

DOBÓR MANEWRU ZMIANY KURSU DLA BIOMIMETYCZNEGO POJAZDU PODWODNEGO NA PODSTAWIE BADAŃ SYMULACYJNYCH

W ciągu ostatnich lat można zaobserwować rozwój nowych konstrukcji pojazdów podwodnych, które imitują żywe organizmy występujące pod wodą, np. ryby. Tego typu pojazdy nazywane są biomimetycznymi. Są one napędzane przez napęd falowy imitujący ruch falowy płetw.

W artykule omówiony został model matematyczny ruchu biomimetycznego pojazdu podwodnego BPP. Model ten, po zaimplementowaniu w środowisku Matlab został wykorzystany do przeprowadzenia badań numerycznych, mających na celu dobór właściwego manewru zmiany kursu przez BPP.

WSTĘP

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój robotyki podwodnej. Jednym z najnowszych innowacyjnych konstrukcji w tej dziedzinie są biomimetyczne pojazdy podwodne BPP [1] [3]. Naśladują one zarówno w budowie jak i w sposobie ruchu podwodne organizmy, np. ryby, ssaki morskie, itd. BPP są napędzane przez napęd falowy imitujący płetwy- rys. 1 [4].



Rys.1. BPP CyberRyba w basenie

W kolejnym rozdziale przedstawiony został model matematyczny opracowany dla potrzeb modelowania ruchu BPP. Następnie przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych mających na celu dobór odpowiedniego manewru zmiany kursu. W ostatnim rozdziale przedstawiono podsumowanie z przeprowadzonych testów.

1. MODEL MATEMATYCZNY RUCHU BPP

Zazwyczaj w modelowaniu pojazdu podwodnego przyjmuje się następujące uproszczenia:

- 1) pojazd podwodny jest rozpatrywany jako ciało sztywne,
- 2) posiada 3 płaszczyzny symetrii,
- 3) porusza się w 6 stopniach swobody,
- 4) porusza się z małą prędkością w lepkim płynie.

Ruch pojazdu podwodnego rozpatruje się w dwóch układach odniesienia:

- 1) układ ruchomy związany z pojazdem oraz
- 2) układ nieruchomy związany z Ziemią xyz.

Początek ruchomego układu współrzędnych odpowiada środkowi geometrycznemu pojazdu. Natomiast osie tego układu są zdefiniowane jako:

- 1) x_0 jest wzdłużną osią symetrii skierowaną od rufy do dziobu,
- 2) y_0 jest osią poprzeczną skierowaną na prawą burtę,
- 3) z_0 jest osią pionową skierowaną ku dnu.

Zmiany położenia ruchomego układu współrzędnych $x_0y_0z_0$ są opisywane w odniesieniu do układu współrzędnych xyz związanego z Ziemią. Z powodu tego, iż pojazd porusza się ze stosunkowo małą prędkością, przyspieszenie na powierzchni Ziemi spowodowane ruchem wirowym Ziemi jest pomijane i system xyz jest rozpatrywany jako stacjonarny.

Biorąc pod uwagę wymienione wyżej założenia, dla potrzeb symulacji ruchu ABPP przyjmuje się nieliniowy model ruchu w 6-ciu stopniach swobody. Ruch pojazdu jest opisywany przez 6 równań różniczkowych, które prezentowane w formie macierzowej mają następującą postać:

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

gdzie:

v – wektor prędkości liniowych i kątowych w układzie ruchomym,

η – wektor współrzędnych położenia pojazdu i kąta Eulera w układzie nieruchomym,

M – macierz inercji (suma macierzy ciała sztywnego i mas towarzyszących),

$D(v)$ – macierz tłumienia hydrodynamicznego,

$g(\eta)$ – wektor sił i momentów sił przywracających (ciężkości i pływalności),

τ – wektor sygnałów sterujących (suma wektorów sił i momentów sił generowanych przez system napędowy τ_p i zakłócenia środowiska τ_d).

Lewa strona równania (1) zawiera siły i momenty sił wywołane przez zjawiska fizyczne takie, jak: inercja ciała sztywnego i inercja mas towarzyszących lepkiej cieczy, opór hydrodynamiczny środowiska wodnego, równowaga sił ciężkości i pływalności.

Natomiast prawa strona równania (1) reprezentuje wektor sił i momentów sił działających na pojazd wygenerowanych przez sys-

tem napędowy i dodatkowe zakłócenia środowiska (pod wodą w szczególności prąd morski). Parametry macierzy zawartych po lewej stronie równania (1) zostały obliczone na podstawie zależności zawartych w literaturze [2]. Problemem do tej pory nie rozpatrywanym jest problem obliczenia wektora sił i momentów sił τ_p wygenerowanych przez nowy typ systemu napędowego, czyli napęd falowy imitujący działanie płetw ryby:

$$\tau_p = [X, Y, Z, K, M, N] \quad (2)$$

gdzie:

X, Y, Z – siły działające odpowiednio wzdłużnej, poprzecznej i pionowej osi symetrii,

K, M, N – momenty sił działające względem wzdłużnej, poprzecznej i pionowej osi symetrii.

Obliczenia wektora sił i momentów sił wygenerowanych przez napęd falowy powinny uwzględniać specyficzną konfigurację systemu napędowego.

Na rys. 2 zilustrowano model 3D ABPP z specyficznym systemem napędowym, składającym się z skręcanego modułu ogona zakończonego ruchomą płetwą ogona oraz dwoma niezależnie sterowanymi płetwami bocznymi.

Napór generowany przez każdą płetwę powinien być odniesiony do środka ciężkości (rys. 2) wykorzystując proste zależności na transformacje wektorów:

$$X = X_t + X_l + X_r - X_d \quad (3)$$

$$Y = Y_t \quad (4)$$

$$Z = Z_l + Z_r \quad (5)$$

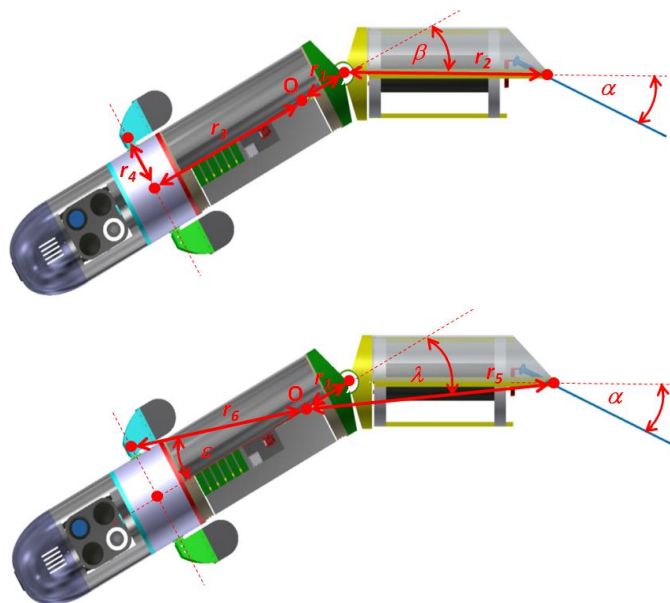
$$K = 0 \quad (6)$$

$$M = M_l + M_r \quad (7)$$

$$N = N_t + N_l - N_r - N_d \quad (8)$$

gdzie:

dolne indeksy t, l oraz r odnoszą się odpowiednio do działania ogona, płetwy lewej bocznej i płetwy prawej bocznej, dolny indeks d odnosi się do tłumienia wywołanego przez lewą lub prawą płetwę boczną działającą jako ster, czyli powierzchnia tej płetwy jest ustawiona prostopadłe do wzdłużnej osi symetrii.



Rys. 2. BPP nr 2 (widok z góry)[8]

Składniki wektora, np. X_t, Y_t, N_t można obliczyć biorąc pod uwagę położenie tych płetw w odniesieniu do środka ciężkości, wykorzystując następujące zależności:

$$X_t = \cos\beta \cdot T_t \quad (9)$$

$$Y_t = \sin\beta \cdot T_t \quad (10)$$

$$N_t = -\cos\lambda \cdot r_5 \cdot Y_t \quad (11)$$

$$X_l = \cos\delta_l \cdot T_l \quad (12)$$

$$Z_l = \sin\delta_l \cdot T_l \quad (13)$$

$$N_l = r_4 \cdot X_l \quad (14)$$

$$M_l = r_3 \cdot Z_l \quad (15)$$

$$N_d = \cos(90-\varepsilon) \cdot r_6 \cdot X_d \quad (16)$$

gdzie:

T_t, T_l, T_r – napory generowane przez odpowiednio: ogon, lewą i prawą płetwę boczną,

$\beta, \lambda, \delta_l, \varepsilon$ – kąty zilustrowane na rys. 2,

δ_l – kąt ustawienia płetwy bocznej w stosunku do wzdłużnej osi symetrii,

r_1 – odległość od środka ciężkości do środka obrotu modułu ogona, r_2 – odległość od środka obrotu modułu ogona do środka obrotu płetwy ogonowej,

r_3 – odległość od środka ciężkości do środka obrotu płetw bocznych,

r_4 – odległość od środka obrotu płetw bocznych do środka obrotu lewej lub prawej płetwy,

r_5 – odległość od środka ciężkości do środka obrotu płetwy ogonowej,

r_6 – odległość od środka ciężkości do środka obrotu lewej lub prawej płetwy.

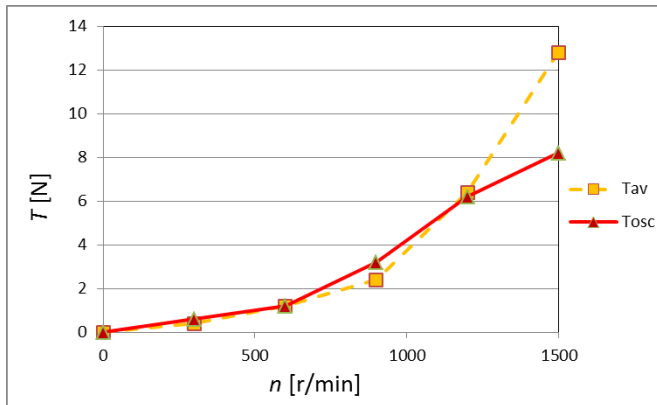
Składniki wektora dla prawej płetwy X_r, Y_r, N_r, M_r można obliczyć korzystając z zależności dla lewej płetwy (12-15) wstawiając zamiast kąta δ_l odpowiedni kąt dla prawej płetwy bocznej δ_r . Tłumienie hydrodynamiczne generowane przez lewą lub prawą płetwę boczną X_d , ustawioną prostopadłe do wzdłużnej osi symetrii może być wyznaczone wykorzystując zależności zawarte w publikacji [2].

Każda płetwa generuje napór z wartością chwilową zmieniającą się w czasie w zależności od parametrów sterujących płetwą, w szczególności amplituda i częstotliwość oscylacji płetwy. Napór generowany przez płetwę jest również uzależniony od typu stosowanej płetwy (sztywność membrany płetwy, kształt i wymiary płetwy, itp.).

W prezentowanym w opracowaniu modelu przyjęto iż, napory T_t, T_l, T_r zostały wyznaczone w wyniku pomiaru różnych płetw wykorzystując stanowisko laboratoryjne opisane w [7].

Bazując na uzyskanych wynikach pomiaru naporu w zależności od zmian częstotliwości wychyleń płetwy [6] założono, iż napór generowany przez płetwę jest sumą dwóch sygnałów: stałej składowej naporu (Rys. 3 – T_{av}) oraz składowej zmiennej zamodelowanej w postaci fali sinusoidalnej o określonej amplitudzie (Rys. 3 – T_{osc}). Oba sygnały wzrastają wraz ze wzrostem prędkości obrotowej napędu płetwy.

Wyniki pomiaru naporu [6] zostały uzyskane dla zerowej prędkości ruchu pojazdu. Po modernizacji stanowiska laboratoryjnego do pomiaru naporu (tunel z płynącą wodą), charakterystyki zilustrowane na rys. 3 zostaną wzbogacone o nowe charakterystyki dla niezerowych prędkości ruchu.



Rys. 3. Zmiany średniego naporu T_{av} i amplitudy oscylacji naporu T_{osc} dla różnych prędkości obrotowych napędu płetwy [8]

Opracowany model posłużył do implementacji modelu napędu falowego w środowisku Matlab. Opracowany i zaimplementowany w środowisku Matlab model napędu falowego posłużył m.in. do wyboru manewru zmiany kursu.

2. WYNIKI BADAŃ NUMERYCZNYCH

W badaniach symulacyjnych został wykorzystany model symulacyjny BPP przedstawiony w poprzednim rozdziale.

W trakcie testów przyjęto następujące wartości parametrów symulacji (rys. 3):

- $r_1 = 0,1$ m,
- $r_2 = 0,4$ m,
- $r_3 = 0,3$ m,
- $r_4 = 0,1$ m.

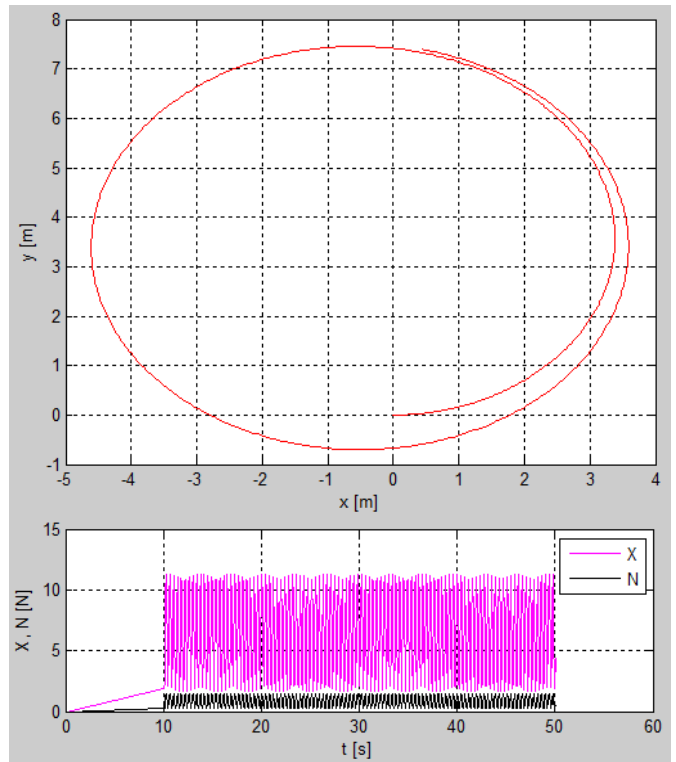
Ponadto założono, że biomimetyczny pojazd podwodny ma cylindryczny kadłub o następujących wymiarach: długość równą 1,2 m oraz średnicę równą 0,2 m.

Podczas testów numerycznych przetestowano następujące manewry zmiany kursu:

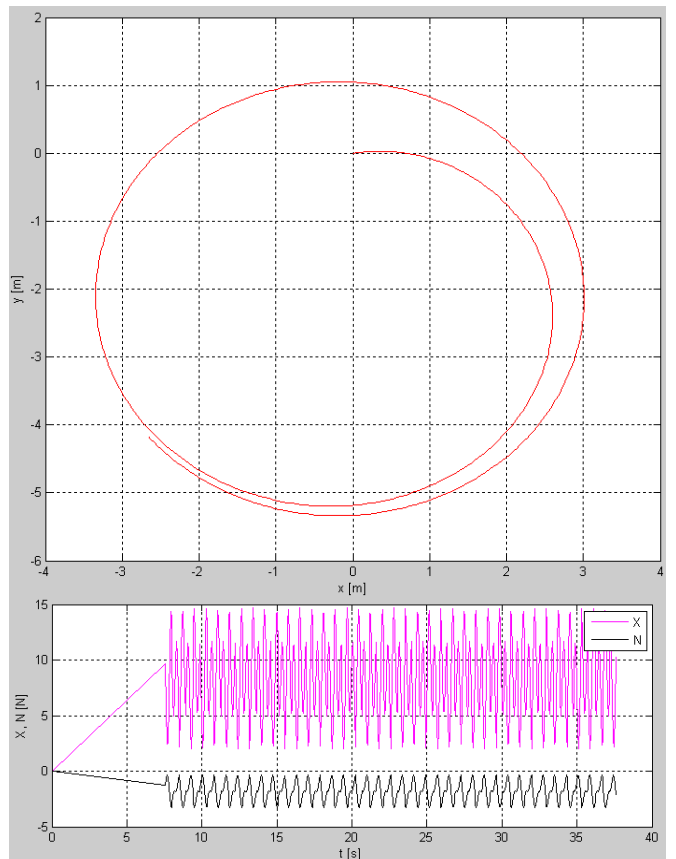
- tylko jedna płetwa boczna pracuje (oscyluje), a druga płetwa boczna oraz płetwa ogonowa pozostają w położeniu neutralnym i nie oscylują, co pozwala na generowanie momentu siły N , a to z kolei powoduje zmianę kursu w kierunku oscylującej płetwy,
- jedna płetwa boczna zostaje ustawiona w położeniu prostopadłym do wzdłużnej osi symetrii (generuje opór hydrodynamiczny), a druga płetwa boczna oscyluje w położeniu neutralnym (w tym czasie płetwa ogonowa pozostaje bez ruchu w położeniu neutralnym),
- płetwa ogonowa jest skrzyżowana pod pewnym kątem, tzn. oscyluje w położeniu innym niż neutralne, a płetwy boczne są ustawione w położeniu neutralnym i nie pracują.

Na rys. 4 zobrazowano zmiany położenia BPP na poziomej powierzchni xy oraz siły X i momentu siły N dla BPP z oscylującą prawą płetwą boczną (2000 obr / min) i nie oscylującą lewą płetwą boczną i płetwą ogonową, ustawionymi w położeniu neutralnym. Taki sposób ustawienia płetw pozwolił na uzyskanie średnicy cyrkulacji ok. 7,5 m. W tym przypadku przy włączonej dodatkowej pracy płetwy ogonowej obserwuje się szybszy ruch BPP, ale po trajektorii z większą średnicą cyrkulacji.

Na kolejnym rys. 5 zilustrowano zmiany położenia BPP na poziomej powierzchni xy oraz siły X i momentu siły N dla oscylującej lewej płetwy bocznej (2000 obr/min) i nie oscylującej ustawionej prostopadłe do wzdłużnej osi symetrii prawej płetwy bocznej oraz niepracującej płetwy ogonowej, ustawionej w położeniu neutralnym.



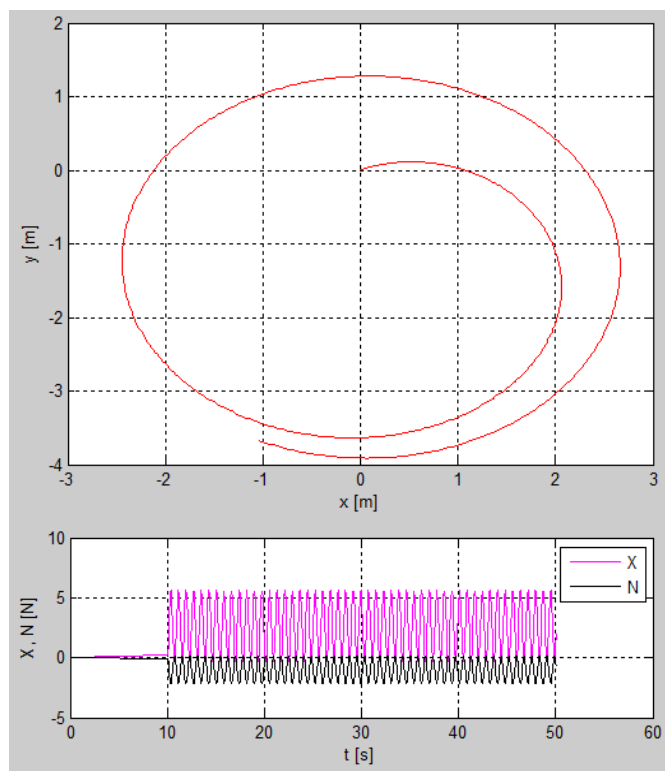
Rys. 4. Zmiany położenia na poziomej powierzchni xy oraz siły X i momentu siły N dla BPP z oscylującą prawą płetwą boczną (2000 obr/min) i nie oscylującą lewą płetwą boczną i płetwą ogonową, ustawionymi w położeniu neutralnym



Rys. 5. Zmiany położenia na poziomej powierzchni xy oraz siły X i momentu siły N dla BPP z oscylującą lewą płetwą boczną (2000 obr/min) i nie oscylującą ustawioną prostopadłe do wzdłużnej osi symetrii prawą płetwą boczną oraz niepracującą płetwą ogonową, ustawioną w położeniu neutralnym

Włączenie dodatkowego oporu hydrodynamicznego wygenerowanego przez prawą płetwę działającego przeciwnie do naporu generowanego przez lewą płetwę skutkuje uzyskaniem większego wypadkowego momentu siły N odpowiedzialnego za zmianę kursu. Na podstawie rys. 5 widać, iż w tym przypadku można uzyskać średnicę cyrkulacji ok. 6 m. Podobnie jak w poprzednim przypadku przy dodatkowej pracy płetwy ogonowej obserwuje się szybszy ruch BPP, ale po trajektorii z większą średnicą cyrkulacji.

Na rys. 6 zobrazowano zmiany położenia BPP na poziomej powierzchni xy oraz siły X i momentu siły N dla oscylującej płetwy ogonowej (1000 obr/min) skreślonej pod kątem 45° i nie pracujących płetw bocznych ustawionych w położeniu neutralnym. Trzeci manewr zmiany kursu zakłada wykorzystanie mechanizmu zmiany położenia modułu płetwy ogonowej względem wzdłużnej osi symetrii (rys. 2). Ten sposób zmiany kursu okazuje się być najbardziej efektywny, tzn. uzyskuje się ruchu po kole o średnicy ok. 4 m, ale wiąże się z bardziej skomplikowaną budową modułu ogona. Przy zwiększaniu prędkości obrotowej silnika płetwy ogonowej uzyskuje się w tym przypadku zmniejszenie średnicy cyrkulacji.



Rys. 6. Zmiany położenia na poziomej powierzchni xy oraz siły X i momentu siły N dla BPP z oscylującą płetwą ogonową (1000 obr/min) skreślonej pod kątem 45° i nie pracującymi płetwami bocznymi ustawionymi w położeniu neutralnym

PODSUMOWANIE

Zaprojektowany i zaimplementowany w środowisku Matlab model matematyczny ruchu biomimetycznego pojazdu podwodnego pozwolił na wykonanie wstępnych testów manewrowości pojazdu, w tym doboru właściwego manewru zmiany kursu. W trakcie kolejnych badań symulacyjnych zostaną opracowane, a następnie przebadane różne regulatory kursu. Natomiast w trakcie badań eksperymentalnych na rzeczywistym obiekcie zostaną zweryfikowane opracowane manewry zmiany kursu. Przewiduje się testowanie w trakcie badań na rzeczywistym obiekcie dodatkowych kombinacji

opisanych w artykule manewrów, np. manewr zmiany kursu polegający na pracy obu płetw bocznych, ale obróconych o 180° , przy niepracującej płetwie ogonowej.

PODZIĘKOWANIE

Badania opisane w artykule zostały uzyskane w ramach projektu rozwojowego nr DOBR-BIO4/033/13015/2013, współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w latach 2013-2016.

BIBLIOGRAFIA

1. J.E. Colgate, K.M. Lynch, "Mechanics and Control of Swimming: A Review", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 29, No. 3, 2004, pp. 660-673.
2. T. Fossen, "Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control", Wiley, 2011.
3. K. H. Low, "Modelling and parametric study of modular undulating fin rays for fish robots", Mechanism and Machine Theory, Vol. 44, 2009, pp. 615-632.
4. M. Malec, M. Morawski, P. Szymak, A. Trzmiel, "Analysis of Parameters of Traveling Wave Impact on the Speed of Biomimetic Underwater Vehicle", Trans Tech Publications, Solid State Phenomena, Vol. 210, 2014, pp. 273-279.
5. T. Praczyk, P. Szymak, "Decision System for a Team of Autonomous Underwater Vehicles – Preliminary Report", Elsevier, Neurocomputing, Vol. 74 (17), 2011, pp. 3323-3334.
6. P. Szymak, et al., "Autonomous underwater vehicles with silent undulating propulsion for underwater ISR – II part", Report on the second stage of the project No. DOBR-BIO4/033/13015/2013, Polish Naval Academy, 2015.
7. P. Szymak, S. Bruski, "Microprocessor system for measurement of a thrust generated by an underwater vehicle", Trans Tech Publication, Applied Mechanics and Materials, Vol. 817, 2016, pp. 162-167.
8. P. Szymak, "Mathematical model of underwater vehicle with undulating propulsion", Conference Proceedings MCSI, Crete 2016.

Selection of course change maneuver of biomimetic underwater vehicle based on numerical research

In recent times, we may notice some new designs of underwater vehicles, which imitate living underwater organisms, e.g. a fish. These vehicles are called biomimetic. They are driven by undulating propulsion, imitating wavy motion of fins.

In the paper, mathematical model of biomimetic underwater vehicle was presented. This model after its implementation in Matlab environment was used in numerical tests. The aim of the tests was to select proper course change maneuver used by biomimetic underwater vehicle.

Autorzy:

dr hab. inż. **Piotr Szymak** – Akademia Marynarki Wojennej, Instytut Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej

dr hab. inż. **Tomasz Praczyk** – Akademia Marynarki Wojennej, Instytut Uzbrojenia Okrętowego i Informatyki