

P. Szymak

## **METODY REGULACJI KĄTA PRZEGŁĘBIENIA POJAZDU PODWODNEGO TRANSPORTUJĄCEGO ŁADUNEK**

*W przypadku wykorzystania pojazdu podwodnego do przenoszenia różnego rodzaju ładunków można zaobserwować efekt niepożądanego przegłębienia robota, co ma niekorzystny wpływ na proces sterowania jego ruchem. W referacie przedstawiono wyniki działania konwencjonalnych i rozmytych regulatorów kąta przegłębienia pojazdu podwodnego, dostrajanych przy wykorzystaniu metod klasycznych oraz metod sztucznej inteligencji. Prace realizowano w Instytucie Podstaw Techniki Wydziału Mechaniczno-Elektrycznego Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni.*

**słowa kluczowe:** *bezzałogowy pojazd podwodny, sterowanie, metody sztucznej inteligencji*

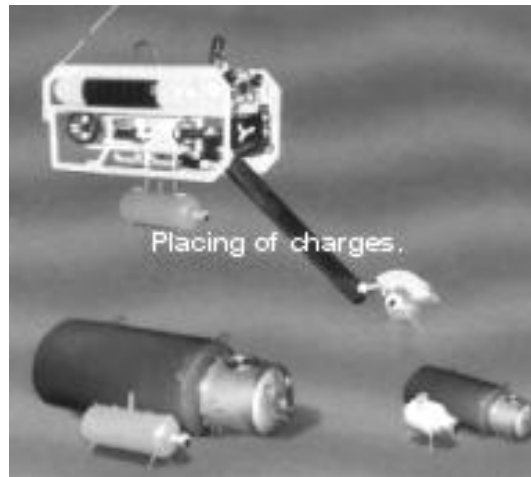
## **THE METHODS OF TRIM CONTROL OF AN UNDERWATER VEHICLE TRANSFERING A LOAD**

*In the case of using an underwater vehicle to transfer different kind of loads, an effect of undesirable robot's trim might be observed, which has disadvantageous influence on a control process of its movement. In the paper, results of action of conventional and fuzzy underwater vehicle's trim controllers, tuned with the assistance of classical and artificial intelligence methods have been presented. Researches were carried out in The Electrotechnical and Electronic Department, The Naval University in Gdynia.*

**keywords:** *unmanned underwater vehicle, control, artificial intelligence methods*

### **WSTĘP**

W ostatnim czasie obserwuje się wzrost zainteresowania w zakresie wykorzystywania pojazdów podwodnych do wykonywania różnego rodzaju inspekcji obiektów podwodnych. Jednym z zadań podwodnej inspekcji realizowanej w Marynarce Wojennej przez zdalnie sterowane pojazdy podwodne jest misja przeciwwminowa (rys. 1).



rys. 1. Zdalnie sterowany pojazd podwodny typu Ukwiat przenoszący ładunki niszczące (zdjęcie z <http://www.underwater.pg.gda.pl/>)

Zdalnie sterowany pojazd (z ang. *Remotely Operated Vehicle*) jest robotem podwodnym, którego zasilanie i sterowanie przebiega poprzez kablolinę zwaną pępowiną z pokładu jednostki pływającej lub stacjonarnie z brzegu. Natomiast proces unieszkodliwiania obiektów minopodobnych polega na: wstępnym ich rozpoznaniu przez okrętowe systemy hydrolokacyjne, a następnie szczegółowej identyfikacji przeprowadzonej przy zastosowaniu wyposażenia technicznego zamontowanego na pojeździe oraz na unieszkodliwianiu wykrytego i zidentyfikowanego obiektu przy wykorzystaniu ładunku niszczonego przenoszonego przez pojazd podwodny.

W realizacji różnego rodzaju zadań z udziałem robota podwodnego istotnym zagadnieniem jest dokładne sterowanie jego ruchem, co warunkuje powodzenie całej misji. Jednym z parametrów ruchu wymagającym stabilizacji w przypadku oddziaływania na pojazd podwodny przenoszonego ładunku jest kąt obrotu robota względem osi poprzecznej zwany przegłębieniem. Wartość niekorzystnego kąta przegłębienia zależy od kilku czynników, a mianowicie: stosunku masy ładunku względem masy pojazdu, położenia środka masy ładunku względem środka masy robota oraz wielkości tłumienia hydrodynamicznego uzależnionego od opływu ładunku. Efekt przegłębienia robota ma niepożądany wpływ na proces jego sterowania, przede wszystkim proces regulacji głębokości zanurzenia, tzn. zwiększanie kąta przegłębienia zmniejsza możliwości regulacji głębokości zanurzenia.

W dalszej części artykułu przedstawiony zostanie model matematyczny pojazdu podwodnego uwzględniający oddziaływanie przenoszonego ładunku, a następnie zastosowane dla potrzeb regulacji kąta przegłębienia metody konwencjonalne i metody sztucznej inteligencji oraz wybrane wyniki badań symulacyjnych i wnioski z przeprowadzonych badań.

## **1. MODEL MATEMATYCZNY POJAZDU PODWODNEGO TRANSPORTUJĄCEGO ŁADUNEK**

Dla opisu ruchu pojazdu podwodnego w 6-ściu stopniach swobody przyjęto oznaczenia wielkości liniowych i kątowych ruchu pojazdu (tab. 1) zgodnie z notacją SNAME (ang. *The Society of Naval Architects and Marine Engineers*) [4].

Tabela 1.

Opis poszczególnych stopni swobody pojazdu podwodnego

L.p. stopnia swobody	Opis ruchu	Oznaczenia		
		sił i momentów	prędkości liniowych i kątowych	współrzędnych i kątów Eulera
1	Ruch w kierunku osi $x_o$ (od rufy do dziobu): <i>kołysanie postępowe</i> (ang. <i>surge</i> )	$X$	$u$	$x$
2	Ruch w kierunku osi $y_o$ (ku prawej burcie): <i>kołysanie burtowe</i> (ang. <i>sway</i> )	$Y$	$v$	$y$
3	Ruch w kierunku osi $z_o$ (od góry do dołu): <i>zanurzanie</i> (ang. <i>heave</i> )	$Z$	$w$	$z$
4	Obrót wokół osi $x_o$ : <i>kołysanie boczne</i> (ang. <i>roll</i> )	$K$	$p$	$\phi$
5	Obrót wokół osi $y_o$ : <i>kiwanie</i> (ang. <i>pitch</i> )	$M$	$q$	$\theta$
6	Obrót wokół osi $z_o$ : <i>myszgowanie</i> (ang. <i>yaw</i> )	$N$	$r$	$\psi$

Dla analizy ruchu pojazdu podwodnego przyjęto dwa układy odniesienia:

- 1) ruchomy układ współrzędnych  $x_o y_o z_o$  związany z obiektem podwodnym,
- 2) nieruchomy układ współrzędnych  $xyz$  związany z Ziemią [2].

Początek ruchomego układu współrzędnych  $O$  odpowiada zazwyczaj środkowi ciężkości pojazdu, natomiast jego osie zdefiniowane są jako:

- $x_o$  – oś wzdłużna skierowana od rufy do dziobu,
- $y_o$  – oś poprzeczna skierowana na prawą burtę,
- $z_o$  – oś prostopadła skierowana od góry do dna.

Zmiany położenia ruchomego układu współrzędnych  $x_o y_o z_o$  opisywane są względem przyjętego układu współrzędnych  $xyz$ , związanego z Ziemią. Ponieważ obiekt porusza się ze stosunkowo niewielką prędkością, stąd też pomija się przyspieszenie punktów na powierzchni Ziemi i układ  $xyz$  rozważa się jako nieruchomy. Daje to możliwość opisu położenia pojazdu podwodnego w przestrzeni względem nieruchomego układu  $xyz$  oraz opisu jego prędkości liniowych i kątowych względem ruchomego układu współrzędnych  $x_o y_o z_o$ .

#### Równania ruchu pojazdu podwodnego

Dla potrzeb przeprowadzenia badań symulacyjnych przyjęto model matematyczny ruchu pojazdu podwodnego o 6-ciu stopniach swobody w dwóch układach odniesienia, czyli w układzie nieruchomym związanym z Ziemią oraz w układzie ruchomym związanym z pojazdem [7].

Do opisu ruchu pojazdu podwodnego wykorzystano tzw. równania ruchu, które w postaci macierzowej przyjmują następującą postać [2]:

$$M\dot{v} + D(v)v + g(\eta) + U(v)v = \tau \quad (1)$$

gdzie:

- $v$  – wektor prędkości liniowych i kątowych w układzie ruchomym, czyli  $v=[u, v, w, p, q, r]$ ,
- $\eta$  – wektor współrzędnych pozycji pojazdu podwodnego oraz kątów Eulera w układzie związanym z Ziemią, czyli  $\eta=[x, y, z, \phi, \theta, \psi]$ ,
- $M$  – macierz inercji (równa sumie macierzy ciała sztywnego i mas towarzyszących),
- $D(v)$  – macierz tłumienia hydrodynamicznego,

$g(\eta)$  – macierz sił przywracających (siły ciężkości i siły wyporu),  
 $U(\nu)$  – macierz tłumienia generowanego przez kablolinę,  
 $\tau$  – wektor sił i momentów oddziałujących na pojazd, czyli  $\tau=[X, Y, Z, K, M, N]^T$ .

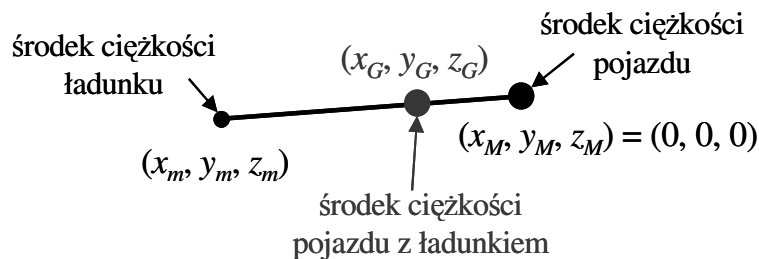
Dla dalszej analizy modelu zespołu okrętowego pojazd podwodny – ładunek istotne jest przedstawienie otrzymanej w wyniku obliczeń i przekształceń macierzy sił przywracających  $g(\eta)$  [8], czyli:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (P - B) \cdot \sin \theta \\ (P - B) \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi \\ -(P - B) \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi \\ (z_G \cdot P + y_B \cdot B) \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi - (y_G \cdot P + z_B \cdot B) \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi \\ -(z_G \cdot P + z_B \cdot B) \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi + (x_G \cdot P + x_B \cdot B) \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie:  $P$  – ciężar pojazdu równy iloczynowi jego masy i przyspieszenia ziemskiego,  $B$  – wypór pojazdu równy iloczynowi wypartej masy wody i przyspieszenia ziemskiego,  $x_G, y_G, z_G$  – współrzędne środka ciężkości,  $x_B, y_B, z_B$  – współrzędne środka wyporu.

#### Wpływ oddziaływania ładunku na ruch pojazdu podwodnego

Przenoszony przez pojazd podwodny ładunek zamodelowany został jako punkt materialny o określonej masie  $m$ , którego środek ciężkości jest przesunięty względem środka ciężkości pojazdu o odległość  $[x_m, y_m, z_m]$ . W wyniku oddziaływania ładunku na pojazd podwodny przesunięciu ulega jego środek ciężkości (rys. 2).



rys. 2. Położenie środka ciężkości zespołu okrętowego pojazd podwodny-ładunek

Wypadkowe położenie środka ciężkości zespołu okrętowego obliczyć można z następującej zależności [8]:

$$\begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} \frac{m}{M + m} \quad (3)$$

gdzie:  $M$  – masa pojazdu podwodnego,  $m$  – masa przeniesionego ładunku.

Na podstawie przedstawionych zależności 1, 2 i 3 można zauważyć, iż zmianie położenia środka ciężkości zespołu okrętowego towarzyszyć będzie zmiana wartości elementów macierzy sił przywracających:  $g_{41}$  i  $g_{51}$ . W efekcie końcowym da to zmianę wartości momentów sił względem osi  $x$  i  $y$ , odpowiedzialnych odpowiednio za przechył i

prześwietlenie pojazdu. Korzystając z zależności 3 obliczyć można również wypadkowe położenie środka wyporu [6].

### 3. KONWENCJONALNE METODY REGULACJI KĄTA PRZEGLĘBIENIA

Regulatory konwencjonalne dzieli się ze względu na sposób działania oraz kształtowanie sygnału wyjściowego na: proporcjonalne typu P, proporcjonalno-różniczkujące typu PD i proporcjonalno-całkujące typu PI [7].

Regulator typu P jest najprostszym regulatorem, cechującym się stosunkowo dużą szybkością działania, jednakże małą precyzją regulacji. Dodanie do działania proporcjonalnego regulatora typu P działania całkującego I powoduje niwelację błędu w stanie ustalonym. Poprawny dobór nastaw regulatora PI powoduje, że stany przejściowe są zbliżone do występujących w układzie regulacji z regulatorem P, a w stanie ustalonym błąd zostaje zlikwidowany dzięki działaniu całkującemu. Regulatory PI zapewniają dobrą regulację przy powolnych zakłóceniach. Natomiast działanie członu różniczkującego regulatora PD zapewnia skuteczniejsze tłumienie zakłóceń o wyższych częstotliwościach i szybką interwencję w przypadku pojawiającego się zakłócenia. Regulator PD, podobnie jak regulator P, podczas pracy z obiektami inercyjnymi nie jest w stanie sprowadzić błędu ustalonego do zera, zapewnia on jednak dobrą regulację w zakresie szerszego pasma częstotliwości zakłóceń niż regulator PI. Regulatory PD skutecznie zmniejszają błędy przejściowe dzięki temu, że działanie różniczkujące powoduje zwiększenie współczynnika wzmocnienia w początkowym momencie. W układach sterowania z regulatorem PD otrzymuje się krótkie czasy regulacji.

Regulator typu PID stosuje się w przypadku, gdy wymagana jest większa skuteczność reakcji na zmianę zakłóceń niż prostszych regulatorów P, PI lub PD. Zapewnia stabilniejszą pracę układu regulacji automatycznej. Tego typu regulatory stosuje się do obiektów poddanych dużym i gwałtownym zmianom zakłóceń.

Działanie regulatora konwencjonalnego typu PID opisane jest następującą zależnością w postaci dyskretniej:

$$u(k) = K_p \cdot \left( e(k) + \frac{T_p}{T_i} \cdot s(k) + \frac{T_d}{T_p} \cdot \Delta e(k) \right) \quad (4)$$

gdzie:

- $u(k)$  – sygnał sterujący w  $k$ -tym kroku symulacji,
- $K_p$  – współczynnik wzmocnienia,
- $e(k)$  – uchyb regulacji w  $k$ -tym kroku symulacji,
- $T_i$  – stała czasu całkowania,
- $T_d$  – stała czasu różniczkowania regulatora,
- $T_p$  – czas próbkowania,
- $s(k)$  – suma uchybów regulacji w  $k$ -tym kroku symulacji równa sumie uchybów regulacji od  $i = 0$  do  $k$ -tego kroku symulacji, czyli  $e(0)+e(1)+\dots+e(k)$ ,
- $\Delta e(k)$  – zmiana uchybu regulacji w  $k$ -tym kroku symulacji równa różnicy uchybów regulacji  $e(k)$  i  $e(k-1)$ .

Dla prawidłowego działania tego typu regulatora istnieje potrzeba ustalenia wartości jego parametrów takich, jak współczynnik wzmocnienia, stała czasu całkowania i różniczkowania regulatora oraz czas próbkowania. Proces znajdowania ww. parametrów nazywa się dostrajaniem nastaw regulatora. W celu dostrojenia parametrów regulatora PID wykorzystano następujące metody:

- 1) metody konwencjonalne: Zieglera-Nicholsa (na podstawie odpowiedzi układu regulacji na skok jednostkowy) i doświadczalnie przy wykorzystaniu wskaźników jakości sterowania bezpośrednich i/lub całkowych,
- 2) metodę optymalizacji losowej, polegającą na stochastycznym przeszukiwaniu przestrzeni rozważań w celu znalezienia ekstremum globalnego, opartą na prawach doboru naturalnego z dziedziny genetyki, tzw. algorytmy genetyczne.

#### Metoda Zieglera-Nicholsa

W przypadku dysponowania charakterystyką skokową, na przebiegu odpowiedzi obiektu na skok jednostkowy wykreśla się styczną w punkcie o największym stopniu nachylenia, co daje możliwość wyznaczenia stałej czasu opóźnienia  $T_{osc}$  i tangensa kąta nachylenia stycznej  $K_{kr}$ . Na podstawie wyznaczonych parametrów oblicza się dla konkretnego typu regulatora (P, PI, PID) jego parametry zgodnie z podanymi przez Zieglera i Nicholasa zależnościami [6].

Tabela 2.

Parametry regulatora PID wg. Zieglera-Nicholsa

TYP REGULATORA	WARTOŚCI NASTAW REGULATORA		
	$k_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5 K_{kr}$		
PI	$0,45 K_{kr}$	$0,83 T_{osc}$	
PID	$0,6 K_{kr}$	$0,5 T_{osc}$	$0,12 T_{osc}$

Wartości nastaw regulatorów (np. tab. 2) można starać się dobrać doświadczalnie przy wykorzystaniu wskaźników jakości sterowania: bezpośrednich i/lub całkowych. W zależności od charakteru przebiegu regulowanego parametru, tzn. kąta przegłębienia zespołu okrętowego, można zwiększać lub zmniejszać wpływ poszczególnych członów: proporcjonalnego, różniczkującego i całkującego. Przedstawiony sposób dostrajania nastaw regulatora wymaga doświadczenia projektanta oraz przeprowadzenia wielu prób symulacyjnych, stwarza jednakże możliwość otrzymania regulatora z lepszymi nastawami.

Otrzymane wartości dostrojonych nastaw regulatora przegłębienia przy wykorzystaniu metod konwencjonalnych zostały zebrane w tabeli 3 i 4.

Tabela 3 .

Wartości nastaw regulatorów przegłębienia wg. Zieglera-Nicholsa

TYP REGULATORA	WARTOŚCI NASTAW REGULATORA				
	$k_p$ [ ]	$T_i$ [s]	$T_p / T_i$ [ ]	$T_d$ [s]	$T_d / T_p$ [ ]
P	35	–	–	–	–
PI	31,5	1,66	0,0334	–	–
PID	42	1	0,0555	0,24	0,0133

Tabela 4.

Wartości nastaw regulatora przegłębienia dostrajane doświadczalnie

TYP REGULATORA	WARTOŚCI NASTAW REGULATORA		
	$k_p$ [ ]	$T_p / T_i$ [ ]	$T_d / T_p$ [ ]
PID	25	0,48	2,4

Metoda algorytmów genetycznych

Algorytmy genetyczne są częścią obliczeń ewolucyjnych, czyli rodziną modeli obliczeniowych inspirowanych przez darwinowską teorię ewolucji, tzn. rozwiązanie problemu rozwiązywanego za pomocą algorytmów genetycznych jest ewoluowane. Tego typu algorytmy kodują potencjalne rozwiązanie postawionego problemu na prostym chromosomie jako strukturze danych i zastosowują operatory rekombinacji na tych strukturach również po to, aby zachować informacje krytyczne. Algorytmy genetyczne są często przedstawiane jako funkcje optymalizacji, chociaż zakres problemów, do których algorytmy genetyczne są stosowane jest znacznie szerszy [2].

Implementacja algorytmu genetycznego rozpoczyna się od populacji losowych chromosomów. Następnie zapisane w chromosomach rozwiązania problemu są oceniane i w ten sposób wyłaniane najlepsze rozwiązania, które tym samym osiągają większe szanse na „reprodukcję” niż te chromosomy, które są ocenione jako gorsze rozwiązania. W szerszym użyciu terminu, algorytm genetyczny jest jakimkolwiek modelem bazującym na populacji, który używa operatorów selekcji i rekombinacji, aby stworzyć nowe przykładowe punkty w przestrzeni poszukiwań.

Dla realizacji celu strojenia regulatora PID przy pomocy algorytmów genetycznych wykorzystano *Genetic Algorithms for Optimization Toolbox* (GAOT) – wersja dla Matlaba 5, zrealizowany w North Carolina State University przez Christopher R. Houck, Jerery A. Jones oraz Michael G. Kay. Pakiet oprogramowania GAOT został udostępniony na zasadach General Public License, czyli tzw. wolnego oprogramowania.

Przedstawiony problem, z uwagi na konieczność pominięcia dodatkowych operacji jakie byłyby wykonywane na ciągach binarnych, rozwiązywany został przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego wykorzystującego kodowanie bezpośrednie. Obliczenia przeprowadzone zostały dla następujących wartości parametrów algorytmu genetycznego:

- 1) wielkość populacji – 20 chromosomów,
- 2) maksymalna ilość kolejnych generacji – 100,
- 3) zdefiniowana dokładność obliczeń –  $10^{-6}$ ,
- 4) ilość zmiennych w chromosomie – współczynniki regulatora:  $k_p$ ,  $T_i$  i  $T_d$   
(każda wartość zmiennej chromosomu, występującego w algorytmie genetycznym zawierała się w przedziale liczbowym od 0 do 100)
- 5) funkcja selekcji geometrycznej – z prawdopodobieństwem uzyskania rozwiązania w danej generacji równym 0,08,
- 6) funkcja krzyżowania arytmetycznego – z prawdopodobieństwem wystąpienia operacji krzyżowania równym 0,6,
- 7) funkcja mutacji zmiennej – z prawdopodobieństwem uzyskanym z rozkładu Gaussa o wartości średniej równej 0,05.

Dla potrzeb rozwiązania postawionego problemu zaprojektowano funkcję oceny, opisaną zależnością [6]:

$$C(n) = \sum_{i=1}^n |\Delta e(i)| + p_{osc} \sum_{i=1}^n |\Delta e_{pas}(i)| \quad (5)$$

gdzie:

$n$  – liczba wszystkich kroków symulacji,

$C(n)$  – funkcja celu,

$\Delta e(i)$  – zmiana uchybu dla  $i$ -tego kroku symulacji,

$\Delta e_{pas}(i)$  – zmiana uchybu niepożądanego (wywołującego oscylacje) dla  $i$ -tego kroku symulacji,

$p_{osc}$  – współczynnik ważności zmian uchybów niepożądanych w funkcji celu (przyjęto 999).

Otrzymane przy wykorzystaniu algorytmów genetycznych wartości dostrojonych nastaw regulatora przegłębienia PID zostały zebrane w tabeli 5.

Tabela 5.

Wartości nastaw regulatorów przegłębienia PID przy wykorzystaniu algorytmów genetycznych przy różnych wartościach funkcji celu

FUNKCJA CELU	WARTOŚCI NASTAW REGULATORA		
$C(n)$	$k_p$ [ ]	$T_p / T_i$ [ ]	$T_d / T_p$ [ ]
276,8	18	0,5	3,94
275.1	14	0,64	6,35
273.6	4	2,25	23

#### 4. ROZMYTO-NEURONOWA REGULACJA KĄTA PRZEGŁĘBIENIA

W przypadku nieliniowych obiektów sterowania pracujących w środowisku z dużymi zakłóceniami coraz częściej wykorzystuje się metody sztucznej inteligencji, a w szczególności metody logiki rozmytej. Zastosowanie w przetwarzaniu danych logiki rozmytej daje możliwość budowania nieliniowych systemów odpornych na zakłócenia środowiska [1],[7],[8].

Projektowanie algorytmów sterowania rozmytego można podzielić na dwa etapy:

- 1) zbudowanie wstępnej struktury systemu rozmytego:
  - przyjęcie określonej przestrzeni rozważań dla zmiennych wejściowych i wyjściowych,
  - podział przestrzeni rozważań na zbiory rozmyte (rozmywanie),
  - zapisanie reguł wnioskowania rozmytego,
  - przyjęcie określonej metody wyostrażania zmiennych wyjściowych,
- 2) dostrajanie systemu rozmytego, czyli dobór parametrów funkcji przynależności i ewentualna zmiana reguł wnioskowania rozmytego.

W pierwszym etapie projektowania systemu rozmytego istotną rolę odgrywa doświadczenie i intuicja projektanta, decydującego o przyjętej operacji rozmywania i wyostrażania oraz bazie reguł, co wpływa na skuteczność działania sterownika rozmytego. Drugi etap ma postać długotrwałego procesu iteracyjnego, w którym na drodze zmiany parametrów zaprojektowanego systemu i następującej po tym oceny jego zachowania się, dochodzi się do rozwiązania najlepiej spełniającego wymagania użytkownika. W tym przypadku bazuje się na wynikach symulacji komputerowych, a końcowe dostrojenie systemu rozmytego przeprowadzane jest przy wykorzystaniu badań eksperymentalnych na rzeczywistym obiekcie. Drugi etap projektowania algorytmów sterowania rozmytego może być również wspomagany przy wykorzystaniu



innych metod sztucznej inteligencji: sztucznych sieci neuronowych lub algorytmów genetycznych.

Sztuczne sieci neuronowe można traktować jako nowoczesne systemy obliczeniowe, które przetwarzają informacje wzorując się na zjawiskach zachodzących w mózgu człowieka [7]. Na podstawie danych treningowych, opisujących wymuszenie i odpowiedź np. obiektu o nieznaną charakterystykę, sieć neuronowa uczy się wymaganych zachowań i może posłużyć jako model tego obiektu. Zastosowanie właściwości uczenia się sztucznych sieci neuronowych daje możliwość dostrojenia parametrów systemu rozmytego. Powstaje wtedy tzw. sterownik rozmyto-neuronowy (ang. neuro-fuzzy). Do realizacji tego sterownika niezbędny jest zestaw reprezentatywnych danych treningowych, zawierających wymuszenie i oczekiwaną odpowiedź systemu sterowania.

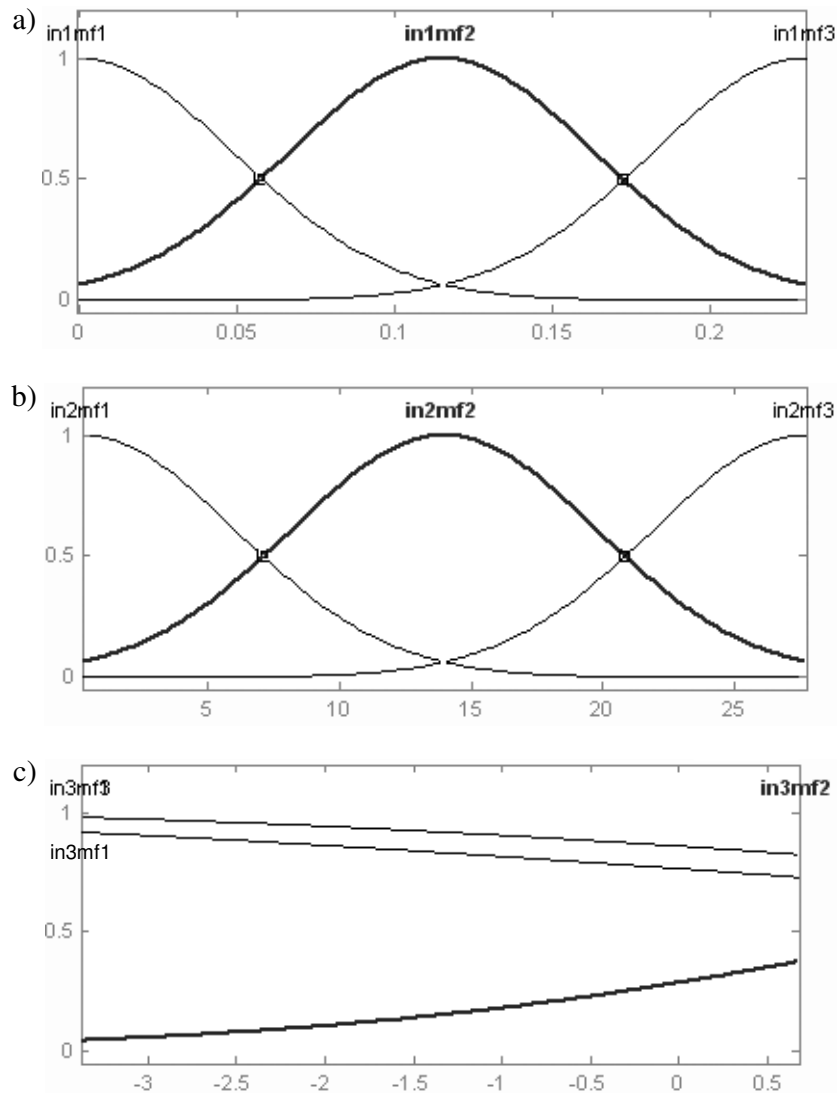
W skomplikowanym obliczeniowo procesie trenowaniu sterownika rozmyto-neuronowego mogą się pojawić następujące problemy:

- 1) popadanie algorytmu uczenia się sztucznej sieci neuronowej w optima lokalne [7]  
Ugrzęźnięcie algorytmu uczenia się w optimum lokalnym daje efekt braku uogólniania przez sieć neuronową jej wyuczonych zachowań na inne dane niż dane treningowe. Dyskwalifikuje to w tym przypadku przydatność sieci do dostrajania parametrów systemu rozmytego, który np. w przypadku sterowania ruchem pojazdu podwodnego w obecności min powinien działać niezawodnie.
- 2) „przekleństwo wielowymiarowości” [1]  
Zjawisko przekleństwa wielowymiarowości polega na tym, iż w miarę zwiększania stopnia podziału przestrzeni rozważań wejściowo-wyjściowych na zbiory rozmyte, zwiększa się liczba reguł rozmytych, a co za tym idzie zwiększeniu ulega architektura sztucznej sieci neuronowej i dodatkowa trudność z jej wytrenowaniem.

Dla potrzeb realizacji sterownika neuro-fuzzy wykorzystano oprogramowanie ANFIS (ang. Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems), wchodzące w skład pakietu Fuzzy Logic Toolbox [5]. Całość oprogramowania pracuje w środowisku Matlab.

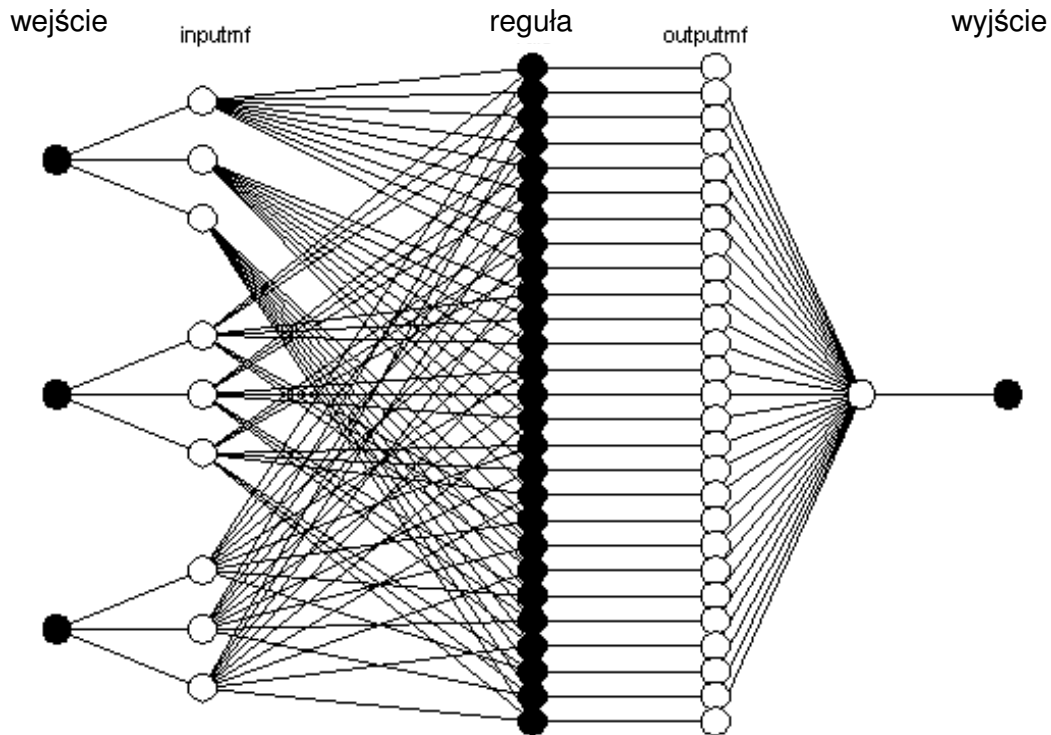
W celu dostrojenia systemu rozmytego przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych istotne jest przygotowanie reprezentatywnych danych treningowych. W realizacji rozmyto-neuronowego regulatora przegłębienia zespołu okrętowego pojazd podwodny - ładunek dane treningowe przygotowano przy wykorzystaniu dostrojonych wcześniej za pomocą algorytmów genetycznych regulatorów PID. Do podziału wejściowej przestrzeni rozważań wykorzystano metodę siatkową. W celu uniknięcia „przekleństwa wielowymiarowości” wyznaczono maksymalny próg podziału zmiennych wejściowych na 3 zbiory rozmyte, co daje liczbę 27 reguł wnioskowania rozmytego. Natomiast w celu dostrajania systemu wnioskowania rozmytego zastosowano zarówno klasyczną metodę propagacji wstecznej, jak i metodę hybrydową.

Otrzymany przy użyciu oprogramowania ANFIS podział przestrzeni rozważań wejściowych regulatora przegłębienia dostrajanego przy zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych ilustruje rysunek 3.



rys. 3. Przestrzeń rozważań wejściowych regulatora przegłębienia rozmyto-neuronowego:  
 a) uchyb  $e_\theta$ , b) suma uchybów  $s_\theta$ , c) zmiana uchybu przegłębienia  $\Delta e_\theta$

Natomiast powstała struktura wnioskowania rozmyto-neuronowego regulatora przegłębienia, składająca się z 27 reguł wnioskowania rozmytego została zobrazowana na rysunku 2.11.



rys. 4. Struktura systemu wnioskowania rozmyto-neuronowego regulatora przegłębienia

Wartości poszczególne wyjść „outputmf”, czyli konkluzji  $i$ -tej implikacji, są funkcją liniową trzech zmiennych, tzn. sygnałów „inputmf” (rys. 4).

Architektura otrzymanego regulatora rozmyto-neuronowego została szerzej przedstawiona w [6].

## 5. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Prezentowane w dalszej części artykułu wyniki badań symulacyjnych zostały przeprowadzone dla ruchu pojazdu podwodnego do przodu przy oddziaływaniu stałego sygnału wymuszającego  $X = 100$  N. Natomiast oddziaływanie ładunku zasymulowano w postaci szklanej kuli o  $m = 10,88$  kg przenoszonej na manipulatorze o długości 0,5 m, który wypiera wodę o masie 4,18 kg [6].

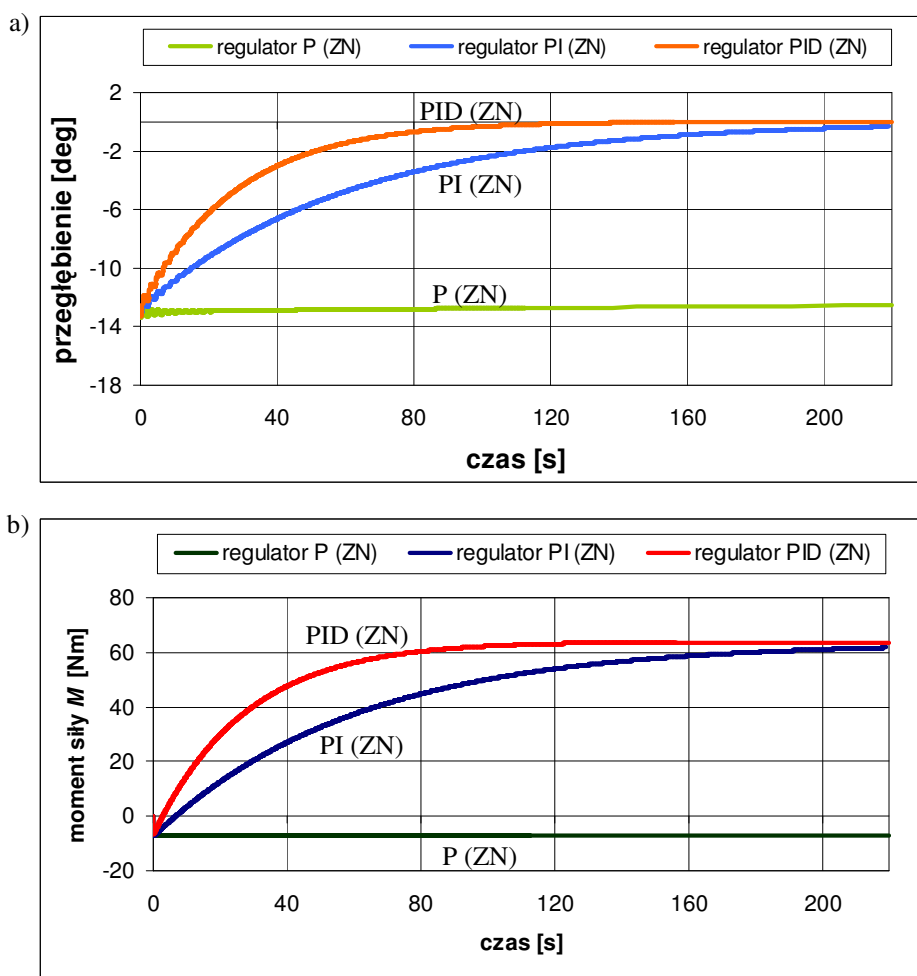
Do oceny pracy poszczególnych regulatorów przyjęto następujące wskaźniki jakości sterowania [7]:

- 1) bezpośrednie wskaźniki jakości, uzyskiwane z przebiegu czasowego zmian przegłębienia:
  - a)  $t_n$  – czas narastania, zdefiniowany jako czas do osiągnięcia 90% oczekiwanej zmiany wielkości regulowanej (od wartości początkowej do wartości zadanej),
  - b)  $t_r$  – czas regulacji, zdefiniowany jako czas, po którym wartość wielkości regulowanej nie odbiega bardziej od wartości zadanej niż o 5% zmiany wielkości regulowanej,
  - c)  $M_r$  – wielkość pierwszego przeregulowania, charakteryzująca oscylacyjność odpowiedzi układu,
- 2) całkowite wskaźniki jakości:

a) wartość średniokwadratowa uchybu przegłębienia  $E_\theta$ , charakteryzująca dokładność regulacji kątem przegłębienia:

$$E_\theta = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (e_\theta)^2 \quad (6)$$

gdzie:  $i = 1, 2, \dots, k$  – liczba kolejnego kroku symulacji,  $e_\theta$  – uchyb przegłębienia.



rys. 5 Symulacja działania regulatorów przegłębienia typu P, PI i PID dostrajanych metodą Zieglera-Nicholsa, przebieg zmian: a) kąta przegłębienia, b) sygnału sterującego

Na rys. 5 zobrazowano wyniki działania regulatorów P, PI i PID dostrajanych metodą Zieglera-Nicholsa. Na podstawie zebranych przebiegów działania różnych regulatorów można zauważyć, iż oddziaływanie ładunku na kąt przegłębienia wymaga przeciwdziałania regulatora typu całkującego (samo oddziaływanie proporcjonalne jest niewystarczające). Poza tym działanie regulatora znacznie przyspiesza oddziaływanie członu różniczkującego, dlatego też najkrótszym czasem regulacji charakteryzuje się regulator PID (tab. 6).

Tabela 6.

Porównanie działania regulatorów przegłębienia dostrajanych różnymi metodami

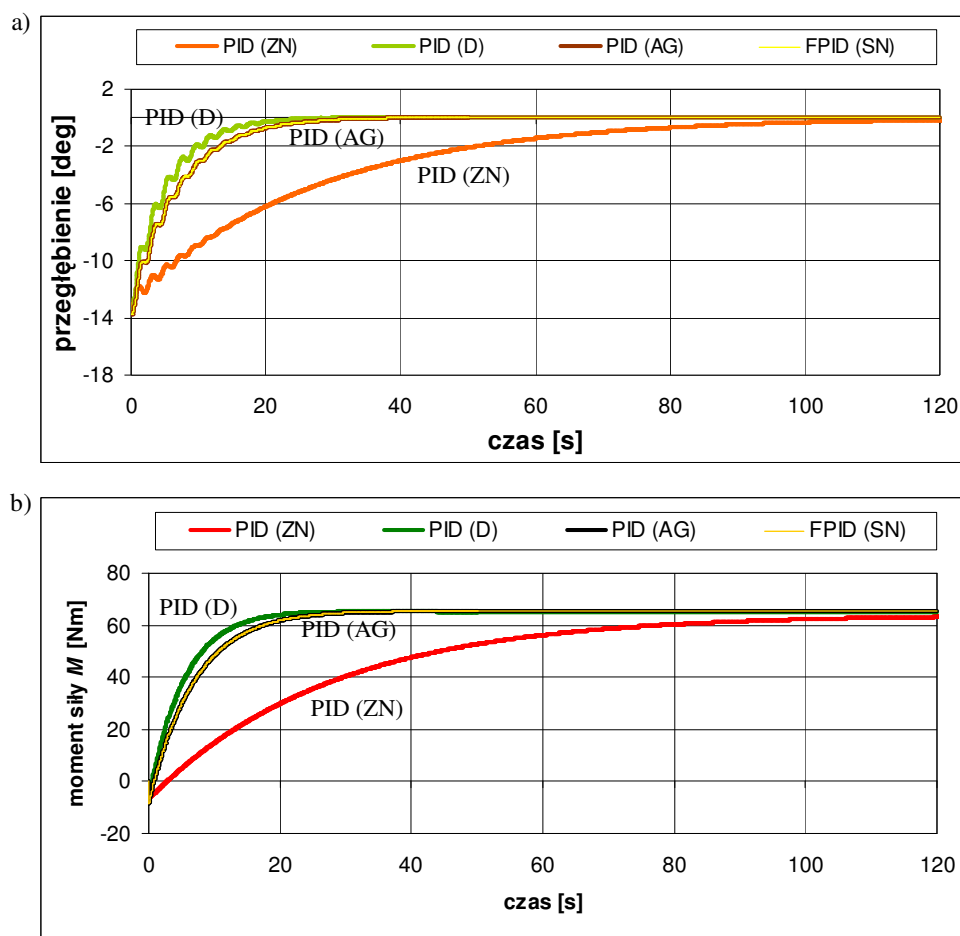
wskaźniki jakości sterowania	regulatory konwencjonalne dostrajane:					regulator rozmyty dostr.
	met. Zieglera-Nicholsa			doświadczalnie typu PID	za pomocą algorytmów genetycz. typu PID	za pomocą sztucznych sieci neuron. typu FPID
	typu P	typu PI	typu PID			
<b>wskaźniki bezpośrednie</b>						
$t_n$ [s]	–	134,95	61,48	11,43	15,66	15,66
$t_r$ [s]	–	176,04	80,05	15,38	20,11	20,11
$M_r$ [deg]	–	–	–	0,02	0,01	0,01
<b>wskaźniki całkowite</b>						
$E_\theta$ [deg <sup>2</sup> ]	164,92	22,64	14,44	7,46	12,75	12,75

Wyniki prób symulacyjnych zebrane na rys. 5 oraz wskaźniki oceny jakościowej zobrazowane w tab. 6 potwierdzają możliwość dostrojenie nastaw regulatora PID przy wykorzystaniu metody Zieglera-Nicholsa.

Na kolejnym rys. 6 zobrazowano wyniki działania regulatorów PID dostrajanych różnymi metodami. Na podstawie prezentowanych przebiegów czasowych można zauważyć, że w wyniku zastosowania innych metod niż klasyczna metoda Zieglera-Nicholsa uzyskuje się regulatory znacznie szybsze, tzn. o znacznie mniejszych czasach narastania i regulacji.

W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych można postawić następujące wnioski:

- 1) regulator PID dostrojony doświadczalnie jest najlepiej działającym regulatorem stabilizacji przegłębienia pojazdu podwodnego przenoszącego ładunek, tzn. charakteryzuje się najlepszymi wskaźnikami jakości sterowania,
- 2) regulatory PID (AG) i FPID (SN) działają ze zbliżoną do najlepszego regulatora, czyli PID (D) jakością sterowania,
- 3) przebiegi zmian kąta przegłębienia dla regulatorów PID (D), PID (AG) i FPID (SN) charakteryzują się nałożonymi oscylacjami; brak jest natomiast wyraźnego pierwszego przeregulowania,
- 4) regulatory PID (AG) oraz FPID (SN) posiadają prawie identyczny przebieg zmian sygnału sterującego - momentu siły  $M$  i parametru regulowanego - kąta przegłębienia, a co za tym idzie takie same wartości wskaźników jakości sterowania; związane jest to z tym, że do strojenia regulatora rozmytego wykorzystano dane treningowe utworzone przy zastosowaniu regulatora PID (AG).



rys. 3 Symulacja stabilizacji przegięcia zespołu okrętowego przy użyciu regulatorów dostrajanych: metodą Zieglera-Nicholsa PID (ZN), doświadczalnie PID (D), za pomocą algorytmów genetycznych PID (AG) oraz regulatora rozmytego strojonego za pomocą sieci neuronowych FPID (SN); przebieg zmian: a) kąta przegięcia, b) momentu siły  $M$

## 6. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych można stwierdzić, iż przy wykorzystaniu zaprezentowanych metod klasycznych i sztucznej inteligencji istnieje możliwość dostrajania nastaw regulatora PID w taki sposób, aby możliwa była stabilizacja kąta przegięcia pojazdu podwodnego przenoszącego ładunek.

Natomiast na podstawie wykonanych prób symulacyjnych trudno jest jednoznacznie stwierdzić, który z regulatorów: konwencjonalny, czy też oparty na metodach logiki rozmytej lepiej rozwiązuje postawiony problem w sensie lepszej jakości sterowania. Wynika to z tego, że dla potrzeb dostrajania regulatora rozmytego przy użyciu sztucznych sieci neuronowych wykorzystano dane treningowe utworzone na podstawie pracy regulatora konwencjonalnego.

Można postawić hipotezę, iż dla lepszych danych treningowych, utworzonych np. przez doświadczonego operatora uzyska się lepiej działający regulator rozmyty.

Brak dostępu do takich danych uniemożliwia na obecnym etapie prac przeprowadzenie stosownych prób.

**LITERATURA:**

1. Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M., „Wprowadzenie do sterowania rozmytego”, Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, Warszawa 1996,
2. Fossen T.I., “Guidance and Control of Ocean Vehicles”, John Wiley & Sons Ltd., 1994.
3. Goldberg D., „Algorytmy genetyczne i ich zastosowania”, WNT, Warszawa 1998.
4. “Nomenclature for Treating the Motion of Submerged Body Through a Fluid”, Technical and Research Bulletin, The Society of Naval Architects and Marine Engineers – SNAME, no. 3 – 47, 1989.
5. Roger Jang, “ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference Systems”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, No. 03, pp 665-685, May 1993.
6. Szymak P., „Sprawozdanie merytoryczne z projektu badawczego własnego nr 0 T00B 037 29”, Wydawnictwo Akademii Marynarki Wojennej, Gdynia 2006.
7. Szymak P., „Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji dla potrzeb sterowania pojazdem podwodnym w inspekcji obiektów oceanotechnicznych”, rozprawa doktorska, Wydawnictwo Akademii Marynarki Wojennej, Gdynia 2004.
8. Szymak P., Małecki J., “Control of the naval unit underwater vehicle – load”, Szczecin University of Technology, Proceedings of 12th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, pp.527-530, Międzyzdroje 2006.

Recenzent: dr hab. inż. Jerzy Garus

Autor: dr inż. Piotr Szymak

Akademia Marynarki Wojennej, Zakład Elektrotechniki i Elektroniki

81 – 103 Gdynia 3

ul. Śmidowicza 69

tel.: +58 626 28 81

e-mail: p.szymak@amw.gdynia.pl