OPEN ACCESS

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

Daniel POWARZYŃSKI
ORCID: 0000-0003-2131-1660
DOI: 10.15199/48.2025.11.23

Analiza sprawności energetycznej napędu dla biomimetycznego pojazdu podwodnego w funkcji algorytmów sterowania

Analysis of the energy efficiency of the drive for a biomimetic underwater vehicle as a function of the control algorithm

por. mar. mgr inż. Daniel Powarzyński, Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, Instytut Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej, Katedra Automatyki Okrętowej, Inżyniera Jana Śmidowicza 69, 81-127 Gdynia

Adres do korespondencji: d.powarzynski@amw.gdynia.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę sprawności energetycznej napędu dla biomimetycznego pojazdu podwodnego w funkcji algorytmów sterowania. Projekt i wykonanie zrealizowano z uwagi na znaczące zalety wynikające z stosowania napędów falowych w pojazdach podwodnych. Wyszczególniono sprawności w odniesieniu matematycznym do napędów falowych. Zaprezentowano użytą konstrukcję pojazdu wraz z jej parametrami oraz przygotowane stanowisko laboratoryjne. Na podstawie wdrożonych algorytmów sterowania oraz przeprowadzonych badań udowodniono, iż zależności wynikające z sprawności energetycznej w różnych algorytmach sterowania nie są liniowe. Otrzymane wyniki zależą od częstotliwości oraz amplitudy pracy płetw. Zastosowane badania pozwoliły wydłużyć czas pracy biomimetycznego pojazdu podwodnego względem bazowego algorytmu sterowania.

Słowa kluczowe: napęd biomimetyczny, bezzałogowy pojazd podwodny, analiza sprawności energetyczej

Abstract: The article presents an analysis of the energy efficiency of the propulsion system for a biomimetic underwater vehicle as a function of control algorithms. The design and implementation were carried out due to the significant advantages of using undulating propulsion in underwater vehicles. The energy efficiencies are specified with mathematical reference to undulating propulsion systems. The vehicle's structure and its parameters are presented, along with the prepared laboratory test setup. Based on the implemented control algorithms and the conducted experiments, it was demonstrated that the relationship between energy efficiency and different control algorithms is non-linear. The obtained results depend on the frequency and amplitude of fin operation. The applied research allowed for an extension of the operational time of the biomimetic underwater vehicle compared to the baseline control algorithm

Keywords: biomimetic underwater vehicle (BUV), unmanned underwater vehicle (UUV), analysis of propulsion energy efficiency

Wstęp

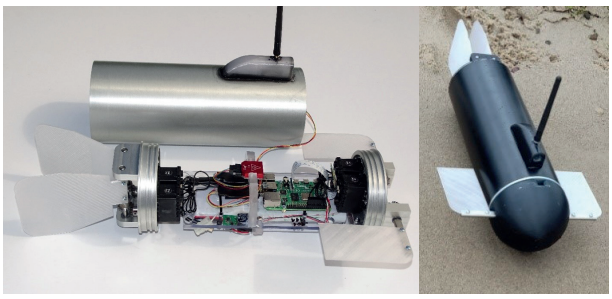
Bezzałogowe pojazdy podwodne stanowią kluczowy element systemów ochrony i monitorowania podwodnej infrastruktury krytycznej. Mogą być wykorzystywane do skrytego operowania w rejonach bazowania sił przeciwnika, identyfikacji oraz klasyfikacji jednostek pływających, min, a także do inspekcji obszarów przewidzianych pod budowę morskich farm wiatrowych czy podwodnych magazynów. Dodatkowo, pojazdy te mogą zostać wyposażone w ładunki wybuchowe, co czyni je relatywnie tanią i trudną do wykrycia bronią w środowisku morskim.

W znacznym stopniu wyróżniają się pojazdy o konstrukcji torpedopodobnej wyposażone w scentralizowany napęd śrubowy umieszczony w tylnej części kadłuba. Jednakże, ze względu na wysoki poziom hałasu hydroakustycznego generowanego przez tego typu napęd, rozwinięto alternatywny kierunek bezzałogowych pojazdów podwodnych, oparty na zastosowaniu napędów biomimetycznych. Rozwiązania te umożliwiają naśladowanie ruchu oraz kształtów charakterystycznych dla żywych organizmów morskich [1][2], co pozwala na znaczną redukcję generowanego sygnału akustycznego i zwiększenie skrytości operacyjnej.

Ze względu na sposób realizacji napędu biomimetycznych pojazdów podwodnych wyszczególnia się dwie grupy: BCF (ang. Body and/or Caudal Fin) oraz MPF (ang. Median and/or Paired Fin). Pojazdy typu

BCF wyróżniają się budową korpusu, która składa się z kilku członów połączonych szeregowo obrotowymi parami kinematycznymi. Pojedynczy człon oscyluje z odpowiednią amplitudą i częstotliwością, wprawiając w ruch drgający zespojony korpus lub jego końcową cześć, tzw. płetwę ogonową, stanowiąc główny napęd. Natomiast pojazdy typu MPF (ang. Median and/or Paired Fin) generują siłę napędową za pomocą falujących powierzchni pionowych i poziomych imitujących płetwy [3].

Badania ukazane w dalszej części artykułu przeprowadzono z wykorzystaniem pojazdu podwodnego pk. „Nerpa" przedstawionego na rysunku 1. Konstrukcja ta charakteryzuje się biomimetycznym układem napędowym realizowanym za pomocą powierzchni pionowych i poziomych, generujących siłę naporu. W efekcie wykorzystanie siły naporu umożliwia efektywne przemieszczanie się pojazdu w kierunkach horyzontalnych, przy jednoczesnym znacznym ograniczeniu emisji hałasu hydroakustycznego [4]. Ponadto zastosowanie powierzchni poziomych pozwoliło na regulację i utrzymanie głębokości i zanurzenia. W procesie projektowania i budowy pojazdu szczególny nacisk położono na minimalizację emisji sygnatury akustycznej, zwiększenie wytrzymałości mechanicznej konstrukcji, a także redukcję kosztów produkcyjnych i eksploatacyjnych. Kluczowym aspektem funkcjonalnym pojazdu jest jego modularna budowa, umożliwiająca integrację dodatkowych systemów zwiększających autonomię operacyjną oraz wszechstronność zastosowań. Znaczący wpływ na opisane właściwości miały zastosowane płetwy napędowe, wykonane z elastycznego polimetakrylanu metylu (PMMA). W ramach badań przeanalizowano różne parametry materiałowe PMMA, mające bezpośredni wpływ na optymalizację pracy układu napędowego.



Rys. 1. Biomimetyczny Pojazd Podwodny – Nerpa

Jednym z kluczowych parametrów determinujących użyteczność pojazdu jest jego sprawność energetyczna. W celu jej parametryzacji oraz dalszej optymalizacji przeprowadzono szczegółową analizę efektywności energetycznej biomimetycznego układu napędowego.

Proces ten obejmował modyfikacje algorytmów sterowania oraz zmianę wybranych parametrów geometrycznych i materiałowych płetw napędowych, co przyczyniło się do zwiększenia efektywności energetycznej i wydłużenia czasu operacyjnego pojazdu. Dodatkowo, w celu zbadania charakterystyki przepływu płynu wokół pędników oraz oceny ich interakcji z medium, zastosowano metodę PIV (ang. Particle Image Velocimetry) [5] w połączeniu z kamerą rejestrującą obraz z wysoką częstotliwością. Analiza ta umożliwiła porównanie różnych konfiguracji układów napędowych, a także ocenę powstających wirów i ich wpływu na charakterystyki pracy pędnika w kontekście zastosowanych algorytmów sterowania.

W kolejnych podrozdziałach artykułu przedstawiono analizę sprawności napędu falowego w ujęciu matematycznym, a także szczegółowy opis konstrukcji badanego pojazdu wraz z wykorzystywanym stanowiskiem laboratoryjnym i zapleczem sprzętowym. Dodatkowo zaprezentowano kluczowe wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Całość opracowania zamyka prezentacja wniosków końcowych wynikających z przeprowadzonych analiz i eksperymentów.

Matematyczna analiza sprawności napędu falowego

Interakcja pomiędzy elastycznym elementem pędnym, a otaczającym ośrodkiem płynnym zależy od szeregu czynników, obejmujących zarówno parametry środowiskowe opisujące właściwości fizykochemiczne płynu, parametry geometryczne definiujące kształt płetwy, parametry kinematyczne związane z charakterystyką ruchu płetw, jak i parametry użytkowe odnoszące się do napędu oraz zużycia energii przez układ wykonawczy [6].

Analiza tej interakcji może zostać przeprowadzona z wykorzystaniem teorii analizy wymiarowej Buckingham'a [7], która umożliwia sformułowanie związku między zmiennymi fizycznymi w postaci relacji opartych na zmiennych bezwymiarowych. Podejście to pozwala na redukcję liczby analizowanych zmiennych poprzez ich grupowanie w niezależne liczby bezwymiarowe, ułatwiając analizę zjawiska oraz jego modelowanie.

Z tego wynika, iż wzajemną interakcję pomiędzy elastyczną płetwą a płynem można opisać za pomocą następującego wyrażenia:

$$F = \mathcal{L}(K, \alpha, S, \omega, f, \rho, \mu, u_\infty) \tag{1}$$

gdzie:
K – parametr geometrycznym płetwy,

α – kąt wychylenia, mierzonym między cięciwą płetwy, a wektorem prędkością płynu,
S – powierzchnia boczna płetwy,
ω – grubość płetwy,
f – częstotliwość ruchu płetwy,
ρ – gęstość płynu,
μ – lepkość płynu,
u_∞ – prędkość płynu.

W przypadku przepływu nieściśliwego zakłada się, że gęstość ρ oraz lepkość dynamiczna cieczy μ pozostają stałe. W sytuacji, gdy element pędny wykonany jest z elastycznego materiału, jego ugięcie dynamicznie zmienia się w zależności od amplitudy wzbudzenia [8].

Zgodnie z analizą wymiarową opartą na teorii Buckingham'a, układ ten można opisać przy użyciu ośmiu zmiennych fizycznych, z których dwie – oznaczone jako K oraz α są zmiennymi niezależnymi, natomiast pozostałe sześć pozostaje względem nich zależnych. W rezultacie oddziaływanie pomiędzy strukturą a cieczą (ang. Fluid-Structure Interaction, FSI) może być przedstawione w postaci bezwymiarowej funkcji:

$$F = f(K, \alpha, St, \mathfrak{R}, k) \tag{2}$$

gdzie:
St – liczba Strouhala [9],
$\mathfrak{R}$ – liczbą Reynoldsa [10], zdefiniowana jako stosunek bezwładności płynu do sił lepkości,
k – współczynnik sztywności [11]

W przeprowadzonych badaniach przyjęto stałe wartości parametrów materiałowych płetw, ich geometrii oraz powierzchni bocznej. Opracowane w ramach badań algorytmy sterowania umożliwiają regulację liczby Strouhala poprzez kontrolowaną zmianę częstotliwości oraz amplitudy wychyleń płetw bocznych, które przyjęto za obiekt badany. Takie podejście pozwala na dynamiczną adaptację charakterystyki pracy układu napędowego w zależności od warunków operacyjnych, z zachowaniem spójności parametrów konstrukcyjnych.

Charakterystyka pojazdu podwodnego

Charakterystyczną cechą opracowanej konstrukcji jest napęd falowy, składający się z dwóch płetw ogonowych pracujących równolegle w płaszczyźnie poziomej, odzwierciedlających ruch pływającej foki. Dodatkowy napęd boczny realizowany jest za pomocą dwóch płetw zamontowanych w przedniej części pojazdu. Konstrukcja została wykonana z aluminium, poliwęglanu oraz elementów wytworzonych metodą druku 3D. Kadłub pojazdu stanowi aluminiowy cylinder, pełniący funkcję nośną dla pozostałych podzespołów. Wymiary podstawowe oraz dane techniczne pojazdu podwodnego zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Dane techniczno-taktyczne pojazdu

długość pojazdu (z płetwami ogonowymi)	410 mm
szerokość pojazdu (z płetwami bocznymi)	250 mm
średnica pojazdu	120 mm
wysokość (bez anteny)	150 mm
masa	3200 g
czas pracy pojazdu (algorytm bazowy)	210 min
Układ wykonawczy dla algorytmów sterowania	Raspberry Pi 5 / 8 GB LPDDR4X-4267 / Broadcom BCM2712 ARM Cortex-A76 64, 2,4 GH
komunikacja sterująca	2,4GHz / 868MHz
prędkość maksymalna	0,5 m/s
wyporność	dodatnia
możliwość przenoszenia ładunku	do 700 g

Pojazd składa się z czterech głównych sekcji. W przedniej części znajduje się mechanizm przeniesienia napędu płetw bocznych, osłonięty elementem wypornościowym, który chroni wystające komponenty oraz nadaje konstrukcji opływowy kształt. Następnie umieszczona jest szczelna sekcja elektroniki, zawierająca akumulatory litowo-jonowe, napędy płetw bocznych i ogniowych, komputer wykonawczy, konwertery portów RS232/USB oraz czujniki INS/DVL. W górnej części kadłuba znajduje się płetwa grzbietowa (kiosk górny) wyposażona w kamerę, odbiornik systemu GNSS oraz antenę komunikacyjną. W tylnej części pojazdu zlokalizowany jest mechanizm przeniesienia napędu płetw ogonowych. Pojazd może pracować w całkowitym zanurzeniu, w oparciu o nawigację zaliczeniową, w przypadku konieczności korekty pozycji, następuje wynurzenie oraz poprawa parametrów zgodnych ze wskazaniami GNSS. Komunikacja pojazdu ze stacją brzegową czyli komputerem planowania i monitorowania misji, realizowana jest poprzez sieć WLAN w paśmie 2,4GHz, redundantność transmisji zapewnia połączenie radiowe. W łączności z aplikacją sterującą i pojazdem wykorzystywany jest protokół UDP, który nie wymaga ciągłego połączenia pomiędzy serwerem a klientem. Serwer UDP zainstalowany jest w pojeździe, natomiast klient na komputerze planowania i monitorowania misji. Dzięki takiej konfiguracji nie występują błędy w komunikacji podczas zaniku sygnału radiowego. Pojazd zawsze udostępnia

serwer, a klient komunikuje się z nim tylko wówczas, gdy jest nawiązana łączność. Zastosowana konstrukcja pozwala na przenoszenie i zdalną detonację ładunku o łącznej masie do 700g. System sterowania i monitorowania pojazdu ukazano na rysunku 2.

Rys. 2. System sterowania i monitorowania pojazdu: 1 – biomimetyczny bezzałogowy pojazd podwodny; 2 – skrzynia transportowa; 3 – punkt nadawczo-odbiorczy; 4 – komputer planowania i monitorowania misji

Stanowisko pomiarowe

Celem przeprowadzenia szczegółowych pomiarów opracowano stanowisko laboratoryjne umożliwiające jednoczesny pomiar siły naporu generowanej przez napęd falowy oraz poboru energii elektrycznej przez układ wykonawczy pojazdu podwodnego, tj. serwomechanizm. Szczególną uwagę zwrócono na odzwierciedlenie rzeczywistych warunków eksploatacji systemów napędowych, przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej dokładności i powtarzalności wyników pomiarowych. Kluczowym aspektem było odpowiednie przygotowanie oraz precyzyjna konfiguracja zarówno układu eksperymentalnego, jak i systemu pomiarowego.

W ramach prac projektowych zbudowano stanowisko laboratoryjne o wymiarach 2000 mm × 600 mm × 600 mm przedstawione na rysunku 3. Zintegrowany układ umożliwił bezpośredni pomiar siły naporu generowanej przez napęd falowy, co pozwala na przeprowadzenie analizy sprawności energetycznej napędu w funkcji zastosowanych algorytmów sterowania.

Na stelażu konstrukcyjnym osadzono ramiona nośne w stosunku długości 2:1. Układ ramion utrzymywany jest na wale okrągłym, podpartym dwoma łożyskami kulkowymi wzdłużnymi. Ramię pomiarowe zostało połączone z certyfikowanym tensometrycznym czujnikiem siły FC5 za pośrednictwem łącznika pomiarowego MHK-101, co umożliwia precyzyjne rejestrowanie wartości sił działających na napęd. Dodatkowo, do dolnej części ramienia przymocowano obejmę służącą do stabilizacji pojazdu w środowisku wodnym, co umożliwia niezakłócony pomiar siły naporu przy zachowaniu pełnej funkcjonalności układu testowego. Urządzenie pomiarowe rejestruje dane i przesyła je w czasie rzeczywistym do komputera.

Rys. 3. Stanowisko pomiarowe: 1 – ramie górne; 2 – ramie dolne; 3 – wał okrągły; 4 – łożyska kulowe wzdłużne; 5 – tensometrycznym czujnikiem siły FC5

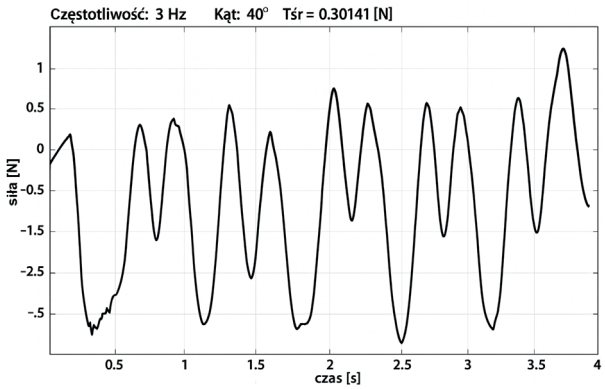
Wyniki

Algorytmy sterowania opracowano w oparciu o ustawienia parametrów kątów i częstotliwości dla zastosowanych serwomechanizmów napędu bocznego. Do przeprowadzenia analizy sprawności energetycznej przyjęto wartości, które odpowiadały częstotliwości wychyleń płetw: od 1 Hz do 4 Hz. oraz poprzez przypisanie odpowiednich punktów do określonych kątów zwymiarowano tzw. amplitudę wychyleń. Wartości początkowe określono programowo zgodnie z danymi technicznymi serwomechanizmu.

Największe średnie wartości siły osiągnięte zostały przy amplitudzie pacy płetw wynoszącej 40°. Ponadto największa uzyskania średnia wartość siły wynosi 0.301 N dla amplitudy 3 Hz oraz kąta wychylenia 40°, wykres wartości naporu przedstawiono na rysunku 4. W odniesieniu do wszystkich częstotliwości wartość naporu maleje wraz ze spadkiem amplitudy z wyłączeniem kąta 40°. Jak wykazały badania, przy częstotliwości wychyleń płetwy 3 Hz uzyskane średnie wartości naporu są największe dla wszystkich kątów (tabela 2). Z tego wynika, iż prędkość pośrednia wywiera najlepszy wpływ pracy płetw na ośrodek wodny w stosunku do otrzymanej wartości naporu.

Sprawność energetyczną układu napędowego pojazdu określa się jako stosunek użytecznej mocy wyjściowej do wartości poboru mocy mierzonej w określonym przedziale czasu [12]. Pomiar średniej wartości energii elektrycznej został wykonany z wykorzystaniem opracowanych algorytmów zwracających wartość obciążenia serwomechanizmu próbkowanych w czasie. Zaimplementowany program odczytywał wartości obciążenia serwomechanizmów i zapisywał je do pliku wraz sygnaturą czasu.

Następnie uwzględniając średnią wartość obciążenia serwomechanizmu z oporem wody jak i bez oporów wody obliczono różnice wartości obciążenia (tabela 3). Z otrzymanych danych pomiarowych dla badanych częstotliwości i kątów stwierdzono, iż otrzymane wartości rosną wraz ze wzrostem prędkości obrotowej serwomechanizmu.



Rys. 4. Wykres wartości naporu dla wybranego algorytmu

Realizacja obliczeniowa sprawności energetycznej w funkcji algorytmów sterowania wymaga zestawienia średnich wartości naporu Fx do średnich wartości obciążenia P. W celu uzyskania wartości procentowych sprawności energetycznej wyniki pomnożono przez 100, zestawienie przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 2. Średnia wartość naporu

α / f Hz	45°	40°	35°	30°
4 Hz	0,272	0,275	0,255	0,213
3 Hz	**0,296**	**0,301**	**0,269**	**0,224**
2 Hz	0,186	0,187	0,183	0,177
1 Hz	0,077	0,081	0,077	0,072

Tabela 3. Sprawność energetyczna w funkcji algorytmów sterowania dla kluczowych częstotliwości i amplitudy

α / f Hz	45°	40°	35°	30°
4 Hz	5,486	4,188	3,914	3,802
3 Hz	5,141	4,118	4,067	3.507
2 Hz	2,541	1,751	1,674	1,657
1 Hz	0,6	0,429	0,292	0,277

Tabela 4. Sprawność energetyczna w funkcji algorytmów sterowania dla kluczowych częstotliwości i amplitudy

α / f Hz	45°	40°	35°	30°
4 Hz	4,96	6,57	6,52	5,6
3 Hz	5,76	**7,31**	6,61	6,39

Rozpatrywanie wartości sprawności energetycznej realizowane jest w górnych wskazaniach częstotliwości ze względu na siłę naporu, która pozwala na efektywny ruch wzdłużny pojazdu.

Otrzymane wyniki można porównać z wartościami sprawności modeli śrub napędowych gdzie średnia wartość modelu śruby dwuskrzydłowej wynosi 8.53%. [13] Biorąc pod uwagę fakt, że w wykorzystanym podczas badań pojeździe zastosowano napęd generujący znacznie niższy poziom hałasu hydroakustycznego, wyniki są zadowalające i przyszłościowe w kontekście dalszego rozwoju.

Podsumowanie

Analiza sprawności napędu dla biomimetycznego pojazdu podwodnego w funkcji algorytmów sterowania pozwoliła na parametryzację wartości naporu generowanych przez układ napędowy oraz zużycia energetycznego badanego obiektu celem optymalizacji czasu pracy pojazdu. Z uwagi na istotne zalety wynikające ze stosowania napędów falowych, kluczowe znaczenie ma ich szczegółowa analiza pozwalająca na dalszą optymalizację i wydłużenie czasu operacyjnego wykorzystania konstrukcji biomimetycznych.

Na podstawie wdrożonych algorytmów sterowania oraz przeprowadzonych badań wykazano, że zależności związane ze sprawnością energetyczną w kontekście różnych algorytmów sterowania nie mają charakteru liniowego. Otrzymane wyniki wykazały istotny wpływ częstotliwości oraz amplitudy pracy płetw na sprawność układu napędowego. Przeprowadzone badania pozwoliły na wydłużenie czasu pracy biomimetycznego pojazdu podwodnego w porównaniu do rozwiązań opartych na bazowym algorytmie sterowania.

W dalszych etapach badań planowane jest porównanie różnych układów napędowych z wykorzystaniem metody PIV (ang. Particle Image Velocimetry), co umożliwi szczegółową analizę powstawania struktur wirowych w zależności od zastosowanych algorytmów sterowania. Ponadto, zastosowanie metod uczenia maszynowego pozwoli na precyzyjne określenie optymalnych parametrów pracy układu pod kątem efektywności energetycznej, co w konsekwencji przyczyni się do zwiększenia możliwości i efektywności eksploatacyjnej badanych konstrukcji biomimetycznych.

Przyjęto: 05.10.2025, **zaakceptowano:** 04.11.2025, **opublikowano:** 24.11.2025

LITERATURA

[1] Malec, Marcin, Marcin Morawski, and Jerzy Zajac. "Fish-like swimming prototype of mobile underwater robot." Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems (2013): 25-30.
[2] Szymak, P., Praczyk, T., Naus, K., Szturomski, B., Malec, M., & Morawski, M. (2016, June). Research on biomimetic underwater vehicles for underwater ISR. In Ground/Air Multisensor Interoperability, Integration, and Networking for Persistent ISR VII (Vol. 9831, pp. 126–139). SPIE.
[3] Piskur P., Łarzewski B., Kot R., Szymak P., Design, Modelling, And Simulation Of Biomimetic Underwater Vehicle, Conference: 37th ECMS International Conference on Modelling and Simulation, June 2023
[4] Kiciński, R.; Szturomski, B. (2020) Pressure Wave Caused by Trinitrotoluene (TNT) Underwater Explosion – Short Review. Appl. Sci. 10, 3433. https://doi.org/10.3390/app10103433
[5] Raffel, M. & Willert, Christian & Wereley, Steve & Kompenhans, Juergen. (2007). Particle Image Velocimetry: A Practical Guide. 10.1007/978-3-540-72308-0
[6] X. Wu, X. Zhang, X. Tian, X. Li i W. Lu, „A review on fluid dynamics of flapping foils," Ocean Eng, 2020.
[7] BUCKINGHAM, E. The Principle of Similitude. Nature 96, 396–397 (1915). https://doi.org/10.1038/096396d0
[8] W. Liu, Q. Xiao i F. Cheng, „A bio-inspired study on tidal energy extraction with flexible flapping wings," Bioinspir Biomimet, 2013.
[9] G. Triantafyllou, M. Triantafyllou i M. Grosenbaugh, „Optimal thrust development in oscillating foils with application to fish propulsion," J. Fluids Struct, p. 205–224.
[10] Y. Baik i L. Bernal, „Experimental study of pitching and plunging airfoils at low Reynolds numbers," 2012.
[11] Y. Luo, Q. Xiao, G. Shi, G. Pan i D. Chen, „The effect of variable stiffness of tuna-like fish body and fin on swimming performance," Bioinspir. Biomimet, 2020.
[12] M. Morawski, A. Słota, J. Zając i M. Malec, „Fish-like shaped robot for underwater surveillance and reconnaissance – Hull design and study of drag and noise," Ocean Engineering, 2020.
[13] P. Bzura, „Porównanie sprawności śrub napędowych jachtu motorowodnego na stanowisku dydaktycznym," Jurnal of Polish CIMEEAC - Faculty of Ocean Engineering & Ship Technology.