

Tadeusz Graczyk, Sławomir Jaszczak, Mariusz Matejski

dr hab. inż. Tadeusz Graczyk
Wydział Techniki Morskiej
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
tadeusz.graczyk@zut.edu.pl

dr inż. Sławomir Jaszczak
Wydział Informatyki
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
sjaszczak@wi.zut.edu.pl

dr inż. Mariusz Matejski
Wydział Techniki Morskiej
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
mariusz.matejski@zut.edu.pl

**WPLYW ALGORYTMÓW STEROWANIA POJAZDEM TYPU ROV
NA JEGO DZIAŁANIE**

Sterowanie zdalnie sterowanym pojazdem głębinowym wymaga od operatora dużych umiejętności i koncentracji. Niezbędne jest zastosowanie automatycznego układu sterowania ruchem pojazdu wspomagającego pracę operatora. W artykule przedstawiono zakres prac badawczych obejmujących opracowanie i przebadanie szeregu samouczących się algorytmów sterowania, umożliwiających automatyzację ruchu pojazdu głębinowego w zależności od postawionego zadania.

Słowa kluczowe: pojazd głębinowy, ROV, badania podwodne, automatyka ruchu, automatyczne sterowanie.

**THE INFLUENCE OF CONTROL ALGORITHMS
ON ROV OPERATION**

Controlling the remotely operated vehicle requires high skill and concentration on the part of its operator, therefore it is necessary to implement an automatic control system for ROV operation to support the operator in his/her work. The underlying article presents the scope of research works including the development and analysis of a number of self-teaching control algorithms, which would enable the automation of ROV motions depending on a task given to the vehicle.

Keywords: underwater vehicle, ROV, underwater investigations, automatics of movement, automatic control.

WSTĘP

W Polsce techniką podwodną zajmują się głównie trzy ośrodki: Politechnika Gdańska, Akademia Marynarki Wojennej (AMW) w Gdyni i Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny (ZUT) w Szczecinie. Politechnika Gdańska specjalizuje się w budowie urządzeń głębinowych dla zastosowań militarnych, ZUT w Szczecinie – w budowie systemów monitoringu dedykowanych dla zastosowań cywilnych, natomiast AMW eksploatuje pojazdy głębinowe, wspierając nimi technikę nurkowania. Pojazdy takie eksploatowane są także w Akademii Morskiej w Szczecinie, Firmie Petrobaltic oraz przez Marynarkę Wojenną.

W Zakładzie Konstrukcji, Mechaniki i Technologii Okrętów na Wydziale Techniki Morskiej ZUT, od początku lat 80 ubiegłego wieku prowadzone są prace badawcze i projektowe związane z techniką podwodną, a w szczególności budową i sterowaniem bezzałogowymi pojazdami głębinowymi (ang. ROV – remotely operated vehicle).

Przedmiotem obecnie prowadzonych badań naukowych jest pojazd głębinowy typu ROV o nazwie MAGIS, przeznaczony do zadań inspekcyjnych i wykonywania prostych prac pod wodą. Sterowanie takim pojazdem wymaga od operatora dużych umiejętności i koncentracji, która maleje z upływem czasu, a ponadto przebiega prawidłowo jedynie w warunkach dobrej widoczności pod wodą. Niezbędne zatem jest zastosowanie automatycznego układu sterowania ruchem pojazdu głębinowego, wspomagającego pracę operatora.

1. ZADANIA I CHARAKTERYSTYKA TECHNICZNA POJAZDU GŁĘBINOWEGO MAGIS

Pojazd MAGIS został zaprojektowany dla monitoringu dna Morza Bałtyckiego w celu poszukiwań wraków, naturalnych przeszkód, pozostałości militarnych itp. Może być też zastosowany do inspekcji podwodnych: poszycia jednostek pływających morskich i śródlądowych, stacjonarnych i pływających elektrowni wiatrowych itp. MAGIS jest sterowany zdalnie przez operatora ze stacji nawodnej poprzez kablolinę, [1, 7]. Ma on możliwość obserwowania obiektu podwodnego za pośrednictwem kamer umieszczonych w pojeździe oraz korzysta z informacji przekazywanych przez system podwodnej nawigacji hydroakustycznej z super krótką bazą oraz system pomiarowy parametrów fizykochemicznych wody. Pojazd może pracować na głębokościach do 400 m.

Pojazd przedstawiono na rys. 1 i scharakteryzowano w tabeli 1. Obiekt ten cechuje znaczny stopień skomplikowania, duża liczba parametrów, nieliniowość i niestacjonarność (różnego rodzaju zakłócenia od prądów morskich, falowania, kabloliny), [1].

2. CEL BADAŃ

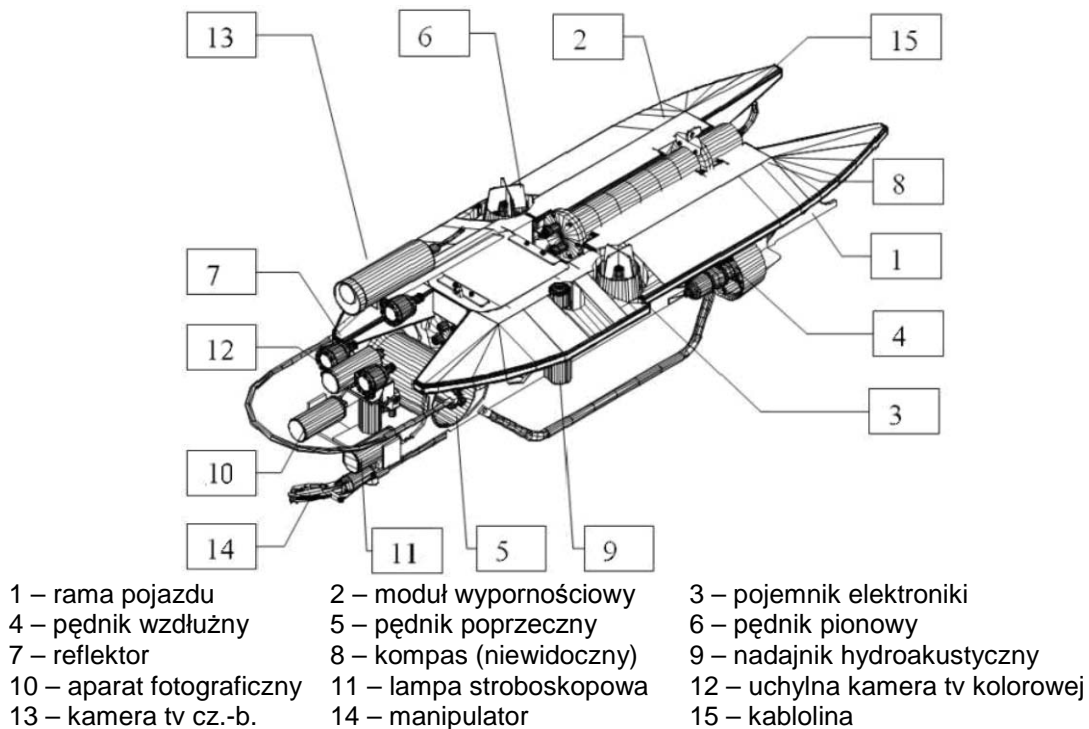
Celem badań systemu pojazdu MAGIS jest opracowanie i przebadanie – zgodnie z procedurami Model-in-the-Loop, Hardware-in-the-Loop oraz w czasie rzeczywistym – szeregu samouczących/samonastrajających się algorytmów sterowania. Algorytmy te umożliwią automatyzację ruchu pojazdu głębinowego w zależności od postawionego zadania, tj. automatyczną stabilizację i/lub regulację programową następujących wielkości:

- głębokości przy manualnym sterowaniu kursem,
- kursu przy manualnym sterowaniu głębokością,
- kursu i głębokości.

Jednocześnie automatyzacja ta nie będzie wymagać znajomości dynamiki pojazdu głębinowego, a jedynie wiedzy doświadczonego operatora, zapisanej w postaci danych numerycznych (zapis sygnałów sterujących i sterowanych).

Sterowanie automatyczne umożliwi oddzielną stabilizację kursu lub głębokości lub łącznie zarówno kursu jak i głębokości, [1, 2, 3, 4]. Ta ostatnia opcja umożliwia ruch pojazdu po zadanej trajektorii, co jest szczególnie przydatne w warunkach monitoringu ściśle określonych obszarów dna morskiego. Przykładowo:

- w przypadku monitoringu rurociągów wykorzystywana byłaby opcja stabilizacji głębokości, dzięki której operator na długim odcinku regulowałby co najwyżej prędkości i kurs pojazdu, dokonując niewielkiej korekty głębokości;
- w przypadku monitoringu wsporników platform wiertniczych i stacjonarnych elektrowni wiatrowych wykorzystywana byłaby opcja stabilizacji kursu, natomiast do operatora należałoby sterowanie głębokością, równoległym przesunięciem pojazdu i sterowanie odległością pojazdu od konstrukcji.



Rys. 1. Konfiguracja pojazdu *MAGIS*, [1]

3. BADANIE ALGORYTMÓW STEROWANIA RUCHEM POJAZDU GŁĘBINOWEGO

Klasyczne algorytmy sterowania stosowane powszechnie w praktyce przemysłowej (PID), albo synteza algorytmu sterowania z wykorzystaniem modelu obiektu są niewystarczające do uzyskania żądanej jakości sterowania lub niemożliwe do zastosowania dla pojazdu głębinowego. Przy syntezie algorytmu sterowania automatycznego, metodami klasycznymi, wymagana jest znajomość modelu matematycznego, reprezentującego jego własności dynamiczne jako obiektu sterowania. Model jest niejednokrotnie bardzo skomplikowany lub w ogóle nieznany, [5, 6], a jego współczynniki są trudne do określenia w trakcie prostych prób. Tak jest również w przypadku pojazdu głębinowego *MAGIS*. Równania ruchu pojazdu głębinowego zawierają około 400 współczynników, zidentyfikowanie ich podczas prób basenowych jest praktycznie niemożliwe, [2].

Główne trudności i ograniczenia które należy brać pod uwagę przy projektowaniu układu regulacji dla pojazdów głębinowych typu ROV to:

- warunki techniczne realizacji (niemożność wykonania wszystkich ruchów uwzględnionych w modelu matematycznym) – można oczywiście uprościć model do płaszczyzny ruchu pojazdu, ale każde uproszczenie zmniejsza wartość użytkową modelu,
- warunki ekonomiczne – koszty badań przewyższają cenę pojazdu podwodnego.

Tabela 1.

Charakterystyka techniczna pojazdu głębinowego MAGIS

Lp	Wyszczególnienie	Miara	Wartość
1	Masa	[kg]	120
2	Wymiary	[mm]	2250x760x600 mm
3	Różnica wysokości środków wyporu i ciężkości	[mm]	50
3	Głębokość robocza	[m]	do 400
4	Prędkość maksymalna	[m/s]	2,5
5	Kształt kadłuba, konstrukcja	-	wrzeciono, szkielet – płyty aluminiowe, pojemniki ciśnieniowe – PCV, pływaki – styrodur laminowany
6	Pędniki, konfiguracja	-	2 wzdłużne, 2 poprzeczne, 2 pionowe
7	Zasilanie	-	3x400 V/50Hz
8	Wyposażenie	-	kamera TV kolorowej i 2 reflektory z mechanizmem uchylnym, kamera TV czarno-białej nieruchoma, aparat fotograficzny, lampa błyskowa, dwufunkcyjny manipulator (uchwyt, obrót), nadajnik hydroakustyczny, kompas, głębokościomierz ciśnieniowy, sonda pomiarowa parametrów fizyko-chemicznych wody

Kolejnymi utrudnieniami procesu projektowania algorytmu sterowania automatycznego metodami klasycznymi w przypadku pojazdu głębinowego są:

- nieliniowości modelu dynamicznego obiektu sterowania tj. współczynniki modelu zależą w sposób nieliniowy od zmiennych stanu, występujących w obiekcie np. prędkości wzdłużnej,
- niestacjonarność obiektu przede wszystkim ze względu na użycie kabloliny, która posiada masę rzędu masy pojazdu,
- nieliniowości statyczne w układzie wykonawczo-nastawczym tj. pędnikach np. ograniczenia mocy pędników (nasycenie) oraz strefy nieczułości,
- zmienny charakter zakłóceń np.: prądy morskie, falowanie, odległość od dna/brzegu itp.

Szczegółowy zakres prac badawczych obejmuje opracowanie i przebadanie szeregu algorytmów sterowania w wybranych torach (np.: sterowania kursem, głębokością) pod kątem jakości działania i przydatności dla pojazdów typu ROV. Przewiduje się realizację następujących zadań badawczych:

- opracowanie struktury sterownika rozmytego wygodnej do implementacji dla sterownika PLC (ang. Programmable Logic Controller – do wstępnego nastrojenia algorytmu rozmytego wystarczy zaprojektowanie odpowiednich reguł lingwistycznych, odpowiadających zebranemu doświadczeniu przez operatora ludzkiego; sterownik rozmyty musi mieć dokładnie określone: funkcje przynależności, reguły inferencyjne oraz algorytm defuzyfikacji);
- przebadanie możliwości zastosowania reguły MIT (adaptacyjna reguła korekcji parametrów regulatora on-line – w trakcie procesu regulacji) dla sterownika Mamdaniego, adaptacja parametrów sterownika będzie polegać na zmianie położenia funkcji przynależności;
- przebadanie neuronowo-rozmytej struktury regulatora MRAC (ang. Model Reference Adaptive Controller) z możliwością samonastrojania/adaptacji;
- implementację w/w struktury dla przewidzianego sterownika PLC tj. dla ograniczonych zasobów pamięci programu, danych i szybkości jednostki centralnej;
- opracowanie (ewentualnie wybranie spośród znanych) metody identyfikacji obiektu w otoczeniu punktu pracy wygodnej do implementacji dla sterownika PLC zdolnej do pracy w trybie on-line;
- wykorzystanie metody identyfikacji do stworzenia samonastrającego regulatora rozmytego pracującego w strukturze typu MIAC (ang. Model Identification Adaptive Controllers);
- zastosowanie filtrów Kalmana do odtwarzania stanu obiektu i filtracji torów pomiarowych, przebadanie możliwości zastosowanie ogólniejszych struktur jak ukryte łańcuchy Markowa (ang. HMM) czy filtracja bayesowska;
- analizę jakości uzyskanych struktur układów regulacji pod kątem przydatności w pojazdach głębinowych ROV.

Zaplanowano wykorzystanie algorytmów sterowania o strukturze rozmytej, ponieważ ułatwiają one proces ich projektowania na etapie doboru nastaw optymalnych ze względu na stabilność i jakość. Algorytm rozmyty nie wymaga znajomości modelu matematycznego, którego współczynniki określane podczas prób modelowych są niepewne (subiektywne i obciążone błędami). Do nastrojenia algorytmu rozmytego wystarczy często zaprojektowanie odpowiednich reguł lingwistycznych, odpowiadających zebranemu doświadczeniu przez operatora ludzkiego. Pewnym praktycznym problemem występującym w sterownikach rozmytych jest istnienie dużej liczby stopni swobody. Poprzez dodanie mechanizmu korekcji parametrów planuje się uzyskać zdolność do adaptacji w warunkach dużej zmienności sygnałów zakłócających i parametrów obiektu.

Element przypadkowości w syntezy algorytmów rozmytych stanowi kolejny problem do rozwiązania w ramach badań. Jednym z rozwiązań może być

wprowadzenie nauczania współczynników analogicznie do algorytmu wstecznej propagacji błędu prowadzonego z nadzorem (nauczanie na podstawie danych z regulatora referencyjnego lub tworzonego on-line modelu obiektu-nauczyciela) wyklucza element przypadkowości w procesie syntezy algorytmu sterowania i zbliża projektanta do rozwiązania optymalnego. Poglądowość i jasność lingwistycznych reguł algorytmu rozmytego zostaje w ten sposób powiązana ze zdolnością uczenia właściwą dla sztucznych sieci neuronowych SSN.

Należy zaznaczyć, że ogólne struktury czy techniki takie jak sterownik rozmyty Mamdaniego czy reguła MIT mimo, że są opisane dobrze w literaturze, wymagają w praktyce wykonania szeregu badań i testów dla konkretnego obiektu zwłaszcza tak złożonego jak ROV. Ponadto zastosowanie reguły MIT do sterownika Mamdaniego nie jest znane w literaturze.

Przygotowanie pojazdu głębinowego MAGIS do badań wymaga wykonania prac przygotowawczych o charakterze projektowym w celu wytworzenia oryginalnej aparatury badawczej, obejmującej prototyp platformy wykonawczej algorytmów sterowania, stację operatorską i oprogramowanie typu Human Machine Interface dla stacji operatorskiej. Stworzenie platformy sprawi, że samo testowanie i weryfikacja algorytmów będzie względnie łatwe dzięki zastosowaniu szybkiego prototypowania algorytmów sterowania, dedykowanych sterownikowi PLC zainstalowanemu na pokładzie pojazdu głębinowego. Przewiduje się praktyczną weryfikację jakości algorytmów sterowania kursem i głębokością w trakcie prób basenowych i w akwenu poligonowym.

PODSUMOWANIE

Wspieranie rozwoju automatyki i sterowania w zakresie zastosowań w technice głębinowej leży w interesie Polski, a szczególnie w obliczu intensywnego rozwoju w Bałtyku infrastruktury do wydobywania i transportu ropy i gazu oraz ekologicznych źródeł energii.

Realizacja badań umożliwi wspomaganie operatora pojazdu głębinowego typu ROV w następujących zadaniach praktycznych:

- w transporcie morskim i śródlądowym – inspekcja i monitoring stanu nabrzeży, basenów portowych i torów wodnych, podwodnych części jednostek pływających i ich układów napędowych,
- w przemyśle stoczniowym – inspekcja i monitoring stanu budowli stoczniowych oraz stanu budowanych i remontowanych statków w warunkach planowanych remontów oraz stanach awaryjnych,
- w budownictwie hydrotechnicznym – inspekcja i monitoring zapór wodnych, obiektów hydrotechnicznych,
- w ratownictwie śródlądowym i morskim – monitoring zatopionych jednostek i stanów awaryjnych jednostek pływających,
- we wspomaganii działań ekip nurkowych,
- w ochronie środowiska naturalnego – monitoring stanu środowiska wodnego poprzez analizę parametrów fizykochemicznych wody, pobór próbek wody i osadów dennych.

Z praktycznego punktu widzenia opracowany system sterowania ma prowadzić do:

- zwolnienia operatora z konieczności dozoru w założonym punkcie pracy po sprowadzeniu pojazdu z punktu wyjściowego do założonego – stabilizacja i/lub regulacja programowa kursu i głębokości;

- automatycznego doprowadzania pojazdu na zadaną głębokość i utrzymywanie go na niej pomimo oddziaływania zakłóceń – stabilizacja i/lub regulacja programowa głębokości przy manualnym sterowaniu kursem;
- automatycznego doprowadzania pojazdu na zadany kurs i utrzymywanie go na kursie (w ruchu wzdłużnym lub na postoju pomimo oddziaływania zakłóceń) – stabilizacja i/lub regulacja programowa kursu przy manualnym sterowaniu.

LITERATURA

1. Graczyk T.: Zagadnienia projektowania na przykładzie bezzałogowych pojazdów głębinowych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2008, Nr 421 Rozprawy, ISSN 0551-6528, ISBN 978-83-7143-375-7, Wydanie I.
2. Jaszczak S.: Zastosowanie metod sztucznej inteligencji w projektowaniu cyfrowego sterownika kursu pojazdu podwodnego, rozprawa doktorska, Politechnika Szczecińska, Szczecin 2001.
3. Matejski M.: Metoda opracowania i weryfikacji modelu ruchu bezzałogowego pojazdu podwodnego w płaszczyźnie pionowej w ograniczonych warunkach eksperymentalnych, rozprawa doktorska, Politechnika Szczecińska, 2006 r.
4. Matejski M., Graczyk T.: Creation of models of the ROV movement in limited experimental conditions applying fuzzy logic technique, proc. of the 7th International Conference on Marine Science and Technology Black Sea 2004, Scientific and Technical Unions - Varna, Technical University of Varna, Black Sea Technology Company PLC, Bulgarian Academy of Sciences, Varna, 7-9 October 2004, s. 38-43.
5. Piegat A. : Modelowanie i sterowanie rozmyte, EXIT, Warszawa 2003.
6. Rojas I., Pomares H., Gonzalez J. , Herrera L.J., Guillen A., Rojas F., Valenzuela O.: Adaptive fuzzy controller: Application to the control of the temperature of a dynamic room in real time, Fuzzy Sets and Systems, 157, pp. 2241 – 2258, 2006.
7. Skórski W., Graczyk T., Matejski M.: Universal Control System of a multipurpose underwater vehicle, proc. of the Sixth International Conference on Marine Science and Technology Black Sea 2002, Federation of the Scientific and Technical Unions in Bulgaria, Black Sea Technology Company PLC, Union of Scientists, Varna, 10-12 October 2002, s. 170-174.

Autorzy:

dr hab. inż. Tadeusz Graczyk,

Adiunkt na Wydziale techniki Morskiej ZUT. Technika głębinowa, projektowanie i budowa pojazdów głębinowych, technologia budowy okrętów. Towarzystwo Okrętowców Polskich „Korab”, Society of Underwater Technology. Dwa zaprojektowane i zbudowane systemy monitoringu głębinowego, projekty pojazdów głębinowych, granty Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

dr inż. Sławomir Jaszczak,

adiunkt na Wydziale Informatyki ZUT. Badania w zakresie sterowania pojazdami głębinowymi z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji. Szybkie prototypowanie algorytmów sterowania złożonych algorytmów sterowania dyskretnego i cyfrowego, wykorzystujących metody sztucznej inteligencji na platformie wykonawczej PLC.

dr inż. Mariusz Matejski,

adiunkt na Wydziale Techniki Morskiej ZUT. Technika głębinowa, budowa i eksploatacja pojazdów głębinowych, projektowanie, budowa i eksploatacja siłowni okrętowych, transport paliw ciekłych i gazowych. Dwa zbudowane i eksploatowane systemy monitoringu

głębinowego, projekty pojazdów głębinowych, zastosowanie sztucznej inteligencji w systemie sterowania pojazdem.