

Projekt i wykonanie bezzałogowego statku powietrznego (BSP) typu oktokoptyr do akwizycji danych ze środowiska podwodnego sonarem Ping 360

Jakub Tkaczyk, Maciej Tyszecki, Jacek Jabłoński, Paweł Piskur

Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, Katedra Automatyki Okrętowej, ul. Śmidowicza 69, 81-127 Gdynia

Streszczenie: W artykule omówiono projekt, budowę oraz testy bezzałogowego statku powietrznego (BSP) przeznaczonego do zastosowań morskich. Konstrukcja BSP obejmuje specjalnie opracowane pływaki, umożliwiające unoszenie się na powierzchni wody. BSP został zaprojektowany do pozyskiwania danych w toni wodnej za pomocą sonaru Ping360. Sterowanie odbywa się za pomocą dedykowanego kontrolera zdalnego, a alternatywnie BSP może realizować autonomiczne misje według zaprogramowanego scenariusza. Dane sonarowe są przesyłane w czasie rzeczywistym do operatora przy stacji naziemnej, co umożliwia ich bieżącą analizę. W artykule szczegółowo omówiono kolejne etapy projektowania i budowy, w tym konstrukcję ramy i pływaków, architekturę systemu oraz warstwę elektroniczną i sprzętową. W końcowej części zaprezentowano wyniki analizy parametrów lotu, uzyskane zarówno podczas testów nad lądem, jak i w warunkach morskich.

Słowa kluczowe: bezzałogowy statek powietrzny (BSP), lądowanie na wodzie, bezzałogowy system morski (BSM), sonar, systemy autonomiczne, sterowanie zdalne, transmisja danych, pływaki

1. Wprowadzenie

Bezzałogowe systemy, w szczególności statki powietrzne, stały się jednym z najczęściej wykorzystywanych narzędzi w zastosowaniach cywilnych jak i wojskowych, w każdej dziedzinie, rozpoczynając od komercyjnego wykonywania zdjęć i ujęć życia codziennego po dedykowane zastosowania bojowe oraz rozpoznawcze [1, 2]. Szczególnym przypadkiem jest sytuacja panująca na Bliskim Wschodzie [3] oraz za granicą naszego kraju, gdzie inżynierowie, konstruktorzy i operatorzy wykazali znaczenie oraz sens wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych (BSP). Ich zastosowanie powinno sprowadzać się do możliwie największej redukcji kosztów, przy jednoczesnym zachowaniu łatwości obsługi oraz wszechstronności operacyjnej [4]. Integracja z nowoczesnymi systemami analizy danych i sztucznej inteligencji otwiera także perspektywy dla rozwoju zaawansowanych metod autonomicznej nawigacji oraz adaptacyjnego zarządzania zasobami energetycznymi w misjach długotrwałych [5]. Rozwój w kierunku wykonywania bezzało-

gowych misji jest postępujący i codziennie pojawiają się nowe rozwiązania oraz pomysły – w tym projekt pojazdu przedstawionego w artykule.

Prezentowany projekt został opracowany w ramach konkursu Ministra Obrony Narodowej na realizację projektu Bezzałogowego Systemu Powietrznego, Bezzałogowego Systemu Lądowego lub Bezzałogowego Systemu Morskiego do zastosowań związanych z obronnością i bezpieczeństwem państwa. Projekt uzyskał finansowanie, a następnie II miejsce w kategorii rozpoznawczej bezzałogowych systemów morskich, nagrodę specjalną oraz dwa wyróżnienia na tle pozostałych pojazdów prezentowanych w konkursie [18]. Właścicielem praw autorskich jest Ministerstwo Obrony Narodowej. Pojazd może lądować na wodzie, działać w portach i na morzu, monitorować dno oraz przysyłać dane sonarowe i telemetrię w czasie rzeczywistym. System jest przystosowany do pracy w różnych warunkach środowiskowych, wspierając działania z zakresu obronności i bezpieczeństwa morskiego.

2. Projekt i budowa BSP

Proces projektowania i budowy konstrukcji BSP wymaga interdyscyplinarnego podejścia obejmującego zagadnienia takie jak inżynieria lotnicza, elektronika, automatyka oraz informatyka [6]. Celem projektu było opracowanie bezzałogowego pojazdu zdolnego do szybkiego przemieszczania się w powietrzu oraz stabilnego dryfu na wodzie w celu zrealizowania pomiarów i skanowania dna morskiego za pomocą sonaru mechanicznego [7]. Bazując na wymaganiach co najmniej 25-minutowego lotu

Autor korespondujący:

Jakub Tkaczyk, kuba.tkaczyk@gmail.com

Artykuł recenzowany

nadesłany 15.03.2025 r., przyjęty do druku 13.06.2025 r..



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

oraz średniego poboru energii, wyznaczono pojemność baterii i maksymalną masę pojazdu wynoszącą 10,5 kg. Ze względu na potrzebę zachowania niskiej masy wybrane materiały konstrukcyjne spełniają kryteria uwzględniające lekkość, wytrzymałość oraz jednocześnie sztywność. Zaprojektowanie kadłuba BSP pk. „SHAD”, wymagało głębokiej analizy kształtu pod



Rys. 1. Model 3D Bezzałogowego Statku Powietrznego do zadań morskich „SHAD”
Fig. 1. The 3D model of Unmanned Aerial Vehicle for maritime purposes “SHAD”

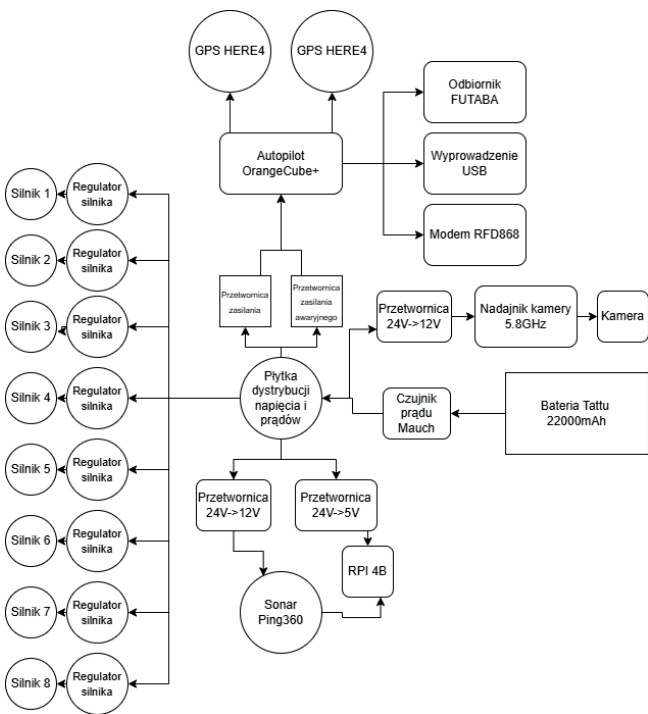
kątem minimalizacji oporów powietrza i zwiększenia stabilności podczas lotu. Projekt 3D widoczny jest na rys. 1.

Optymalizacja układu napędowego pozwoliła na uzyskanie wymaganej siły ciągu zespołu napędowego, wysokiej efektywności energetycznej oraz odpowiedniej redundancji sterowania, zwiększając niezawodność pojazdu. BSP przeznaczony jest do pracy w środowisku wodnym, zatem ważne było również zaprojektowanie ramy pod kątem maksymalnej szczelności i odporności na korozję. Dedykowane płytki dobierane były pod kątem siły wyporu przypadającej na wielkość i masę materiału. Założeniem była modułowa konstrukcja, umożliwiająca łatwą rozbudowę i modyfikację pojazdu. Modułowa komora akumulatora umożliwia szybkie wymiany źródła zasilania bez konieczności ingerowania w elementy konstrukcyjne, co znacznie minimalizuje długość przerwania pracy w przypadku wyczerpania jednego źródła zasilania.

2.1. Architektura systemu

Architektura systemu, przedstawiona na rys. 2, jest efektem połączeń licznych bloków zastosowanych w BSP. System zasilany jest pojedynczym akumulatorem litowo-polimerowym (Li-Po) o nominalnym napięciu 22,2 V, który dostarcza energię do wszystkich komponentów za pośrednictwem konwerterów napięcia. Komponenty komunikują się ze sobą za pomocą kontrolera lotu OrangeCube+ [9]. Kontroler lotu przekazuje i wymienia informację między sensorami oraz odbiornikami sygnałów za pomocą połączeń kablowych i komunikacji szeregowej.

Wbudowane sensory, zintegrowane z autopilotem oraz odbiornikami GPS, obejmują łącznie: pięć akcelerometrów, pięć żyroskopów, cztery barometry oraz trzy magnetometry. Wszystkie dane są na bieżąco przetwarzane przez system autopilota, który na podstawie obliczonej średniej wartości dokonuje korekt związanych ze stabilizacją lotu, ruchem oraz sterowaniem. Operacje polegające na uśrednianiu sygnałów pomiarowych przyczyniają się do zwiększenia precyzji i dokładności wyników. W wybranych trybach lotu system ten jest zdolny do podejmowania samodzielnych decyzji. System wyposażono w dwa odbiorniki GPS z wbudowanymi sensorami, odbiornik fal radiowych oraz odbiornik aparatury zdalnego sterowania. Dodatkowo w układzie zamontowany jest mikrokomputer Raspberry Pi 4B, odpowiedzialny za zarządzanie sonarem, akwizycję danych oraz bez-



Rys. 2. Architektura systemu BSP „SHAD”
Fig. 2. System Architecture UAV “SHAD”

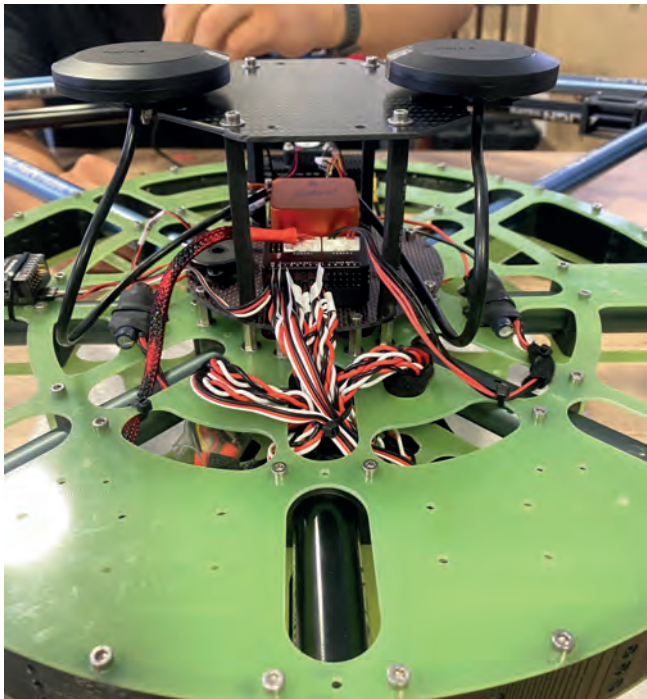
przewodowe przesyłanie informacji do operatora. Zintegrowany system komputerowy umożliwia rozpoczęcie rejestracji danych, natomiast moduł łączności Wi-Fi zapewnia zdalny dostęp i kontrolę nad wykonywanymi zadaniami. System programowania misji autonomicznych wykorzystuje środowisko Mission Planner, które stanowi panel operatorski służący do zarządzania wszystkimi funkcjami pojazdu. Środowisko to umożliwia prezentację i zarządzanie danymi związanymi z telemetrią, przebiegiem misji oraz funkcjonowaniem pojazdu. Ponadto pozwala na integrację z autopilotem BSP, zapewniając pełną kontrolę oraz bieżący monitoring danych [9].

2.2. Komponenty układu wykonawczego

Projekt BSP opiera się na urządzeniach kompatybilnych z rodziną ArduPilot. Kontroler OrangeCube+ wybrano ze

Tabela 1: Specyfikacja techniczna BSP
Table 1. Technical specification of BSP

Parametr	Wartość
Masa	10,5 kg
Długość lotu	25 minut
Maks. stan morza	2–3
Rodzaj nawigacji	GPS, GLONASS, Galileo
Liczba barometrów	4
Liczba magnetometrów	3
Liczba żyroskopów	5
Liczba akcelerometrów	5
Ładowność	1–2 kg
Zasięg komunikacji	3000 m
Zasięg kontrolera	1000 m



Rys. 3. Widok na kontroler lotu oraz odbiorniki GPS
Fig. 3. View of the flight controller and GPS receivers

względem na wydajność i moc obliczeniową, niezbędną do realizacji misji wymagających jednoczesnej obsługi wielu urządzeń. W jego skład wchodzi trzy niezależne jednostki IMU, z których każda zawiera wbudowany magnetometr AK09916, akcelerometr wraz z żyroskopem model ICM20649 oraz dwa barometry MS5611, które służą do określania kursu, położenia i wysokości. Dwa odbiorniki GPS zawierają dodatkowe sensory: dwa akcelerometry zintegrowane z żyroskopem w module

ICM42688, dwa dodatkowe moduły barometru MS5611 oraz dwa czujniki pola magnetycznego RM3100. System autopilota analizuje średnie wartości ze wszystkich dostępnych sensorów, obsługuje każdą jednostkę pomiarową i oblicza wartości uśrednione na podstawie zebranych danych. Podwojenie modułów GPS (rys. 3) zwiększa dokładność określania pozycji i zapewnia redundancję dzięki rozszerzonej liczbie źródeł danych. System obsługuje wiele standardów nawigacji satelitarnej, w tym GNSS, Galileo oraz GLONASS, a także umożliwia pozycjonowanie z dokładnością do kilku centymetrów dzięki wykorzystaniu technologii RTK.

Bezzałogowy statek powietrzny o masie 10,5 kg wymaga odpowiedniego bilansu energetycznego, który zapewni wymagany czas lotu wynoszący 20–25 minut. Szczegółowa specyfikacja techniczna pojazdu znajduje się w tabeli 1. Każdy z ośmiu silników musi udźwignąć około 1,45 kg przy 50 % mocy [10]. W układzie napędu zastosowano jednostki MAD 5008 IPE V3. Charakteryzują się parametrem 340 KV, gdzie KV to jednostka określająca stałą prędkościową silnika, która wskazuje liczbę obrotów na minutę (RPM) przypadającą na każdy wolt napięcia zasilania przy pracy bez obciążenia. Taki dobór pozwala na efektywne wykorzystanie napięcia z źródła zasilania [11]. Analiza potrzebnej mocy oraz pojemności baterii doprowadziła do wyboru akumulatora GensAce Tattu o pojemności 22 000 mAh. Są to baterie o współczynniku 30C, zapewniają odpowiednią moc dla systemów 6S z napięciem 22,2 V (3,7 V na ogniwo), gwarantując zapas energii niezbędny do wykonania misji. Baterię można bezpiecznie ładować prądem 10 A, co umożliwia pełne naładowanie w zakresie 20–100 % w ciągu godziny. Masa baterii wynosząca 2460 g stanowi 23,42 % całkowitej masy BSP i została umiejscowiona centralnie pod ramą statku powietrznego, co pozwala na obniżenie środka ciężkości.

Zespół napędowy składa się z trzech głównych elementów: śmigła, silnika oraz regulatora. Każdy z ośmiu silników MAD 5008 IPE V3 340 KV wymaga dostarczenia odpowiedniej energii, by udźwignąć 1,45 kg przy 50 % mocy. Silnik ma stopień

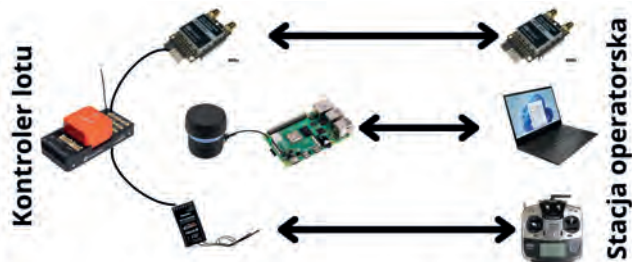
Tabela 2. Wykaz komponentów pojazdu
Table 2. List of vehicle components

Komponent	Nazwa	Parametry
Autopilot	OrangeCube+	CPU STM32H743, 3 × IMU, 14 PWM, magnetometr
GPS	Here 4	GNSS, RTK, 1 × IMU
Odbiornik radiowy	RFD868	868 MHz, FHSS, 40 km, 1 W, UART
Odbiornik RC	Futaba R7008R	FASSTest, S.BUS/S.BUS2, 8 PWM, 18 S.BUS
RTK	Here+ RTK Base	GNSS, RTK ±1 cm, magnetometr, barometr
Silnik	MAD 5008 340 kV	340 kV, 800 W, 6–12S, śmigła 16–20"
Regulator	MAD PRO 40 A	40A (50A), 2–6S Li-Po, PWM
Pływak	Polistyren	Lekki, odporny na wilgoć, formowalny
PDB	120 A PDB	120 A, 6 S, pady lutownicze
Czujnik prądu	Mauch 200A	200 A, 6 S, wysoka dokładność
Moduł zasilania	Mauch Std. Line	5–42 V, ochrona przed przepięciami
Bateria	Tattu Li-Po	22 Ah, 22,2 V (6S)
Aparatura	Futaba 14SG	14 CH, 2,4 GHz, S.BUS, telemetria
Sonar	Ping360	50 m, 360°, 4.1 cm/50 m, 300 m głębokości
Śmigła	MAD Fluxer 18×5.7	składane, 18", polimerowe

ochrony IP45, co zapewnia jego odporność na pył i bryzganie wodą, gwarantując niezawodność w trudnych warunkach [12]. Parametry silnika oraz jego współpracę z kontrolerem zapewniają regulatory MAD AMPX 40A PRO, które charakteryzują się prądem roboczym 40 A. Regulatory zostały uszczelnnione, aby chronić je przed wilgocią podczas dryfu oraz lotów w trudnych warunkach hydrometeorologicznych. Śmigła statku powietrznego wykonano z kompozytowego włókna węglowego, co zapewnia im lekkość i wytrzymałość. Mają one wielkość 18 cali i są składane – siła odśrodkowa podczas pracy ustawia łopatki prostopadle do osi obrotu, zapewniając optymalną wydajność napędu [13]. Szczegółowy wykaz komponentów przedstawiono w tabeli 2. Wszystkie elementy systemu komunikują się za pomocą połączeń szeregowych między autopilotem, jego interfejsem wejść/wyjść oraz mikrokomputerem. Kontroler lotu ma rozbudowane interfejsy oraz panel konfiguracyjny, umożliwiający dostosowanie aparatury i planowanie misji.

2.3. System komunikacji

Pojazd wykorzystuje szereg odbiorników i nadajników, zapewniając redundancję w zakresie łączności. Komunikuje się za pomocą łączności radiowej oraz mikrofalowej [14]. Zdalne sterowanie realizowane jest przez aparaturę Futaba, model 14SG, skomunikowaną z pojazdem za pomocą odbiornika Futaba R7008R. Odbiornik radiowy RFD868 MHz, działający w zakresie 868–900 MHz, dostarcza dane telemetryczne do 20 km od stacji operatorskiej. Niższa częstotliwość oznacza większą długość fali, co zwiększa skuteczność transmisji na dużych odległościach. Odbiornik mikrofalowy pracuje na częstotliwości 2,4 GHz, co pozwala na kontrolę na odległość 1000 m od operatora. Wyższe częstotliwości, jak 2,4 GHz, oferują lepszą przepustowość w mniejszym zasięgu, co wpływa na szybkość transmisji danych telemetrycznych. Schemat połączeń oraz użyte urządzenia przesyłu danych znajdują się na rys. 4.



Rys. 4. Podzespoły do komunikacji ziemia-powietrze (operator-BSP)
Fig. 4. Ground-to-air communication components (operator-UAV)

Dzięki zastosowaniu różnych pasm częstotliwości w komunikacji radiowej i mikrofalowej, system zapewnia optymalizację zarówno w zakresie zasięgu, jak i jakości transmisji. Odbiorniki działające w pasmach o niższej częstotliwości, umożliwiają bardziej stabilną komunikację na większych odległościach, co jest istotne w kontekście operacji wymagających daleko-zasięgowej transmisji danych. Z kolei wyższe pasma, wykorzystywane przez aparaturę pozwalają na przesyłanie większych ilości danych w krótszym czasie, takich jak sterowanie w czasie rzeczywistym. Zwiększenie niezawodności systemu łączności przez redundancję sprzętową pozwala na większą odporność na awarie, co jest szczególnie ważne w kontekście misji wymagających długotrwałej i niezawodnej operacji pojazdu.

2.4. Sonar jako narzędzie do obrazowania dna morskiego

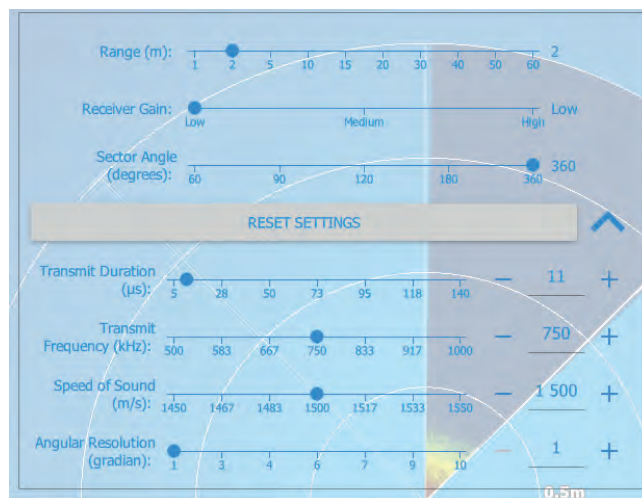
Sonar umiejscowiony pod BSP jest głównym sensorem wykonawczym (rys. 5) do pomiaru dna morskiego [15, 16]. Zamontowany jest on pod kątem 10°, a głowica o silniku krokowym zapewnia regulację obszaru skanowania (rys. 10). Wysokość fali

hydroakustycznej generowanej przez sonar to 25°, a szerokość pojedynczej wiązki wynosi 2°. Głowica jest wyposażona w silnik krokowy, który powoduje, że zakres skanowania może być programowalny. Za pomocą generatora fal hydroakustycznych i nadajnika mierzącego czas odbicia fali i powrotu do odbiornika potrafi on generować obrazy środowiska podwodnego. Możliwe jest to dzięki dużej prędkości dźwięku w wodzie mieszczącej się w zakresie 1450–1570 m/s w zależności od charakterystyki zbiornika wodnego, zasolenia, poziomu zanieczyszczeń oraz temperatury. System pracuje domyślnie z częstotliwością roboczą wynoszącą 750 kHz. Rozdzielczość wynosi 0,08 % odległości od dna, co w praktyce przekłada się na dokładność rzędu 4,1 cm dla obiektów oddalonych o 50 metrów. Sonar ma ustawienia możliwe do zmiany przez użytkownika. Przedstawione one są na rys. 6. W przypadku większych odległości dokładność pomiarów może ulec pogorszeniu ze względu na tłumienie energii fali oraz interferencję fal hydroakustycznych w środowisku wodnym.



Rys. 5. Sonar BlueRobotics Ping360

Fig. 5. BlueRobotics Ping360 sonar



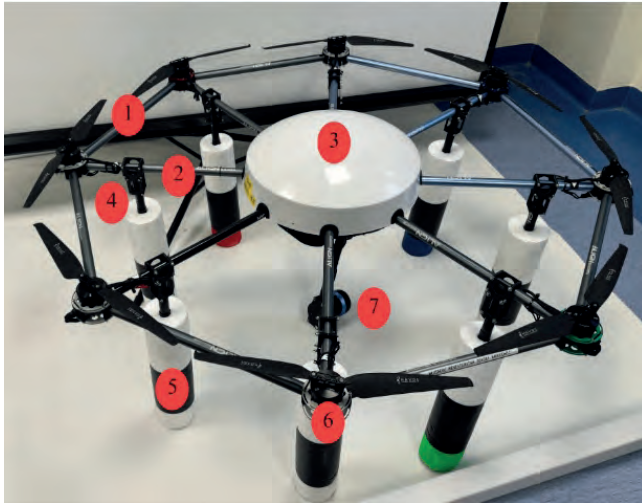
Rys. 6. Ustawienia możliwe do zdefiniowania przez użytkownika w aplikacji PingViewer

Fig. 6. Settings that can be defined by the user in the PingViewer application

Sonar zasilany jest napięciem 11–18 V, a jego moc wyjściowa wynosi 5 W. Zasilanie to realizowane jest za pośrednictwem przetwornicy prądu stałego, podłączonej bezpośrednio do głównego źródła zasilania pojazdu. Dodatkowy mikrokomputer jednopłytkowy Raspberry Pi 4B, oparty na układzie Broadcom BCM2711 z 64-bitowym, czterordzeniowym procesorem ARM Cortex-A72 taktowanym zegarem 1,5 GHz, odpowiada za rejestrowanie danych sonarowych w czasie rzeczywistym. Wbudowany moduł łączności bezprzewodowej w standardzie Wi-Fi 5G umożliwia zdalne połączenie z mikrokomputerem, na którym uruchamiana jest aplikacja PingViewer służąca do rozpoczęcia nagrywania, rejestracji i podglądu danych sonarowych w czasie rzeczywistym.

3. Wykonanie konstrukcji BSP

Główna część konstrukcji, tj. rama BSP (rys. 7) składa się z dwóch płyt, szesnastu rur przeznaczonych na ramiona, czterech rur stanowiących podwozie oraz z łączników i elementów montażowych, które zostały częściowo wydrukowane w technologii druku 3D. Bazę ramy stanowią dwie płyty z włókna szklanego, będące elementarną częścią konstrukcji drona. Zostały one zaprojektowane w taki sposób, aby po wycięciu zawierały gotowe otwory montażowe dla wszystkich podzespołów. Obie płyty mają promień 400 mm i grubość 1 mm.



Rys. 7. Oznaczenia: (1) Wspornik, (2) Ramię, (3) Osłona ramy, (4) Podwozie, (5) Pływaki, (6) Zespół napędowy, (7) Sonar
Fig. 7. Labels: (1) Bracket, (2) Arm, (3) Frame cover, (4) Chassis, (5) Floats, (6) Drive unit, (7) Sonar



Rys. 8. Oznaczenia: (1) Silnik, (2) Podstawa mocująca, (3) Łącznik ramienia zamontowany na pojeździe
Fig. 8. Labels: (1) Motor, (2) Mounting base, (3) Arm connector mounted on the vehicle

Ramiona wykonane są z rur z lekkiego stopu aluminium stosowanego w modelarstwie lotniczym (np. do budowy zdalnie sterowanych śmigłowców). Konstrukcja obejmuje osiem rur o długości 630 mm stanowiących główne ramiona, osiem wsporników łączących silniki o długości 450 mm oraz cztery rury podwozia o długości 350 mm. Wszystkie rury mają średnicę wewnętrzną 20 mm i zewnętrzną 21,5 mm.

Przedstawiony na rys. 8 łącznik ramienia pełni funkcję elementu mocującego zarówno płyty nośne, jak i uchwyty silników, które wykonano z frezowanych płytek. Łączniki ramion zostały zaprojektowane w środowisku AutoCAD – część z nich wydrukowano w technologii druku 3D, a część wykonano metodą frezowania z litego materiału. Wybór technologii wykonania

zależał od obciążeń działających na dany element: komponenty narażone na większe drgania i naprężenia wykonano w sposób frezowany ze względu na ich wyższą wytrzymałość mechaniczną. Dla ograniczenia masy całkowitej pojazdu pozostałe łączniki zostały wydrukowane z wypełnieniem 30 %, co pozwoliło znacząco zmniejszyć ich masę.

Konstrukcja BSP ma postać modułową, co umożliwia dalsze modyfikacje i rozwój. Taka architektura pozwala na integrację nowych komponentów oraz dostosowanie systemu do zmieniających się wymagań operacyjnych. Modułowa budowa umożliwia szybkie przebrojenie statku powietrznego w dodatkowe sensory, systemy komunikacyjne lub narzędzia analityczne, co czyni go wszechstronną platformą do różnych zastosowań. Gotowa konstrukcja została zaprezentowana na rys. 9.



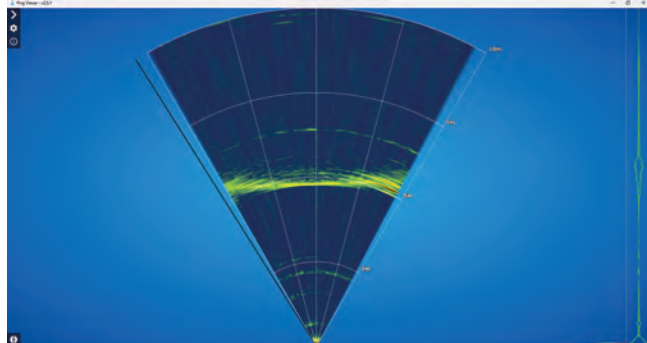
Rys. 9. BSP „SHAD” podczas wykonywania pomiarów sonarem
Fig. 9. UAV „SHAD” during sonar measurement operations

Materiał, z którego przygotowano pływaki do lądowania na wodzie, spełnił założone kryteria wypornościowe. Wstępne testy przeprowadzono z wykorzystaniem alternatywnego materiału PET, który okazał się podatny na odkształcenia spowodowane naporem wody oraz na wyginanie podczas lądowania. Zastosowanie polistyrenu ekspandowanego (EPS) przyniosło lepsze rezultaty – materiał ten był lżejszy i umożliwiał łatwe formowanie do zaprojektowanego kształtu. W tym przypadku zdecydowano się na kształt walca, który zapewnia korzystne właściwości opływowe zarówno w powietrzu, jak i w wodzie. Przeprowadzone testy wykazały, że obecność pływaków nie wpływa negatywnie na właściwości lotne pojazdu, a ich objętość umożliwia skuteczne utrzymanie pojazdu na powierzchni wody.

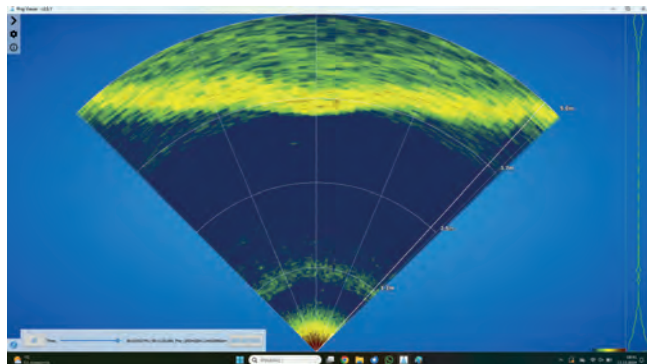
4. Wyniki z testów

Przykładowy podgląd danych sonarowych przedstawia rys. 10 oraz rys. 11 na którym wykryto dno morskie w odległości pięciu metrów od sonaru. Pierwszy rysunek przedstawia testy wykonywane statycznie, podczas prób działania sonaru. Warto zwrócić uwagę na kształt dna na drugim rysunku. Falowanie wynika z nierówności podłoża morskiego, ponieważ w tym przypadku wykonywanych testów stan morza wynosił 1. Fala morska nie miała wpływu na pomiar i sonar skutecznie wykrył nierówność wynikającą z ukształtowania dna zbiornika wodnego. Mimo że pojazd poddawany był łagodnym warunkom podczas ćwiczeń i testów, to planowane jest sprawdzenie wytrzymałościowe, pod względem odporności na warunki

atmosferyczne i falowanie podczas stanu morza 3–4. Sonar rejestruje i nagrywa wszystkie dane na dysku lokalnym komputera operatorskiego, a następnie pozwala na ich odtwarzanie. Oprócz możliwości rejestrowania oraz odczytu dedykowana aplikacja ma funkcję kalibracji sonaru Ping360 w kilku zakresach, m.in. częstotliwości, szerokości kątowej skanowania, siły sygnałów czy długości wiązki hydroakustycznej. Poniższe przykłady wykonane zostały przy parametrach: odległość pomiarowa 10 metrów, wzmacnienie sygnału ustawione na „Low”, a częstotliwość fal hydroakustycznych emitowanych przez nadajnik na 750 kHz. Kontroler lotu oprócz przesyłania telemetrii w czasie rzeczywistym do operatora wykonuje również rejestrację wszystkich informacji i danych zbieranych podczas wykonywania misji [17].

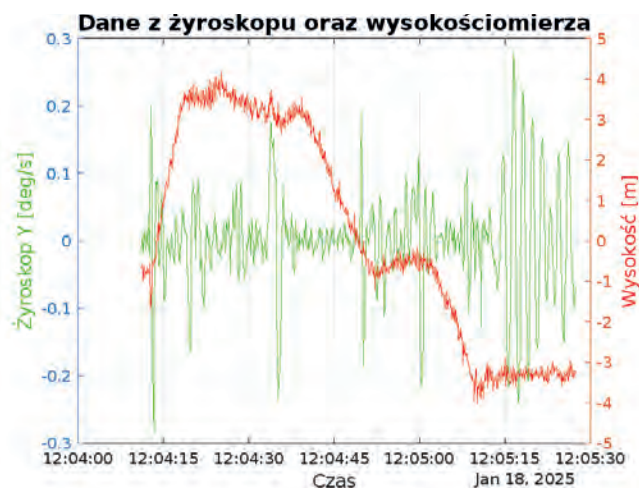


Rys. 10. Podgląd danych sonarowych podczas prób
Fig. 10. Preview of sonar data during tests



Rys. 11. Podgląd danych sonarowych w aplikacji PingViewer
Fig. 11. Preview of sonar data in the PingViewer application

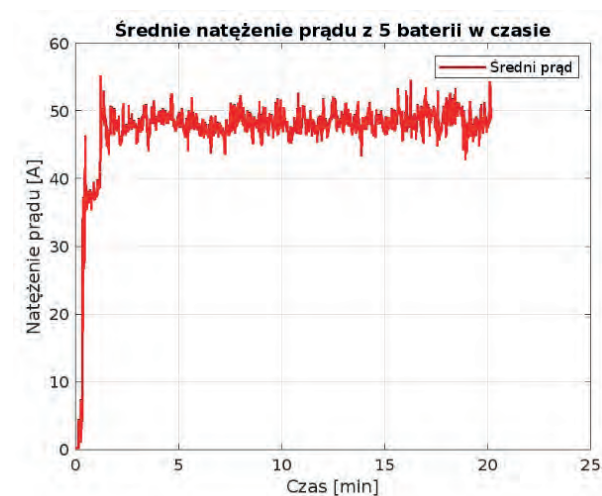
Testy wykonywane podczas budowy pojazdu wykazały kilka znaczących jego cech. Wykreślanie charakterystyk poszczególnych parametrów pozwoliło na szczegółową analizę danych. Zakładana stabilność lotu, zmiany położenia w przestrzeni oraz czas utrzymywania się w powietrzu potwierdziły liczne dane zebrane przez sensory systemu – żyroskopy, akcelerometry, magnetometry oraz barometry. Przedstawione wykresy na rys. 12 oraz rys. 13 przedstawiają wartości zarejestrowane przez żyroskop w osi Y skorelowany z wysokością BSP w czasie, na których możemy zauważyć procedurę startu z lądu oraz lądowania na wodzie. Zmiany w charakterystyce wysokościomierza, wskazujące na rozpoczęcie i zakończenie manewru, korelują z wartościami żyroskopu, które odzwierciedlają stabilność pojazdu w tych momentach. Analiza wykresów potwierdza, że zarówno start, jak i lądowanie na wodzie przebiegały płynnie, bez zakłóceń a pobór prądu nie osiągał wartości maksymalnej. Warto zwrócić uwagę na końcowy fragment wykresu na rys. 12, na którym możemy zauważyć falowanie wykresu po wylądowaniu na wodzie – jednoznaczne jest to z falowaniem pojazdu utrzymującego się na powierzchni wody.



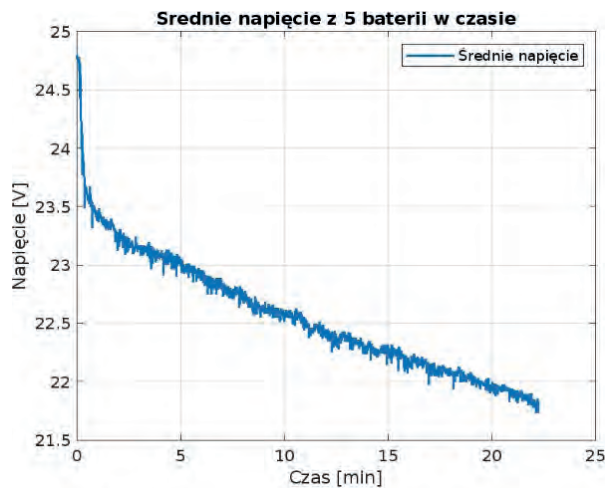
Rys. 12. Charakterystyka danych żyroskopu w osi Y oraz barometrów podczas lądowania na wodzie
Fig. 12. Gyroscope data characteristics in the Y-axis and barometer data during water landing



Rys. 13. Charakterystyka danych z żyroskopu w osi X oraz barometrów podczas startu z wody
Fig. 13. Gyroscope data characteristics in the X-axis and barometer data during water take-off



Rys. 14. Średnie natężenie prądu w układzie na podstawie danych z pięciu lotów
Fig. 14. Average current intensity in the system based on data from five flights

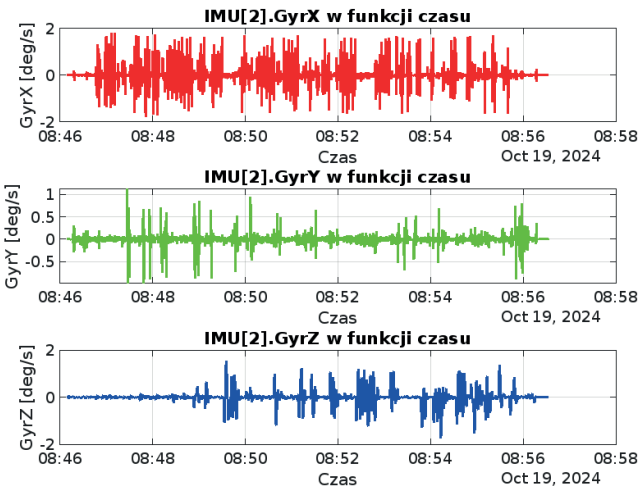


Rys. 15. Średnie napięcie źródła zasilania na podstawie danych z pięciu misji

Fig. 15. Average voltage of the power source based on data from five missions

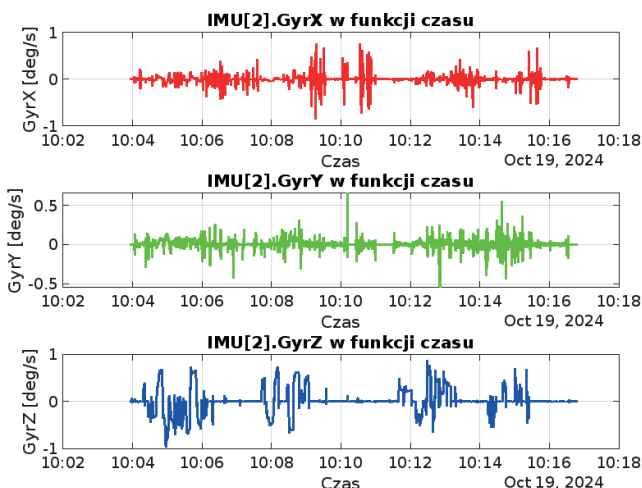
Wartości falowania są dużo większe niż dane zebrane podczas wykonywania ruchu w powietrzu czy operacji lądowania, co potwierdza stabilność BSP zakładaną w projekcie. Znaczącym parametrem jest również średnia wartość natężenia prądu w układzie. Na jej podstawie ocenić można wpływ wiatru na BSP lub stabilność układu. Wykres na rys. 14 przedstawia wartość natężenia prądu na podstawie pięciu lotów wykonanych w różnych warunkach środowiskowych i atmosferycznych. Średnia z wykresu to 49 A. Zakres napięcia przedstawia rys. 15. Nagły spadek wynika z obciążenia układu po uruchomieniu zespołu napędowego pojazdu. Po uniesieniu się nad powierzchnię następuje na akumulatorze zmiana napięcia oraz wzrost natężenia prądu. Minimalne napięcie wynosi 20,8 V, przy którym system informuje o braku zasilania i rozpoczyna okresowo informować o kończącej się energii.

Kalibracja regulatorów PID pozwoliła na zniwelowanie obecności nadmiernych wibracji, poprawę stabilności lotu za pomocą regulatorów P, I oraz D znajdujących się przed silnikiem. Regulator odpowiedzialny jest za sterowanie prędkością obrotową rotora przez regulację natężenia pobieranego prądu. Wykonanie procedury kalibracji PID pozwala na dostosowanie parametrów regulatora do rodzaju konstrukcji, jego masy, symetrii obciążenia oraz budowy. Wykresy na rys. 16 przedstawiają wartości żyroskopu przed wykonaniem kalibracji. Diagram na



Rys. 16. Dane z żyroskopu przed wykonaniem kalibracji regulatorów silnika

Fig. 16. Gyroscope data before performing the motor controller calibration



Rys. 17. Dane z żyroskopu po wykonaniu kalibracji regulatorów silnika

Fig. 17. Gyroscope data after performing the motor controller calibration

rys. 17 obrazuje charakterystykę danych z żyroskopu zarejestrowaną podczas lotu po kalibracji. Warto zaznaczyć, iż loty były wykonywane w krótkim odstępie czasu – przed i po kalibracji. Analiza porównawcza tych dwóch wykresów daje obraz, jaki wpływ ma kalibracja na pozycjonowanie w przestrzeni pojazdu oraz jego stabilizację w powietrzu. Duża zmiana, zauważalna na wykresie żyroskopu z osi X oznacza, iż pojazd po kalibracji zniwelował większość uchybów podczas ruchu, jak i utrzymywania pozycji. Jednoznacznie oznacza to poprawę stabilizacji i utrzymywanie prawidłowego poziomu w każdej z osi. Wykresy z pozostałych osi również uległy wypłaszczeniu i osiągają mniejsze wartości względem niedostrojonego regulatora.

5. Podsumowanie i kierunki dalszych prac

Oktokopter, dzięki swojej otwartej i modułowej konstrukcji, stanowi nowoczesne narzędzie do testów i badań, wspierając rozwój wiedzy i umiejętności w zakresie technologii lotniczych jak i morskich. Może być wykorzystywany zarówno w akademickich badaniach nad aerodynamiką i autonomią lotu, jak i w szkoleniach operatorów systemów bezzałogowych. Jego adaptacyjna architektura umożliwia prowadzenie eksperymentów nad nowymi metodami sterowania, optymalizacją trajektorii lotu oraz testowaniem innowacyjnych rozwiązań w zakresie napędu i zasilania.

W perspektywie długoterminowej planowany jest rozwój jednostki w kierunku wykrywania okrętów i pojazdów podwodnych ASW (ang. *Anti-Submarine Warfare*). Główną zaletą takiego rozwiązania są niższe koszty operacyjne oraz większa efektywność czasowa prowadzonych działań. W przypadku klasycznych środków ZOP, takich jak śmigłowce Mi-14 czy jednostki nawodne (bojowe i rozpoznawcze), zaangażowanie zasobów jest znacznie większe – zarówno pod względem finansowym, jak i organizacyjnym. Ich użycie wymaga udziału licznych personelu oraz rozbudowanego zaplecza logistycznego. W przeciwieństwie do tego, BSP może być obsługiwany przez jedną osobę, a jego konstrukcja i eksploatacja są zdecydowanie tańsze.

W celu realizacji zadań ZOP, BSP może zostać wyposażony w specjalistyczne czujniki hydroakustyczne, sonarowe lub magnetometryczne, wspomagające wykrywanie i śledzenie obiektów nawodnych oraz podwodnych. Docelowo jednostka ma pełnić funkcję uniwersalnego systemu pomiarowo-rozpoznawczego. Dodatkowo możliwość integracji algorytmów przetwarzania sygnałów i analizy danych w czasie rzeczywistym znacząco zwiększa potencjał operacyjny systemu.

Bibliografia

1. Telli K., Kraa O., Himeur Y., Ouamane A., Boumehraz M., Atalla S., Monsoor W., *A Comprehensive Review of Recent Research Trends on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), "Systems"*, Vol. 11, No. 8, 2023, DOI: 10.3390/systems11080400.
2. Yang Z., Yu X., Dedman S., Rosso M., Zhu J., Yang J., Xia Y., Tian Y., Zhang G., Wang J., *UAV remote sensing applications in marine monitoring: Knowledge visualization and review*, "Science of The Total Environment", Vol. 838, Part 1, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155939.
3. Sotoudehfar S., Sarkin J.J., *Drones on the Frontline: Charting the Use of Drones in the Russo-Ukrainian Conflict and How Their Use May Be Violating International Humanitarian Law*, "International and Comparative Law Review", Vol. 23, No. 2, 2023, DOI: 10.2478/iclr-2023-0018.
4. Chávez K., *Learning on the Fly: Drones in the Russian-Ukrainian War*, "Arms Control Today", Vol. 53, No. 1, 2023, 6–11.
5. Jeelani I., Gheisari M., *Safety challenges of UAV integration in construction: Conceptual analysis and future research roadmap*, "Safety science", Vol. 144, 2021, DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105473.
6. Feron E. (ed.) *Advances in Control System Technology for Aerospace Applications*, Springer, LNCIS, Vol. 460, 2016, DOI: 10.1007/978-3-662-47694-9.
7. Zhu H., Nie H., Zhang L., Wei X., Zhang M., *Design and assessment of octocopter drones with improved aerodynamic efficiency and performance*, "Aerospace Science and Technology", Vol. 106, 2020, DOI: 10.1016/j.ast.2020.106206.
8. Bin H., Justice A., *The design of an unmanned aerial vehicle based on the ArduPilot*, "Indian Journal of Science and Technology", Vol. 2, No. 4, 2009, 12–15, DOI: 10.17485/ijst/2009/v2i4/29423.
9. Chintanadilok J., Patel S., Zhuang Y., Singh A., *Mission planner: An open-source alternative to commercial flight planning software for unmanned aerial systems*, "Agricultural Education and Communication", Vol. 2022, No. 4, 2022, DOI: 10.32473/edis-AE576-2022.
10. Yan H., Yang S.-H., Chen Y., Fahmy S.A., *Optimum battery weight for maximizing available energy in UAV-enabled wireless communications*, "IEEE Wireless Communications Letters", Vol. 10, No. 7, 2021, 1410–1413, DOI: 10.1109/LWC.2021.3069078.
11. Mu J., Zhang R., Cui Y., Gao N., Jing X., *UAV meets integrated sensing and communication: Challenges and future directions*, "IEEE Communications Magazine", Vol. 61, No. 5, 2023, 62–67, DOI: 10.1109/MCOM.008.2200510.
12. Yaşa Y., *An Efficient Brushless DC Motor Design for Unmanned Aerial Vehicles*, "Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi", No. 35, 2022, 288–294, DOI: 10.31590/ejosat.1083838.
13. Andria G., Di Nisio A., Lanzolla A.M.L., Spadevecchia M., Pascasio G., Antonacci F., *Design and performance evaluation of drone propellers*, 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), IEEE, 2018, 407–412, DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2018.8453604.
14. Hassija V., Chamola V., Agrawal A., Goyal A., Luong N.C., Niyato D., Yu F.R., Guizani M., *Fast, reliable, and secure drone communication: A comprehensive survey*, "IEEE Communications Surveys & Tutorials", Vol. 23, No. 4, 2021, 2802–2832, DOI: 10.1109/COMST.2021.3097916.
15. Bandini F., Olesen D.H., Jakobsen J., Kittel C.M.M., Wang S., Garcia M., Bauer-Gottwein P., *Technical note: Bathymetry observations of inland water bodies using a tethered single-beam sonar controlled by an unmanned aerial vehicle*, "Hydrology and Earth System Sciences", Vol. 22, No. 8, 2018, 4165–4181, DOI: 10.5194/hess-22-4165-2018.
16. Hansen T., Belenis B., Firvida M.B., Creutz T., Birk A., *Scanning Sonar Data from an Underwater Robot with Ground Truth Localization*, "IEEE Access", Vol. 12, 2024, 129202–129211, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3420766.
17. Metni N., Pflimlin J.-M., Hamel T., Souères P., *Attitude and gyro bias estimation for a VTOL UAV*, "Control Engineering Practice", Vol. 14, No. 12, 2006, 1511–1520, DOI: 10.1016/j.conengprac.2006.02.015.
18. Konkurs MON – Automatyka AMW.
https://automatyka.amw.gdynia.pl/konkurs_MON_II.html.

Inne źródła

Design and Implementation of an Octocopter-type Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Underwater Environmental Data Acquisition Using the Ping 360 Sonar

Abstract: The article presents the design, construction and testing of an unmanned aerial vehicle (UAV) for marine applications. The UAV design includes specially developed floats, allowing it to float on the surface of the water. The UAV is designed to acquire data in the water's depths using Ping360 sonar. It is controlled using a dedicated remote controller, or alternatively, can carry out autonomous missions according to a preprogrammed scenario. The sonar data is transmitted in real time to the operator at the ground station for ongoing analysis. The article discusses in detail the subsequent design and construction stages, including the frame and float design, the system architecture, and the electronic and hardware layers. The final section presents the results of the analysis of flight parameters, obtained both during tests over land and in sea conditions.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (UAV), autonomous aerial vehicle, sonar, drone, water landing, maritime environment, reconnaissance

inż. Jakub Tkaczyk

kuba.tkaczyk@gmail.com
ORCID: 0009-0000-4008-4112

Absolwent Akademii Marynarki Wojennej na kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale Mechaniczno-Elektrycznym. Aktualnie kontynuuje studia magisterskie na tym samym kierunku. Ma doświadczenie w zakresie bezzałogowych systemów latających, jednak specjalizuje się w technologiach podwodnych. Ma także doświadczenie w projektowaniu, modelowaniu i programowaniu robotów oraz w przetwarzaniu sygnałów.



inż. Maciej Tyszecki

mtyszecki@gmail.com
ORCID: 0009-0009-1333-4783

Absolwent Akademii Marynarki Wojennej na kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale Mechaniczno-Elektrycznym. Aktualnie kontynuuje studia magisterskie na tym samym kierunku. Ma doświadczenie w zakresie bezzałogowych systemów latających oraz w projektowaniu, modelowaniu i budowie nawodnych pojazdów bezzałogowych.



mgr inż. Jacek Jabłoński

Jacekjab1972@gmail.com
ORCID: 0009-0000-3908-6858

Absolwent Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy na Wydziale Elektroniki i Telekomunikacji (1997). W latach 1996–2003 odpowiedzialny za projekt i wdrożenie interfejsów nawigacyjnych dla samolotów SU-22M4 i MIG-29. Interfejsy te integrują systemy GPS (Trimble), TACAN (Rockwell Collins USA), VOR, DME oraz ILS (Marconi Selenia Italia). Od 2003 r. związany z firmą EYE-DRON.PL jako Project Manager, konstruktor oraz pilot-operator UAV. W latach 2017–2021 Kierownik Projektu Dron For Nature. Od 2021 r. Główny Specjalista ds. Dronów w JSW Nowe Projekty, uczestniczący w projektach: SOWA, ZOP-BSP oraz AutoInvent. Od 2024 r. wykładowca w Akademii Marynarki Wojennej.



kmdr por. dr hab. inż. Paweł Piskur

p.piskur@amw.gdynia.pl
ORCID: 0000-0002-8823-43164

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. na Politechnice Koszalińskiej uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dziedzinie mechaniki i budowy maszyn. Od 2017 r. pracuje w Akademii Marynarki Wojennej. Jego obszar badawczy jest ściśle związany z podwodnymi pojazdami bezzałogowymi, a zwłaszcza biomimetycznymi układami napędowymi.

