

dr hab. inż. Mirosław Gerigk, prof. PG  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa  
Politechniki Gdańskiej

**Recenzja**  
**pracy doktorskiej mgr inż. Kamili Stryczniewicz**  
**pt. "Autonomous Underwater Vehicle Dynamics and Predictions of AUV's Hydrodynamic Characteristics Based on Surrogate Model"**

**Podstawa prawna.** Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie decyzji Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 1 czerwca 2022 r. o powołaniu na recenzenta, rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamili Stryczniewicz pt.: "Autonomous Underwater Vehicle Dynamics and Predictions of AUV's Hydrodynamic Characteristics Based on Surrogate Model", oraz na podstawie pisma Pana prof. dr hab. inż. Roberta SITNIKA, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 13 czerwca 2022 r.

**1. Uzasadnienie podjęcia problemu badawczego i rozwiązania zadania naukowego**

Problem badawczy, którego dotyczy rozprawa doktorska Pani mgr inż. Kamili Stryczniewicz dotyczy modelowania dynamiki bezałogowych pojazdów podwodnych typu AUV (Autonomous Underwater Vehicle) z ukierunkowaniem na pojazdy AUG (Autonomous Underwater Glider). Poruszoną w pracy problematykę należy uznać za bardzo aktualną z naukowego, badawczego i praktycznego punktu widzenia.

Rozwiązanie problemu dynamiki pojazdu AUV wymaga znajomości wiedzy w kilku obszarach badawczych, począwszy od definicji pojazdu, poprzez definicję dynamiki morza, mechanikę analityczną, numeryczną mechanikę płynów CFD aż po modelowanie dynamiki pojazdu (hydrostatyka, obciążenia, równania ruchu, hydrodynamika/dynamika pojazdu). W przypadku ocenianej rozprawy doktorskiej mamy do czynienia z badaniami, które są ważne w obszarach badań należących do kilku dyscyplin: (1) automatyka, elektronika i elektrotechnika, (2) informatyka techniczna i telekomunikacja, (3) inżynieria materiałowa, (4) inżynieria mechaniczna czy (5) inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Istota rozprawy doktorskiej przedstawionej do oceny dotyczy modelowania dynamiki bezałogowego pojazdu podwodnego typu AUG. Doktorantka sformułowała następującą hipotezę (tezę) badawczą: "Zastosowanie modelu zastępczego oddziaływań hydrodynamicznych do modelu matematycznego ruchu pojazdu AUV umożliwi uzyskanie dokładniejszego i wciąż efektywnego, z obliczeniowego punktu widzenia, narzędzia do przewidywania dynamiki i osiągow pojazdu AUV". Doktorantka podjęła się rozwiązania trudnego problemu badawczego, stosując systemowe i zintegrowane podejście oraz znane i nowe metody badawcze i modele matematyczne.

Pojazdy typu AUV (AUG) są coraz częściej wykorzystywane zarówno do celów cywilnych jak i militarnych. Obecnie, do najtrudniejszych zadań z naukowego, badawczego i praktycznego punktu widzenia należy opracowanie w pełni autonomicznego pojazdu, którego charakterystyki zależą od kształtu kadłuba i doboru materiałów oraz układu napędowego, źródeł zasilania w energię, pokładowych systemów sensorycznych i efektorowych oraz systemów sterowania, nawigacji i komunikacji. Istotny jest też wpływ pokładowych systemów dedykowanych. Każdy z powyższych elementów ma wpływ na charakterystyki hydromechaniczne i dynamikę pojazdu. Z kolei, dynamika pojazdu ma bezpośrednie przełożenie na pracę systemu sterowania i systemu zasilania w energię. Dodatkowe wyzwania wynikają z konieczności nadania tym pojazdom specjalnych cech, które są szczególnie istotne w obszarach bezpieczeństwa żeglugi i obronności. Rozwiązanie problemów dotyczących dynamiki pojazdu wymaga szerokiej wiedzy, ponieważ dynamika ma największy wpływ na to, czy zostaną spełnione kryteria operacyjne. Jest ona najlepszą miarą funkcjonalności, efektywności (osiągów) i bezpieczeństwa pojazdu. Dynamika w znacznej mierze decyduje o sukcesie misji pojazdu rozumianej, jako sekwencja zdarzeń i zadań w warunkach operacyjnych. Z naukowo-badawczego punktu widzenia, modelownie dynamiki pojazdów AUV (AUG) można przeprowadzić



stosując badania na obiekcie rzeczywistym, na modelu fizycznym lub za pomocą symulacji komputerowej z wykorzystaniem matematycznego modelu dynamiki pojazdu. Stosując powyższe metody badawcze można uzyskać wiarygodny opis dynamiki pojazdu jednak należy sobie zdawać sprawę z tego, że przewidywanie dynamiki w przypadku rzeczywistego pojazdu AUV (AUG), może się wiązać z trudnościami, związanymi między innymi z opracowaniem chociażby systemu sterowania. Może to wynikać z różnicy wartości funkcji celu opisujących dynamikę pojazdu otrzymanych za pomocą symulacji komputerowej (wirtualny model dynamiki) i wartości tych funkcji uzyskanych z użyciem systemu sensorycznego w warunkach zbliżonych do rzeczywistych lub operacyjnych (realny model dynamiki). Wprowadzenie poprawek stanowi podstawę poprawnej pracy systemu sterowania pojazdem. Praca Doktorantki wychodzi na przeciw rozwiązaniu naukowych i realnych problemów związanych z eksploatacją pojazdów AUV (AUG).

*Podsumowując, należy podkreślić, że rozwiązanie zadania naukowego, którego podjęła się Doktorantka ma duże znaczenie z naukowego, badawczego i praktycznego punktu widzenia. Między innymi, dlatego że opracowanie zaawansowanych modeli dynamiki tych pojazdów będzie miało wpływ na ich dalszy rozwój, w tym autonomicznych pojazdów typu AUV(AUG).*

## 2. Ogólna ocena rozprawy doktorskiej

**Struktura pracy.** Rozprawa doktorska mgr inż. Kamili Stryczniewicz liczy łącznie 121 stron i została napisana w języku angielskim. Obejmuje część merytoryczną, składającą się z 11 rozdziałów wraz z podsumowaniem zawartym w końcowej części rozdziału 11. Część merytoryczna pracy została poprzedzona streszczeniem w języku angielskim i polskim, spisem treści oraz zestawieniem rysunków, tabel i załączników. Po części merytorycznej zamieszczono spis literatury. Zawiera on łącznie 58 pozycji, w tym 10 to publikacje internetowe. Zdecydowana większość pozycji literatury pochodzi z okresu po roku 2010, łącznie 34 pozycje. W końcowej części pracy zawarto 7 załączników, które zawierają treści dotyczące kolejno: rozwiązywania równań Myringa (załącznik 1), równań ruchu ciała sztywnego - wyprowadzenie z zasad zachowania pędu i momentu pędu (załącznik 2), wyprowadzenie równań sił i momentów hydrostatycznych (załącznik 3), algorytm do wyznaczania oporu poprzecznego opracowany w środowisku MATLAB (załącznik 4), algorytm do wyznaczania mas dołączonych opracowany w środowisku MATLAB (załącznik 5), symulator dynamiki pojazdu, kod opracowany w środowisku MATLAB (załącznik 6), zbiór danych dla systemu ANN (załącznik 7).

W celu dokonania oceny rozprawy doktorskiej z uwagi na *elementy nowości naukowej stanowiące oryginalny dorobek Doktorantki* oraz z uwagi na *dorobek w odniesieniu do starych i nowych dyscyplin* recenzent dokonał najpierw oceny każdego z rozdziałów merytorycznych.

W rozdziale 1 "*Introduction*" Doktorantka przedstawiła rolę mórz i oceanów w ochronie środowiska naturalnego. W kontekście badań morza wskazała na pogłębiający się proces zanieczyszczenia i zatrucia środowiska morskiego, który przebiega szybciej niż proces poznawania tego środowiska. Podkreśliła, że skala zanieczyszczeń w połączeniu z przemysłową eksploatacją zasobów żywnościowych i surowcowych mórz i oceanów może doprowadzić do stanu wyeksploatowania tych zasobów i degradacji ekologicznej. Doktorantka podała uzasadnienie swoich zainteresowań badawczych, jeśli chodzi o autonomiczne pojazdy podwodne typu AUG ("glidery"). Wykorzystała wiedzę na temat ewolucji tych pojazdów od późnych lat 50-tych XX wieku, aż do pojawienia się dojrzałej koncepcji Slocum Glidera w roku 1989. Doktorantka podkreśliła potrzebę szerokiego zastosowania tych pojazdów w ochronie mórz, z uwagi między innymi na ograniczenia systemów antropotechnicznych oraz i potrzeby efektywnej, i bezpiecznej kontroli środowiska morskiego. W końcowej części rozdziału, przedstawiła istotę podjętego w pracy problemu badawczego, wskazując na konieczność znajomości dynamiki pojazdów AUG, między innymi z uwagi na wymuszenia hydrodynamiczne, które występują podczas eksploatacji.

W rozdziale 2 "*Research objective and hypothesis*" Doktorantka zdefiniowała przedmiot badań, jako "podwodny szybowiec" typu AUG - "glider". Pod tą nazwą należy rozumieć pojazd podwodny posiadający kadłub i płaty (powierzchnie nośne), które decydują o rozkładzie głównych sił hydrodynamicznych i dynamice pojazdu. Doktorantka założyła, że ruch pojazdu odbywa się w płaszczyźnie pionowej a trajektoria ruchu ma umownie przebieg "piło-kształtny". Ruch postępowy



pojazdu wynika z niewielkich zmian jego wyporności, położenia i zorientowania. Doktorantka wyodrębniła dwa podstawowe obszary naukowe stanowiące podstawę badań własnych: mechanikę analityczną złożonych układów mechanicznych o zmiennej bezwładności oraz numeryczną mechanikę płynów CFD (Computational Fluid Dynamics). Za cel główny badań przyjęła opracowanie modelu matematycznego opisującego dynamikę pojazdu podwodnego typu AUG, w tym opracowanie metody oddziaływań hydrodynamicznych. Podkreśliła, że opracowany model dynamiki pojazdu powinien umożliwiać uzyskanie wysokiego poziomu dokładności i szerokiego zakresu opisu ruchu pojazdu. Doktorantka sformułowała następującą hipotezę badawczą (używa dwóch określeń: hipoteza i teza): *"Włączenie modelu zastępczego oddziaływań hydrodynamicznych do modelu matematycznego dynamiki pojazdu AUV (AUG) umożliwia uzyskanie dokładniejszego i nadal efektywnego, z obliczeniowego punktu widzenia, narzędzia do przewidywania dynamiki i osiągnięć pojazdu"*. W celu uzasadnienia hipotezy i realizacji celu naukowego rozprawy Doktorantka sformułowała następujące cele szczegółowe: (1) opracowanie modelu CFD i symulacja CFD w celu przygotowania prób oddziaływań hydrodynamicznych pojazdu dla modelu zastępczego, (2) opracowanie modelu zastępczego, opartego na zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych ANN (Artificial Neural Networks), (3) opracowanie równań ruchu pojazdu i przystosowanie modelu zastępczego do modelu dynamiki pojazdu, (4) opracowanie kompletnego modelu dynamiki pojazdu i symulacja jego ruchu w środowisku MATLAB.

W rozdziale 3 *"Applied research methodology and content of the thesis"* Autorka, odnosząc się do celu pracy, i roli modelu dynamiki pojazdu AUG określiła wiarygodność modelu dynamiki pojazdu poprzez odpowiednio wysoki poziom dokładności i możliwość opisu szerokiego zakresu obciążeń hydrodynamicznych i dynamiki pojazdu i przedstawiła istotę własnego podejścia do modelowania dynamiki pojazdów AUG. Ponieważ rozwiązanie równań dynamiki AUG wymaga wyznaczenia obciążeń hydrodynamicznych, do ich oszacowania należy zastosować symulację numeryczną CFD opartą na rozwiązaniu równań przepływu Navier'a-Stokes'a, przy użyciu metody objętości skończonych FVM (Finite Volume Method).

Szeroki zakres warunków eksploatacyjnych AUG, które charakteryzują się zmienną bezwładnością, wymaga znajomości charakterystyk hydrodynamicznych pojazdu dla szerokiego zakresu jego ruchu (dla często zmiennych kątów natarcia obiektu, zmiennego kursu czy zmiennej prędkości). Zdaniem Doktorantki, opracowanie efektywnego sposobu określania obciążeń hydrodynamicznych, wymaga zbudowania modelu zastępczego do wyznaczania tych obciążeń, w oparciu o sieci ANN. Istota tego rozwiązania polega na nauczaniu sieci ANN przewidywania obciążeń hydrodynamicznych, w szerokim zakresie warunków operacyjnych, w oparciu o wiarygodne dane wejściowe tych obciążeń uzyskane z symulacji CFD, dla wejściowego wybranego zbioru danych opisujących te warunki. Zdaniem Doktorantki, takie podejście umożliwi otrzymanie wiarygodnych charakterystyk hydrodynamicznych AUG dla szerokiego zakresu jego ruchu. W celu opracowania modelu dynamiki AUG, należy zatem wyprowadzić i rozwiązać równania różniczkowe ruchu pojazdu, co zrobiono z wykorzystaniem środowiska MATLAB.

W rozdziale 4 *"Literature overview"* Doktorantka przedstawiła ewolucję prac prowadzonych na świecie w zakresie dynamiki pojazdów AUG, w okresie dwóch ostatnich dekad. Wskazała na dominujące w różnych rozwiązaniach podejście, oparte na zastosowaniu modelu Newton'a-Euler'a. Podejście to zostało zastosowane także przez Doktorantkę. Następnie, odniosła się do możliwości zastosowania w modelowaniu dynamiki pojazdu, metod CFD i metod opartych na sieciach ANN. Jeśli chodzi o zastosowanie metody CFD w dynamice pojazdów AUG, powołała się na liczne opracowania znane w literaturze. Dużo miejsca poświęciła na omówienie doświadczeń innych autorów, w tym zastosowaniom CFD, poprzez rozwiązanie równań przepływu Naviera-Stokesa z uśrednieniem Reynoldsa RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes), w celu określenia współczynników hydrodynamicznych dla uproszczonych modeli dynamiki pojazdu. Omówiła też fakt stosowania różnych modeli wirowości i podała uwagi krytyczne na temat stosowanych definicji dziedziny obliczeniowej, która była najczęściej dzielona na dwie części, wewnętrzną i zewnętrzną, dla których definiowano oddzielne siatki obliczeniowe, przy czym dziedzina wewnętrzna niestrukturalna, wykonywała ruch obrotowy z uwagi na zmienną orientację przestrzenną pojazdu.

W ocenianej pracy Doktorantka zastosowała podejście podobne do powyżej opisanego. W odniesieniu do modelowania dynamiki z wykorzystaniem sieci ANN. Doktorantka podała, że sieci te



są najczęściej stosowane, jako modele aproksymacyjne, w celu uzyskania rozwiązania problemów wiążących się z wykorzystaniem dużych zbiorów danych. Doktorantce znane są prace, w których użyto sieci ANN do przewidywania charakterystyk hydrodynamicznych, gdzie potwierdzono dobrą korelację uzyskanych z ich użyciem wyników w stosunku do wyników otrzymanych na przykład za pomocą badań eksperymentalnych. Doktorantka zdecydowała się na użycie modelu zastępczego, opartego na sieci ANN do wyznaczania obciążeń hydrodynamicznych.

W rozdziale 5 "*General taxonomy of submersible vehicles*", Doktorantka przedstawiła ewolucję bezzałogowych pojazdów podwodnych w oparciu dane zaczerpnięte z literatury. Zdaniem recenzenta linie podziału pomiędzy poszczególnymi typami tych pojazdów wynikają głównie z ich funkcjonalności, w tym z przeznaczenia i z osiągnięć. Prace badawcze i projektowanie omawianych pojazdów powinny się odbywać w oparciu o tak zwane "key drivers", czyli w oparciu o elementy decydujące o funkcjonalności, osiągnięciach i bezpieczeństwie pojazdu a nie w oparciu o rutynową "spirale projektową". Istotne jest przy tym uwzględnienie wpływu innowacyjnych technologii i rozwiązań. Dąży się także do nadania tym pojazdom różnych poziomów autonomiczności (od poziomu 1 do 5), co dodatkowo komplikuje klasyfikację tych pojazdów. Ostatecznie, kombinacja wszystkich powyższych czynników może zdecydować o końcowej klasyfikacji pojazdu. Doktorantka posiada wiedzę na temat powyższych zagadnień i potrafi ustosunkować się do pojęcia "stopnia autonomiczności" tych pojazdów w warunkach operacyjnych. Potwierdzają to rozważania na temat pojazdu typu "glider" lub "wave glider".

W rozdziale 6 "*Autonomous Underwater Gliders*", Doktorantka przedstawiła definicję pojazdów AUG, odwołując się do różnych rozwiązań znanych w literaturze i praktyce. Omówiła podstawowe cechy tych pojazdów: zmienną wyporność oraz zmienne położenie. Zaznaczyła rolę odpowiednich rozwiązań w zakresie systemu balastowego i hydrodynamicznych powierzchni nośnych, pozwalających na wygenerowanie układu sił, masowych i hydrodynamicznych, decydujących o ruchu postępowym pojazdu w płaszczyźnie pionowej. Ruchowi postępowemu towarzyszą zazwyczaj kołysania podłużne, na skutek zmian stanu systemu balastowego a przy zmianie kursu, zmiany stanu systemu balastowego w płaszczyźnie poprzecznej pojazdu. Doktorantka zaznaczyła, że brak typowego napędu wodnego pojazdu ogranicza jego prędkość, ale może znacznie wydłużyć jego misję. Podkreśliła rolę systemów sensorycznych. Podała też typowe problemy związane z transmisją i gromadzeniem danych. System sensoryczny pojazdu umożliwia nawigację i komunikację, w tym kontrolę wyporności, zanurzenia, uniknięcia kolizji oraz wykonywanie pomiarów. Gotowość pojazdu do pracy potwierdzana jest przez gotowość do działania systemów pokładowych: nawigacyjnego, balastowego i sensorycznego.

#### **Rozdziały 7, 8, 9, 10 i 11 należy uznać za kluczowe z merytorycznego punktu widzenia.**

W rozdziale 7 "*Physical model of the AUG*" Autorka przedstawiła opracowany przez siebie model pojazdu AUG, który powstał w ramach prac badawczych wykonanych na Politechnice Warszawskiej. Do ogólnych założeń projektowych Doktorantka zaliczyła: wielkość, geometrię i masę pojazdu, składającą się z komponentu stałego i zmiennego, co do położenia. Zmiana wyporności dokonywana była poprzez zmianę położenia masy, pomiędzy zbiornikiem pokładowym a pęcherzem. Pojazd nie posiadał typowego systemu napędowego. Posiadał zapas energii w postaci zestawu baterii. Doktorantka opisała pojazd, podając użyte materiały konstrukcyjne, wymiary główne, kształt oraz masę całkowitą pojazdu. Model geometrii pojazdu przedstawiła w formie 3D w środowisku CAD tak, aby można go było wykorzystać w obliczeniach numerycznych i analizie CFD (Rys. 9 i 10). Wymiary główne pojazdu dobrano z uwagi na akwen oraz biorąc pod uwagę istniejące rozwiązania systemów pokładowych.

Analizowany pojazd AUG posiada kształt torpedo-podobny. Stosunek wymiarów głównych L/D wynosił 8. Skrajne części pojazdu zaprojektowano wykorzystując równania Myring'a. Pojazd potraktowano jak ciało sztywne o stałej masie i stałym jej rozkładzie. Siły masowe i grawitacyjne obliczono w układzie związanym z geometrycznym środkiem kadłuba (Rys. 14, str. 33), gdzie znajdował się też środek wyporu. Środek ciężkości usytuowany był 2 cm poniżej środka wyporu (Tabela 4). W czasie analizy ruchu pojazdu przyjęto stałe wartości charakterystyk hydrostatycznych pojazdu. Dotyczyło to każdej symulacji ruchu pojazdu w środowisku MATLAB. Otoczenie pojazdu potraktowano, jako ośrodek nieograniczony, bez uwzględnienia prądu wody i powierzchni



ograniczających, z uwzględnieniem jedynie warunków początkowych. Pominięto ruch pojazdu w płaszczyźnie horyzontalnej.

W rozdziale 8 "*Numerical simulation of hydrodynamic forces*" Doktorantka skoncentrowała się na zagadnieniach związanych z symulacją sił hydrodynamicznych z wykorzystaniem CFD. Przedstawiła własny model obliczeń charakterystyk hydrodynamicznych pojazdu, dla danych wejściowych warunków operacyjnych, który oparto na następujących założeniach:

- analiza CFD dla przepływu ustalonego - użyto oprogramowania komercyjnego ANSYS Fluent 18.2,
- 3-wymiarowy opływ kadłuba pojazdu w warstwie przyściennej - przyjęto model przenoszenia naprężeń stycznych oparty na modelu SST  $k-\omega$ ,
- opisano środowisko operacyjne pojazdu dla akwenu Bałtyku, w tym głębokość operacyjną akwenu,
- dziedzinę obliczeniową zdefiniowano zgodnie z zaleceniami ITTC (International Towing Tank Conference), dzieląc ją na część wewnętrzną obrotową w formie siatki niestrukturalnej (użyto środowiska ICEM-CFD 18.2) oraz część zewnętrzną strukturalną (Rys. 16, 17 i 18),
- do rozwiązania równań przepływu użyto metody FVM (Finite Volume Method),
- symulację CFD przeprowadzono dla przepływu ustalonego, dla szerokiego zakresu warunków operacyjnych: (1) kątów natarcia obiektu od 0 do 30 stopni, z krokiem co 2 stopnie oraz dla prędkości przepływu od 0,5 do 1,5 m/s, z krokiem co 0,3 m/s,
- wartości sił hydrodynamicznych zostały wyznaczone całkując rozkład ciśnień i naprężeń stycznych na powierzchni kadłuba, co umożliwiło wyznaczenie wartości współczynników hydrodynamicznych.

Wyniki badań w postaci rozkładu ciśnień, prędkości oraz wektorów prędkości przedstawiono dla danych wartości kąta natarcia obiektu i prędkości przepływu (Rys. 24, 25, 26, 27, 28 i 29). Podano także wyniki z uwzględnieniem zmiany kąta kursowego (yaw displacement) i kąta natarcia obiektu dla prędkości przepływu 0,5 m/s, co podano na Rys. 30, 31 i 32. Wyniki potwierdzają wysoką jakość przeprowadzonych prac badawczych.

Rozdział 9 "*Approximation model using artificial neural network*" Doktorantka poświęciła opisaniu modelu aproksymacyjnego, jako modelu zastępczego (z użyciem sieci ANN) do szybkiego i dokładnego szacowania obciążeń hydrodynamicznych dla szerokiego zakresu warunków operacyjnych pojazdu. Opisała procedurę budowy modelu aproksymacyjnego. Do rozwiązania zadania aproksymacji funkcji użyto oprogramowania Alyuda NeuroIntelligence, które wykorzystano kolejno do zaprojektowania, optymalizacji, uczenia i testowania własnej sieci ANN. Do uczenia i testowania sieci wykorzystano charakterystyki hydrodynamiczne pojazdu uzyskane z symulacji CFD dla wejściowego zbioru warunków eksploatacyjnych (kąta natarcia obiektu, kursu, prędkości obiektu). Populację tych danych przedstawiono w załączniku 7. Ostatecznie zweryfikowano 6 możliwych struktur własnej sieci ANN. Najbardziej przydatną okazała się struktura 4-10-1, posiadająca 4 wejścia, 10 jednostek w ukrytej warstwie i 1 wyjście (Rys. 35, Tabela 7). Jako algorytm uczący sieć 4-10-1 wybrano algorytm Levenberg'a-Marquardt'a, polegający na minimalizacji sumy kwadratów różnic wartości aproksymowanych i dokładnych (danych z CFD). Parametry sieci po jej nauczaniu podano na stronie 55. Testowanie sieci zaowocowało 5 % błędem średnim. Przydatność sieci potwierdzono na Rys. 37, str. 56, gdzie porównano wartości siły hydrodynamicznej (oporu) uzyskane z symulacji CFD z wartościami oporu uzyskanymi przy użyciu sieci własnej. W Tabeli 8 podano wyniki zapytań dla nauczonej sieci. Na Rys. 38 i 39 przedstawiono ocenę sieci 4-10-1. Wyniki potwierdzają jednoznacznie, że zastosowana sieć umożliwia uzyskanie dużej zgodności z wynikami uzyskanymi przy użyciu CFD.

W rozdziale 10 "*Mathematical description of glider motion in vertical plane*", Doktorantka opracowała i podała sposób rozwiązania równań różniczkowych ruchu AUG. Opisała ruch i dynamikę pojazdu, w przypadku ruchu w płaszczyźnie pionowej (MATLAB, Załącznik 6). Równania ruchu wyprowadzono w układzie związanym z pojazdem. Przedstawiono związki kinematyczne pomiędzy układem związanym z pojazdem a układem inercyjnym, związanym ze swobodną powierzchnią (Rys. 40). Wyznaczono pozycję, orientację i składowe prędkości liniowych AUG w układzie inercyjnym, wykorzystując macierz transformacji. Przedstawiono "kąty Eulera", dotyczące obrotów układu związanego z AUG względem układu inercyjnego. Składowe prędkości w układzie inercyjnym wyznaczono używając macierzy odwrotnej transformacji. Ogólną postać nieliniowych równań ruchu AUG dla 6 stopni swobody (równania 19, 20) podano na stronie 62 i 63. W równaniach uwzględniono wszystkie możliwe oddziaływania, decydujące o dynamice pojazdu. Do opisu dynamiki AUG



Doktorantka zastosowała równania pędu w postaci II prawa Newtona. Użyto liniowych i kątowych składowych pędu (r. 21 i 22) tworząc równania pędu i momentu pędu pojazdu w układzie inercyjnym. Po wprowadzeniu uproszczeń dotyczących macierzy bezwładności, dla osiowo-symetrycznego kształtu pojazdu, przedstawiono końcową postać równań (r. 29, 30). Podano macierz sił zewnętrznych składającą się z sił: hydrostatycznych, tłumienia, od działania mas dodanych i nośnych. Opisano szczegółowo wszystkie z nich, uwzględniając "osobliwości" metod służących do ich szacowania, biorąc pod uwagę składowe siły w zależności od kątów przechyłu i przegłębienia, przesunięcia masy czy sprzężenia metody przewidywania współczynników hydrodynamicznych z rozwiązaniem równań ruchu. Podano istotne informacje dotyczące problemów szczegółowych, związanych z modelowaniem różnego rodzaju oddziaływań. Dotyczy to między innymi: wpływu na ruch AUG sił od wymuszonych spadków ciśnień w skrajnych częściach pojazdu, generowania zmiennych wartości oporu i siły nośnej w zależności od kąta natarcia obiektu, identyfikacji masy dodanej dla przepływu poprzecznego przy użyciu teorii paskowej dla ciała smukłego, zakłóceń od mas dodanych o charakterze bezwładnościowym przy zmiennym kierunku obrotu pojazdu, wpływu ruchu obrotowego pojazdu na indukowane masy towarzyszące zależne od rozpiętości płatów. Na stronie 75 (r. 40, 41 i 42) podano macierzowy model mas dodanych. Na koniec podano podsumowanie dotyczące sił zewnętrznych.

W rozdziale 11 "*Vehicle simulation*", Doktorantka przedstawiła numeryczną aproksymację równań ruchu AUG (r. 52), która umożliwiła przeprowadzenie symulacji ruchu pojazdu dla szerokiego zakresu wybranych warunków operacyjnych. Po opracowaniu równań dynamiki ciała sztywnego (r. 29) i uwzględnieniu równań sił i momentów (r.51) utworzono układ nieliniowych równań ruchu pojazdu dla 6 stopni swobody. Przekształcając doprowadzono je do postaci końcowej (r. 53, 54). Ostatnie przekształcenie umożliwia szybkie ich całkowanie w MATLAB (solver ode45). Do całkowania użyto metodę RK 5-rzędu przy założonym błędzie obliczeń. W czasie symulacji określano warunki początkowe, w tym stan wektora pojazdu i krok symulacji. Przedstawiono algorytm symulacji ruchu AUG. Kod z podziałem na części podano w Załączniku 6. Istota symulacji dynamiki pojazdu AUG polegała na całkowaniu równań ruchu, obliczając obciążenia działające na pojazd dla każdego kroku czasowego, w oparciu o aktualne wartości pozycji, zorientowania i prędkości pojazdu. Wyniki symulacji stanowiły: prędkość, obciążenia oraz położenie i zorientowanie pojazdu, dla ruchu w płaszczyźnie pionowej, który wynikał jedynie z zadanych początkowych warunków ruchu i opisanych oddziaływań. Takie podejście umożliwiło precyzyjną analizę prostych zachowań pojazdu w jego progresywnym ruchu. Symulację przeprowadzono dla różnych warunków eksploatacyjnych, dla zakresu prędkości od 0,5 do 1,5 m/s. Podano szczegółowe wyniki symulacji dla prędkości 1,5 m/s dla 4 przypadków ruchu AUG: dla fazy wynurzenia ( $W < B$ ) na Rys. 51-55, dla fazy zanurzenia ( $W > B$ ) na Rys. 56-60, dla fazy wynurzenia ( $W < B$ ) z początkową wartością kąta przegłębienia "w dół" 24 stopnie na Rys. 61-65 oraz dla fazy zanurzenia ( $W > B$ ) z początkową wartością kąta przegłębienia "w górę" 24 stopnie na Rys. 66-70. Z symulacji ruchu, dla fazy wynurzenia i zanurzenia bez początkowego przegłębienia wynika, że zmiany położenia (pozycji)  $z=f(x)$  i prędkości  $U, W=f(t)$  przebiegają "quasi-liniowo". W sytuacji, gdy AUG zanurza się z początkową wartością przegłębienia "w górę" 24 stopnie, można zauważyć dużą zmienność tych charakterystyk, jeśli chodzi o wartości położenia (pozycji)  $z=f(x)$ , prędkości  $U, V=f(t)$  oraz sił  $X, Z=f(t)$ . Świadczy to bardzo dobrze o poprawności otrzymanego rozwiązania, modelu dynamiki pojazdu AUG i jego czułości. W końcowej części rozdziału 11 Doktorantka załączyła "*Summary and outlook*" - podsumowanie i wnioski, wynikające z badań. Mają one charakter ogólny i stanowią potwierdzenie wniosków zawartych w poszczególnych rozdziałach.

*Podsumowując, ogólna ocena pracy z uwagi na jej zawartość merytoryczną pozwala stwierdzić, że rozprawa doktorska jest kompletna i wykonana na wysokim poziomie. Treści przedstawione w poszczególnych rozdziałach zostały przedstawione w sposób merytoryczny. Zawarta w nich wiedza została przedstawiona w sposób przemyślany i syntetyczny.*

### **3. Uwagi krytyczne dotyczące rozprawy doktorskiej**

Recenzowana rozprawa doktorska pod względem redakcyjnym została wykonana bardzo starannie i posiada wiele zalet. Temat rozprawy doktorskiej oddaje treść zawartą w pracy. Zadanie



naukowe i hipoteza (teza) pracy zostały sformułowane prawidłowo. Praca posiada odpowiednią dla prac dyseracyjnych strukturę logiczną i formalną.

Zawiera ona kolejno:

- 1) Syntetyczne wprowadzenie do tematyki pracy.
- 2) Motywację podjęcia tematyki badań, przedstawienie problemu badawczego, sformułowanie zadania naukowego wraz z hipotezą (tezą) oraz ukazanie zasadniczego celu i celów szczegółowych badań.
- 3) Szczegółowy opis sposobu rozwiązania postawionego zadania badawczego przy użyciu: modelu przedmiotu badań, metody szacowania oddziaływań hydrodynamicznych dla wejściowego zbioru warunków eksploatacyjnych za pomocą CFD, metody wyznaczenia wartości oddziaływań hydrodynamicznych dla szerokiego zakresu warunków eksploatacyjnych za pomocą modelu aproksymacyjnego, jako modelu zastępczego (sieć ANN), modelu do analizy ruchu pojazdu z uwzględnieniem różnych oddziaływań, modelu dynamiki pojazdu opartego na rozwiązywaniu nieliniowych równań różniczkowych ruchu pojazdu i ich całkowaniu z użyciem MATLAB, symulacji ruchu pojazdu AUG dla szerokiego zakresu warunków eksploatacyjnych (MATLAB) wraz z podaniem wyników badań własnych i podsumowaniem pracy.

W pracy występują nieliczne błędy merytoryczne, stylistyczne i edytorskie. Dla przykładu, na stronie 43, nad Rys. 24 - zamiast "The results of selected aerodynamic characteristics...", powinno być "The results of selected hydrodynamic characteristics...". Pewnym mankamentem pracy jest brak słownika terminologicznego. W pracy występują nieliczne powtórzenia, szczególnie w jej pierwszej części, przed stroną 30. Recenzent ma pewne zastrzeżenia, co do użytych w rozdziale 8 i dalej określeń "pitch displacement" i "yaw displacement", jak wspomniano, dla ustalonych (quasi-statycznych lub quasi-dynamicznych) warunków opływu.

Recenzent wysoko ocenia pracę i uzyskane przez Doktorantkę wyniki badań. Pojawia się jednak kilka pytań merytorycznych. W recenzji zadano jedno z nich. Doktorantka w rozprawie podkreśla, że pojazd AUG traktowany jest, jako ciało sztywne o stałej masie i stałym rozkładzie masy. Pojawia się pytanie, czy jest to stwierdzenie aktualne w obu przypadkach, gdy pojazd jest typu suchego (przestrzeń wewnętrzna AUG nie posiada kontaktu z wodą zaburtową) oraz w przypadku, gdy pojazd jest typu mokrego (istnieje kontakt przestrzeni wewnętrznej z wodą zaburtową)? Proszę o odniesienie się do powyższego w formie ustnej na dalszym etapie przewodu doktorskiego.

*Podsumowując, recenzent pragnie zaznaczyć, że powyższe uwagi nie pomniejszają w żadnym stopniu wartości i jakości rozprawy doktorskiej, którą recenzent ocenia wysoko zarówno z merytorycznego, stylistycznego jak i edytorskiego punktu widzenia.*

#### **4. Ocena rozprawy doktorskiej z uwagi na elementy nowości naukowej stanowiące oryginalny dorobek Doktorantki**

W przedstawionej do oceny pracy, Doktorantka rozwiązała następujące problemy badawcze:

- 1) uzasadniła potrzebę znajomości dynamiki pojazdów AUG w warunkach eksploatacyjnych,
- 2) przedstawiła w sposób syntetyczny cel badań, metody badawcze a po przedstawieniu zadania naukowego sformułowała hipotezę (tezę) badawczą wraz z podaniem szczegółowych celów badań,
- 3) opisała problem badawczy po wnikliwej analizie ewolucji bezzałogowych pojazdów podwodnych i zastosowanych rozwiązań szczegółowych,
- 4) przeprowadziła badania literaturowe w zakresie dynamiki pojazdów AUG, odnosząc się do znanych w literaturze metod modelowania dynamiki bezzałogowych pojazdów podwodnych,
- 5) opracowała *własne podejście do analizy dynamiki pojazdów AUG*, które oparła na zastosowaniu wyników symulacji charakterystyk hydrodynamicznych dla wejściowego zbioru warunków eksploatacyjnych przy użyciu metody CFD i użyciu modelu zastępczego, w oparciu o sieć ANN, do przewidywania obciążeń hydrodynamicznych dla szerokiego zakresu warunków eksploatacyjnych,
- 6) przed przystąpieniem do szczegółowego rozwiązania własnego problemu badawczego przedstawiła definicję pojazdów AUG oraz ich podstawowe cechy w zależności od zastosowanych rozwiązań.

Kluczowymi rozdziałami z merytorycznego punktu widzenia, gdzie wkład Doktorantki w rozwiązanie postawionego zadania naukowego jest największy są rozdziały od 7 do 11.

Doktorantka przedstawiła w nich kolejno następujące elementy osiągnięć własnych:

- 1) w rozdziale 7 - przedstawiła opracowaną przez siebie *oryginalną koncepcję modelu pojazdu AUG*,



- 2) w rozdziale 8 - opisała *własny model szacowania obciążeń hydrodynamicznych dla danych warunków operacyjnych za pomocą CFD*,
- 3) w rozdziale 9 - opisała *własny oryginalny model aproksymacyjny, jako model zastępczy (oparty o własną sieć ANN - 4-10-1), do szybkiego i dokładnego szacowania obciążeń hydrodynamicznych dla szerokiego zakresu warunków operacyjnych*,
- 4) w rozdziale 10 - przedstawiła *własny model nieliniowych równań różniczkowych ruchu i dynamiki pojazdu AUG, dla przypadku ruchu w płaszczyźnie pionowej*,
- 5) w rozdziale 11 - Doktorantka opisała *numeryczną aproksymację nieliniowych równań ruchu do symulacji ruchu AUG, dla szerokiego zakresu warunków operacyjnych, opracowaną w środowisku MATLAB; aproksymację tych równań opracowano w oparciu o wcześniej wyprowadzone równania dynamiki ciała sztywnego (r. 29), z uwzględnieniem w nich kompletnych równań sił i momentów działających na pojazd (r.51).*

Jako pierwszy element nowości naukowej, stanowiący oryginalny dorobek Doktorantki należy wymienić opracowanie zintegrowanego podejścia do modelowania dynamiki pojazdów typu AUG. Podejście to można przedstawić, jako połączenie metody numerycznej mechaniki płynów CFD z modelem aproksymacyjnym, jako modelem zastępczym, opartym na zastosowaniu sieci ANN, służącym do przewidywania obciążeń hydrodynamicznych dla szerokiego zakresu eksploatacji pojazdów AUG. **Jako drugi element nowości naukowej**, należy uznać opracowany przez Doktorantkę kompletny model dynamiki pojazdu AUG w oparciu o nieliniowe równania różniczkowe ruchu, który wykorzystuje wyniki aproksymacji obciążeń uzyskanych za pomocą powyższego modelu zastępczego i umożliwia przewidywanie ruchu i dynamiki pojazdu AUG za pomocą symulacji w środowisku MATLAB.

*Podsumowując, recenzent uważa, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska, z uwagi na zawarte w niej elementy nowości naukowej, jest pracą kompletną, postawione zadanie badawcze należy uznać za rozwiązane a hipotezę (tezę) badawczą za udowodnioną.*

## **5. Ocena rozprawy doktorskiej z uwagi na dorobek w odniesieniu do starych i nowych dyscyplin**

W przedstawionej do oceny rozprawie doktorskiej, Doktorantka podjęła się rozwiązania aktualnych problemów naukowych i badawczych w omawianym obszarze. Przedstawione rozwiązania zostały oparte głównie na współczesnej wiedzy z zakresu mechaniki analitycznej złożonych układów mechanicznych o zmiennej bezwładności, mechanice płynów, numerycznej mechanice płynów CFD oraz sztucznych sieciach neuronowych ANN, co potwierdza przyjęty przez Doktorantkę plan pracy.

W dysertacji przedstawiono własne podejście do modelowania dynamiki autonomicznych pojazdów podwodnych AUG oraz przewidywania ich charakterystyk hydrodynamicznych. Wykorzystano "klasyczne" metody i modele oraz opracowano nowe, przynależne wcześniej do starych dyscyplin takich, jak budowa maszyn czy budowa i eksploatacja maszyn. Obecnie znalazły się one w polu zainteresowania aktualnych dyscyplin takich, jak (dziedzina nauk inżynierijno-technicznych): (1) inżynieria mechaniczna, (2) inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka czy (3) inżynieria bezpieczeństwa. Należy zaznaczyć, że z uwagi na wpływ dynamiki pojazdu AUG na pracę systemu sterowania czy systemu zasilania pojazdu w energię, rozpatrywane w dysertacji zagadnienia są też istotne z punktu widzenia dyscyplin: automatyka, elektronika i elektrotechnika oraz informatyka techniczna i telekomunikacja. Nie należy zapominać o dyscyplinie: inżynieria materiałowa. Badania własne przeprowadzone przez Doktorantkę mają istotne znaczenie dla rozwoju poszczególnych obszarów badań i zastosowań praktycznych, związanych z dyscypliną "Inżynieria mechaniczna" i powyżej wymienionymi.

Jeśli chodzi o wiedzę z obszarów badawczych, które są ściśle związane z badaniami przeprowadzonymi przez Doktorantkę, a które można zaliczyć do "klasycznych", to: mechanika teoretyczna i stosowana, hydromechanika obiektów pływających - w tym statyka i hydrodynamika okrętu, dynamika morza, numeryczna mechanika płynów CFD oraz informatyka, automatyka i robotyka. Doktorantka, w swoich badaniach wykorzystwała wiedzę, którą zakwalifikowała do nowych obszarów badań: mechanika analityczna złożonych układów mechanicznych o zmiennej bezwładności, numeryczna mechanika płynów CFD oraz sztuczne sieci neuronowe ANN. Zastosowanie przez Doktorantkę mechaniki analitycznej złożonych układów o zmiennej bezwładności



oraz numerycznej mechaniki płynów CFD, w przypadku takich układów, jest zastosowaniem do rozwiązania zadania naukowego obszarów, które należą do dyscypliny "Inżynieria mechaniczna". Wykorzystanie modelu zastępczego i z użyciem sieci ANN, należy potraktować, jako obszar badań związany z zastosowaniem wiedzy z innych dziedzin w dyscyplinie "Inżynieria mechaniczna", w "Dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych".

Istota podejścia zaproponowanego przez Doktorantkę do rozwiązania zadania dynamiki pojazdów AUG polega na tym, że metoda bezpośrednia szacowania obciążeń hydrodynamicznych dla zbioru wejściowego warunków eksploatacyjnych, została zmodyfikowana w taki sposób, że charakterystyki hydrodynamiczne dla szerokiego zakresu warunków eksploatacyjnych, są aproksymowane (przewidywane) przy użyciu modelu zastępczego, w oparciu o wyniki symulacji CFD. **Za starą metodę szacowania charakterystyk hydrodynamicznych**, dla szerokiego zakresu warunków eksploatacyjnych pojazdów AUG, należy uznać metodę, która polega na wyznaczaniu tych charakterystyk w sposób bezpośredni za pomocą: metody CFD, badań na modelu fizycznym lub badań na obiekcie rzeczywistym, w celu oszacowania współczynników hydrodynamicznych niezbędnych do rozwiązania nieliniowych równań różniczkowych ruchu i opisu dynamiki pojazdu AUG. **Za nową metodę szacowania charakterystyk hydrodynamicznych**, dla szerokiego zakresu warunków eksploatacyjnych AUG, należy uznać metodę opisaną w dysertacji, która stanowi połączenie metody bezpośredniej CFD wyznaczenia charakterystyk hydrodynamicznych dla wejściowego zbioru warunków eksploatacyjnych, z modelem zastępczym (opartym o zastosowanie ANN), który umożliwia aproksymację charakterystyk hydrodynamicznych dla szerokiego zakresu warunków eksploatacyjnych AUG, w oparciu o dane ze zbioru wejściowego, otrzymane z symulacji CFD. **W obu metodach**, aproksymowane wartości charakterystyk hydrodynamicznych są używane, już w formie współczynników, do rozwiązania nieliniowych równań różniczkowych ruchu i opisu dynamiki pojazdu AUG.

W nomenklaturze anglosaskiej istnieją określenia "sea loads on offshore structures" oraz "sea loads on ships". Być może określenia "sea loads on AUV structures" oraz "AUV hydrodynamics" staną się przyjętymi obszarami badań, które wejdą na stałe w zakresu dyscypliny "Inżynieria mechaniczna". Podsumowując, Doktorantka posiada dużą wiedzę w zakresie mechaniki analitycznej złożonych układów o zmiennej bezwładności, numerycznej mechaniki płynów CFD i sieci ANN. W ocenie recenzenta, pomyślnie rozwiązanie postawionego zadania naukowego przez Doktorantkę ma duże znaczenie z naukowego i praktycznego punktu widzenia. Opracowana metoda ma duży potencjał, jeśli chodzi o dalsze badania oraz jej użycie w projektowaniu pojazdów AUV oraz w rozwiązywaniu problemów praktycznych w omawianym obszarze. Wartość naukowa i praktyczna przedstawionej do recenzji pracy jest bardzo duża. Rozprawa posiada też cechy użytkowe. Zawarta w rozprawie wiedza ma istotne znaczenie dla dalszego rozwoju pojazdów bezałogowych i powinna być kontynuowana.

## 6. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej. Wniosek końcowy

Oceniana rozprawa doktorska stanowi oryginalne i prawidłowo przedstawione rozwiązanie problemu naukowego mieszczącego się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr inż. Kamili Stryczniewicz pt. *"Autonomous Underwater Vehicle Dynamics and Predictions of AUV's Hydrodynamic Characteristics Based on Surrogate Model"*, całkowicie spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” Dz.U.2022.574 tekst jednolity z poprawkami z 12 i 23 marca 2022. W związku z powyższym, wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamili Stryczniewicz do jej publicznej obrony.

Recenzent chciałby pokreślić, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi duże osobiste osiągnięcie Doktorantki. Rozwiązała trudny problem badawczy, przystosowując istniejącą i nową wiedzę do rozwiązania postawionego zadania naukowego, jakim jest modelowanie dynamiki autonomicznych pojazdów podwodnych i przewidywanie ich charakterystyk hydrodynamicznych przy użyciu modelu zastępczego. Oceniana praca wnosi istotny wkład do rozwoju dziedziny inżynieria mechaniczna. Doktorantka rozwiązała postawione zadanie naukowe w sposób wzorowy, dlatego wnioskuję o wyróżnienie pracy.