

---

# Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych

---

## SYMULATOR AUTONOMICZNEGO BIOMIMETYCZNEGO POJAZDU PODWODNEGO

Piotr SZYMAK, Tomasz PRACZYK  
Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia

---

### Streszczenie

W artykule zaprezentowano symulator autonomicznego biomimetycznego pojazdu podwodnego (ABPP) przeznaczonego do zadań rozpoznania podwodnego. ABPP w postaci demonstratora technologii na VII poziomie gotowości technologicznej będzie efektem końcowym projektu rozwojowego nr DOBR-BIO4/033/13015/2013, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. W pierwszej części artykułu zaprezentowano opracowany dla potrzeb realizacji symulatora model matematyczny ABPP. Następnie pokazano wybrane wyniki jego działania w postaci przebiegu parametrów ruchu pojazdu podwodnego. W zakończeniu artykułu zamieszczono plan planowanych badań numerycznych. Symulator będzie wykorzystywany przede wszystkim do dostrojenia wstępnej wersji systemu autonomii biomimetycznego pojazdu podwodnego. Ponadto, posłuży on do zasymulowania pracy sensorów zainstalowanych na pokładzie ABPP w warunkach ruchu falowego.

**Słowa kluczowe:** pojazd podwodny, symulator

---

### Abstract

In the paper, a simulator of an autonomous biomimetic underwater vehicle (BUV) destined for underwater reconnaissance has been presented. ABUV in the form of technology demonstrator on VII level of technology readiness will be the final effect of the development project No. DOBR-BIO4/033/13015/2013, funded by National Centre of Research and Development. In the first part of the paper, a mathematical model of the BUV designed for implementation of the simulator has been described. Then, selected results of the BUV operation in the form of courses of the vehicle motion parameters have been presented. First of all the simulator will be used for tuning initial version of autonomy system of the biomimetic underwater vehicle. Moreover, it will be used for simulation of operation of sensors installed on board of the BUV in conditions of undulating motion.

**Key words:** underwater vehicle, simulator.

---

### 1. WPROWADZENIE

W ramach aktualnie realizowanego projektu rozwojowego nr DOBR-BIO4/033/13015/2013, finansowanego przez NCBiR w latach 2013-2016 Konsorcjum, składające się z: Akademii Marynarki Wojennej – lider, Politechniki Krakowskiej, Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów oraz firmy Forkos sp. z o.o. pracuje nad konstrukcją autonomicznego biomimetycznego pojazdu podwodnego ABPP, wykorzystującego w swoim ruchu tzw. napęd falowy [1][3][4]. ABPP ma być

wykorzystany dla potrzeb zadań rozpoznania podwodnego i nawodnego w zadaniach operacji specjalnych [7].

W kolejnym rozdziale przedstawiono autorską metodę modelowania ruchu pojazdu podwodnego z napędem falowym, która została wykorzystana w implementacji symulatora ABPP. W kolejnym rozdziale zamieszczono wybrane wyniki zachowań ABPP w postaci przebiegów czasowych podstawowych parametrów ruchu pojazdu podwodnego. W podsumowaniu zamieszczony w ostatnim rozdziale artykułu przedstawiono wnioski z dotychczasowych badań nad symulatorem oraz opisano przyszłe planowane badania z jego udziałem.

## 2. MODEL MATEMATYCZNY ABPP

Modelowanie ruchu ABPP oparte jest na klasycznym nieliniowym modelu pojazdu podwodnego [2], traktowanego jako ciało sztywne posiadające następujące właściwości:

- 1) 3 płaszczyzny symetrii,
- 2) porusza się w 6-ciu stopniach swobody,
- 3) porusza się z małą prędkością w lepkim płynie.

Ruch pojazdu podwodnego opisywany jest za pomocą dwóch układów odniesienia:

- 1) ruchomego układu współrzędnych  $x_0, y_0, z_0$  związanych z pojazdem,
- 2) oraz nieruchomego układu współrzędnych  $xyz$  związanego z Ziemią.

Początek ruchomego układu współrzędnych  $O$  odpowiada zazwyczaj środkowi ciężkości pojazdu, natomiast jego osie zdefiniowane są jako:

- $x_0$  – oś wzdłużna skierowana od rufy do dziobu,
- $y_0$  – oś poprzeczna skierowana na prawą burtę,
- $z_0$  – oś prostopadła skierowana od góry w kierunku dna.

Zmiany położenia ruchomego układu współrzędnych  $x_0, y_0, z_0$  opisywane są względem przyjętego układu współrzędnych  $xyz$ , związanego z Ziemią. Ze względu na to, że obiekt porusza się ze stosunkowo niewielką prędkością, stąd też pomija się przyspieszenie punktów na powierzchni Ziemi i układ  $xyz$  rozważa się jako nieruchomy.

Do opisu ruchu pojazdu podwodnego wykorzystuje się równania ruchu, które w postaci macierzowej przyjmują następującą postać [2]:

$$M\dot{\nu} + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau \quad (1)$$

gdzie:

- $\nu$  – wektor prędkości liniowych i kątowych w układzie ruchomym,
- $\eta$  – wektor współrzędnych pozycji pojazdu oraz kątów Eulera w układzie nieruchomym,
- $M$  – macierz inercji (równa sumie macierzy ciała sztywnego i mas towarzyszących),
- $D(\nu)$  – macierz tłumienia hydrodynamicznego,
- $g(\eta)$  – wektor sił i momentów przywracających (ciężkości i wyporu),
- $\tau$  – wektor sygnałów sterujących.

W przedstawionych dalej badaniach numerycznych przyjęto wartości elementów macierzy równania 1 dla pojazdu podwodnego typu Głuptak, który posiada kształt torpedopodobny i wymiary zbliżone do projektowanego pojazdu biomimetycznego, z tą różnicą, iż ABPP będzie wyposażony w napęd falowy w miejsce klasycznego napędu śrubowego. Napęd falowy, poza swoimi zaletami w stosunku do klasycznego napędu w postaci mniejszego generowanego hałasu i większej efektywności energetycznej,

posiada wadę w postaci generowania dodatkowych oscylacji ruchu oddziałujących w płaszczyźnie działania napędu [4]. Oscylacje te mogą powodować niewłaściwą lub utrudnioną pracę sensorów ABPP, w szczególności hydroakustycznych. Dlatego też zamodelowanie tej właściwości jest bardzo istotne dla badań nad ABPP. W tym celu wprowadzono dodatkowy składnik w wektorze sygnałów sterujących o charakterze sinusoidalnym, powodujący powstanie oscylacji o częstotliwości i amplitudzie zbliżonej do uzyskanych na podstawie badań pojazdu biomimetycznego CyberRyba 5 [4].

W przedstawionych dalej badaniach numerycznych przyjęto, że pojazd podwodny jest sterowany za pomocą rozmytych regulatorów typu FPD [7].

W koncepcji systemu autonomii ABPP przyjęto, iż w najniższej warstwie tego systemu będą zlokalizowane regulatory parametrów ruchu, które będą wykonywały zadane wartości parametrów ruchu uzyskane z warstwy wyższej lub realizowały podstawowe zachowania typu: zanurzaj się, skończ zanurzać się, skręcaj w prawo, skończ skręcać w prawo, itp.

Ze względu na przedstawioną wyżej postać sygnałów generowanych przez wyższą warstwę systemu autonomii opracowano model uproszczony automatycznie sterowanego pojazdu podwodnego opisany na pomocą macierzy **S** zawierającej macierze z zmianami zdyskretyzowanych parametrów ruchu w odpowiedzi na zadaną wartość wybranego parametru:

$$\mathbf{S} = [\mathbf{P}_{ij}]_{|\mathbf{I}| \times |\mathbf{J}|} \quad (2)$$

gdzie:

**I** – zbiór zawierający prędkości postępowe pojazdu  $V_i = i \Delta V$  ( $i=1..|\mathbf{I}|$ ,  $\Delta V$  to krok kwantyzacji prędkości postępowej),

**J** – liczba parametrów ruchu pojazdu (np. kurs, współrzędna  $x, y, z$ ),

Macierz **S** składa się z macierzy **P<sub>ij</sub>**, których elementy są uzyskiwane na podstawie rejestracji ruchu pojazdu podwodnego (symulowanego za pomocą modelu nieliniowego) w odpowiedzi na zadaną wartość wybranego parametru, np. parametry opisujące ruch pojazdu na płaszczyźnie poziomej w odpowiedzi na zadaną wartość kursu. W artykule przyjęto nazywać **P<sub>ij</sub>** macierzami manewrów. Natomiast macierz **P<sub>ij</sub>** zawiera zmiany zdyskretyzowanych parametrów ruchu  $\Delta p_{kl}$  w odpowiedzi na zadaną wartość wybranego parametru  $p_k^{set}$  dla  $V_i$  i  $j$ -go parametru ruchu pojazdu:

$$\mathbf{P}_{ij} = [\Delta p_{kl}^{ij}]_{|\mathbf{K}| \times |\mathbf{L}|} \quad (3)$$

**K** – zbiór zawierający zadane wartości wybranego parametru  $p_k^{set} = k \Delta p^{set}$ , ( $k = 1..|\mathbf{K}|$ ,  $\Delta p^{set}$  to krok kwantyzacji zadanej wartości wybranego parametru),

**L** – zbiór zawierający kroki czasowe rejestracji parametrów  $t_l = l \Delta t$  ( $l = 1..|\mathbf{L}|$ ,  $\Delta t$  to krok próbkowania).

W artykule przyjęto nazywać **P<sub>ij</sub>** macierzami manewrów ABPP lub w skrócie macierzami manewrów.

Dla uproszczenia analizy, ruch pojazdu podwodnego rozpatruje się jako złożenie dwóch ruchów: w płaszczyźnie pionowej  $xz$  i poziomej  $xy$ . W szczególności takie podejście można zastosować przy ABPP z napędem falowym działającym w poziomej płaszczyźnie ruchu, np. tak jak ma to miejsce w przypadku CyberRyby. W tym przypadku za zanurzanie odpowiadają sztuczny pęcherz pławny i płetwy boczne [4]. Bardziej szczegółowy opis uproszczonego modelu ruchu pojazdu podwodnego jest zawarty w [5].

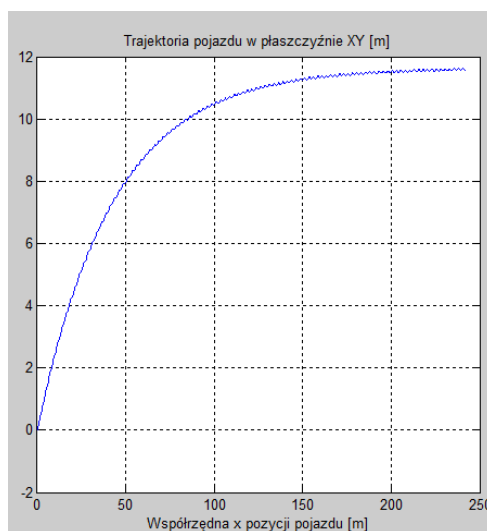
### 3. PRZYKŁADY DZIAŁANIA MACIERZY MANEWRÓW

W przypadku ABPP wyodrębniono dwa rodzaje macierzy manewrów ABPP:

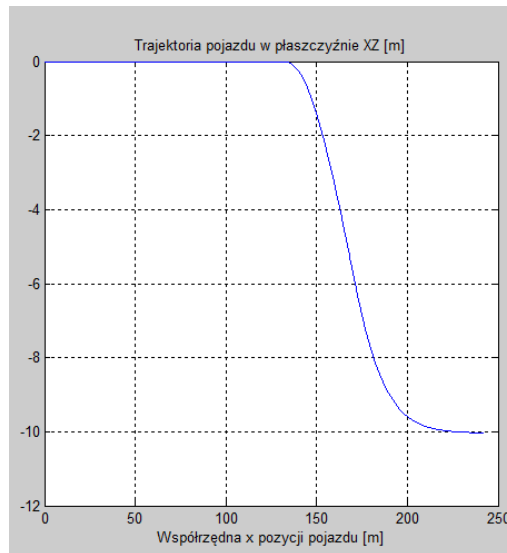
- 1) macierze manewrów podstawowych takich, jak: startuj do przodu, hamuj, skręcaj w prawo, skręcaj w lewo, skończ skręt w prawo, skończ skręt w lewo, zanurzaj się pionowo, zanurzaj się, skończ zanurzenie, wynurzaj się, skończ wynurzenie,
- 2) macierze manewrów z regulacją takich, jak: zmień kurs o  $5^\circ$  w lewo, zmień kurs o  $30^\circ$  w prawo, zanurz się o 5 metrów, wynurz się o 1 metr, itp.

Kombinacja ww. manewrów daje możliwość poruszania się po zadanym torze, w zadanym kierunku, czy też na zadanej głębokości. O kolejności i czasie załączania tych manewrów będzie decydował system decyzyjny, stanowiący wyższą warstwę systemu autonomii. Opis ruchu za pomocą macierzy daje duże „zyski obliczeniowe” w stosunku do podejścia, w którym aktualny wektor stanu ABPP oblicza się przy zastosowaniu ww. nieliniowego modelu ruchu. Pozwoli to na szybsze przeprowadzenie badań numerycznych, których zadaniem będzie przede wszystkim dostrojenie systemu autonomii. W trakcie realizacji wcześniejszych badań [5], dzięki zastosowaniu modelu uproszczonego udało się znaleźć satysfakcjonujące rozwiązanie dla algorytmu ewolucyjno-rozmyto-neuronowego w rozsądnym czasie (z wykorzystaniem modelu nieliniowego zajęłoby to kilkaset tysięcy razy większy okres czasu). Algorytmy ewolucyjne potrzebowały dużej mocy obliczeniowych, ze względu na iteracyjny sposób poszukiwania rozwiązania i jednocześnie przeszukiwanie dużej przestrzeni potencjalnych rozwiązań.

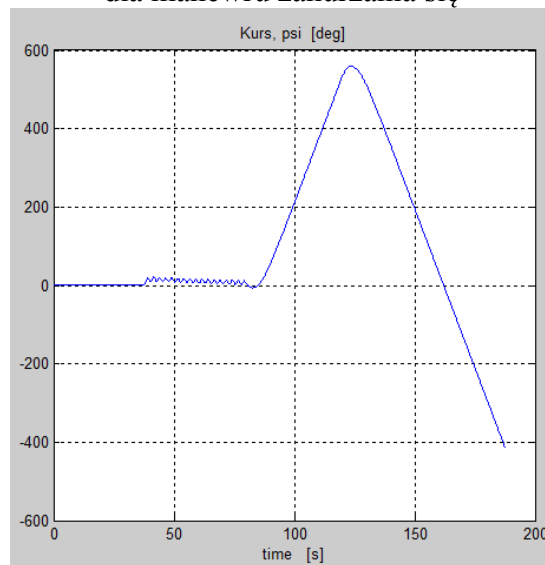
Na rysunkach 1 i 2 zaprezentowano manewr zanurzania się w postaci przebiegów podstawowych parametrów ruchu, natomiast na rysunkach 3 i 4 manewr skrętu w lewo, a następnie w prawo. W obu przypadkach wykorzystano odpowiednie kombinacje sekwencyjnie załączanych macierzy manewrów.



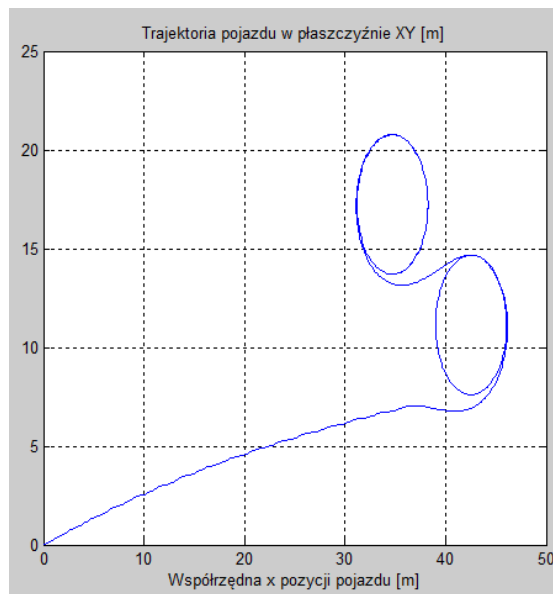
Rys. 1. Przebieg zmian współrzędnych pozycji ABPP na płaszczyźnie xy dla manewru zanurzania się



Rys. 2. Przebieg zmian współrzędny pozycji ABPP na płaszczyźnie xz dla manewru zanurzania się



Rys. 3. Przebieg zmian kursu ABPP w czasie dla manewru zmiany kursu w lewo, a następnie w prawo



Rys. 4. Przebieg zmian współrzędnych pozycji ABPP na płaszczyźnie xy dla manewru zmiany kursu w lewo, a następnie w prawo

Przeprowadzone badania pozwoliły na opracowanie i implementację symulatora ABPP, który będzie wykorzystywany w trakcie badań symulacyjnych podsystemów ABPP, w tym przede wszystkim podsystemu autonomii i nawigacji, w trakcie realizacji ww. projektu rozwojowego.

#### 4. PODSUMOWANIE

Otrzymane wyniki wskazują na potrzebę dalszego dostrajania uproszczonego modelu matematycznego ABPP. W momencie uzyskania obiektu rzeczywistego będzie można uzyskać przebiegi parametrów ruchu ABPP, które posłużą do uzyskania wiarygodnego modelu matematycznego oraz związanego z tym symulatora ABPP.

Opracowany symulator będzie mógł być wykorzystany w dalszych pracach nad ABPP m.in. dla potrzeb szkolenia operatorów ABPP, opracowania algorytmów współdziałania ławicy pojazdów biomimetycznych, itp.

#### Literatura

1. Colgate J.E., Lynch K.M., Mechanics and Control of Swimming: A Review, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 29, No. 3, **2004**, str. 660-673.
2. Fossen T.J., Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley and Sons Ltd., **1994**.
3. Low K.H., Modelling and parametric study of modular undulating fin rays for fish robots, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 44, **2009**, str. 615-632.
4. Malec M., Morawski M., Szymak P., Trzmiel A., Analysis of Parameters of Traveling Wave Impact on the Speed of Biomimetic Underwater Vehicle, Trans Tech Publications, *Solid State Phenomena*, Vol. 210, **2014**, str. 273-279.
5. Praczyk T., Szymak P., Decision System for a Team of Autonomous Underwater Vehicles – Preliminary Report, Elsevier, *Neurocomputing* (October **2011**), 74 (17), str. 3323-3334.
6. Szymak P., Malec M., Morawski M., Directions of Development of Underwater Vehicle with Undulating Propulsion, HARD Publishing Company, *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol.19, No.4A, **2010**, str. 107-110.

7. Szymak P., Automatyczne sterowanie samobieżnym ładunkiem do zwalczania min podwodnych po zadanym torze, Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów, Pomiary, Automatyka i Robotyka Nr 2/**2008**, str. 433-440.
8. Szymak P. Praczyk T., Naus K., Scenariusze operacyjne dla Autonomicznego Biomimetycznego Pojazdu Podwodnego, Akademia Marynarki Wojennej, Materiały Konferencji KOSOP 2014, Ustka **2014**.