

Marcin Malec, Marcin Morawski

Marcin Malec

Politechnika Krakowska im Tadeusza Kościuszki,
Wydział Mechaniczny
31-864, Kraków, Jana Pawła II 37
e-mail: mmalec@m6.mech.pk.edu.pl

Marcin Morawski

Politechnika Krakowska im Tadeusza Kościuszki,
Wydział Mechaniczny
Zakład Zautomatyzowanych Systemów Produkcyjnych,
31-864, Kraków, Jana Pawła II 37
e-mail: morawski@m6.mech.pk.edu.pl

**ZMODERNIZOWANA KONSTRUKCJA BIOMIMICZNEGO
POJAZDU PODWODNEGO CYBERRYBA**

W niniejszym artykule zaprezentowano projekt podwodnego robota mobilnego wykorzystującego niekonwencjonalny napęd realizowany dzięki zsynchronizowanym wychyleniom jego ruchomych członów. Opisano koncepcje prac badawczych mających na celu zwiększenie efektywności napędu falowego. W artykule przedstawiono także wyniki badań oraz plany dalszego rozwoju konstrukcji i oprogramowania, prowadzących do zwiększenia manewrowości, funkcjonalności oraz możliwości wykorzystania podwodnego robota mobilnego z napędem falowym w zadaniach inspekcyjnych.

Słowa kluczowe: autonomiczny pojazd podwodny, napęd falowy, podwodny robot mobilny.

**MODERNIZED STRUCTURE OF A BIONIC UNDERWATER
VEHICLE CYBERFISH**

This paper presents the design of underwater mobile robot using unconventional propulsion realized with synchronized inclination its moving parts. The concepts of research aimed at increasing the efficiency of the undulating propulsion. The article presents the results of the studies and plans for further development and software design, leading to increased maneuverability, functionality and usability of underwater vehicles powered by undulating propulsion in inspection tasks.

Keywords: autonomous underwater vehicle, undulating propulsion, underwater vehicles.

BEZZAŁOGOWE PODWODNE ROBOTY MOBILNE – SPRAWDZONE KONSTRUKCJE

Rozwój elektroniki, informatyki oraz nowych technologii materiałowych pod koniec minionego wieku przyczynił się do powstania zaawansowanych technicznie urządzeń zanurzalnych. Konstrukcje podwodnych robotów mobilnych zależą od przeznaczenia i typu realizowanego zadania [10]. Główny podział bezzałogowych pojazdów podwodnych dokonywany jest ze względu na zastosowany sposób sterowania i zasilania. ROV (*ang. Remotely Operated Vehicle*) to statek głębinowy sterowany zdalnie, którego załoga znajduje się poza urządzeniem zanurzalnym. AUV (*ang. Autonomous Underwater Vehicle*) to autonomiczny bezzałogowy statek głębinowy, który samodzielnie, bez ingerencji człowieka podejmuje decyzje i wykonuje zadania. Oba typy urządzeń przeznaczone są do realizacji prac o różnym stopniu skomplikowania. Wspólną cechą ww. pojazdów jest zmniejszenie kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych wynikających między innymi z ograniczenia roli człowieka podczas realizacji zadania. Urządzenia te ponadto umożliwiają zwiększanie czasu realizacji i zakresu prowadzonych badań zwłaszcza na dużych głębokościach.

Rozwiązania techniczne napędów komercyjnych pojazdów głębinowych zarówno załogowych jak i bezzałogowych, oparte są na pędnikach śrubowych. Urządzenia tego typu często poza napędem głównym, umiejscowionym wzdłuż osi pojazdu, którego zadaniem jest realizacja ruchu postępowego, posiadają dodatkowe pędniki odpowiadające za zmianę kursu, głębokości zanurzenia, przegłębienia itp. Wadą klasycznego rozwiązania napędu w postaci pędników śrubowych w porównaniu do proponowanego w artykule napędu falowego są problemy z widocznością przy operowaniu pojazdem w pobliżu dna, w szczególności zamulonego. Silne zawierowania towarzyszące pracy pędników powodują unoszenie osadu dennego, co w konsekwencji prowadzi do drastycznego ograniczenia widoczności w pobliżu działającego urządzenia.

Istotną cechą większości robotów inspekcyjnych jest stała, często zerowa lub nieznacznie dodatnia pływalność, co wymusza ciągłą pracę pędników pionowych w czasie zanurzania, wynurzania jak również podczas prac na stałej głębokości. Poważną wadą tego typu rozwiązania jest ciągłe zapotrzebowanie systemu na energię elektryczną konieczną do napędu silników.

INSPIRACJA NATURĄ – BIOMIMETYCZNE NAPĘDY FALOWE

Ryby jako najliczniejsi mieszkańcy mórz i oceanów w wyniku ewolucji doskonale przystosowały swe ciała do warunków w jakich przyszło im funkcjonować. W zależności od obszarów występowania czy trybu życia, wykształciły i udoskonaliły do perfekcji różne formy, które z uwagi na manewrowość, prędkość poruszania się, gabaryty i zwartość budowy ciała dalece wyprzedzają klasyczne konstrukcje pojazdów podwodnych napędzanych pędnikami.

Tworzone są nowe koncepcje konstrukcji podwodnych robotów mobilnych naśladujących kinematyką ryby, wykorzystujące do poruszania się płetwę grzbietową, odbytową, płetwy boczne. Innym, dużo bardziej popularnym podejściem jest system napędowy określany jako BCF (*ang. Body and/or Caudal Fin*), który naśladuje grupy rodzin realizujące ruch falowy ciała i płetwy ogonowej. Różnorodność gatunków poruszających się przy pomocy tego typu ruchu, wymusiła opracowanie szczegółowej klasyfikacji ze względu na procentowy udział długości ciała wykonujący oscylacje. Wyróżnia się pięć kategorii takich jak: węgorzowate (*anguiliform*), łososiokształtne (*subcarangiform*), okoniokształtne (*carangiform*), tuńczykowate (*tuniform*), rozdymkookształtne (*ostraciform*) [3].

UNMANNED MOBILE UNDERWATER ROBOTS – VERIFIED CONSTRUCTIONS

The development of electronics, informatics and new mechanical technologies of the past century has led to the creation of technically advanced robots and automatons that are sometimes known as controllable deep-sea vehicles. The constructions of these underwater vehicles are strongly dependent on their purpose and the nature of the task to be completed [10]. The main division of unmanned underwater vehicles is made according to the type of controls and power supply. SGSZ is a deep-sea unit controlled and powered by a cable line (umbilical cord), in which the crew is outside the submersible. SGA is an autonomous underwater vehicle – the device autonomously makes decisions and completes tasks. Both types of devices are meant for tasks of different complexity. A common feature of both devices is the lowering of the investment and operation costs which result from the reduction of the role of humans in task fulfillment.

The technical solutions for commercial underwater vehicles, both manned and unmanned, SGZS and SGA, are based on the pump jet. These types of devices, often separate from the primary drive and located along the axis of the vehicle, which are to provide translational motion, also have additional propellers which are responsible for changing the direction, depth and lateral tilt, etc. These solutions limit the operational capabilities of deep-sea vehicles, especially inspection works and manipulation in the vicinity of a muddy sea floor – the strong turbulence which accompanies the operation of the propellers causes the sediment to rise, which, in consequence, leads to a drastic reduction of visibility in the vicinity of the vehicle.

A major flaw in most inspection robots is a constant, often zero and, at times, slightly positive buoyancy, which in turn requires the continuous operation of the vertical propulsion during immersion and emersion as well as while working at an invariable depth. Another serious flaw of this solution is the unvarying demand for electrical energy required to power the motors.

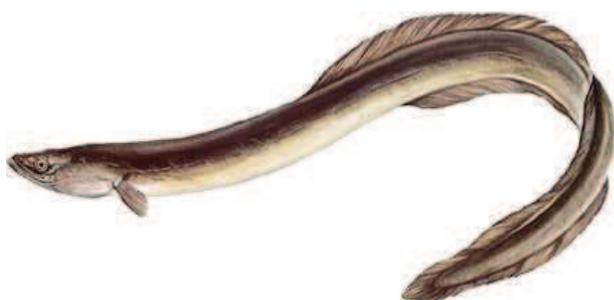
INSPIRED BY NATURE – BIOMIMETIC UNDULATING PROPULSION

Fish, which are the most numerous inhabitants of the seas and oceans, have, due to evolution, perfectly adapted their bodies to the conditions in which they have existed. Based on the area of occurrence or a way of life, they have developed and perfected various forms, which in reference to maneuverability, speed size and contents of body composition, are far better and more advanced than the classical constructions of propeller powered underwater vehicles.

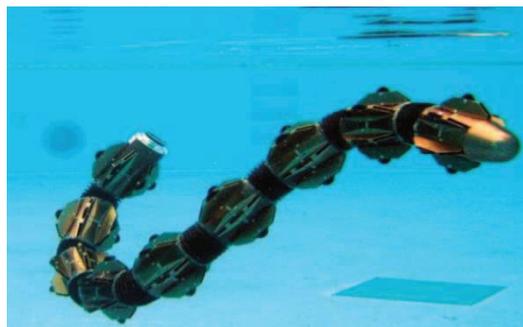
New conceptions of underwater vehicles are now being created to imitate fish in terms of kinematics, utilizing the body, side and anal fins. Another, and a much more popular approach, is a system described as BCF (Body and/or Caudal Fin), which mimics various species of fish that implement undulating movement of the body and the caudal fin. The diversity of species set in motion with this type of movement, forced a development of a detailed classification defined by the percentage of body length performing oscillations.

We distinguish five categories: Anguillidae, Subcarangidae, Carangidae, Tunidae, and Ostraciidae [3]. Fish species of the anguillidae family (fig. 1) (or lampreys), whose bodies make an undulating movement along their entire length, are often deprived of paired fins and a clearly outlined caudal fin in favour of well developed dorsal fins running across the greater part of the body. These fish can be characterized by their high maneuverability as the oval cross-section of their body allows the penetration of scrub and narrow rocky openings.

Gatunki ryb z rzędu węgorzowatych (Rys. 1) (lub minogokształtnych), których ciało wykonuje ruch falowy na całej długości często pozbawione są płetw parzystych i wyraźnie zarysowanej płetwy ogonowej na rzecz dobrze wykształconych, przebiegających przez większą część ciała płetw grzbietowych zazwyczaj połączonych w jeden ciągły fałd płetwowy. Ryby te odznaczają się wysoką manewrowością, bowiem owalny przekrój ciała umożliwia penetrację zarośli i wąskich otworów skalnych. Uwarunkowania te nie pozwalają jednak na uzyskanie dużych prędkości [11]. Roboty naśladujące takie zwierzęta wymagają wysokich nakładów finansowych, zaawansowanych algorytmów sterujących i wydajnych energetycznie systemów zasilania (Rys. 2).

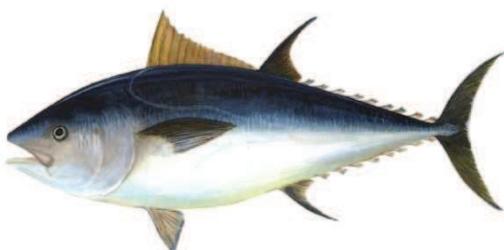


Rys. 1. Węgorz europejski [11].

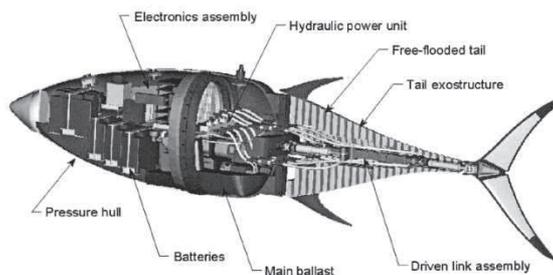


Rys. 2. Robot ACM-R5 [12].

Ruch falowy wykonywany co najwyżej połową długości ciała jest typowy dla rodzin okoniowatych i tuńczykowatych (Rys. 3). Wydłużone, bocznie spłaszczone ciało, o spiczastej głowie to cechy charakterystyczne dla ryb należących do wymienionych grup. Duża płetwa ogonowa, zewnętrznie symetryczna, o tylnej krawędzi mniej lub bardziej wcięta przypomina kształtem półksiężyc. Gatunki o takich cechach mają ograniczoną manewrowość w porównaniu do ryb z rodziny węgorzowatych, jednak dzięki specyficznej anatomii mogą z łatwością rozwijać duże prędkości.



Rys. 3. Tuńczyk błękitno płetwy [11].



Rys. 4. Konstrukcja robota mobilnego VCUUV.

Przeważająca liczba podwodnych robotów mobilnych naśladujących sposobem poruszania się organizmy żywe to konstrukcje typu BCF (Rys. 4).

W dostępnej literaturze, dominująca większość prototypów robotów naśladuje kinematykę ryb z rodziny rozdymkokszałtnych (Rys.5, Rys. 6.).

However, such considerations do not allow for obtaining high speeds [11]. Robots mimicking these animals would require high costs, advanced algorithms for control and efficient power supply systems (fig. 2).

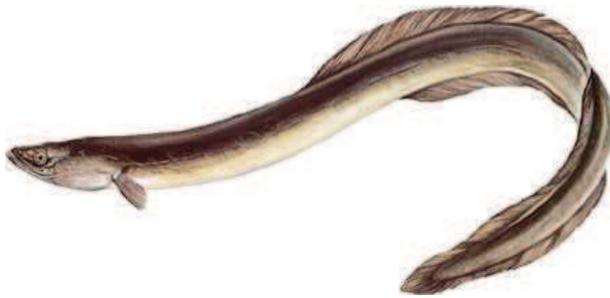


Fig. 1. European Eel [11].

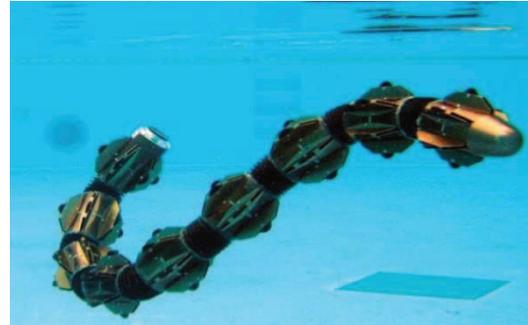


Fig. 2. The ACM-R5 Robot [12].

The undulating movement with only half of the body-length is typical for both Tunidae and Carangidae. What is characteristic of fish belonging to these groups is an elongated, laterally flattened body with a pointed head and a large, externally symmetrical, caudal fin near the rear edge resembling a crescent shape. Species with these features have limited maneuverability in comparison to the Anguilidae, although due to the specific anatomy they can develop high speeds.



Fig. 3. Blue Fin Tuna [11].

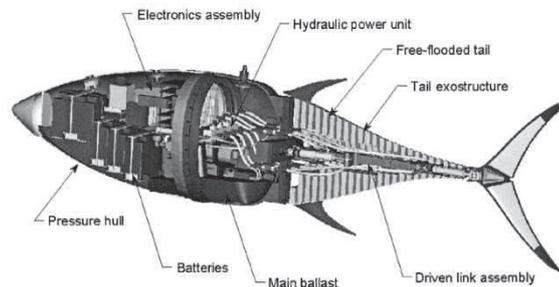
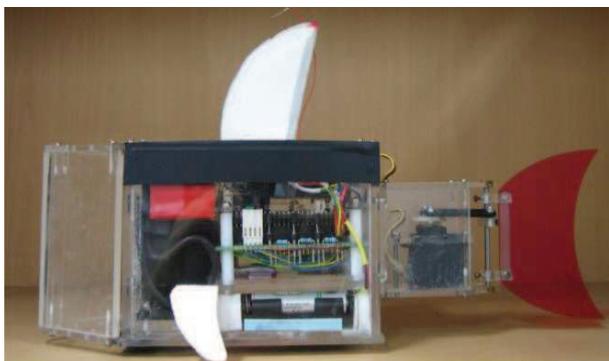


Fig. 4. Construction of the mobile unit VCUUV.

The vast majority of underwater mobile robots that mimic the way in which living organisms move are of the BCF type (fig. 4). In available literature, the dominant designs of prototype robot imitate the kinematics of fish from the Ostriciidae family (fig. 5, fig. 6). In these creations, the propulsion is implemented through only one moving section on which a caudal fin has been attached. However, this solution to the propulsion system greatly limits maneuverability of these devices.

Jest to przypadek, gdzie napęd realizowany jest jedynie przez pojedynczą sekcję ruchomą, do której przymocowano płetwę ogonową. Rozwiązanie napędu w ten sposób znacznie ogranicza możliwości manewrowe.

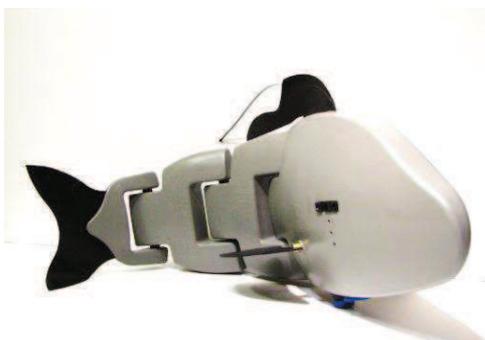


Rys. 5. Robot typu Ostraciiform [2].



Rys.6. BoxyBot [4].

Przy realizacji badań nad napędem falowym projektuje się roboty, których mechanizm napędowy jest złożony z szeregu połączonych ze sobą sztywnych członów, napędzanych najczęściej niezależnymi serwonapędami. Rozwiązania takie umożliwiają elastyczną zmianę położenia, prędkości kątowej każdego członu z osobna. Z uwagi na powyższe, konstrukcje te umożliwiają implementacje modeli matematycznych, odwzorowujących sposób poruszania się różnorodnych gatunków w różnych stanach – pływanie na wprost, skręt po okręgu, szybki skręt itp. Dzięki takiemu podejściu można dokonać analizy wpływu parametrów sterujących i konstrukcyjnych na wydajność napędu falowego.



Rys.7. CyberRyba wer 3 [7].



Rys.8. CyberRyba wer 4.

W pracy [7] przedstawiono wyniki badań doświadczalnych opisujących zmianę parametrów sterujących ruchem czterocłonowego robota mobilnego z napędem falowym na myśzkowanie, kiwanie, przechylenie boczne oraz maksymalną prędkość pływania. Badania obejmowały zmianę częstotliwości oscylacji z zakresu 0,7–1,1Hz i amplitudy w przedziale 13-25°. Na podstawie zrealizowanych testów [6], [7] i nabytego doświadczenia przystąpiono do realizacji czwartego prototypu robota mobilnego, naśladującego sposobem poruszania wodne organizmy. Podczas projektowania zdecydowano się na zbudowanie pięciosekccyjnej konstrukcji (Rys. 8) umożliwiającej w przyszłości dokonanie analizy wpływu parametrów sterujących czterosegmentową sekcją ogonową na trajektorię ruchu robota mobilnego.

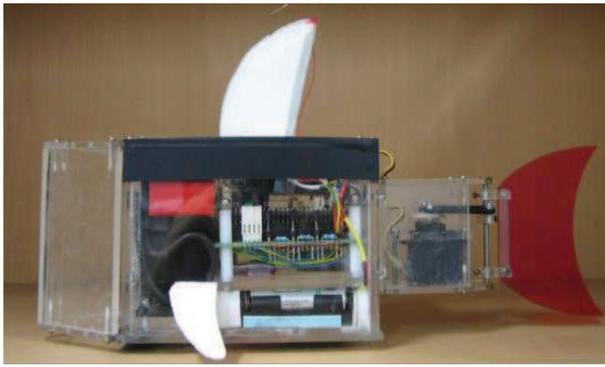


Fig. 5. Ostraciiform type robot [2].

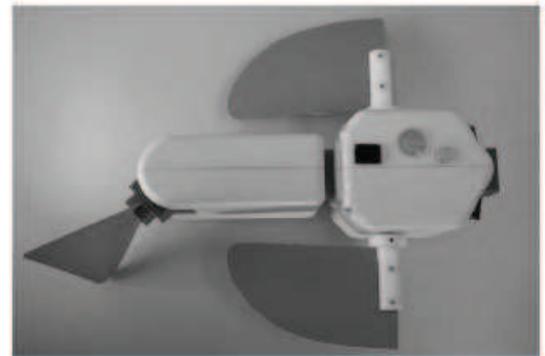


Fig. 6. BoxyBot [4].

Research on undulating propulsion, involves designing robots in which the drive mechanism is composed of a number of interconnected rigid segments. Such robots are mostly driven by independent servo-drives. Such solutions allow for flexibility in changing the position, as well as the angular velocity, of each segment individually. Due to this, the structures allow implementation of mathematical models imitating the way of movement for a variety of species in different states - swimming straight ahead, turning in a circle, performing quick turns, etc. Utilizing this approach may help to analyze the impact of structural and control parameters on the performance of undulating drives.

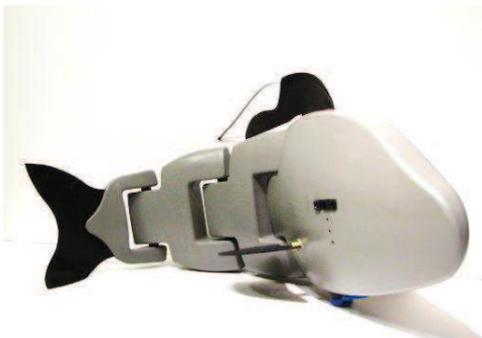


Fig. 7. CyberFish ver. 3 [7].

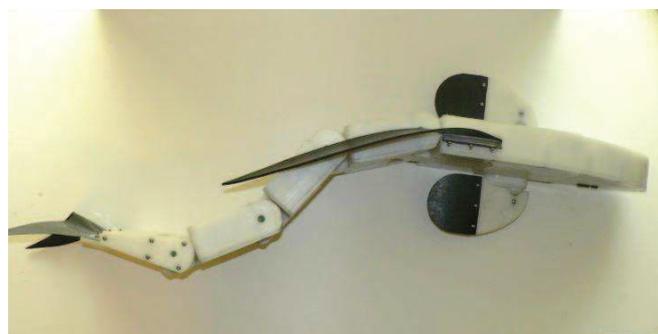


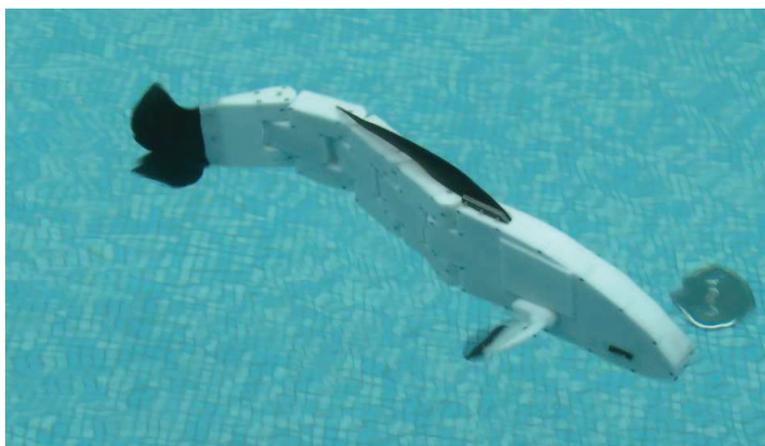
Fig. 8. CyberFish ver. 4.

In the case of the model [7] the results of the conducted experimental research describe the changes of parameters controlling the movements of a four-module mobile robot with an undulating drive including prowling, wagging, lateral tilt and the maximum swimming speed. The research covered the changes in frequency of oscillation in a range varying between 0.7 – 1.1 Hz and amplitude in the range of 13-25°. On the basis of the tests [6], [7] and gained experience, a trial of a fourth prototype of mobile robot, which mimicked a water organisms in the manner in which it moved, was performed.

In the design phase it had been decided to build a five-module construction [fig. 8], which in the future would allow for the conduction of an analysis of the influences controlling the four-module tail section on the trajectory of movement. The main objectives pursued in the design of the prototype were increased speed of movement and the implementation of technical solutions enabling autonomous robot navigation in open waters. A detailed analysis of literature concerning BCF drives as well as studies concerning the life and habits of freshwater fish from Europe was undertaken.

Nadrzędnym celem realizowanym podczas projektowania prototypu było zwiększenie prędkości poruszania się oraz implementację rozwiązań technicznych umożliwiających autonomiczne poruszanie robota w toni. Dokonano szczegółowej analizy literatury dotyczącej istniejących napędów BCF oraz opracowań poświęconych życiu i funkcjonowaniu ryb słodkowodnych z obszaru Europy. W ramach realizacji prac konieczne było zaprojektowanie i wykonanie wodoszczelnych połączeń statycznych elementów konstrukcji poszczególnych sekcji, uszczelnienia par kinematycznych obrotowych klasy V, mocowania i przeniesienia napędu sekcji ogonowej oraz płetw bocznych. Na etapie projektowania niezbędne było oszacowanie parametrów napędów – dynamiki, momentu napędowego, napięcia zasilania i wydajności źródła zasilania. Konieczne stało się określenie elementów składowych systemu sensorycznego, jednostki sterującej, czujników ciśnienia, orientacji, położenia, wilgotności, kamery wizyjnej, systemu oświetlenia, systemu komunikacji.

Innowacyjny mechanizm zamiany głębokości oparty na niezależnie działających płetwach bocznych oraz konstrukcji sztucznego pęcherza pławnego, umożliwia realizację zanurzenia i wynurzenia poprzez regulację pływalności robota. Główną zaletą rozwiązania jest znaczące ograniczenie zużycia energii elektrycznej i wyeliminowanie zawirowań wody towarzyszących klasycznym rozwiązaniom stosowanym w SGSZ i SGA. Dodatkowo niezależnie działające płetwy boczne zwiększają dynamikę zmiany głębokości podczas ruchu robota. Zadaniem zintegrowanego systemu zanurzenia ma być w przyszłości umożliwienie poruszania się platformy na stałej głębokości lub wysokości od dna niezależnie od wpływu warunków środowiskowych oraz minimalizacja przechylenia bocznego realizowana poprzez dynamiczne sterowanie płetwami bocznymi. W konstrukcji przewidziano przestrzeń dla zmiany położenia balastu oraz zarezerwowano miejsce na dodatkowe obciążenie umożliwiające zmianę pływalności wynikającą ze zmian parametrów środowiska wodnego (termoklina, chemoklina) oraz rekonfiguracji czujników. Prace projektowe musiały uwzględniać poprawne rozmieszczenie części składowych w sposób gwarantujący prawidłową stateczność statyczną, wzdłużną i poprzeczną oraz technologiczność wykonania i montażu elementów robota (Rys. 9).



Rys. 9. CyberRyba wer. 4 podczas testów w basenie.

In the process it became necessary to design and create waterproof static connections for the construction of individual modules, sealing rotary kinematics pairs of class V and the attachment and transmission of particular tail modules as well as side fins.

At the design stage it was necessary to estimate the parameters of the drive – the dynamics, torque, voltage and efficiency of the power source. It was also necessary to establish the components of a sensor system, control unit (pressure sensors, orientation, position, humidity), camera, switcher, lighting system and the communications system. Incorporated into the design was an innovative mechanism of depth change. Based on independent side fins and the construction of an artificial swim bladder, the mechanism allows immersion and emersion completely through the regulation of the robot's buoyancy. The main advantage of this solution is a great diminishment in the energy consumption as well as the elimination of the turbulence in the water accompanying the classical solutions used in SGSZ and SGA. Additional independent side fins increase the dynamics of depth changes while the robot is in movement. The aim of the integrated submersion system is to minimize the lateral tilt achieved through the dynamic control of the side fins and to allow for the movement of the platform on a constant depth or at a particular distance from the sea floor irrespective of the environmental conditions. In the design, facility to change the positioning of the ballast has been provided, as well as a capacity to increase the amount of ballast carried, thus enabling adjustment of the device's buoyancy when different environmental conditions are encountered (thermoclines, chemoclines) or sensors are reconfigured. The design works had to provide the correct placement of components in a way that ensures proper longitudinal and transverse static stability, as well as technological manufacture and implementation in assembling of the robot. [Fig. 9]



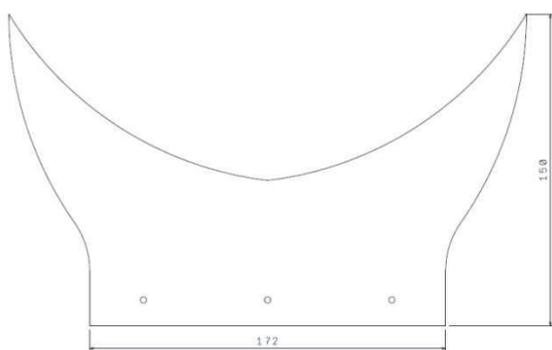
Fig. 9. CyberFish ver. 4 during tests in a swimming pool.

PŁETWA Ogonowa – ISTOTA NAPĘDU FALOWEGO

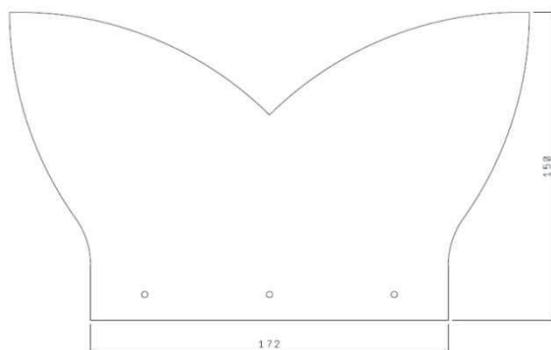
Z wykorzystaniem konstrukcji czwartego prototypu CyberRyby przeprowadzono wstępne badania wpływu parametrów płetwy ogonowej i częstotliwości oscylacji na maksymalną prędkość pływania. Na potrzeby eksperymentu zaprojektowano płetwy ogonowe o dwóch kształtach:

1. kształt księżyca - K (Rys. 10) z silnym, sierpowatym wcięciem krawędzi tylnej, typowym dla przedstawicieli szybko poruszających się gatunków,
2. kształt serca - S (Rys. 11) o wypukłej i zaokrąglonej krawędzi.

Każdą z płetw wykonano z arkusza akrylu o grubości 1mm, gumy o grubości 3, 2, 1 i 0,5 mm, uzyskując w ten sposób pięć modeli płetw o różnej podatności. Płetwom nadano numery 1-5 porządkując je przy tym od największej do najmniejszej sztywności materiału, z którego zostały wykonane.



Rys. 10. Płetwa ogonowa K.



Rys. 11. Płetwa ogonowa S.

Testy wykonano w zbiorniku 6x12m o głębokości 1 m, przy czym robot poruszał się pośrodku zbiornika wzdłuż krótszej krawędzi basenu. Start odbywał się z zerową prędkością początkową i zadaną częstotliwością oscylacji. Robot płynął tuż pod powierzchnią, dzięki czemu możliwa była obserwacja powierzchni wody wokół poruszającego się urządzenia. Dla zadanej częstotliwości oscylacji i wybranej płetwy ogonowej dokonano trzech prób. Średnią prędkość pokonania dystansu prezentują poniższe wykresy (Rys. 12).

THE CAUDAL FIN – THE ESSENCE OF AN UNDULATING DRIVE

Using the structure of the fourth prototype of the CyberFish, preliminary tests on the impact of the parameters of the caudal fin and oscillation frequency at the maximum speed of swimming were conducted. For the purpose of the experiment, two shapes of tail fins were designed:

1. Shape of the Moon - K (Fig. 10) with a strong, sickle-shaped indentation in the rear edge, typical of representatives of fast-moving species,
2. Heart shape - S (Fig. 11) of convex and rounded edge.

Each of the fins is made of an acrylic sheet with the thickness of 1 mm, rubber with the thickness of 3, 2, 1 and 0.5 mm, thereby obtaining five fin models of varying susceptibility. Fins have been given numbers from 1 to 5 at the same time ordering them from the largest to the smallest stiffness of the material from which they were made.

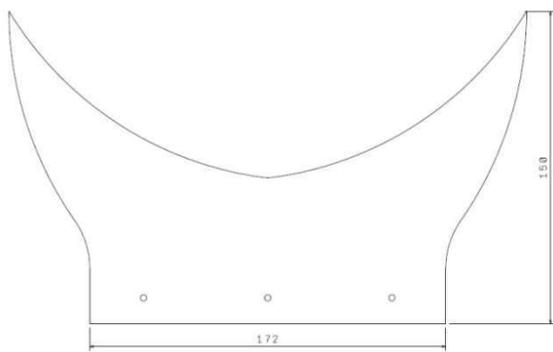


Fig.10. Tail/ Caudial fin K

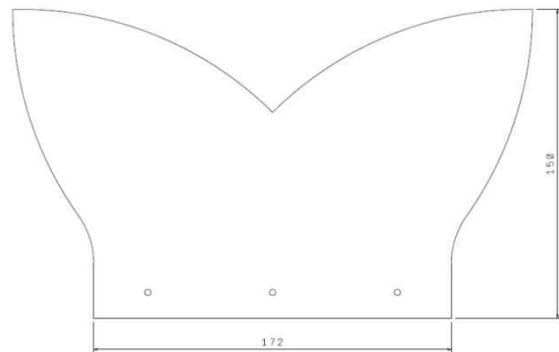
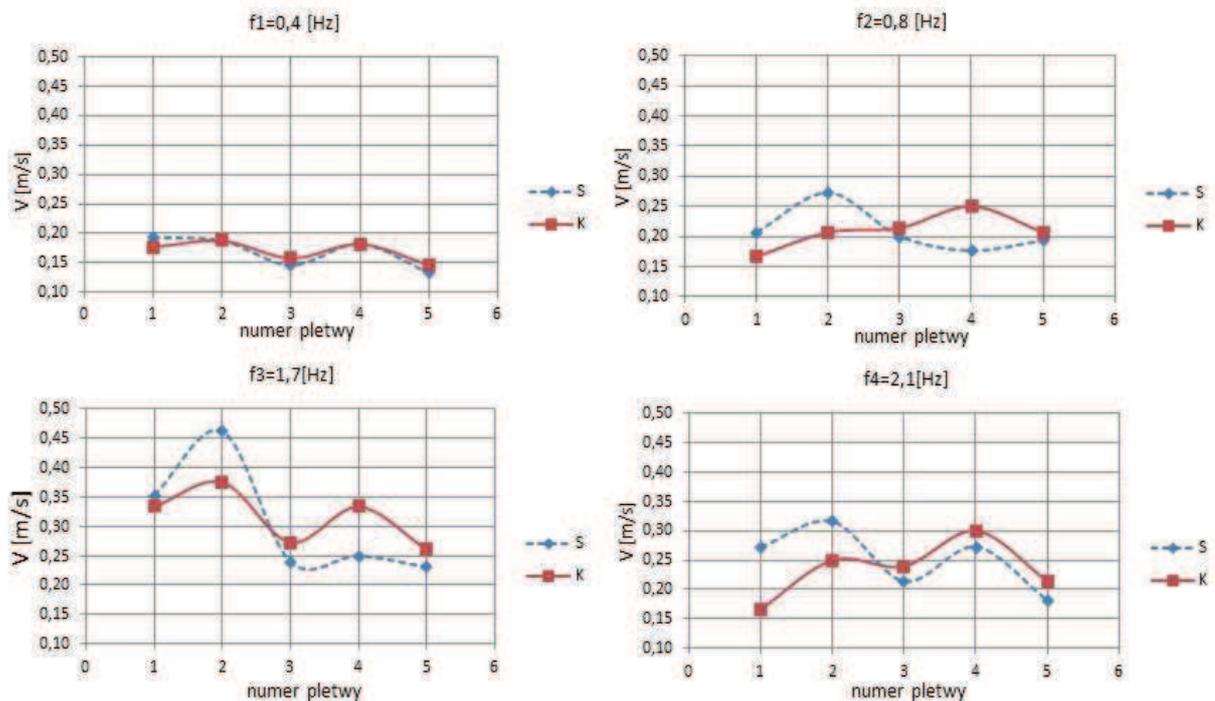


Fig.11. Tail/ Caudial fin S

Tests were performed in a tank 6x12m with a depth of 1 m, the robot moved in the middle of the tank along the short edge of the pool. The test was commenced with zero initial velocity and a set frequency of oscillation. The robot swam just below the surface, which allowed for the observation of the surface of water around the moving device. Three trial runs were conducted for each set frequency of oscillation and the selected caudal fin. The average speeds for distance coverage have been presented in the charts below (Fig. 12).



Rys. 12. Wykres zależności prędkości pływania od parametrów płetwy ogonowej.

Na podstawie przeprowadzonych prób można wnioskować, iż prędkość poruszania robota dla zakresu małych częstotliwości nie zależy w istotny sposób od sztywności płetwy ogonowej jak i kształtu S lub K. Prędkości poruszania się dla częstotliwości $f_1=0,4\text{Hz}$ nie przekraczają $0,20\text{m/s}$. Prawdopodobnie w tym przypadku powstała siła napędowa jest wynikiem oddziaływania korpusu na strumień wody wokół robota. Z uwagi na małą prędkość płetwa ogonowa nie jest w stanie odebrać energii z wirów powstałych wokół tylnej części falującego korpusu sztucznej ryby. Dla rozpatrywanych częstotliwości oscylacji płetwa ogonowa typu S o nr 1 i 2 charakteryzuje się lepszą efektywnością w stosunku do płetwy K, wykonanej na bazie tego samego materiału. Modele typu K o dużej podatności, tj. nr 3, 4, 5 powodują wzrost prędkości pływania w stosunku do zastosowanej płetwy typu S. Analizując dane należy stwierdzić, iż największa prędkość pływania $0,46\text{m/s}$ została odnotowana dla płetwy o kształcie sercowym wykonanej z gumy o grubości 3mm dla częstotliwości oscylacji $1,7\text{Hz}$. W zakresie wszystkich częstotliwości płetwa ta charakteryzowała się najlepszymi osiągnięciami.

Rozpatrując wpływ częstotliwości oscylacji na prędkość robota można odnotować tendencję rosnącą, z wyjątkiem przypadku czwartego. Dla częstotliwości oscylacji równej $2,1\text{Hz}$ zaobserwowano silne zawirowania strumienia wody wokół korpusu, niepowodujące spodziewanego zwiększenia prędkości poruszania się. Po wykonaniu testów, dokonano próby na basenie o długości 25 metrów ze stopniowym zwiększeniem częstotliwości oscylacji, przy jednoczesnym zachowaniu maksymalnej amplitudy wychyleń napędów. Zaobserwowano zmniejszenie zawirowania wody wokół robota oraz znaczący wzrost prędkości.

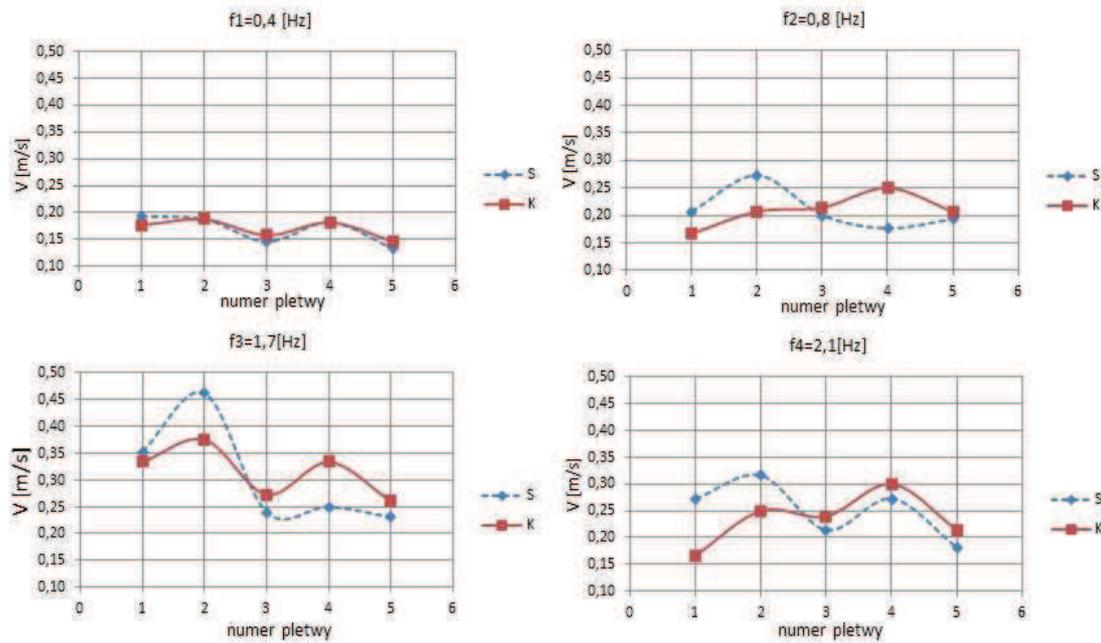


Fig 12. A graph representing the dependence of the speed on the parameters of the caudal fin.

On the basis of the tests it can be concluded that the speed of the robot for a range of low frequencies does not depend significantly on the selected caudal fin rigidity or the S or K shapes. The speeds of movement for the frequency of $f_1 = 0,4$ Hz do not exceed $0,20$ m / s. Probably in this case the driving force was simply the result of the flow of water around the robot's body. Due to the low velocity the caudal fin was unable to receive energy from vortices generated around the back of the heaving body of the artificial fish. For the considered oscillation frequencies, the caudal fin type S no. 1 and 2 has better efficiency compared to fin K made from the same material. K-type models with high sensitivity, i.e., 3, 4, 5, cause an increase in the swimming speed in relation to the applied fin type S. When analyzing the data it should be noted that the fastest swimming speed of $0,46$ m/s was recorded for heart-shaped fins made of 3 mm rubber with an oscillation frequency of $1,7$ Hz. This fin type was characterized by the best performance in the case of all the applied frequencies. It is possible to observe from the effect of oscillation frequencies on the speed of the robot an increasing trend, with the exception of case four. For oscillation frequencies equal to $2,1$ Hz strong water turbulence around the body could be observed, not resulting in the expected increase of speed of movement. Further tests, carried out in a 25 meter long swimming pool, allowed a gradual increase in the oscillation frequencies whilst maintaining the maximum amplitude of the oscillation drives. The result was a reduction of water swirling around a robot and a significant increase in speed.

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych testów należy wnioskować, iż prędkość pływania zależy od parametrów sterowania takich jak: częstotliwość oscylacji, amplituda wychyleń, przesunięcie fazowe, itp.

Należy jednak zwrócić uwagę, iż prawidłowy dobór płetwy ogonowej może radykalnie wpłynąć na prędkość pływania, a tym samym na efektywność napędu falowego. Odpowiedni dobór parametrów płetwy ogonowej powinien być uzależniony od sposobu sterowania oraz musi opierać się na przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych i optymalizacji [9] z wykorzystaniem np. algorytmów ewolucyjnych [8].

Przeprowadzone testy utwierdziły autorów niniejszej pracy o konieczności prowadzenia dalszych badań nad algorytmami sterującymi oraz parametrami płetwy ogonowej. W ramach prowadzonych eksperymentów uznano, że konieczne jest stopniowe zwiększanie częstotliwości oscylacji w miarę wzrostu prędkości poruszania się.

SUMMARY

On the basis of the tests it must be concluded that the swimming speed is dependent on control parameters such as oscillation frequency, oscillation amplitude, phase shift, etc. It should be noted however, that the proper selection of the caudal fin can dramatically influence the swimming speed, and thus the efficiency of undulating propulsion.

Proper selection of the caudal fin parameters should be dependent on the control method and must be based on experimental studies and optimization [9] using, for example, evolutionary algorithms [8].

The tests convinced the authors of the study about the need for further research into control algorithms and parameters of the caudal fin. In the course of experiments it was seen as necessary to gradually increase oscillation frequencies while providing a gradual increase of the speed of movement.

LITERATURA/ BIBLIOGRAPHY

1. Anderson J. M., Chhabra N. K.; "Maneuvering and Stability Performance of a Robotic Tuna", *Integrative and Comparative Biology*, Volume 42, Issue 1, 2002, p. 118 – 126,
2. Chan W. L., Kang T., Lee Y. J., Sung S. K., Yoon K. J.; "Swimming Study on an Ostraciiform Fish Robot", *International Conference on Control, Automation and Systems in COEX, Seoul, Korea, Oct. 17 – 20, 2007*,
3. Hu H.; "Biologically Inspired Design of Autonomous Robotic Fish at Essex", *Proceedings of the IEEE SMC UK-RI Chapter Conference 2006 on Advances in Cybernetic Systems*, September 7 – 8, 2006, p 1 – 8,
4. Lachat D., Crespi A., Ijspeert A. J.; "BoxyBot: a swimming and crawling fish robot controlled by a central pattern generator", *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, BioRob*, February 20 – 22, 2006, p. 643 – 648,
5. Malec M., Morawski M., Zajac J.; „Biomimetyczne napędy podwodnych robotów mobilnych w kontekście rozwoju CyberRyby”, *Pomiary Automatyka Robotyka* 2/2011, s. 402 - 410,
6. Malec M., Morawski M., Zajac J.; „Niekonwencjonalny napęd podwodnego robota mobilnego na przykładzie CyberRyby”, *Problemy Robotyki Tom II, WPW, Warszawa 2010*, s. 423 – 434,
7. Malec M., Morawski M.; Szymak P.: „Pomiar parametrów ruchu pojazdu podwodnego z napędem falowym z wykorzystaniem inercyjnego czujnika położenia”, *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, nr. 185A, s. 275 – 284,
8. Osyczka A., Krenich S., Krzystek J. and Habel J.; "Evolutionary Optimization System (EOS) for Design Automation", *Evolutionary Methods in Mechanics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 2004, pp. 309-320.
9. Osyczka A., Krenich S.; "Evolutionary Algorithms for Multicriteria Optimization with Selecting a Representative Subset of Pareto Optimal Solutions", W: Zitzler E. et al. (Eds.) *Evolutionary Multicriterion Optimization. Lecture Notes in Computer Science*, Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg, str. 141-153.
10. Rowiński L.; „Technika głębinowa – pojazdy głębinowe budowa i wyposażenie”, WIB, Gdańsk 2008,
11. Terowal F., Militz C.; „Leksykon przyrodniczy – ryby słodkowodne”, Świat Książki, Warszawa 1997,
12. Źródła internetowe: <http://www.find.botmag.com/011191> Snake robot AMC-R5, grudzień 2011.

УМОДЕРНИЗИРОВАННАЯ КОНСТРУКЦИЯ БИОМИМЕТИЧЕСКОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ЦИБЕРРЫБА

В данной статье представлен проект мобильного подводного робота с использованием нетрадиционной двигательной установкой, которая была реализована с синхронизацией высунания его подвижных частей. Описана концепция исследовательских работ, направленная на повышение эффективности передачи волнового сигнала. В статье представлены также результаты исследований и планы дальнейшего развития и разработки программного обеспечения, что приводит к увеличению маневренности, функциональности и возможности использовать подводного мобильного робота с волновой передачей в инспекционных задачах.

Ключевые слова: автономное подводное средство передвижения, волновая передача, подводный мобильный робот.