

## Streszczenie rozprawy doktorskiej

mgr inż. **Kamila Styczniewicz**

temat: ***Autonomous Underwater Vehicle dynamics and predictions of AUV's hydrodynamic characteristics based on surrogate model***

dziedzina: nauki techniczne /nauki inżynieryjno-techniczne  
dyscyplina: mechanika / inżynieria mechaniczna

Promotor pracy: prof. dr hab. inż. Jacek Szumbarski - Politechnika Warszawska Wydział MEiL

Promotor pomocniczy: dr inż. Marek Kraskowski - Centrum Techniki Okrętowej w Gdańsku

### Recenzenci:

dr hab. inż. Mirosław Gerigk, prof. uczelni - Politechnika Gdańska

dr hab. inż. Paweł Flaszynski, prof. IMP - Instytut Maszyn Przepływowych PAN

Inspiracją do napisania tej pracy są intensywne badania prowadzone w zakresie dynamicznego modelowania pojazdów podwodnych (z ang. Autonomous Underwater Vehicle – AUV), podyktowane zwiększonym popytem na tego typu obiekty, które znajdują zapotrzebowanie w badaniach oceanograficznych, zastosowaniach militarnych, a przede wszystkim w badaniach na rzecz ochrony środowiska naturalnego. Te pojazdy mają neutralny wpływ na środowisko, nie emitują hałasu, spalin, płynnych odpadów, nie wymagają istnienia ludzi na pokładzie i są tanie w produkcji. Zastosowania tego rodzaju pojazdów podwodnych są zgodne z polityką niebieskiej gospodarki i niebieskiego wzrostu, tzw. blue economy i blue growth. Stanowią wsparcie dla eksperymentalnych działań badawczych nad pojawiającą się kwestią zanieczyszczeń i skumulowanych skutków zaburzeń antropogenicznych w morzach i oceanach. W ciągu 100 lat właściwości fizyczne i chemiczne wody ulegną fundamentalnym zmianom. Potrzebujemy natychmiast wdrożyć rozwiązania, które opóźnią zmiany klimatyczne, w przeciwnym wypadku zmiany odczuje fauna i flora na całym świecie. Do dnia dzisiejszego, w Polsce nie odbyły się badania nad autonomicznymi pojazdami typu szybowiec podwodny na szerszą skalę.

W pracy opisano podwodny autonomiczny pojazd zmienno-wypornościowy, znany pod nazwą podwodny szybowiec lub glider (z ang. Autonomous Underwater Glider – AUG). Jest to klasa pojazdów najczęściej nie wyposażona w zewnętrzny napęd. Podwodne szybowce są projektowane na długie samodzielne misje przy zużyciu minimalnej energii. Ruch posuwisty jest wymuszony na skutek zmiennego położenia masy. Ruch góra dół powstaje na skutek zmiennej wyporności, który umożliwiony jest przez wewnętrzny układ pompujący powietrze między

specjalnym pęcherzem a zbiornikiem próżniowym. Ruch unoszenia jest dodatkowo generowany przez hydrodynamiczne siły nośne na hydrołatach przymocowanych do kadłuba. Wskutek działania tych sił, szybowiec wykonuje ruch sinusoidalny w płaszczyźnie pionowej i prostoliniowy w płaszczyźnie horyzontalnej.

Celem pracy jest zbudowanie ogólnego modelu dynamiki autonomicznego pojazdu podwodnego z użyciem takich narzędzi obliczeniowych, jak numeryczna mechanika płynów (CFD) i sztucznych sieci neuronowych. W wyniku tych obliczeń powstał model interakcji dynamicznych pojazdu z zewnętrznym środowiskiem wody morskiej.

Stworzenie adekwatnego modelu dynamiki jest pierwszym i najważniejszym krokiem w przypadku projektowania układu sterowania. Głównym źródłem trudności na tym etapie jest dokładny opis sił i momentów hydrodynamicznych występujących w równaniach ruchu obiektu, które tworzą jego model matematyczny. Identyfikacja tych sił pozwala na zbudowanie efektywnej obliczeniowo metody wyznaczania oddziaływań hydrodynamicznych szybowca – środowisko morskie, zwanej inaczej „modelem zastępczym”.

Siły zewnętrzne działające na podwodny szybowiec są obliczone metodami numerycznymi mechaniki płynów (ang. Computational Fluid Dynamics - CFD) w programie ANSYS Fluent R18.2. Wykorzystana została metoda Reynoldsa uśredniania równań Naviera-Stokesa (RANS). Jako model turbulencji wybrano Shear Stress Transport (SST)  $k - \omega$ , który łączy zalety modelu  $k - \epsilon$  i modelu  $k - \omega$  oraz wprowadza dodatkowy człon ograniczający nadprodukcję energii kinetycznej turbulencji w obszarach silnych dodatnich gradientów ciśnienia (punkty spiętrzenia, obszary oderwania warstwy przyściennej). Charakterystyki hydrodynamiczne, takie jak siła nośna i siła oporu, są wyznaczone dla różnych kątów natarcia i prędkościami. Przepływ płynu jest ustanowiony dla liczby Reynoldsa rzędu  $10^5$  to  $10^6$ , co odpowiada prędkościom od 0.5 do 1.5  $\text{ms}^{-1}$ . Kąt natarcia pojazdu jest zmienny w zakresie  $-30^\circ$  do  $30^\circ$  (z krokiem  $2^\circ$ ). Wyniki z CFD są sprzęgnięte z równaniami ruchu szybowca w płaszczyźnie pionowej. Ruch pojazdu jest opisany poprzez układ nieliniowych równań różniczkowych, które muszą być rozwiązane numerycznie. Do tego został zastosowany MATLAB i jego wewnętrzny solver ode45. Dodatkowo w MATLAB zostały napisane skrypty do szacunkowego przybliżenia wartości takich współczynników hydrodynamicznych (wchodzących w skład równań ruchu) jak, współczynniki oporu poprzecznego i masy dołączonej. Ostatecznie, w oparciu o zastępczy model hydrodynamiczny dopasowany do danych o wysokiej wierności dostarczanych przez obliczenia

CFD, możliwe jest oszacowanie chwilowych sił i momentów za pomocą sztucznej sieci neuronowej w oprogramowaniu Alyuda NeuroIntelligence.

Praca ta stanowi kompleksowe podejście do zagadnienia modelowania dynamiki autonomicznego podwodnego pojazdu z użyciem takich narzędzi jak CFD, zastosowania środowiska MATLAB do rozwiązania układu nieliniowych równań różniczkowych i sztucznej sieci neuronowej (z ang. Artificial Neural Network - ANN). Zaimplementowanie obliczeń przeprowadzonych w niniejszej pracy pozwala na ocenę efektywności dynamicznej pojazdu. W przyszłości planuje się przeprowadzenie badań doświadczalnych z użyciem prototypu podwodnego szybowca w skali 1:1 na basenie modelowym.

Słowa kluczowe: AUV, niebieska gospodarka, niebieski wzrost, podwodny szybowiec, Computational Fluid Dynamics (CFD), równania różniczkowe zwyczajne (ODE), sztuczna sieć

neuronowa, model zastępczy, metamodel, opór hydrodynamiczny, opór poprzeczny, masa dołączona, siły hydrodynamiczne.