i typu elementów skończonych;
- model matematyczny wibracji kadłuba i innych superstruktur (m.in. nadbudówki oraz układu napędowego) dwóch kontenerowców o wielkości 2000 TEU oraz 11 400 TEU. Rezultaty obliczeń porównano z równaniami empirycznymi (m.in. Brown'a, Lewis'a, Todd'a i innych). Przeprowadzona analiza rozrzutów i błędów zwiększa zaufanie do proponowanych modelów obliczeniowych;
- model numeryczny zastosowano dla opisu wibracji układu napędowego statku oraz wpływu ułożenia linii wałów układu napędowego na drgania kadłuba i układu napędowego w aspekcie rozrzutu i błędów obliczeniowych.

Podrozdział 1.5. uzasadnia układ i zawartość pracy.

Rozdział 2 **Ship safety hazards and their prevention** (pl. Zagrożenia bezpieczeństwa statku oraz ich prewencja) przedstawia:

- zagadnienia obciążeń strukturalnych, elementy konstrukcji oraz jej wytrzymałość;
- generacji wibracji w kadłubie statku jak i innych strukturach oraz układzie napędowym;
- uproszczone analityczne wzory określające parametry drgań, w tym częstotliwości;
- rodzaje oraz charakterystykę awarii oraz
- nieniszczące metody diagnostyki elementów konstrukcji, ze szczególnym uwzględnieniem metody monitoringu i diagnozowania stanu konstrukcji (Structural Health Monitoring – SHM)

W podrozdziale 2.1 Autor omawia zagadnienie obciążeń, konstrukcji statku, elementy pływalności i niezatapialności statku oraz wytrzymałości kadłuba.

W podrozdziale 2.2 omówiono zagadnienie drgań statku, w tym źródeł wymuszenia drgań kadłuba: wałów oraz śruby napędowej. Następnie przedstawiono drgania głównych struktur, takich jak układ napędowy, struktury pokładowe, inne duże instalacje: kotły, etc. Więcej uwagi poświęcono wibracjom układu napędowego, w tym zagadnieniom ułożenia linii wałów układu napędowego, brakom zrównoważenia dynamicznego i hydrodynamicznego śruby i wałów

napędowych, naprężeniom dynamicznym wałów napędowych, drganiom podłużnym, poprzecznym oraz skrętnym (torsyjnym) oraz drganiom i wymuszeniom silnika.

W podrozdziale 2.3 przedstawiono zarys teorii belki Euler'a–Bernoulli'ego oraz przybliżone równania empirycznych częstotliwości wertykalnych drgań własnych statku (2.2) i (2.4).

W podrozdziale 2.4 omówiono przyczyny, mechanizm oraz metody analizy awarii oraz zmęczenia materiału.

W podrozdziale 2.5 podstawy metod badań nieniszczących ze szczególnym uwzględnieniem metody monitoringu i diagnozowania stanu konstrukcji (Structural Health Monitoring – SHM) oraz możliwości jej zastosowania dla elementów konstrukcji statku.

Pierwsza część Rozdziału 3 **Numerical modelling for some of the local hull structures** (pl. Modelowanie numeryczne wybranych struktur kadłuba) rozprawy poświęcona jest zagadnieniu drgań belki (wg. teorii Euler'a-Bernoulli'ego) oraz belki uszkodzonej za pomocą metody numerycznej z wykorzystaniem komercyjnego software'u Patran – Nastran.

W następnej części Autor omawia wyniki porównania rezultatów symulacji (dla tej samej metody numerycznej) oraz eksperymentu dla wibracji generowanych w cienkiej płycie oraz płycie wzmocnionej teownikiem.

W podrozdziale 3.1 Autor prezentuje obiekt badań (nieuszkodzona belka w postaci teownika aluminiowego) wraz z jego charakterystyką (Rys. 3.1 i 3.2, Tabela 3.1.) oraz wyniki drgań belki w teorii Eulera-Bernoulliego dla trzech warunków granicznych:

- belka obustronnie utwierdzona (clamped-clamped - CC)
- belka jednostronnie utwierdzona (clamped-free – CF)
- belka utwierdzona i swobodnie podparta (clamped-simply supported – CSS)

Następnie przedstawia wyniki obliczeń numerycznych drgań teownika z wykorzystaniem modelu numerycznego FEM oraz oprogramowania Patran-Nastran dla trzech wariantów elementów skończonych (1D, 2D i 3D) (Tabele 3.4 – 3.5) oraz przedstawionych wyżej warunków brzegowych. Z porównania wyników teorii Euler'a-Bernoulli'ego oraz swoich obliczeń autor wyciąga wniosek, że

- rozrzut wyników oraz ewentualne błędy generalnie maleją ze wzrostem gęstości elementów skończonych;
- najmniejsze błędy otrzymano dla modelu z warunkiem CF oraz dla drugiego (pod względem częstotliwości) modu drgań (~270 Hz);
- błędy nie przekraczają 10%;
- elementy 3D prowadzą do zwiększenia błędów.

Dla belki uszkodzonej (Rys. 3.8) – poddanej badaniom w dalszej części pracy rozrzut wyników zwiększył się znacząco i dla elementów 3D (które ponownie wydają się prowadzić do większych błędów) rozrzut wyników osiągnął poziom 15,4 %. Wydaje się, że Autor w sposób nieuzasadniony używa tu pojęcia błędu zamiast rozrzutu wyników.

W podrozdziale 3.2 Autor przechodzi do analizy cienkich płyt scharakteryzowanych w Tabeli 3.12 bez uwzględnienia i uwzględnieniem oddziaływania z otaczającą jednostronnie wodą. Brakuje tu rysunku przedstawiającego element badany czego nie rozwiązuje przedstawienie elementów skończonych (2D, 2-3D, 3D i 3D-det) na Rys. 3.15. W celu weryfikacji rezultatów obliczeń wykonano badania eksperymentalne wibracji wyznaczając spektrum: przyspieszenie w funkcji częstotliwości wzbudzania. Z porównania rezultatów dla częstotliwości wynika, że

- choć przewidywania wszystkich modeli są zgodne z eksperymentalnie wyznaczonymi częstotliwościami z dokładnością większą niż 6% (5% w przypadku odziaływania z wodą), to najlepiej drgania opisane są w modelach 2-3D oraz 3-D det.;

- biorąc pod uwagę komplikację (wzrost liczby elementów ze wzrostem wymiaru i czasu obliczeń) optymalnym dla dalszych badań wydaje się model 2-3D – choć istnieje problem z uwzględnieniem rotacyjnych stopni swobody.

W podrozdziale 3.3 zbadano drgania cienkiej płyty ze wzmocnieniem przedstawionym na Rys. 3.26 oraz w Tabeli 3.17 z wykorzystaniem modeli wprowadzonych powyżej. Obliczenia zweryfikowano wykorzystując układ laboratoryjny omówiony w podrozdziale 3.3.2. Weryfikacja badań prowadzi do podobnych wniosków jak powyżej.

W podrozdziale 3.4. podsumowano wnioski z przeprowadzonych badań.

W Rozdziale 4 **Numerical modelling of ship hull and superstructure** (pl. Modelowanie numeryczne kadłuba oraz superstruktur statku) przedstawiono wyniki badań wibracji dwóch kontenerowców o wielkości 2000 TEU oraz 11400 TEU scharakteryzowanych w Tabelach 4.1 i 4.2. Określono w oparciu o metodę numeryczną (jak wyżej) oraz uproszczonych fenomenologicznych wzorów eksperymentalnych (na podstawie wieloletnich badań) mody drgań kadłuba oraz superstruktur (np. nadbudówka) oraz ich częstotliwości.

W podrozdziale 4.1 omówiono zagadnienie drgań własnych kadłubów kontenerowców oraz wyznaczono częstotliwości drgań wertykalnych w oparciu o równania (2.22), (2.24) oraz horyzontalnych w oparciu o równanie z prac Brown'a, Lewis'a, Todd'a (4.3). Następnie w oparciu o rozwinięte uprzednio modele 3D i elementy skończone wykonano obliczenia z wykorzystaniem oprogramowania Patran/Nastran i uwzględnieniem oddziaływania z wodą. Częstotliwości w zakresie poniżej 6 Hz zostały obliczone i porównane do wyników równań fenomenologicznych. Z porównania wyników dla drgań wertykalnych wynika, że obliczone częstotliwości drgań wertykalnych w przypadku kontenerowca mniejszego 2000 TEU (poza modem 1) są bliższe wynikom równania (2.22), a w przypadku większego kontenerowca 11 400 TEU (poza modem 3) równania (2.24). W przypadku drgań horyzontalnych rezultaty równania (4.3) i modelu numerycznego są a miarę zbieżne w przypadku mniejszej jednostki (2000 TEU) ale rozrzut wyników dla większej jednostki (11 400 TEU) stawia pod znakiem zapytania zaproponowane metody (być może ze względu na mniejszą znajomość konstrukcji kontenerowca). Podrozdział kończy omówienie Diagramu Rezonansu Kadłuba (Hull Resonance Diagram).

W podrozdziale 4.2 Autor analizuje efekty drgań wymuszonych pracą silnika dla kontenerowca 2000 TEU oraz 11 400 TEU. Z pomocą oprogramowania Patran/Nastran wyznacza zależność amplitudy prędkości dla różnych obrotów silnika i modów drgań. Autor konkluduje, że amplituda drgań wzrasta ze wzrostem częstotliwości.

W podrozdziale 4.3 omawia zagadnienie dozwolonych, bezpiecznych dla załogi, pasażerów oraz konstrukcji drgań na podstawie diagramu 4.84. Diagram określa trzy strefy: bezpieczna, dopuszczalna oraz niedopuszczalna w zależności od poziomu amplitudy prędkości [mm/s], przyspieszenia [mm/s2] i przemieszczenia [mm] w funkcji częstotliwości drgań [c/min]. Podrozdział kończy analiza wzbudzeń drgań: silnika oraz śruby napędowej (efekt hydrodynamiczny i pędu).

W podrozdziale 4.4 autor podsumowuje wnioski m.in. wskazując na fakt zmiany źródeł wzbudzenia. O ile na mniejszym kontenerowcu (2000 TEU) głównym źródłem jest silnik o tyle rola śruby napędowej rośnie w przypadku większego kontenerowca (11 400 TEU).

W Rozdziale 5 **The operating parameter characteristics of the drive system** (pl. Charakterystyki operacyjne układu napędowego) Doktorant przedstawił wyniki badań sztywności kadłuba oraz wpływu ułożenia linii wałów układu napędowego na drgania kadłuba i układu napędowego.

W podrozdziale 5.1 Autor oblicza numerycznie (to samo oprogramowanie FEM) horyzontalną i wertykalną sztywność fundamentów łożyska rufowego i łożysk pośrednich (intermediate). W przypadku kontenerowca 2000 TEU sztywność wertykalna dla częstotliwości 7,58 Hz osiąga maximum dla łożyska pośredniego Nr 3 (Rys. 5.11); sztywność horyzontalna osiąga maximum dla łożyska pośredniego Nr 4 dla tej samej częstotliwości. Podobne obliczenia wykonano dla łożysk głównych. Sztywność wertykalna osiągnęła maksimum dla łożyska numer 2 dla wzbudzenia o częstotliwości 12,13 Hz a horyzontalna dla częstotliwości 7,58 Hz.

W przypadku kontenerowca 11 400 TEU sztywność horyzontalna dla częstotliwości 20 Hz osiągnęła maximum dla łożyska pośredniego nr 1; sztywność wertykalna osiągała maximum dla tej samej częstotliwości ale dla łożyska pośredniego nr 2.

Następnie Autor obliczył sztywność podwójnego dna kontenerowców w otoczeniu fundamentów rozważanych łożysk w dwóch wersjach (sztywności obliczanej lokalnie oraz dla całego kadłuba). Dla częstotliwości drgań 7,58 Hz niepewność (rozrzut) sztywności obliczanej lokalnie posiada dwa maxima dla lokalizacji 3-ego łożyska pośredniego (~39%) oraz 6-tego łożyska pośredniego (~66%). Dla częstotliwości 12,13 Hz maxima rozrzutów występują w okolicy łożysk pośrednich 3, 4 i 5 – wynosząc 59, 51 i 71%, odpowiednio.

W przypadku większego kontenerowca (11 400 TEU) największe rozrzuty wyników (dla sztywności obliczanej lokalnie versus sztywność całego kadłuba) otrzymano dla lokalizacji pośredniego łożyska nr. 2.

Podrozdział 5.2 poświęcony jest zagadnieniu wpływu ułożenia linii wałów układu napędowego na drgania kadłuba i układu napędowego kontenerowca 2000 TEU. Autor rozważa wpływ wymiaru modelu (1D i 3D) oraz warunków brzegowych na rozrzut i błędy obliczeniowe. Rozważane są 4 warianty warunków brzegowych:

1. wszystkie łożyska jako podparcie punktowe, idealnie sztywne;
2. poza tylnym łożyskiem (adekwatna sprężyna) pozostałe łożyska podobnie do war. 1;
3. tylne łożysko podobne do war. 2, pozostałe jako elastyczne podparcia;
4. tylne łożysko jako dwie sprężyny, pozostałe łożyska jak w war. 3.

Niestety brak jest informacji o własnościach i lokalizacji sprężyn. Autor oblicza przesunięcia wału napędowego w czterech wariantach i stwierdza arbitralnie, że wariant 4 jest optymalny.

Następnie Autor porównuje obliczenia przesunięcia wału napędowego w modelu 1D i 3D. Różnice przesunięć na łożyskach rufowych jest największe ale obydwa modele dają podobne rezultaty. Największe rozrzuty wyników otrzymano dla łożysk pośrednich o nr. 2, 3 i 4 (ok. 70%). Autor stwierdza, że 1D model opisuje zagadnienie ułożenia wału napędowego z wystarczającą dokładnością.

W dalszej części przebadano wpływ warunków eksploatacji wału:

1. warunki nominalne, silnik rozgrzany, nominalne siły hydrodynamiczne;
2. warunki tuż po zatrzymaniu napędu, silnik rozgrzany, siły hydrodynamiczne zerowe;
3. warunki po dłuższym postoju, silnik nierozgrzany, siły hydrodynamiczne zerowe.

Obliczono przesunięcia wałów, siły zginające oraz naprężenie i wykazano, że dla badanych warunków siły i momenty zginające mieszczą się w akceptowalnych granicach.

W podrozdziale 5.3 rozważono założenie izolacji wału napędowego od kadłuba i jego wpływ na obliczenia zginających drgań horyzontalnych i wertykalnych. Rozważono 3 warianty:

1. wał napędowy izolowany od kadłuba, podarcia sztywne, łożysko rufowe - podparcie w dwóch punktach, pozostałe pojedynczy punkt podparcia;
2. wariant podobny do 1 ale łożysko rufowe jest modelowane pojedynczym punktem podparcia;
3. podobnie do 1 ale podparcia elastyczne (sprężyna).

W oparciu o wyniki obliczeń Autor konkluduje, że drgania zginające można opisać modelem, w którym układ napędu jest izolowany od kadłuba pod warunkiem właściwego określenia

sztywności oraz tłumienia fundamentu układu (w tym łożysk) oraz położenia punktów podparcia (szczególnie w przypadku łożyska rufowego).

Rozprawę kończy rozdział **Conclusions and objectives of further research** (pl. Wnioski i zadania dla dalszych badań). W rozdziale tym w sposób syntetyczny podsumowano uzyskane w rozprawie wyniki oraz sformułowano najistotniejsze wnioski i plany dla dalszych badań wynikające z przeprowadzonych analiz.

IV. Oryginalność rozprawy

Recenzowana rozprawa stanowi oryginalny przyczynek do opisu oraz modelowania złożonych procesów wibracji statku jako całości oraz superstruktur takich jak kadłub, nadbudówka czy układ napędu. Choć z przeglądu literatury wynika, że zagadnienie to oraz wynikający z niego efekt zmęczenia elementów konstrukcji oraz uciążliwość dla załogi i pasażerów jest badane od wielu lat rozrzut wyników wynosi czasem wiele rzędów wielkości (Rys. 1.3 i 1.4). Stąd podjęcie wysiłku zbadania przyczyn rozbieżności oraz optymalizacja stosowanych metod numerycznych jest godne pochwały, nawet jeśli nie wszystkie zamierzenia udało się osiągnąć.

Należy podkreślić szeroki zakres prac wykonanych i przedstawionych przez Doktoranta od zagadnień laboratoryjnych do badań rzeczywistych jednostek. W pracy przedstawiono wiele modeli numerycznych związanych z drganiami belek uszkodzonych i nieuszkodzonych oraz cienkich płyt oraz płyt usztywnionych oraz wyniki ich weryfikacji z modelem teoretycznym i wynikami eksperymentalnymi. Następnie Autor przeszedł do opisu drgań rzeczywistych jednostek, w tym kontenerowców 2000 TEU oraz 11 400 TEU. Zaprezentowany w rozprawie materiał analityczny oraz rezultaty obliczeń wymagały znacznego nakładu pracy oraz inwencji i stanowią niewątpliwie oryginalne osiągnięcia naukowe Doktoranta.

Wszystko to przesądza w mojej ocenie o oryginalności pracy i istotnym wkładzie w rozwój badań konstrukcji okrętowych, metod modelowania FEM oraz analizy wyników. Uzyskany materiał badawczy w pełni pozwala na stwierdzenie, że cel oraz zakres recenzowanej rozprawy zostały zrealizowane a teza pracy dowiedziona.

V. Wartości poznawcze pracy

Istotne znaczenie dla recenzowanej rozprawy ma to, że zaprezentowano nowe wyniki kompleksowych badań numerycznych wibracji konstrukcji okrętowych oraz ich weryfikację eksperymentalną.

W pracy przedstawiono wiele nowych modeli numerycznych oraz weryfikację różnych elementów skończonych dla belek o różnych warunkach brzegowych w oparciu o teorię Euler'a-Bernoulli'ego. Trochę żal, że brakuje weryfikacji wyników dla belki uszkodzonej. Na szczególne wyróżnienie zasługuje weryfikacja eksperymentalna modelowania drgań cienkich płyt z usztywnieniem i bez. Autor udowodnił użyteczność oraz zoptymalizował modelowanie dużych struktur (np. kadłub statku) metodą elementów skończonych (FEM) z wykorzystaniem oprogramowania Patran/Nastran. Ważne z punktu widzenia wartości poznawczych jest weryfikacja modeli numerycznych drgań konstrukcji okrętowych ze szeroko stosowanymi wzorami fenomenologicznymi drgań wertykalnych i horyzontalnych statków. Jak dotąd brak jest tak kompleksowego podejścia analitycznego badań rozrzutów i błędów obliczeniowych wybranych konstrukcji okrętowych, pozwalającego na przygotowanie wytycznych dla konstruktorów i specjalistów w branży okrętowej. Autor oszacował wpływ założeń modelowych na błędy i rozrzuty wyników numerycznych wibracji różnych konstrukcji.

Zaprezentowane w rozprawie rezultaty wnoszą istotny wkład poznawczy w dziedzinie mechaniki maszyn, w tym okrętownictwa – zwłaszcza w zakresie zagadnień podstaw teoretycznych wibracji oraz analizy wyników numerycznych.

VI. Wartości użytkowe pracy

Recenzowana rozprawa ma niewątpliwie walor aplikacyjny, wynikający z aktualności poruszanych zagadnień, szczególnie w aspekcie zapobiegania, już na etapie projektowania, nadmiernym wibracjom konstrukcji statków. Autor zoptymalizował metodę FEM oraz elementy skończone dla modelowania superstruktur statków (kadłuba, nadbudówki, układu napędowego, etc.) na przykładzie rzeczywistych kontenerowców 2000 TEU oraz 11 400 TEU. Uzyskane przez Doktoranta wyniki mogą być w sposób bezpośredni zastosowane w praktyce inżynierskiej do konstrukcji statków zgodnie z wymaganiami towarzystw certyfikacyjnych.

Na szczególne podkreślenie w tym zakresie zasługują rozważania odnośnie wpływu drgań układu napędowego na pracę łożysk oraz konstrukcję statku. Ciekawe wyniki otrzymano dla modelowania łożysk rufowych i ich obciążeń.

Podsumowując, pragnę jeszcze raz podkreślić dużą wartość użyteczną przeprowadzonych badań i recenzowanej pracy. Autor wykazał, że możliwe jest ograniczenie rozrzutów i błędów modelowania numerycznego konstrukcji statków do akceptowalnych w praktyce wielkości.

VII. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

VII.1. Uwagi o charakterze merytorycznym (w kolejności zgodnej z układem rozprawy)

W rozprawie zaprezentowano oryginalne oraz kompleksowe ujęcie zagadnienia co stanowi niewątpliwie osiągnięcia naukowe Doktoranta. Poniższe uwagi nie umniejszają mojej pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej.

Uwagi ogólne:

1. Zgodnie z deklaracją Doktoranta problem błędów eksperymentalnych nie wchodzi w zakres przedstawionej pracy. Czy Autor jest jednak w stanie ocenić wpływ takich błędów na broniona tezę?
2. Jaki jest wpływ ułożenia linii wałów układu napędowego oraz przyjętych warunków brzegowych na częstotliwości i amplitudy drgań ?
3. Co Autor ma na myśli używając pojęcia 'Shapes' w Tabelach 3.3 - 3.7; brak opisu warunków modelowania. W tabeli 3.6 widać wyraźny trend spadku częstotliwości 'modów' wraz ze wzrostem wymiaru elementów od 1D do 3D. Proszę to wyjaśnić ?
4. Opisując Rys. 3.11 Autor twierdzi, 'im wyższy mod, większa częstotliwość tym większy błąd' – przeczy temu rysunek – gdzie w modzie 2 błąd obliczeniowy jest mniejszy.
5. Dlaczego błąd (dla większej ilości elementów (Rys. 3.12) jest większy w modzie 1. Brak analizy.
6. Dlaczego błąd dla elementu 3D jest większy (dla modu 3 – rys. 3.13) ? To samo dotyczy wyników przedstawionych na rys. 3.14.
7. Proszę wyjaśnić uwagę o modelu 2-3D i ilości stopni swobody na stronie 92.
8. Niezrozumiały (sprzeczny z rysunkiem) jest opis wyników dla modelu 2-3D, str. 104.
9. Rozdział Conclusions (str. 105) nie do końca zgodny jest z wynikami.
10. Proszę wyjaśnić stwierdzenie na str. 124, „application of empirical formulas for predicting the of ships vibration ... has not high accuracy" – na jakiej podstawie opiera Autor swoją tezę ? Czy wykonał lub jest świadom jakichś badan eksperymentalnych?
11. Dlaczego w rozdziałach 4.2.1 – 4.2.4 jako główny parametr Autor podaje prędkość a nie amplitudę odchylenia, częstotliwość, czy przyspieszeń? Jakie parametry są istotne dla zdrowia i samopoczucia człowieka ?
12. W konkluzjach na str. 154 Autor twierdzi „ ... Patran-Nastran software platform gives more accurate results than methods based on existing experimental formulas". Na czym Autor opiera swoje przeświadczenie.

13. Wariant 4 na str. 175 opiera się na stosowaniu dwóch sprężyn ale Autor nie wyjaśnia ich lokalizacji i parametrów – to samo dotyczy pozostałych wariantów – brak pełnej informacji o założeniach?
14. Na stronie 176 Autor twierdzi, że model 4 jest optymalny ale nie wyjaśnia podstaw tej oceny? Poniżej twierdzi, że model 1D zapewnia dużą dokładność – jaka podstawa ?

Uwagi drobniejsze:

1. Autor używa pojęcia „moment of inertia" o wymiarze [kg m2] tam gdzie pw referencyjnej teorii Eulera–Bernoulliego zginania belek występuje „**2nd moment of area**" lub „**second area moment**" ew. „**area moment of inertia**" o wymiarze [m^4]. Proszę o wyjaśnienie tej istotnej różnicy.
2. Proszę wyjaśnić stosowane wymiary w równaniu (2.22) i 2.24.
3. Brak wyjaśnień symboli użytych na Str. 51 i 52.
4. Co Autor ma na myśli pisząc na str. 78 „As the mesh density increases, the graph is smoother"?
5. Brak opisu struktur na rys. 3.15 .
6. Czy w Tabeli 3.15 i 3.16 nie byłoby lepiej pokazać błąd obok wartości bezwzględnych?
7. Na rys. 3.33 występuje dodatkowy pik w okolicy 360 Hz – brak wyjaśnienia.
8. Brak odnośników dla pracy Yumei et al. – Str. 108.
9. Skąd pochodzą wartości 6,4 oraz 4.8 Hz na rys. 4.36 ?
10. Błędne opisy osi na rys. 5.29.
11. Brak wymiarów na osiach rys. 5.50.

VII. 2. Uwagi porządkowe (w kolejności zgodnej z układem rozprawy)

Choć rozprawa doktorska przygotowana jest dość starannie pod względem edytorskim, język rozprawy pozostawia wiele do życzenia. O zauważonych usterkach, poinformowałem Doktoranta osobiście. Poprawna jest struktura i plan pracy.

VIII. Uwagi końcowe

Praca napisana jest w sposób dość zrozumiały, zamieszczono w niej wiele szczegółowych informacji pozwalających na dokładne przeanalizowanie materiału badawczego. Powyższe uwagi krytyczne mają na celu jedynie pomoc w wykorzystaniu przedstawionego materiału dla dalszych prac nad zagadnieniem wibracji struktur okrętowych.

IX. Wniosek do Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu metod numerycznych właściwych przedstawianej dziedzinie, w tym FEM. Na szczególne wyróżnienie zasługuje oryginalne opracowanie procesu wibracji konstrukcji okrętowych oraz weryfikacja eksperymentalna opracowanych modeli.

Podsumowując, wysoko oceniam dorobek Doktoranta w zakresie rozwoju metod numerycznych z wykorzystaniem elementów skończonych

Przedstawiona rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz pokazuje, że kandydata posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie naukowej: „Budowa i eksploatacja maszyn" w wystarczającym zakresie. Potwierdza, że Doktorant posiadł umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Zaprezentowana w rozprawie

analiza stanowi rozwiązanie zadania naukowego i spełnia w moim przekonaniu wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że:

1. Rozprawa doktorska mgr inż. Do Van Doana spełnia wymagania art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz. U. Nr 65, poz. 595, stan prawny na dzień 30 września 2011 r.) i w związku z art. 179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. *Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669 z późn. zm.) wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

2. Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dotychczasowej dziedziny nauk technicznych i dyscypliny naukowej *budowa i eksploatacja maszyn*, co odpowiada dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych i dyscyplinie *inżynieria mechaniczna* według nowej klasyfikacji dziedzin i dyscyplin określonej w rozporządzeniu z dnia 20 września 2018 r. (Dz. U. z 2018 r. poz. 1818).