

Projekt i wykonanie bezzałogowego pojazdu podwodnego o napędzie hybrydowym – REBA

Bartosz Łarzewski, Jakub Hałas, Daniel Powarżyński, Jarosław Lewandowski, Paweł Piskur
Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny

Streszczenie: W artykule przedstawiono projekt i realizację bezzałogowego pojazdu podwodnego o napędzie hybrydowym. Pojazd może być sterowany zdalnie w pozycji nawodnej, jak również posiada możliwość przemieszczenia podwodnego do wskazanego rejonu w celu przeprowadzenia rozpoznania oraz ataku poprzez detonację przenoszonego ładunku lub autodestrukcję. W artykule przedstawiono projekt i wykonanie konstrukcji mechanicznej, warstwy sprzętowej, programowej oraz wnioski wynikające ze wstępnych badań w basenie laboratoryjnym i w środowisku morskim.

Słowa kluczowe: bezzałogowy pojazd podwodny, pojazd bezzałogowy sterowany zdalnie, pół-autonomiczny pojazd podwodny, napęd biomimetyczny, napęd hybrydowy

1. Wprowadzenie

Bezzałogowe pojazdy podwodne stanowią ważny element ochrony i monitorowania podwodnej infrastruktury technicznej. Pojazdy takie mogą być również wykorzystane do inspekcji kadłubów jednostek pływających, obszarów przeznaczonych pod budowę morskich farm wiatrowych, wspierania specjalistycznych prac podwodnych oraz do prowadzenia i wspierania morskich akcji ratunkowych.

Aktualnie znanych jest wiele pojazdów o konstrukcji torpedopodobnej, a także kształtami przypominających żywe organizmy morskie [2–4]. W zależności od konstrukcji kadłuba, stosowane są napędy z jednym lub kilkoma pędnikami. Wśród pędników wyróżnia się konstrukcje przetwarzające ruch obrotowy lub oscylacyjny na siłę naporu [5].

Główne trendy rozwojowe bezzałogowych technologii morskich, takich jak bezzałogowe pojazdy nawodne i podwodne, przedstawiono w artykule [1]. Wśród trudności w projektowaniu pojazdów podwodnych należy wymienić ograniczenia środowiska wodnego w propagacji fal elektromagnetycznych, co eliminuje większość znanych z pojazdów lądowych lub statków powietrznych systemów pozycjonowania [6] lub komunikacji [7]. Z powodu trudności w autonomizacji pojazdów podwodnych szeroko stosowane są pojazdy zdalnie sterowane ROV (ang. *Remotely Operated Vehicle*). Pojazdy autonomiczne AUV (ang. *Autonomous Underwater Vehicle*) wykorzystują do nawigacji

i kontroli położenia przestrzennego systemu hydroakustyczne [8], logi [9], sonary [10], czujniki głębokości, systemy wizyjne [11] oraz czujniki inercyjne.

Prezentowany w artykule pojazd jest wyposażony w napęd hybrydowy, który łączy w sobie zalety pędników falowych i obrotowych. Pędniki obrotowe stanowią napęd główny pojazdu, natomiast napęd falowy wykonany jest z elastycznego tworzywa sztucznego w kształcie płetwy, co umożliwia dodatkowo regulację i utrzymanie głębokości zanurzenia. Pojazd został opracowany w ramach konkursu Ministra Obrony Narodowej, w którym szczególną uwagę zwrócono na wytrzymałość konstrukcji [20], zapewnienie wysokiej autonomiczności energetycznej oraz parametry eksploatacyjne. Istotnym parametrem jest również możliwość modyfikacji pojazdu podnoszącej jego autonomiczność i użyteczność.

Kolejne podrozdziały artykułu zawierają projekt pojazdu wraz ze schematem części sprzętowej i programowej, wyniki realizacji modelu fizycznego oraz zdjęcia z testów w basenie i w środowisku morskim.

2. Projekt pojazdu

Kadłub pojazdu składa się z korpusu oraz dwóch elementów zamykająco-uszczelniających. Główny element konstrukcyjny wykonany jest rury aluminiowej o średnicy 200 mm, długości 1000 mm oraz grubości ścianki równej 5 mm. Stosunek całkowitej długości do średnicy pojazdu wynosi 6:1. Takie rozwiązanie zapewnia minimalizację oporu hydrodynamicznego [12], sztywność konstrukcji, wodoszczelność, jak i odporność na uszkodzenia mechaniczne podzespołów elektronicznych umieszczonych wewnątrz. Metalowa konstrukcja chroni przed szkodliwymi czynnikami zewnętrznymi i wypromieniowuje ciepło podzespołów elektronicznych. Korpus pojazdu został zamknięty obustronnie denkami (Rys. 1).

Połączenie elementów realizowane jest poprzez dopasowanie kanałów uszczelnień metodą skrawania precyzyjnego elementów

Autor korespondujący:

Paweł Piskur, p.piskur@amw.gdynia.pl

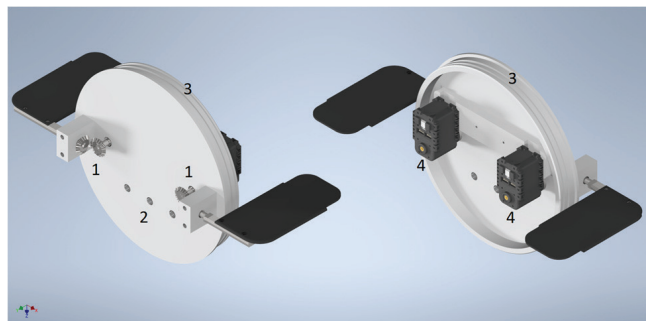
Artykuł recenzowany

nadesłany 16.10.2022 r., przyjęty do druku 08.11.2022 r.



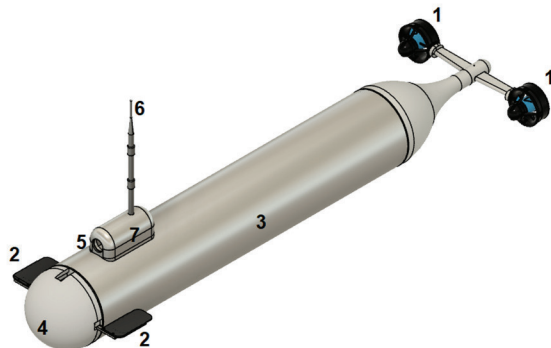
Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

wcisłowych. Uszczelnienie stanowią podwójne zespoły oparte na o-ringach. Denko przednie (Rys. 1) stanowi bazę montażową dla zespołu płetw (nr 2 na Rys. 2), czujników oraz pozostałych elementów elektronicznych (nr 2 na Rys. 1). Układ napędowy płetw przedstawiony jest na Rys. 1. W celu zapewnienia łatwego i szybkiego serwisu, większość podzespołów zainsta-



Rys. 1. Model denka przedniego: 1 – przeniesienie napędu płetw przednich, 2 – otwory na czujnik ciśnienia, odpowietznik i włącznik główny, 3 – kanały uszczelnień, 4 – serwomechanizmy Dynamixel AX 18A

Fig. 1. Model of the front cap: 1 – transmission of the side fin drive, 2 – holes for the pressure sensor, air vent and main power switch, 3 – sealing channels, 4 – Dynamixel AX 18A servos



Rys. 2. Model CAD bezzałogowego pojazdu podwodnego: 1 – pędniki główne, 2 – pędniki boczne, 3 – korpus główny, 4 – osłona denka przedniego, 5 – kamera, 6 – antena Wi-Fi, 7 – kiosk z modułem GPS
Fig. 2. Design of the unmanned underwater vehicle: 1 – main propellers, 2 – side propellers, 3 – the hull, 4 – front bottom cover, 5 – camera, 6 – Wi-Fi antenna, 7 – dome with GPS antenna

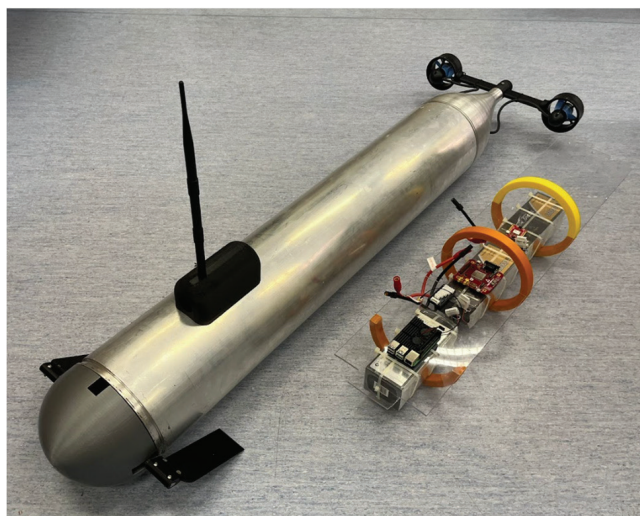
lowano w przedniej części pojazdu i zintegrowano z denkiem przednim. Wysunięcie korpusu pojazdu zapewnia łatwy dostęp do elementów wykonawczych i sterujących, zapewniając jednocześnie pełną funkcjonalność pojazdu w czasie dalszych modernizacji.

W tylnej części pojazdu zamontowano zespół napędu głównego wyposażony w dwa pędniki obrotowe (nr 1 na Rys. 2). Tylna oraz przednia część kadłuba zostały wyprofilowane w celu minimalizacji oporu hydrodynamicznego. Przednia część pojazdu dodatkowo osłania mechanizmy przeniesienia napędu płetw, czujnik głębokości, włącznik pojazdu oraz elektryczne złącza diagnostyczne.

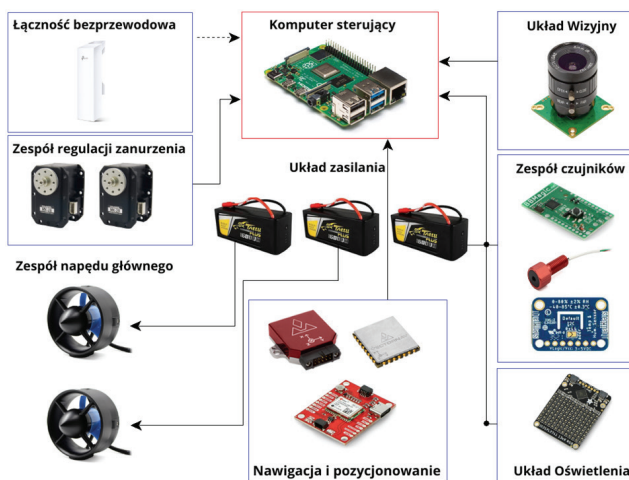
Zanurzenie pojazdu realizowane jest zmianą kąta natarcia płetw poprzez skierowanie generowanego przez płetwy wektora naporu, aby zmienić w ten sposób wypadkową siłę naporu generowaną przez układ napędowy. Zmiana kursu pojazdu realizowana jest przez zamianę naporu generowanego przez pędniki główne (tylne).

2.1. Warstwa sprzętowa i programowa

W celu zapewnienia zakładanego, 12-godzinnego ciągłego czasu pracy, zastosowano zespół trzech niezależnych od siebie akumulatorów o łącznej pojemności 48 Ah. Bazując na platformie



Rys. 3. Kadłub przed malowaniem oraz wyposażenie wewnętrzne pojazdu
Fig. 3. The hull before painting and the interior parts of the vehicle



Rys. 4. Schemat układu sensorów, zasilania i sterowania pojazdem
Fig. 4. Scheme of the sensors, power supply and control system of the vehicle

mie komputerowej Raspberry Pi model 4B opracowano układ wykonawczo-integracyjny oparty na systemie operacyjnym Linux. Aplikacja sterująca ma następujące funkcje:

- komunikacja w standardzie Wi-Fi ze stacją brzegową (operatorem) w celu transmisji rejestrowanych danych, np. obraz z kamery, parametry od czujników;
- ciągła rejestracja obrazu z kamery do pamięci układu wykonawczego;
- sterowanie trajektorią pojazdu zgodnie z instrukcjami wysłanymi w czasie rzeczywistym;
- powrót pojazdu do zadanego punktu w przypadku niepowodzenia misji;
- odczyt oraz rejestracja parametrów czujników, takich jak: IMU, kompas elektroniczny, czujnik głębokości, czujnik zasilania, czujnik temperatury, czujnik ciśnienia. Dokładne parametry w/w czujników i sensorów zamieszczono w Tabeli 2, schemat połączeń zaprezentowano na Rys. 4.

W Tabeli 1 przedstawiono główne parametry eksploatacyjne otrzymane podczas testów i pomiarów. Zasięg transmisji nawodnej zależy od mocy naziemnej stacji Wi-Fi. Zastosowana w pojeździe antena ma możliwość ręcznej zmiany położenia z pionowego na poziomy, a także może być zamocowana na

Tab. 1. Parametrami technicznymi pojazdu

Tab. 1. Technical parameters

Nazwa	REBA
Wymiary	1500 × 200 × 220 mm
Masa	35 kg
Prędkość maksymalna	2,5 m/s
Tryby pracy	zdalny, półautonomiczny
Ciągły czas pracy na jednym ładowaniu	12 h
Maksymalny zasięg transmisji nawodnej	120 m
Zanurzenie	do 15 m
Masa przenoszenia ładunku	do 15 kg
Komputer sterujący	Raspberry PI 4B
Zasilanie	GENS ACE Akumulator LiPo Tattu 16 000 mAh 22,2 V 30C
Napęd tył	Thrusters T200 (2 szt.)
Napęd przód	Dynamixel AX-18 A (2 szt.)

Tab. 2. Zastosowane sensory i ich parametry

Tab. 2. Used sensors and their parameters

Podzespół	Nazwa	Parametry
Czujnik orientacji	VectorNAV VN100T	3-osiowy, zakres żyroskopu $\pm 2000^\circ/\text{s}$, częstotliwość 800 Hz, napięcie 5 V, moc 220 mW
Moduł GPS	NEO-M9N	92-kanalowy odbiornik GNSS, dokładność 1,5 m, max. częstotliwość aktualizacji: 25 Hz (4 jednoczesne GNSS), dokładność prędkości: 0,05 m/s
Czujnik ciśnienia	BlueRobotics BAR30 I2C	napięcie 3,3 V, zanurzenie do 300 m
Czujnik temperatury	SHT31	zakres pomiarowy: od -40°C do 125°C , dokładność: $\pm 0,3^\circ\text{C}$
Czujnik zalania	BlueRobotics Leak Sensor	zasilanie 5 V, pobór prądu 20 mA
Kamera	Kamera IMX477 12,3MPx HQ	sensor: IMX477, rozdzielczość: 4056 px × 3040 px, 12,3 MPx wymiary piksela: 1,55 μm × 1,55 μm , przysłona: F 1,4
Obiektyw	6mm CS-Mount	format: 1/2,3", ogniskowa: 6 mm, przysłona: F 1,4, kąt widzenia: 65° montaż: CS-Mount, tylna ogniskowa: 12,5 mm
Moduł sterujący	Basic ESC	napięcie pędnika 7–26 V, pobór prądu pędnika do 30 A, napięcie PWM 5 V
Łączność	Tp-Link TL-CPE210	procesor: Procesor Qualcomm Atheros 560 MHz, MIPS 74Kc, pamięć: 64 MB DDR2 RAM, 8 MB Flash, moc transmisji: 27 dBm/500 mW
Moduł oświetlenia	Matryca LED RGB 5 × 5 I ² C	napięcie 5 V

plywaku i połączona z pojazdem elastycznym przewodem. Takie rozwiązanie stosowane było m.in. w pojeździe przedstawionym w artykule [13]. Zasadniczym trybem pracy pojazdu jest autonomiczna realizacja misji zaplanowanej przez operatora poprzez wyznaczenie i wskazanie współrzędnych przebytej trasy na mapie. Do planowania misji i kontroli pojazdu służy stacja operatora z wdrożoną dedykowaną aplikacją. W położeniu nawodnym operator może w pełnym stopniu kontrolować pojazd z poziomu systemu operacyjnego poprzez połączenie Wi-Fi.

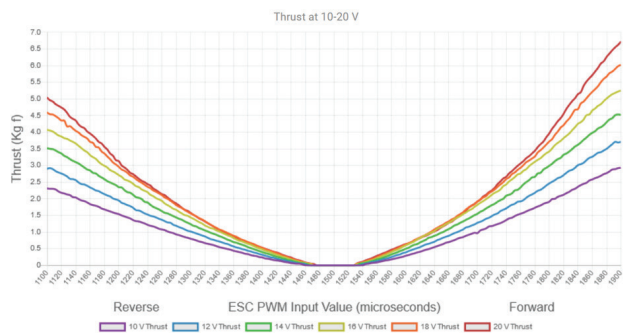
Masa przenoszonego ładunku została wyznaczona na podstawie dodatkowej masy dodanej do wnętrza pojazdu w celu zapewnienia zakładanej (lekko dodatkowej) pływerności, zależnej od parametrów środowiskowych (gęstości wody).

2.2. Układ wykonawczy

Część programistyczna została zaimplementowana, poprzez wykorzystanie środowiska programistycznego Python oraz dostępnych bibliotek [17–20]. Platforma sprzętowa umożliwia integrację przez oprogramowanie sterowania pojazdu z czuj-

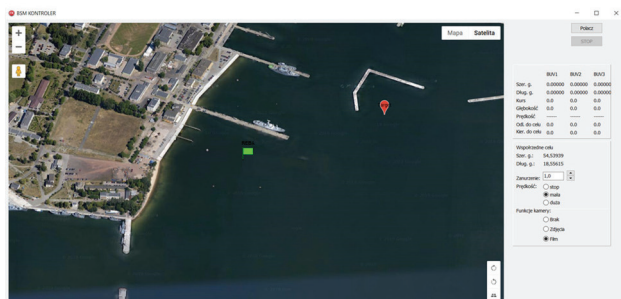
nikami oraz systemem wizyjnym. Funkcje komputera nadzrędnego pełni jednopłytkowy minikomputer Raspberry PI 4B bazujący na układzie Broadcom BCM 2711 z 64-bitowym procesorem quad-core 64 ARM-8 Cortex-A72 o taktowaniu 1,5 GHz. Do realizacji zagadnień dotyczących sekcji programowej wykorzystano język programowania Python, umożliwiając zarówno programowanie obiektowe, strukturalne jak i funkcyjne. Wielowątkowość umożliwia zaimplementowanie dwóch głównych trybów pracy pojazdu. Pierwszy z nich umożliwia sterowanie pojazdem w pozycji nawodnej za pomocą kontrolera: program odczytuje dane z urządzenia sterującego, a następnie za pomocą specjalnej depezy wysyła impuls sterujący do pędników, których charakterystyka w funkcji prędkości obrotowej i napięcia zasilania została przedstawiona na Rys. 5.

Pojazd może pracować w dwóch podstawowych trybach, zdalnym oraz półautonomicznym. W trybie zdalnym operator posiada pełną kontrolę nad sterowanym pojazdem za pomocą dedykowanego kontrolera, ponadto może dostosować prędkość do aktualnych warunków atmosferycznych czy rodzaju misji.



Rys. 5 Charakterystyki pędników T200 w funkcji prędkości obrotowej i napięcia zasilania [16]

Fig. 5. T200 Thruster Performance [16]



Rys. 6. Planowanie misji podwodnej

Fig. 6. Planning of an underwater mission

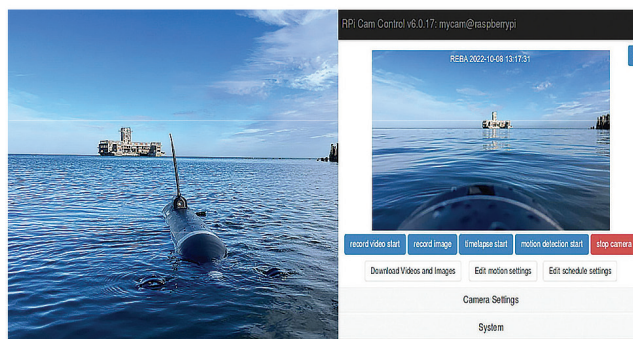
Podgląd obrazu z kamery realizowany jest w czasie rzeczywistym. Operator odbiera na bieżąco depesze sensoryczne, informujące o temperaturze, ciśnieniu, współrzędnych geograficznych, położeniu przestrzennym, składowych prędkości oraz zużyciu energetycznym.

Wielowłatkowość umożliwiła integrację systemów wykonawczych i sterujących, co pozwoliło na wdrożenie trybu pół-autonomicznego, odpowiedzialnego za realizację misji podwodnej. Operator wyznaczając punkty przejścia, programuje trasę, głębokość oraz prędkość pojazdu, następnie definiuje interwał dokładności – czyli czas, w jakim pojazd będzie się wynurzał – w celu odczytania danych położenia i skorygowania toru przejścia. W tym trybie programowane jest również działanie kamery, która może rejestrować obraz w trybie ciągłym lub w sposób zdefiniowany, np. tylko przy wynurzeniu lub na danej głębokości. Po osiągnięciu zadanego punktu realizowany jest dalszy cel misji, np. rozpoznanie poprzez rejestrację wideo czy samodestrukcję.

Układ wykonawczy oraz sensory zasilane są niezależnie jednym z trzech zamontowanych na pojeździe akumulatorów. Pojemność bazowa wynosi 16 Ah, akumulator jest odseparowany od zasilania układów sterujących (Rys. 4). W przypadku awarii układu sterowania takie rozwiązanie pozwala na utrzymanie wymiany informacji pojazdu ze stacją bazową, ponadto pojazd ma możliwość zbierania danych sensorycznych oraz ciągłej rejestracji obrazu z kamery, nawet do 35 godzin (uzależnione od pojemności przestrzeni dyskowej komputera wykonawczego). Pozostałe dwa akumulatory bezpośrednio zasilają pędniki oraz serwomechanizmy płetw.

2.3. System wizyjny

System wizyjny realizowany jest za pomocą kamery ArduCam OV5647 z sensorem OV5647 umieszczonej wewnątrz szczelnego kiosku. Kamera wyposażona jest w system motorycznego ustawiania powiększenia i ostrości, co poprawia jakość pracy podczas przemieszczania się pojazdu. Urządzenie



Rys. 7. Podgląd obrazu wizyjnego podczas realizacji zadań nawodnych

Fig. 7. Preview of the image during the execution of tasks on the water surface

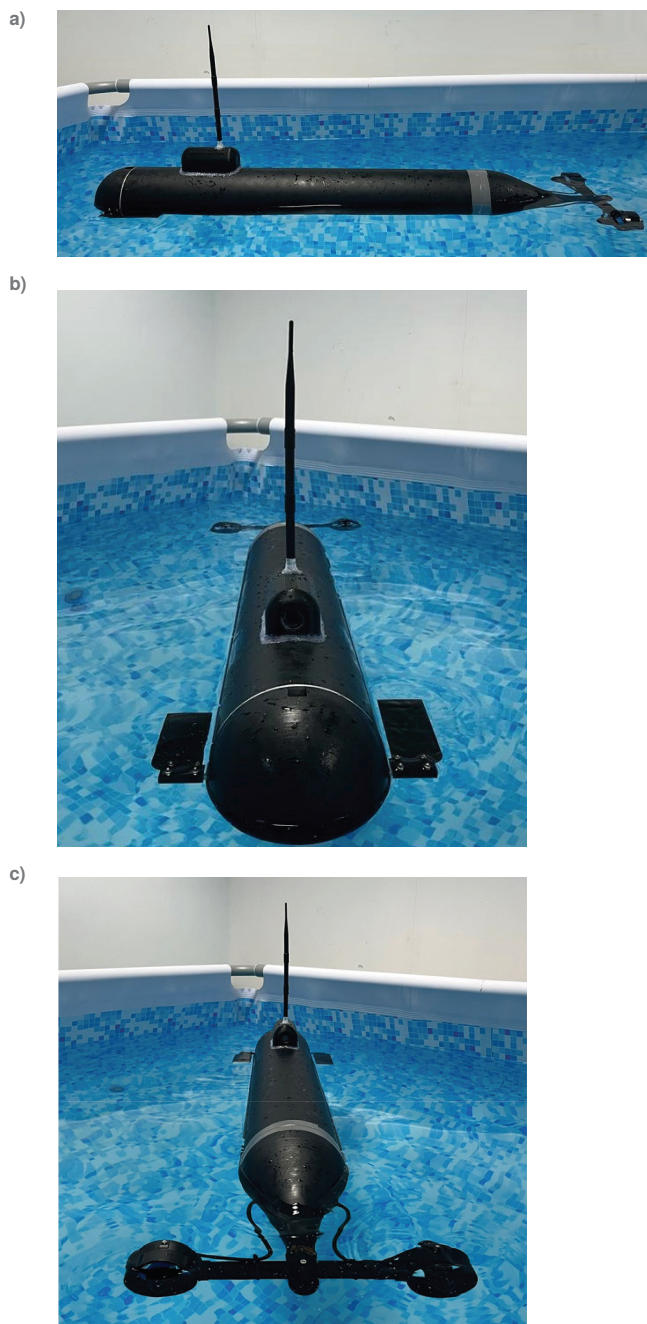
wyposażone jest w matrycę o rozdzielczości 5 Mpx oraz wspiera tryb 1080 px/30 fps. Dodatkowo moduł kamery został wyposażony w obiektyw LS-2718 CS mount o parametrach: ogniskowej 4 mm oraz kącie widzenia równym 93°. Ponadto przesłona 1,4 z formatem 1/2,5” pozwala na nagrywanie całego obszaru roboczego znajdującego się przed pojazdem. Zastosowanie wymienionej przesłony generuje obraz dobrej jakości, zarówno w pełnym słońcu, jak i o zmroku [14]. Taki zestaw łączy się z platformą sprzętową za pomocą dedykowanej taśmy FFC/FPC. Za realizację podglądu w czasie rzeczywistym (Rys. 7) odpowiada serwer sieciowy RPI-Cam-Web. Interfejs użytkownika umożliwia kontrolę ustawienia kamery za pomocą skryptu przeglądarkowego. Interfejs wykorzystywany jest do podglądu obrazu w czasie rzeczywistym oraz współpracuje z dystrybucją systemów Linux, dzięki czemu jest możliwość elastycznego dopasowania możliwości jego programowania. W zależności od panujących warunków, pory dnia, operator ma możliwość definiowania jasności, kontrastu oraz nasycenia obrazu.

3. Model fizyczny bezzałogowego pojazdu podwodnego

Na Rys. 8 przedstawiono zdjęcia modelu fizycznego pojazdu wykonane w basenie laboratoryjnym, kolejno od lewej burty (a), od dziobu (b) oraz od rufy (c). Konstrukcja przedniej kopuły zapewnia opływowy kształt pojazdu i jednocześnie zabezpiecza mechanizm płetw. Kopuła, kioski oraz stelaż tylnego napędu zostały wykonane z polilaktidu z wykorzystaniem metody druku 3D o zwiększonych parametrach wytrzymałościowych z przeznaczeniem dla środowiska morskiego. Zespolecie kiosku oraz anteny zostało zrealizowane metodą precyzyjnego dopasowania i wykończenia oraz za pomocą warstwy neutralnego silikonu i kleju termicznie aktywowanego. Oświetlenie i kamera systemu wizyjnego zostały zespolone z kioskiem wyłącznie klejem aktywowanym termicznie.

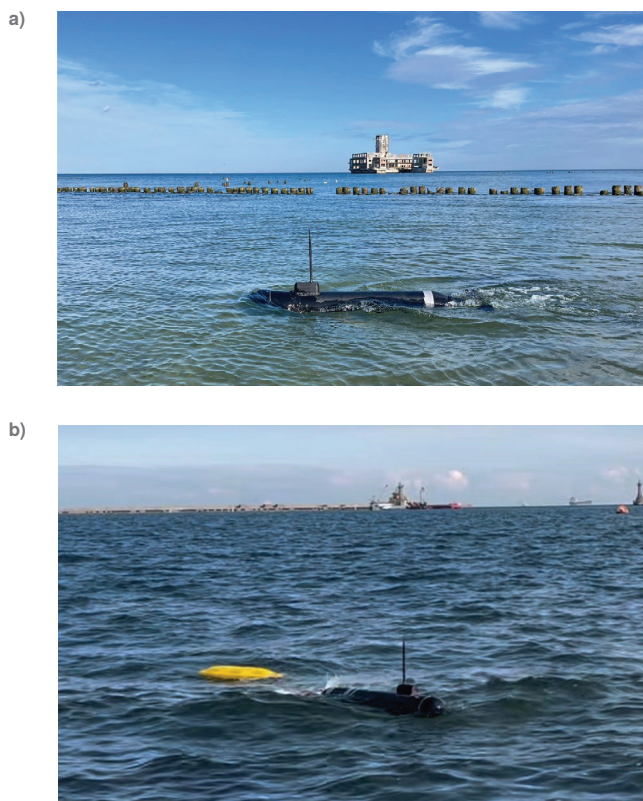
4. Wyniki wstępnych testów

Testy w środowisku morskim pozwoliły na weryfikację szczelności kadłuba, zakładanej (lekko dodatniej) pływalności oraz stabilności położenia pojazdu. Ponadto umożliwiły sprawdzenie pojazdu w rzeczywistych, niekorzystnych warunkach przy falowaniu do stanu morza 5 stopni skali Beauforta (Rys. 9b). Przeprowadzone testy pozwoliły zweryfikować długotrwałość autonomiczności energetycznej pojazdu oraz podstawowe parametry eksploatacyjne, w tym prędkość przemieszczania



Rys. 8. Zdjęcia modelu fizycznego pojazdu w basenie, widok od: a) lewej burty, b) części czołowej, c) rufy
Fig. 8. Images of the physical model of the vehicle in the pool, the view from: a) the left stern, b) the frontal part, c) the stern

się dla zadanych parametrów sterujących zespołu napędowego. Prędkość przemieszczania z maksymalną prędkością wynosi 2,5 m/s, przy zakładanych parametrach żywotność pracy pojazdu na jednym ładowaniu wynoszącym 12 godzin. Dzięki regulowanej mocy oraz zastosowaniu szerokiego rozstawu pędników otrzymano manewrowość pojazdu, którego promień skrętu jest mniejszy niż jeden metr, zapewnia to możliwość szybkiej i precyzyjnej zmiany położenia. Łączność bezprzewodowa w położeniu nawodnym pozwala na sterowanie pojazdem w czasie rzeczywistym, rejestrację obrazu wizyjnego oraz zbieranie danych sensorycznych na dystansie do 120 m. Realizacja misji autonomicznej pozwala na zanurzenie pojazdu do 15 m. W celu niwelacji błędów położenia pojazd powinien wynurzyć się w interwale 100 m w celu rekalkulacji pozycji względem GPS.



Rys. 9 Testy w środowisku morskim w zróżnicowanych warunkach pogodowych, a) stan morza 1-2 w skali Beauforta b) stan morza 4-5 w skali Beauforta

Fig. 9. Tests in the marine environment under various weather conditions, a) sea state 1-2 on the Beaufort scale b) sea state 4-5 on the Beaufort scale

5. Podsumowanie i kierunki dalszych badań

Opracowana konstrukcja modułowa umożliwi implementację i testy różnych algorytmów sterowania. Dalsze prace będą prowadzone w szczególności nad zwiększeniem autonomii pojazdu oraz wdrożeniem innowacyjnych algorytmów sterowania napędów hybrydowych. Opracowana konstrukcja umożliwia testowanie zarówno różnych napędów biomimetycznych w celu oceny zakładanych parametrów technicznych i eksploatacyjnych, jak również zaawansowanych algorytmów sterowania o zmiennej modulacji i częstotliwości pracy pędników. Ponadto pojazd może służyć do skrytego rozpoznania wskazanego akwenu, infrastruktury portowej oraz przesyłowej okrętów, a nawet portów. Pojazd może zostać zwodowany w sposób skryty, a następnie zrealizować misję polegającą na dopłynięciu do wskazanego rejonu, zarejestrowaniu obrazu i powrocie we wskazane miejsce w celu przekazania danych lub podłożenia ładunków wybuchowych we wskazane miejsce infrastruktury krytycznej.

Konstrukcja ma potencjał rozwoju w zastosowaniu cywilnym – w inspekcji kadłubów jednostek pływających, rurociągów, obszarów przeznaczonych pod budowę farm wiatrowych, wspierania specjalistycznych prac podwodnych oraz morskich akcji ratunkowych.

Dalsze działania badawcze ukierunkowane będą na zwiększenie możliwości operacyjnych pojazdu przez programową implementację algorytmów sztucznej inteligencji, które z wykorzystaniem specjalistycznych sensorów umożliwią zarejestrowanie, a następnie identyfikację i klasyfikację wybranych obiektów podwodnych, m.in. min, wraki okrętów lub instalacji gazociągowych.

Kolejnym, równie istotnym kierunkiem badań, jest implementacja algorytmów unikania przeszkód oraz zapewnienie zakładanego stopnia autonomii. Zmniejszy to zagrożenie utraty pojazdu, spowodowane kolizją z niewykrytymi elementami znajdującymi się w akwenie wodnym.

Bibliografia

- Olejnik A., *Tendencje rozwojowe bezzałogowej techniki morskiej*. „Polish Hyperbaric Research”, Vol. 55, No. 2, 2016, 7–28, DOI: 10.1515/phr-2016-0008.
- Panda J.P., Mitra A., Warrior H.V., *A review on the hydrodynamic characteristics of autonomous underwater vehicles*. “Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment”, Vol. 235, No. 1, 2021, 15–29, DOI: 10.1177/1475090220936896.
- Malec M., Morawski M., Zajac J., *Fish-like swimming prototype of mobile underwater robot*. “Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems”, Vol. 4, No. 3, 2010, 25–30.
- Szymak P., Praczyk T., Naus K., Szturomski B., Malec M., Morawski M., *Research on biomimetic underwater vehicles for underwater ISR*. “Ground/Air Multisensor Interoperability, Integration, and Networking for Persistent ISR VII”, SPIE, Vol. 98310L, 126–139, DOI: 10.1117/12.2225587.
- Piskur P., Szymak P., Sznajder J., *Identification in a laboratory tunnel to control fluid velocity*. [In:] *Advanced, Contemporary Control*, 2020, 1543–1552, Springer, Cham, DOI: 10.1007/978-3-030-50936-1_128.
- Felski A., Jaskólski K., Zwolak K., Piskur P., *Analysis of Satellite Compass Error’s Spectrum*. “Sensors”, Vol. 20, No. 15, 2020, DOI: 10.3390/s20154067.
- Jaskólski K., Marchel Ł., Felski A., Jaskólski M., Specht M., *Automatic Identification System (AIS) Dynamic Data Integrity Monitoring and Trajectory Tracking Based on the Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Process Model*. “Sensors”, Vol. 21, No. 24, 2021, DOI: 10.3390/s21248430.
- Piskur P., Gąsiorowski M., *Digital Signal Processing for Hydroacoustic System in Biomimetic Underwater Vehicle*. “NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo”, Vol. 67, No. 1, 2020, 14–18, DOI: 10.17818/NM/2020/1.3.
- Cohen N., Klein I., *BeamsNet: A data-driven approach enhancing Doppler velocity log measurements for autonomous underwater vehicle navigation*. “Engineering Applications of Artificial Intelligence”, Vol. 114, 2022, DOI: 10.1016/j.engappai.2022.105216.
- Jebelli A., Chaoui H., Mahabadi A., Dhillon B., *Tracking and mapping system for an underwater vehicle in real position using sonar system*. “International Journal of Robotics and Automation”, Vol. 37, No. 1, 2022.
- Žak B., Hożyń S., *A Concept for Application of a Stereo Vision Method in Control System of an Underwater Vehicle*. [In:] *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 817, 2016, 73–80, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.817.73.
- Divsalar K., *Improving the hydrodynamic performance of the SUBOFF bare hull model: a CFD approach*. “Acta Mechanica Sinica”, Vol. 36, No. 1, 2020, 44–56, DOI: 10.1007/s10409-019-00913-7.
- Szymak P., Praczyk T., Pietrukaniec L., Hożyń S., *Laboratory stand for research on mini CyberSeal*. “Measurement Automation Monitoring”, Vol. 63, No. 7, 2017, 228–233.
- Powarzyński D., *Mobile Wheeled Robot to Support the Task of the Alarm Sub – Unit*, “Scientific Journal of Polish Naval Academy”, Vol. 223, No. 4, 2020, 53–66, DOI: 10.2478/sjpn-2020-0015.
- Kiciński R., Szturomski B., *Pressure Wave Caused by Trinitrotoluene (TNT) Underwater Explosion—Short Review*. “Applied Sciences”, Vol. 10, No. 10, 2020, DOI: 10.3390/app10103433.

Inne źródła

- BlueRobotics, *T200 Thruster*, <https://bluerobotics.com/store/thrusters/t100-t200-thrusters/t200-thruster-r2-rp/>
- Python, *multiprocessing — Process-based parallelism*, <https://docs.python.org/3/library/multiprocessing.html>
- <https://github.com/bluerobotics/ms5837-python>
- <https://pypi.org/project/pyax12/>
- <https://docs.python.org/3/library/socket.html>

Design and Implementation of an Unmanned Underwater Vehicle with Hybrid Drive – REBA

Abstract: The article presents the design and implementation of an unmanned underwater vehicle with hybrid propulsion system. The vehicle can be controlled remotely as well as it has the ability to reach the indicated area in order to carry out reconnaissance and attack by detonating the carried load or self-destructing. The article presents both the hardware and software layers as well as the results of preliminary tests.

Keywords: Unmanned Underwater Vehicle (UUV), Remote Operating Vehicle (ROV), semi-autonomous underwater vehicle, biomimetic propulsion system, hybrid drive

Bartosz Łarzewski

b.larzewski1999@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4554-2546

Student Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, kierunek Automatyka i Robotyka. Główne obszary zainteresowań to symulacje urządzeń automatyki i robotyki z wykorzystaniem pakietu MATLAB / Simulink / Simscape, tworzenie algorytmów omijania przeszkód za pomocą echosondy oraz projektowanie, budowa oraz programowanie autonomicznych pojazdów podwodnych.

**kmdr ppor. dr inż. Paweł Piskur**

p.piskur@amw.gdynia.pl
ORCID: 0000-0002-8823-4316

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie Wydział Mechatroniki, kierunek osprzęt samolotów i śmigłowców (2004 r.). Przez 13 lat służył w Bazie Lotnictwa Marynarki Wojennej. W 2010 r. w Politechnice Koszalińskiej uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dziedzinie mechanika i budowa maszyn. Od 2017 r. pracuje w Akademii Marynarki Wojennej. Jego obszar badawczy jest ściśle związany z podwodnymi pojazdami bezzałogowymi, a zwłaszcza biomimetycznymi układami napędowymi.

**Jakub Hałas**

halas.jakub@icloud.com
ORCID: 0000-0001-9031-1504

Student Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni Wydział Mechaniczno-Elektryczny, kierunek Automatyka i Robotyka. Doświadczenie w departamentach automatyki i robotyki przemysłowej, inżynierii produktu oraz urządzeń medycznych. Doświadczenie w projektowaniu i rozwoju zrobotyzowanych systemów oraz autonomicznych pojazdów podwodnych.

**ppor. mgr inż. Daniel Powarzyński**

danielpow@interia.pl
ORCID: 0000-0003-2131-1660

Absolwent Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni Wydział Mechaniczno-Elektryczny, kierunek informatyka, mechatronika (2022 r.). Obecnie służy w 13dTR wykonując zadania informatyczne na okręcie MW. Od 2019 r. ściśle związany z projektowaniem i programowaniem robotów mobilnych ze specjalizacją bezzałogowych pojazdów podwodnych. Realizuje badania w obszarze algorytmów sterowania dla napędów biomimetycznych oraz hybrydowych.

**ppor. mgr inż. Jarosław Lewandowski**

jlewandowski1102@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3513-62454

Absolwent Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, kierunek informatyka, mechatronika (2022 r.). Obecnie pełni służbę Dowódcy Działu na okręcie MW w Dywizjonie Okrętów Bojowych. Od 2012 roku interesuje się programowaniem, a od 2019 roku szczególnie projektami powiązаныmi z projektowaniem oraz programowaniem robotów mobilnych oraz mechanizmów sztucznej inteligencji. Realizuje badania w obszarach algorytmów wykorzystujących sieci neuronowe do autonomicznego sterowania pojazdami, jak i przewidywania zjawisk lub wykrywania anomalii.

