

„Zeszyty Naukowe DWSPiT.
Studia z Nauk Technicznych”
2014 (3), s. 7–16.

MAREK CHODNICKI
MAREK JAŹDZEWSKI
ŁUKASZ KULWICKI
DAWID ŁAWRESZUK
ANNA A. PANASIUK-CHODNICKA

Innowacyjny autonomiczny pojazd podwodny do badania stanu środowiska w warunkach trudnych

Streszczenie: Na podstawie rzeczywistej, aktualnej wiedzy w temacie rozwoju robotów podwodnych został zaprojektowany nowy pojazd wyposażony w innowacyjne rozwiązania. Autonomiczny robot podwodny dedykowany jest do pracy w trudnych warunkach środowiskowych, wymagających odporności na wysokie ciśnienie, niskie temperatury i silne prądy, które są typowe dla regionów polarnych. W pracy opisano charakterystykę docelowego rejonu, w którym ma być używany robot podwodny, tj. Zatokę Admiralicji w rejonie Archipelagu Szetlandów Południowych. Istotnym aspektem pracy był także dobór odpowiedniego systemu sterowania, który będzie zdolny przeprowadzić pojazd przez trudne i wymagające warunki stawiane przez środowisko zewnętrzne. Kolejnym elementem projektu jest ocena istniejących systemów nawigacji. Ostatnią częścią jest opracowanie kształtu robota, odpowiedniego do warunków otoczenia z uwzględnieniem możliwości zamontowania dodatkowych urządzeń mechanicznych, elektrycznych i pomiarowych, odpowiedzialnych za wykonywanie powierzonych zadań podczas misji robota.

Słowa kluczowe: autonomiczny pojazd podwodny, nawigacja, sterowanie, Zatoka Admiralicji, Antarktyka.

Innovative autonomous underwater vehicle for research the environment in harsh condition

Summary: The use of Autonomic Underwater Vehicles (AUV) continuously recording the basic environmental parameters in marine polar regions are extremely difficult. This study provides a summary and a description of the existing solutions for the AUV, their use, construction, actuators and transmitters. Based on the actual knowledge a new vehicle equipped with innovative solutions and components was designed. The underwater robot is dedicated to be working in harsh environmental conditions requiring resistance to high pressure, low temperatures and strong currents, which are typical for the polar regions. The first stage of the design process consist of selection miniature sensors, vision systems to collect information about the environment. The next step was to develop a method for processing and storing data from the measurements. There has been elaborated a special communication and data transfer for this system. An important aspect of this design is a proprietary control system, which includes selecting an appropriate drive with the control program Marek

Chodnicki, Marek Jażdżewski, Łukasz Kulwicki, Dawid Ławreszuk, Anna A. Panasiuk-Chodnicka 8 according to the external conditions. Another part of the research was the review of the existing navigation systems and subsequently implementation to the designed vehicle. Then, the power system with automatic charging was elaborated, which is possible to use natural energy sources. The last part was to design the shape of the mobile robot, taking into account the environmental conditions and the possibility of mechanical and electronic devices to be installed.

Keywords: autonomous underwater vehicle, navigation, control system, Admiralty Bay, Antarctica.

1. Wstęp

Korzystanie z autonomicznych pojazdów podwodnych (AUV) do ciągłej rejestracji podstawowych parametrów środowiskowych w morskich regionach polarnych jest niezwykle trudne. Niniejsze opracowanie stanowi podsumowanie i opis istniejących rozwiązań dla AUV, ich zastosowania oraz budowy siłowników i nadajników. Na podstawie stanu aktualnej wiedzy nowo projektowany pojazd wyposażony zostanie w innowacyjne rozwiązania. Podwodny robot jest przeznaczony do pracy w trudnych warunkach środowiskowych wymagających odporności na wysokie ciśnienie, niskie temperatury i silne prądy, które są typowe dla regionów polarnych.

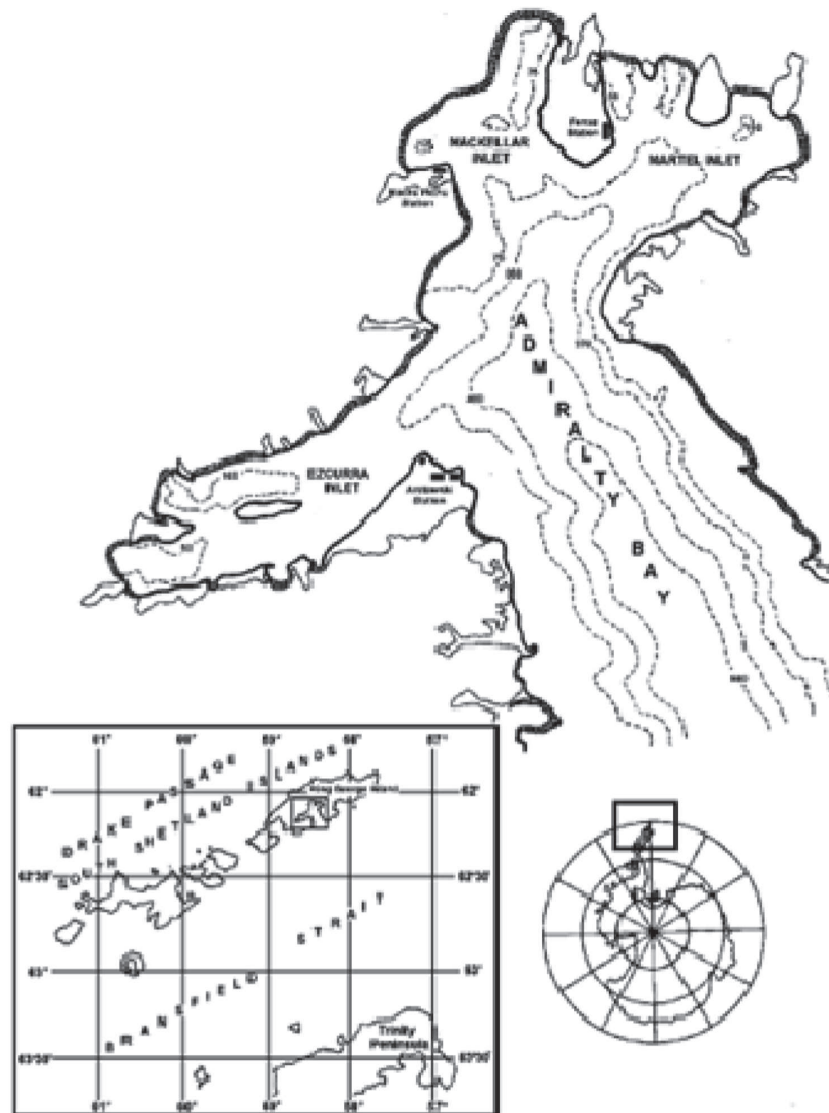
Pierwszy etap procesu projektowania to dobór miniaturowych czujników, systemów wizyjnych, po to aby zebrać informacje na temat środowiska. Kolejny krok to opracowanie metody przetwarzania i przechowywania danych z pomiarów. Został opracowany specjalny system komunikacji i transferu danych dla tego systemu. Istotnym aspektem tej konstrukcji jest system sterowania, który zależnie od warunków zewnętrznych kontroluje napęd za pomocą utworzonego oprogramowania. Kolejną część badania to ocena istniejących systemów nawigacji, a następnie wdrożenie ich do projektowanego pojazdu. Został ponadto opracowany układ zasilania z automatycznym ładowaniem, do którego można użyć naturalnych źródeł energii. Ostatnią częścią projektu jest opracowanie kształtu ruchomego robota z uwzględnieniem warunków otoczenia oraz możliwości przyłączenia urządzeń mechanicznych i elektrycznych.

2. Charakterystyka środowiska badań na przykładzie Zatoki Admiralicji

Należy sądzić, że najważniejszą cechą obu rejonów polarnych, Arktyki i Antarktyki, są skrajne warunki środowiskowe oraz wyraźne zmiany sezonowe pokrywy lodowej, intensywności światła słonecznego i w rezultacie produkcji pierwotnej [3].

Zatoka Admiralicji (rys. 1) jest jedną z największych zatok w rejonie Archipelagu Szetlandów Południowych [7]. Powierzchnia Zatoki wynosi 122,08 km², a maksymalna głębokość to 530 m, natomiast jej średnia głębokość to 201,7 m. Specyficzny charakter Zatoki Admiralicji, w tym jej fiordowy charakter i ukształtowanie dna, wpływa w znacznym stopniu na cyrkulację mas wodnych w niej występujących. Prądy wiatrowe i pływy występujące

na obszarze Zatoki Admiralicji powodują ciągły ruch jej mas wodnych. Cyrkulacja wód w Zatoce jest w głównej mierze indukowana przez wpływ mas wodnych z Cieśniny Bransfielda po jej zachodniej stronie, które ścielą się tuż przy dnie, i ich wpływ w warstwie powierzchniowej wzdłuż wschodniego wybrzeża Zatoki. Dynamika ruchu wód w Zatoce jest w znacznej mierze kształtowana przez zjawiska pływowe. Prędkości, jakie osiągają pływy w tym obszarze, wahają się od 0,5 do 1,5 m/s. Amplituda pływów wynosi nawet 2 m, ale niekiedy dochodzi do prawie 3 m podczas całej doby.



Rys. 1. Batymetria Zatoki Admiralicji

Średnia prędkość prądów powierzchniowych mieści się w granicach od 0,1–0,3 m/s do 0,3–0,5 m/s. W głębszych warstwach wody może nawet osiągnąć wartość do 1,5 m/s. Podczas antarktycznego lata najpłytsze warstwy wody znajdujące się tuż przy brzegu mogą nagrzać się do 5,3°C, a w zbiornikach podpływowych nawet do 12°C. Na styku wody z lodowcami i w mniejszych zatoczkach temperatura wód jest zawsze ujemna i wynosi średnio około -1,6°C. Zasolenie wody w Zatoce nie jest stałe. W zależności od głębokości wartość ta wzrasta. Zatoka Admiralicji jest specyficznym miejscem, jeśli chodzi o warunki hydrometeorologiczne. Pomimo że znajduje się bardzo blisko kontynentu Antarktydy, ostatni raz Zatoka cała zamarzła w 1998 roku i stan ten trwał łącznie kilka tygodni. Zwykle przez cały rok Zatoka jest pod wpływem jedynie okresowego paku lodowego. Główne formy lodowe występujące w tym rejonie to: góry lodowe, odłamy lodowe oraz odłamki lodowe. Pod wpływem prądów wodnych do Zatoki wpływają wzdłuż wschodniego jej wybrzeża odłamy oraz odłamki gór lodowych z rejonu Cieśniny Bransfielda [2, 6].

3. Autonomiczny pojazd podwodny

Autonomiczny pojazd podwodny – AUV (z ang. *Autonomous Underwater Vehicle*) jest urządzeniem poruszającym się pod wodą dzięki własnemu napędowi, którym zazwyczaj jest pędnik strumieniowy zasilany energią elektryczną. Roboty tego typu sterowane są bez ingerencji operatora oraz mają zdolność poruszania się w każdym kierunku. Wykorzystuje się je w celach naukowych, badawczych, militarnych oraz przemysłowych.

Podstawowymi elementami wykonawczymi robotów podwodnych są różnego rodzaju czujniki przymocowane do ich obudowy, które w zaprogramowany sposób, samodzielnie dokonują pomiarów z możliwie największą dokładnością i odpowiednim czasem próbkowania. Dane zbierane podczas pomiarów są gromadzone, a następnie przetwarzane i mogą być wysyłane do stacji bazowej. Sterowanie AUV polega na wcześniejszym zaprogramowaniu mikrokontrolera, czyli doborze odpowiedniego algorytmu, który odpowiada za poruszanie się pojazdu w określony sposób po wyznaczonym akwenu wodnym. Pojazdy podwodne programuje się tak, aby zanurzały się maksymalnie do danej głębokości, ponieważ w zależności od konstrukcji roboty tego typu mają ograniczoną wytrzymałość. Takie rozwiązanie zabezpiecza przed ewentualnym uszkodzeniem wywołanym działaniem dużych ciśnień występujących pod wodą.

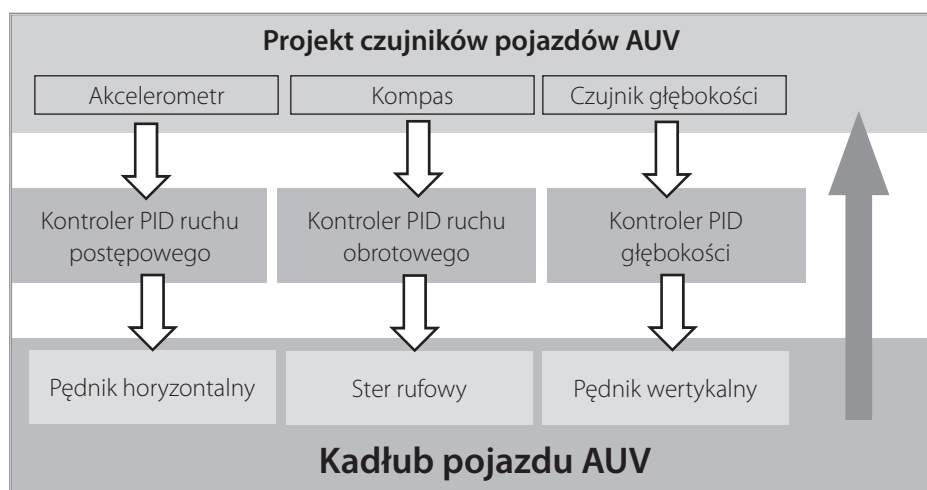
W zależności od rozwiązania, głównym źródłem energii w tego typu urządzeniach są akumulatory, które dostarczają potrzebną moc do działania wszystkim elementom będącym wyposażeniem robotów. Wzrost ilości urządzeń skraca żywotność baterii, dlatego ważne jest dobranie czujników, napędu oraz innych komponentów o jak najmniejszym poborze energii. Standardowy autonomiczny pojazd podwodny może poruszać się z prędkością od 0,5 do 2,5 m/s i działać od 8 do 50 godzin, bez konieczności ładowania akumulatora. Wzrost prędkości poruszania się skraca żywotność baterii, a tym samym zasięg, jaki może osiągnąć robot, dlatego optymalną prędkością, jaką się stosuje, jest 1,5 m/s [9].

Ważne elementy wyposażenia to także: system komunikacji oraz system nawigacji, które w pojazdach podwodnych rozwiązane mogą być na trzy sposoby. Pierwszym z nich jest komunikacja drogą satelitarną, drugi sposób to użycie drogi radiowej (tylko nad powierzchnią wody), a trzecia metoda to wykorzystanie fal akustycznych. Systemy te pozwalają na ciągłe monitorowanie oraz lokalizowanie urządzenia w każdych warunkach.

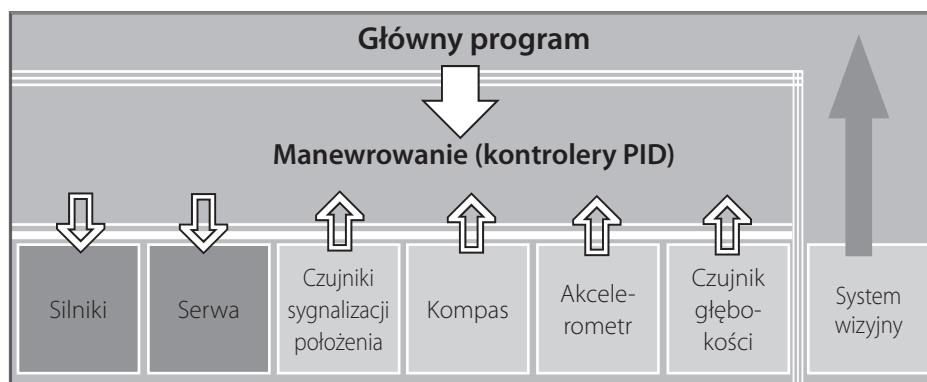
4. Struktura systemu sterowania

Projektowany system sterowania składa się z trzech regulatorów PID dedykowanych po jednym dla każdego stopnia swobody. Na podstawie danych uzyskanych z pakietu czujników każdy regulator steruje przypisanym napędem, wpływając na ruch pojazdu.

Struktura systemu sterowania została przedstawiona na rysunku 2. Podobnie jak trójwarstwowy program, zorganizowana jest także struktura oprogramowania (rys. 3).



Rys 2. Struktura systemu sterowania



Rys. 3. Struktura programu sterującego

Warstwa planowania: Górna warstwa programu pełni funkcję głównego obszaru działań. Na tym poziomie przetwarzane są wyznaczone zadania, nawigacja oraz rozpoznawanie przeszkód.

Warstwa sterowania: Funkcje sterujące i algorytmy śledzące są implementowane na poziomie manewrowania. Poziom ten uzyskuje informacje z warstwy wykonawczej oraz zapewnia instrukcje dla silników i serwomechanizmów.

Warstwa wykonawcza: Warstwa ta jest odpowiedzialna za komunikację między osprzętem pojazdu, składającym się z czujników oraz napędów. Czujniki są wykorzystywane przez kontrolery wyższej warstwy i przez pozostałe elementy architektury programu.

Główny program: Moduł ten zawiera cele misji oraz odpowiada za nawigację. W tej warstwie zaimplementowane jest przetwarzanie obrazu, rozpoznawanie przeszkód oraz mapowanie przestrzeni. Polecenia nawigacyjne są przekazywane bezpośrednio do klasy manewrowanie.

Manewrowanie: Moduł ten zawiera regulatory PID oraz niektóre podstawowe funkcje do sterowania pojazdem.

Silniki: Moduł ten jest odpowiedzialny za zapewnienie kierunku oraz mocy ciągu silników. Tempo jego zmiany jest ograniczone w celu ochrony silników oraz zmniejszenia skoków prądu.

Serwa: Moduł ten jest odpowiedzialny za zmiany kierunku płynięcia poprzez kontrolowanie podwójnego steru rufowego.

Czujniki sygnalizacji położenia: Moduł ten zapewnia informacje o odległości z różnych czujników sygnalizacji położenia zamontowanych w pojeździe. Z pomocą algorytmu zmienia odczyt A/C na wartość odległości.

Akcelerometr: Moduł ten zarządza komunikacją z akcelerometrem, który jest podłączony poprzez port szeregowy. Tłumaczy także dane w kodzie ASCII pochodzące z akcelerometru na wartości INT.

Kompas: Moduł kompasu zapewnia dane o kierunku od 0 do 360 stopni oraz oblicza prędkość obrotową pojazdu (w stopniach na sekundę).

Czujnik głębokości: Moduł głębokości zamienia wartości A/C z kanału czujnika głębokości za pomocą specjalnego algorytmu na wartość głębokości.

5. System komunikacji i nawigacji

Mimo że pojazd podwodny jest w pełni autonomiczny, wymagana jest możliwość komunikacji pomiędzy robotem a statkiem lub stacją naziemną, w której przebywają osoby odpowiedzialne za przebieg zadania.

Komunikacja jest potrzebna do załadowania nowego programu (misji), przesłania zebranych danych, diagnostyki robota i urządzeń pokładowych itp. Gdy robot pozostaje pod wodą, praktycznie jedynym możliwym do wykorzystania rozwiązaniem jest komunikacja

za pomocą fal akustycznych, czyli telemetrii akustycznej. W tym celu proponuje się użycie hydrofonów. Rozchodzenie się fal dźwiękowych pod wodą – komunikacja podwodna – opiera się na trzech głównych czynnikach, którymi są tłumienia, zależne od częstotliwości sygnału, rozchodzenie się fali w różnych kierunkach oraz niska prędkość dźwięku nieprzekraczająca 1500 m/s [8]. Komunikacja za pomocą telemetrii akustycznej jest jednym z najtrudniejszych znanych sposobów komunikacji, co jest spowodowane bardzo ograniczoną przepustowością oraz koniecznością używania niskich częstotliwości, w których daje najlepsze rezultaty.

Jednym z najważniejszych systemów znajdujących się w robocie AUV jest system nawigacji. Lokalizacja robotów znajdujących się pod wodą opiera się głównie na przeliczeniach położenia absolutnego, z uwzględnieniem dużego wpływu błędów. W celu rozwiązania tego problemu stosuje się hybrydowy system nawigacji, składający się z systemu inercyjnego INS (z ang. *Inertial Navigation System*) oraz odczytu prędkości ruchu robota, stosowanego w celu dokładniejszego określenia jego przemieszczeń. Zastosowanie nawigacji hybrydowej daje 100% mobilności dla robota, pozwalając na używanie go w dowolnych akwenach, przemieszczanie się pomiędzy akwenami, zmiany trajektorii ruchu nawet w czasie trwania misji.

System nawigacji hybrydowej, czyli INS + odczyt aktualnej prędkości, składa się z trzech akcelerometrów, trzech żyroskopów oraz modułu obliczającego [4]. Główna zasada działania INS to obliczanie, dzięki czujnikom, kolejnych „kroków” robota i dodawanie ich do położenia absolutnego. Z uwagi na trudne środowisko kolejne położenia obciążone będą błędami, których nie sposób wyeliminować. W celu minimalizacji tego problemu robot co jakiś czas powinien się wynurzać i ustalić swoją bieżącą pozycję, która zostaje wysłana do systemu nadzorującego przebieg zadania. Wielkość błędów położenia oraz nawigacji można opisać specjalnym wzorem (1), w którego skład wchodzi wszelkie możliwe do określenia sumy błędów. Błąd położenia robota zdeterminowany jest chwilowym położeniem geograficznym, zaś błąd nawigacji związany jest z precyzją systemu nawigacyjnego:

$$B = \sqrt{\varepsilon_p^2 + (D \sin \varphi_0)^2 + (D \sin \varphi_{DI})^2 + (D \delta V_0)^2 + (D \delta V_A)^2} \quad (1)$$

gdzie:

- B – błąd całkowity,
- ε_p – błąd pozycji początkowej,
- δV_A – błąd prędkości wzdłuż drogi,
- φ_0 – początkowy błąd kierunku,
- δV_0 – błąd prędkości w poprzek drogi,
- φ_{DI} – niewspółosiowość czujnika,
- D – precyzja systemu nawigacyjnego.

Istnieje wiele metod zmniejszających propagację błędów. W projekcie proponuje się zastosowanie filtra Kalmana [5]. Filtr Kalmana używany jest w nawigacji w celu filtrowania szumów, które wpływają na zakłócenia w pozycjonowaniu robota. Zastosowanie filtra pozwala na znaczne zredukowanie błędów, wynikających z dryfu pojazdu podwodnego, lub innych zakłóceń wpływających na jego ruch. Jest to powszechnie stosowana metoda, pozwalająca na znaczną poprawę jakości otrzymywanych i przetwarzanych danych.

6. Projekt autonomicznego robota podwodnego

Podczas projektowania robota podwodnego zwrócono szczególną uwagę na trudne warunki, w których robot ma pracować. Najważniejsze jest zagwarantowanie bardzo wysokiej szczelności, aby elementy elektroniczne znajdujące się wewnątrz niego chronić przed uszkodzeniem.

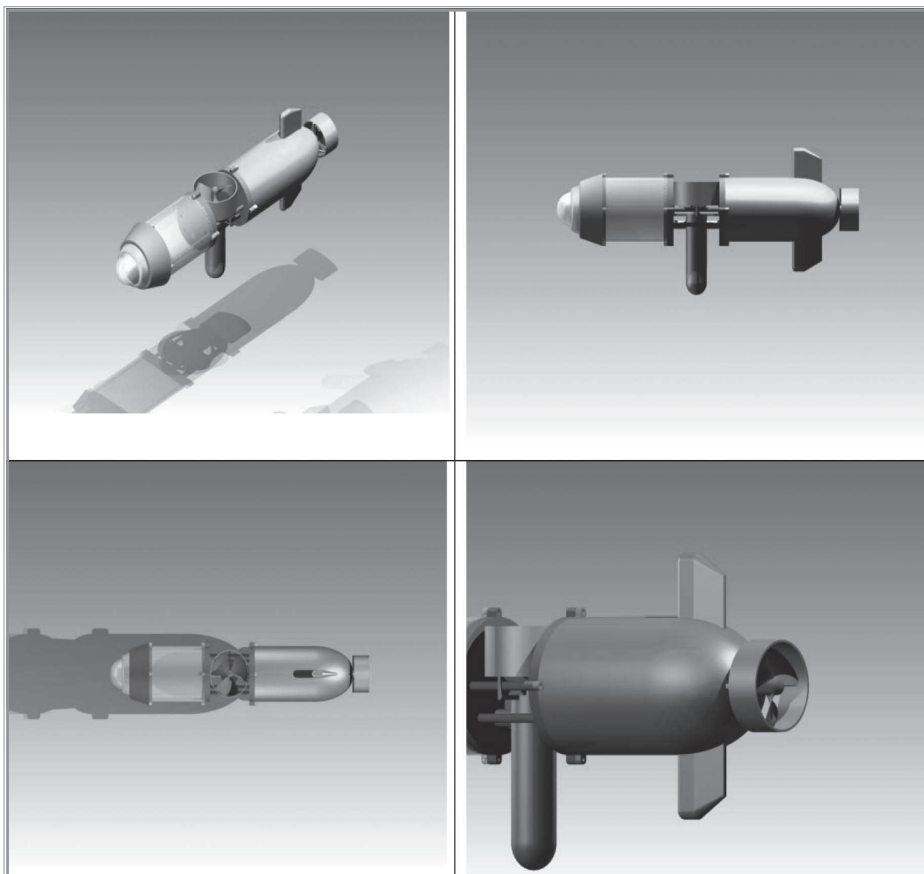
Ważne jest również nadanie odpowiedniego kształtu – najlepiej opływowego – redukującego straty energii podczas poruszania się, spowodowane oporami przepływu. Dobrze dobrany kształt robota podwodnego może zarówno znacznie wydłużyć czas pracy, jak i wzmocnić jego konstrukcję odporną na wysokie ciśnienia. Równomierne rozłożenie ciężaru wszystkich urządzeń ważne jest po to, żeby nie utracić stateczności. Istotnym elementem przy projektowaniu jest także prawidłowy dobór oraz rozmieszczenie pędników, po to aby usprawnić i ułatwić sterowanie. Ostatnim aspektem jest dobór wszelkich czujników, systemu wizyjnego i innych modułów elektronicznych, które pełnią funkcję pomiarowo-badawczą podczas pracy pod wodą.

Materiałem konstrukcyjnym pojazdu podwodnego jest tworzywo sztuczne na bazie poliwęglanu, ze względu na dużą udatność i dobre właściwości mechaniczne. Dodatkowo materiał jest wzmocniany chemicznie, aby zapewnić ochronę przed utlenianiem i degradacją światłem UV.

Kształt robota jest dość symetryczny, a ciężar równomiernie rozłożony. Środek ciężkości znajduje się pośrodku, trochę poniżej linii środka masy – dzięki charakterystycznemu przymocowaniu środkowego pędnika.

Długość całkowita pojazdu osiąga około 865 mm, a średnica 150 mm. Po uwzględnieniu wszystkich elementów waga wynosi 15 kg. Cały pojazd przyjmuje wyporność dodatnią wynoszącą 14 l. Szacowana głębokość zanurzenia to maksymalnie 50 m.

Na rysunku 4 pokazano projekt pojazdu przedstawiający kształt oraz rozmieszczenie wszystkich elementów.



Rys. 4. Projekt autonomicznego robota podwodnego

7. Wnioski

Dzięki rozwojowi techniki pomiarowej nastąpiła znaczna automatyzacja procesu monitorowania środowiska wodnego. Pomiary przeprowadzane dotychczas w skomplikowanym procesie ręcznego pobierania próbek i ich analiza zostały zastąpione w wielu przypadkach poprzez umieszczenie elektronicznego systemu pomiarowego w danym środowisku. Wspomniany postęp technologiczny przyczynił się do popularyzacji robotów pomiarowych, które wyposażone w niezależne źródła zasilania posiadają coraz to większą autonomię działania. Roboty takie mają szansę doskonale się sprawdzać w warunkach trudnych, nieprzyjaznych człowiekowi.

Do obszarów tych należą m.in. rejony polarne. Zapotrzebowanie instytucji naukowych, zajmujących się badaniami m.in. wód Antarktyki, było jedną z głównych przyczyn powstania projektu.

Literatura

1. Absher T.M., Feijo G.B.A.R., da Cruz A.C., Pelagic larvae of benthic gastropods from shallow Antarctic waters of Admiralty Bay, King George Island. *Polar Biol.* 2003, Nr 26, s. 359–364.
2. Arctowski.pl [dostęp: 20.07.2014].
3. Donnelly J., Torres J.J., Hopkins T.L., Lancraft T.M., Chemical composition of Antarctic zooplankton during austral fall and winter. *Polar Biol.* 1994, Nr 14, s. 171–183.
4. Hyakudome T., Design of Autonomous Underwater Vehicle, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Japonia 2011.
5. Loebis D. i in., An integrated approach in the design of a navigation system for an AUV. In: *Manoeuvring and Control of Marine Craft 2003 (MCMC 2003): A Proceedings Volume form the 6th IFAC Conference Girona, Hiszpania 2003.*
6. Panasiuk-Chodnicka A.A., Zmienność strukturalna i behawioralna siphonophorae z Zatok Admiralicji, Ocean Południowy. Rozprawa doktorska, Uniwersytet Gdański, Gdynia 2010.
7. Rakusa-Suszczewski S., The hydrography of Admiralty Bay and its inlets, coves and lagoons (King George Island, Antarctica), *Pol. Polar Res.* 1995, Nr 16(1–2), s. 61–78.
8. Stojanovic M., *Underwater Acoustic Communications: Design Considerations on the Physical Layer*, Massachusetts Institute of Technology Cambridge 2007.
9. von Alt C., *Autonomous Underwater Lagrangian Platforms and Sensors Workshop* by, Woods Hole Oceanographic Institution 2003.