

dr inż. Piotr Szymak
Akademia Marynarki Wojennej

AUTOMATYCZNE STEROWANIE SAMOBIEŻNYM ŁADUNKIEM DO ZWALCZANIA MIN PODWODNYCH PO ZADANYM TORZE

Przeprowadzenie misji zwalczania min podwodnych z wykorzystaniem samobieżnego ładunku wymaga dokładnego sterowania ruchem robota w podwodnym środowisku. W niniejszym artykule przedstawiono system automatycznego sterowania pojazdem podwodnym typu Głuptak, który może wspomagać wykonywanie misji identyfikacji i niszczenia min podwodnych. Dla celu sterowania Głuptakiem rozważano wykorzystanie konwencjonalnych regulatorów typu PD oraz regulatorów wykorzystujących metody sztucznej inteligencji, w szczególności z rozmytym przetwarzaniem danych. Dodatkowo w niniejszym artykule zawarto opis modelu matematycznego samobieżnego ładunku typu Głuptak oraz wybrane wyniki badań symulacyjnych.

AUTOMATIC CONTROL OF SELF PROPELLED CHARGE TO THE AIM OF MINE COUNTER ALONG DESIRED TRAJECTORY

Successful mine counter mission with the assistance of a self propelled charge requires precise control of a robot movement in an underwater environment. In the paper automatic control system of an underwater vehicle called Głuptak has been presented, which can support execution of presented mission. For the purpose of Głuptak's control, it has been considered using of classical controllers PD and artificial intelligence controllers, particularly with fuzzy data processing. Moreover mathematical model of Self propelled Mine Counter Charge SMCC called Głuptak and selected results of numerical research have been inserted.

1. WPROWADZENIE

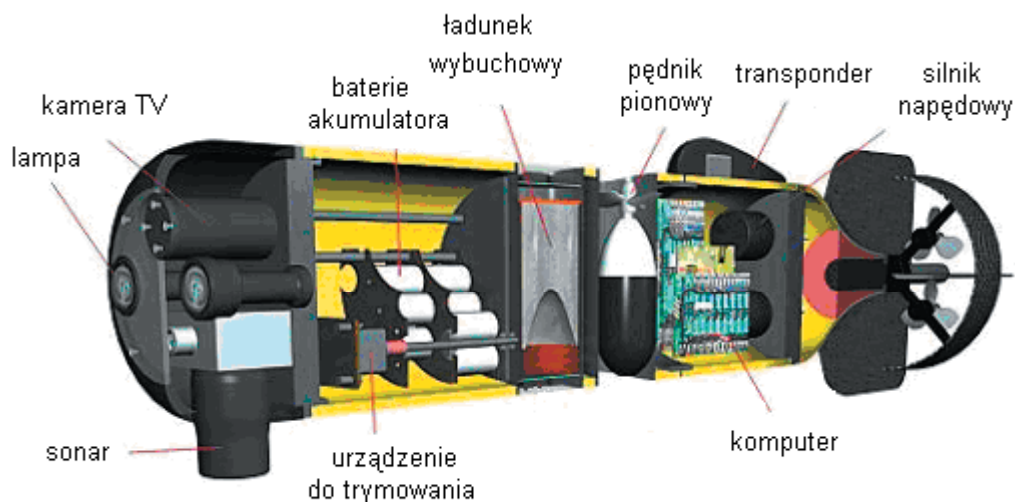
1.1. Charakterystyka misji przeciwminowej

Misja przeciwminowa realizowana z udziałem pojazdów podwodnych polega na: wstępnej identyfikacji obiektów minowych przez okrętowe systemy hydrolokacyjne, szczegółowej identyfikacji przeprowadzonej przy zastosowaniu wyposażenia technicznego zamontowanego na pojeździe oraz na niszczeniu wykrytej miny przy wykorzystaniu ładunku niszczącego przenieszonego przez pojazd podwodny. W realizacji wymienionych zadań z udziałem robota podwodnego istotne jest dokładne sterowanie jego ruchem, warunkujące powodzenie całej misji. Sterowanie poruszaniem się pojazdu podwodnego polega na wyborze strategii ruchu (po zadanych torze, po zadanej trajektorii) oraz na regulacji i stabilizacji parametrów ruchu takich, jak: kąt kursu, współrzędne położenia x , y , z i kąt przegłębienia.

1.2. Samobieżny ładunek do zwalczania min podwodnych typu Głuptak

Samobieżny ładunek do zwalczania min podwodnych typu Głuptak jest zdalnie sterowanym pojazdem podwodnym zaprojektowanym w Katedrze Technologii Podwodnej Politechniki Gdańskiej. Jest to pojazd jednorazowego użytku, zasilany z własnego pokładowego źródła zasilania oraz sterowany zdalnie poprzez kablolinę, wykonaną z cienkiego światłowodu. Dla minimalizacji tłumienia hydrodynamicznego ruchu robota w środowisku podwodnym przyjęto torpedopodobny kształt kadłuba (rys. 1).

Pojazd posiada na pokładzie wyposażenie techniczne do wykrywania i identyfikacji celu (sonar, kamera TV) oraz jego niszczenia (ładunek wybuchowy). Ponadto posiada zainstalowany transponder, który wraz z anteną i dodatkowym wyposażeniem zamontowanymi na pokładzie okrętu stanowi system pozycjonowania podwodnego [3].



Rys. 1. Budowa samobieżnego ładunku do zwalczania min podwodnych typu Głuptak (na podstawie http://www.underwater.pg.gda.pl/01_self.htm)

System napędowy Głuptaka składa się z: 4 pędników poziomych usytuowanych na rufie pojazdu oraz 1 pędnika pionowego usytuowanego w osi środka ciężkości i wyporu. Każdy z pędników jest napędzany przez silniki elektryczne o mocy 50 W. Dodatkowo system pędników jest wspomagany przez urządzenie do trymowania, umożliwiające zmianę środka ciężkości poprzez przesuwanie „specjalnego ciężarka” w wzdłużnej osi symetrii (rys. 1).

Zaprezentowany system napędowy umożliwia poruszanie się w wodzie z maksymalną prędkością 3 m/s i sterowanie ruchem w 4 stopniach swobody (w wzdłużnej x_0 i pionowej z_0 osi symetrii oraz względem poprzecznej osi symetrii y_0 – kąt przegłębienia i względem pionowej osi symetrii – kąt kursowy).

2. MODEL MATEMATYCZNY

2.1. Układy odniesienia

Dla opisu ruchu pojazdu podwodnego w 6-ściu stopniach swobody przyjęto oznaczenia wielkości liniowych i kątowych ruchu pojazdu zgodnie z notacją SNAME (ang. *The Society of Naval Architects and Marine Engineers*) [2].

Natomiast dla analizy ruchu pojazdu podwodnego przyjęto dwa układy odniesienia:

- 1) ruchomy układ współrzędnych $x_0y_0z_0$ związany z obiektem podwodnym
- 2) nieruchomy układ współrzędnych xyz związany z Ziemią [1].

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

- x_0 – oś wzdłużna skierowana od rufy do dziobu
- y_0 – oś poprzeczna skierowana na prawą burtę
- z_0 – oś prostopadła skierowana od góry do dna.

Zmiany położenia ruchomego układu współrzędnych $x_0y_0z_0$ 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 $x_0y_0z_0$.

2.2. Równania ruchu pojazdu podwodnego

W celu zasymulowania ruchu pojazdu podwodnego przyjęto jego model matematyczny o 6 stopniach swobody w dwóch układach odniesienia (podrozdział 2.1).

Do opisu ruchu pojazdu podwodnego wykorzystano tzw. równania ruchu, które w postaci macierzowej przyjmują następującą postać [1]:

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

gdzie:

- v – wektor prędkości liniowych i kątowych w układzie ruchomym, czyli $v=[u, v, w, p, q, r]$
- η – 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)
- τ – wektor sił i momentów oddziaływujących na pojazd, czyli $\tau=[X, Y, Z, K, M, N]^T$.

Ze względu na niewielkie znaczenie liczbowe pominięto w równaniach ruchu pojazdu podwodnego typu Głuptak macierz sił odśrodkowych i dośrodkowych Coriolisa oraz macierz tłumienia generowanego przez kablolinę.

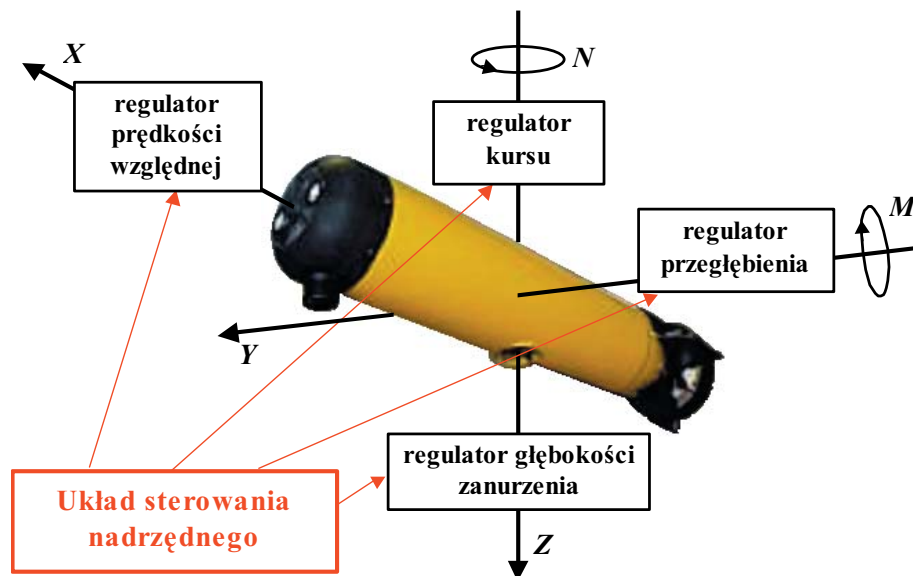
Po przyjęciu założenia, iż pojazd typu Głuptak ma 3 płaszczyzny symetrii, porusza się z małą prędkością w lepkim płynie i początek ruchomego układu odniesienia pokrywa się z środkiem ciężkości pojazdu otrzymuje się macierze z równania (1) z niezerowymi wartościami elementów na głównej przekątnej [3]. Przybliżone wartości elementów macierzy można obliczyć korzystając z podstawowych parametrów obiektu takich, jak: wymiary geometryczne (długość, szerokość, wysokość), masa pojazdu i masa wypartej wody. Dla samobieźnego ładunku typu Głuptak przyjęto założenie, iż posiada kształt walca o wymiarach odpowiadających parametrom geometrycznym rzeczywistego pojazdu podwodnego.

Szerzej problem nieliniowego modelu matematycznego pojazdu podwodnego rozpatrzony został w pozycji literaturowej [1] i publikacji [5], natomiast sposób obliczania elementów macierzy z równania (1) wraz z zależnościami matematycznymi w sprawozdaniu z pracy badawczej [6].

3. SYSTEM STEROWANIA

3.1. Architektura systemu sterowania

System automatycznego sterowania samobieżnym ładunkiem do zwalczania min podwodnych typu Głuptak składa się z: układu sterowania nadrzędnego oraz 4 regulatorów: prędkości względnej, kursu, przegłębienia i głębokości zanurzenia (rys. 2).



Rys. 2. Schemat blokowy systemu sterowania samobieżnym ładunkiem do zwalczania min podwodnych typu Głuptak

Układ sterowania nadrzędnego jest odpowiedzialny za kontrolę pracy pozostałych elementów, w szczególności za dostarczanie regulatorom zadanych wartości regulowanych parametrów oraz włączanie i wyłączanie odpowiednich regulatorów w poszczególnych punktach zadanego toru lub trajektorii ruchu.

Ze względu na brak informacji o oddziaływującym prądzie morskim na samobieżny ładunek przyjęto założenie, iż tempo zbliżania się do celu powinno być realizowane ze stałą prędkością 0,5 m/s bez względu na wartość i kierunek działania prądu morskiego. Dlatego też do systemu sterowania wstawiono regulator prędkości względnej działający w osi x_0 i sterujący prędkością pojazdu podwodnego względem celu. Natomiast prędkość względem celu uzyskuje się w wyniku różniczkowania zmieniającej się w czasie odległości od celu.

3.2. Strategia dotarcia do celu

W trakcie opracowania strategii poruszania się samobieżnego ładunku typu Głuptak do celu istotne jest uwzględnienie następujących czynników:

- 1) torpedopodobna konstrukcja pojazdu, gdzie jedyny efektywny kierunek poruszania się to ruch do przodu, czyli wzdłuż osi x_0 (wynika to z tego, iż tłumienie hydrodynamiczne w osi y_0 i w osi z_0 jest prawie rząd wielkości większe od tłumienia hydrodynamicznego w osi x_0),
- 2) potencjalna możliwość sterowania w 4 stopniach swobody ograniczona do sterowania w 3 stopniach swobody (ze względu na czynnik wymieniony w punkcie 1, tzn. nieefek-

tywne jest zanurzenie się przy zastosowaniu regulatora głębokości zanurzenia, lepiej jest to zrealizować poprzez odpowiednie przegłębienie pojazdu i ruch do przodu),

- 3) specyficzna konstrukcja kabloliny w postaci cienkiego światłowodu wysnuwającego się w toni wodnej ze szpuli (tego typu kablolina nie generuje istotnych oporów ruchu pojazdu, natomiast ma ograniczoną długość a tempo jej wysnuwania się w toni wodnej jest nie tylko uzależnione od trajektorii ruchu samobieźnego ładunku, ale także od oddziaływującego prądu morskiego).

Ze względu na przedstawione wyżej czynniki przyjęto, iż przed rozpoczęciem misji okręt stanowiący bazę dla samobieźnego ładunku powinien zająć taką pozycję względem celu, aby ewentualny prąd morski oddziaływał na pojazd podwodny w kierunku jak najbardziej zbliżonym do jego wzdłużnej osi symetrii i przeciwnie do wektora jego prędkości względnej. Przy tak przyjętej pozycji początkowej samobieźnego ładunku względem celu będzie się on poruszał jedynie do przodu wzdłuż linii zbliżonej do prostej w kierunku celu, a jego kablolina będzie wysnuwała się do tyłu, co zapobiegnie narażeniu jej na ewentualne uszkodzenie przez pędniki poziome usytuowane na rufie pojazdu podwodnego.

3.3. Struktura regulatorów parametrów ruchu

Dla potrzeb regulacji prędkości względnej i głębokości zanurzenia samobieźnego ładunku wykorzystano klasyczne regulatory proporcjonalno-różniczkujące PD, natomiast do regulacji kursu i przegłębienia rozmyte regulatory FPD [4].

Działanie regulatora typu PD w czasie dyskretnym opisane jest następującą zależnością:

$$u_n = k_p \cdot \varepsilon_n + k_d \cdot \Delta \varepsilon_n \quad (2)$$

gdzie:

- u_n – sygnał sterujący w n-tej chwili symulacji,
- ε_n – błąd określonego parametru w n-tej chwili symulacji,
- $\Delta \varepsilon_n$ – uchyb błędu w n-tej chwili symulacji,
- k_p i k_d – stałe w czasie współczynniki wzmocnienia odpowiednio dla członu proporcjonalnego i członu różniczkującego.

W wyniku dostrajania nastaw regulatorów przy wykorzystaniu symulacji komputerowej i bezpośrednich wskaźników jakości sterowania otrzymano przy przyjętym kroku sterowania 1/18 s następujące wartości współczynników wzmocnienia dla członu proporcjonalnego i członu różniczkującego:

- 1) dla regulatora prędkości względnej: $k_p = 55$ and $k_d = 21$,
- 2) dla regulatora głębokości zanurzenia: $k_p = 2,9$ and $k_d = 256$,

Natomiast działanie regulatora FPD oparte jest na wnioskowaniu rozmytym. W tym przypadku sygnały błędu i uchybu błędu regulowanego parametru poddawane są operacji rozmywania, a następnie podlegają wnioskowaniu rozmytemu na podstawie zaprojektowanych wcześniej reguł. Sygnał wyjściowy – sterujący poddawany jest operacji wyostrzania (odwrotnej do operacji rozmywania). Wykorzystanie metody logiki rozmytej daje nieliniową strukturę regulatora odpornego na nieliniową dynamikę obiektu sterowania i zakłócające oddziaływanie środowiska [4].

Dla potrzeb regulacji kursu i przegłębienia wykorzystano regulatory FPD o dość prostej strukturze wewnętrznej, tzn.:

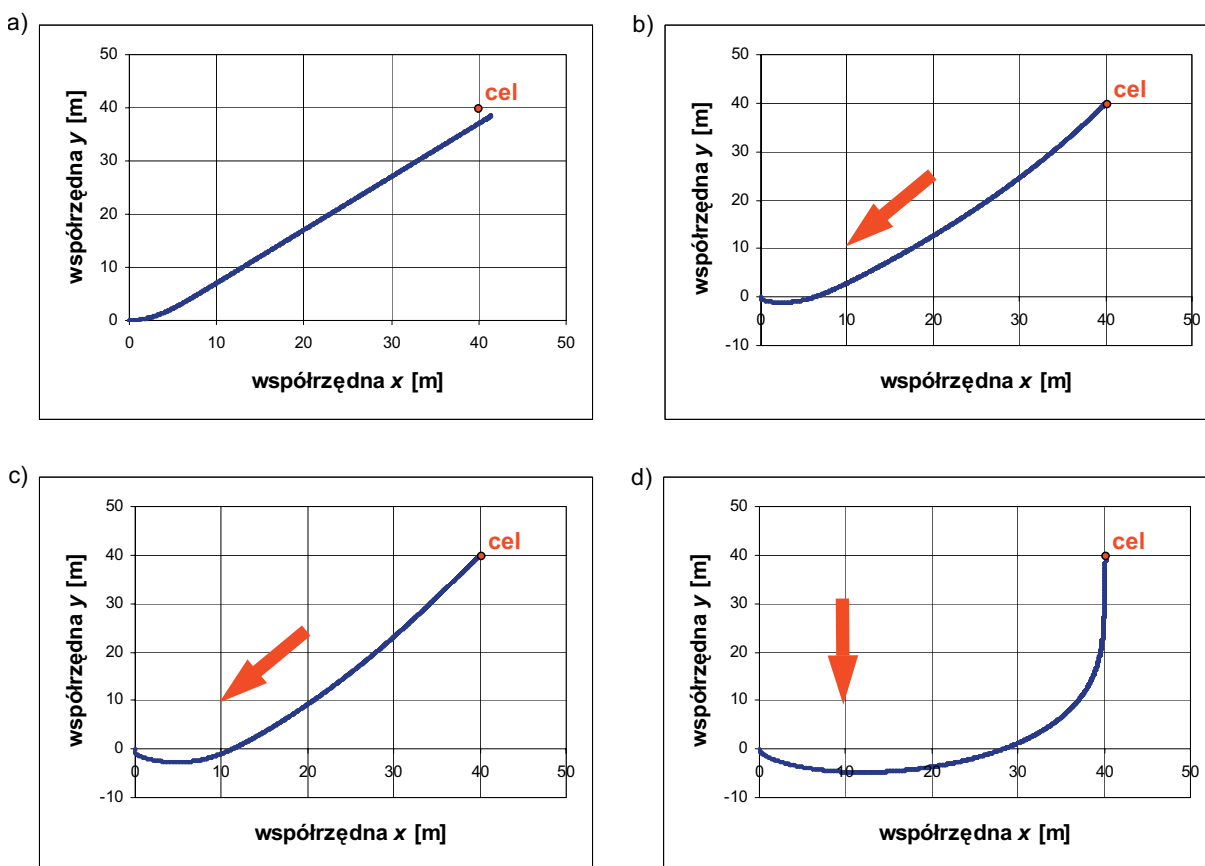
- 1) przestrzeń rozważań wejściowych podzielono na 3 zbiory rozmyte o kształcie funkcji trapezowej na zewnątrz przestrzeni rozważań i trójkątnej wewnątrz z następującymi punkta-

mi przecięć funkcji: $[-0,2; 0,5]$ i $[0,2; 0,5]$ dla sygnału błędu oraz $[-0,07; 0,3]$ i $[0,07; 0,3]$ dla uchybu błędu,

- 2) przestrzeń rozważań wyjściowych podzielono na 5 singletonów z współzrędnymi równymi: -1, -0,65, 0, 0,65.
- 3) blok wnioskowania rozmytego składający się z 9 reguł (zastosowano blok wnioskowania rozmytego uzyskany w wcześniejszych badaniach [5]).

W wyniku dostrajania współczynników wzmocnienia dla unormowanej przestrzeni rozważań wejściowo-wyjściowej przy wykorzystaniu symulacji komputerowej i bezpośrednich wskaźników jakości sterowania otrzymano następujące wartości: 90° dla sygnału błędu, 3° dla sygnału uchybu błędu regulowanego parametru i 4,5 Nm dla sygnału sterującego, czyli momentu siły względem odpowiedniej osi: y_0 dla regulatora przegłębienia i z_0 dla regulatora kursu.

4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

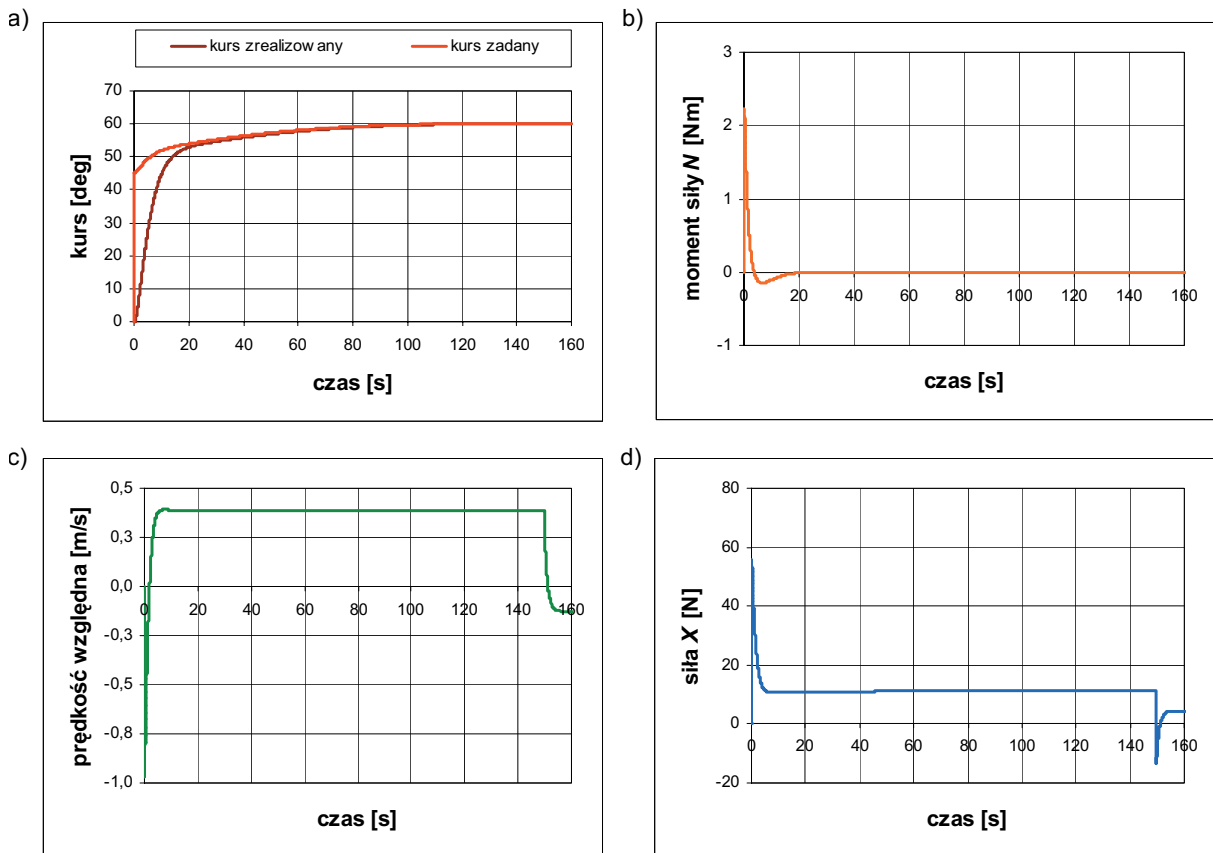


Rys. 3. Wyniki działania systemu sterowania samobieżnym ładunkiem typu Głuptak na płaszczyźnie XY: a) bez korekcji ψ_{zad} i prądu morskiego; z korekcją ψ_{zad} i oddziaływującym prądem morskim o parametrach: b) $V_p=0,5$ m/s, $\alpha_p=60^\circ$, c) $V_p=1,0$ m/s, $\alpha_p=60^\circ$, d) $V_p=1,0$ m/s, $\alpha_p=90^\circ$

Badania symulacyjne zaprojektowanego i dostrojonego systemu automatycznego sterowania samobieżnym ładunkiem do zwalczania min podwodnych typu Głuptak zrealizowano na platformie Windows/PC w środowisku symulacyjnym Matlab. W trakcie badań przetestowano

działanie systemu sterowania na płaszczyźnie pionowej XY w obecności oddziałującego prądu morskiego (strzałki koloru czerwonego na rys. 3 b, c, d) oraz w środowisku bez zakłóceń (rys. 3 a).

Sterowanie po zadanym torze ruchu jest zazwyczaj realizowane jako sterowanie wzdłuż odinków linii prostych połączonych punktami zwrotu, czyli przy ruchu po płaszczyźnie po dotarciu do punktu zwrotu następuje zmiana kursu umożliwiającego poruszanie się do następnego punktu zwrotu. W przypadku oddziałującego prądu morskiego przedstawiona strategia jest niewystarczająca, tzn. należy w sposób ciągły korygować wartość kursu zadanego ψ_{zad} (rys. 3 b, c, d), co umożliwi dotarcie do celu.



Rys. 4. Wyniki regulacji kursu i prędkości względnej z korekcją ψ_{zad} i oddziałującym prądem morskim $V_p=1,0$ m/s, $\alpha_p=60^\circ$: a) oraz b) kurs zadany i zrealizowany oraz sygnał sterujący

- moment siły N , c) oraz d) prędkość względna oraz sygnał sterujący – siła X

Na rysunku powyżej zobrazowano działanie 2 regulatorów, które w trakcie sterowania ruchem pojazdu podwodnego na płaszczyźnie XY pełnią zasadniczą rolę, tzn. regulatora kursu i prędkości względnej. Na podstawie uzyskanych przebiegów można stwierdzić, iż zaprojektowane i dostrojone regulatory w zadowalającym stopniu realizują regulację odpowiednich parametrów.

Ponadto na rys. 4 a zobrazowano proces korekcji kursu zadanego zmienianego w sposób dynamiczny w trakcie „spychania” samobieżnego ładunku z zadanego toru ruchu przez oddziałujący prąd morski.

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonej analizy problemu oraz symulacji komputerowych modelu matematycznego samobieżnego ładunku do zwalczania min morskich typu Głuptak wraz z jego systemem sterowania można stwierdzić, iż:

- 1) proces automatycznego sterowania samobieżnym ładunkiem do zwalczania min morskich powinien być poprzedzony wyborem początkowej pozycji względem celu, dającej możliwość minimalizacji skutków oddziaływania prądu morskiego na pojazd podwodny i jego kablolinę,
- 2) w przypadku sterowania samobieżnym ładunkiem po zadanym torze w obecności oddziałującego prądu morskiego istotna jest dynamiczna korekcja kursu zadanego, co umożliwia dotarcie pojazdu podwodnego do celu.

BIBLIOGRAFIA

1. Fossen T.I., "Guidance and Control of Ocean Vehicles", John Wiley & Sons Ltd., 1994.
2. "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.
3. Rowiński L., „Opis rozwiązań technicznych analizowanych dla Samobieżnego Ładunku Niszczącego”, Sprawozdanie z pracy badawczej, Politechnika Gdańska, Katedra Techniki Głębiny, Gdańsk 2002.
4. Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., „Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Łódź 1999.
5. Szymak P., "Using of fuzzy logic method to control of underwater vehicle in inspection of oceanotechnical objects", Artificial Intelligence and Soft Computing, Polish Neural Network Society, Warsaw 2006, p. 163 – 168.
6. Szymak P., Sprawozdanie z pracy badawczej własnej pt. „Zastosowanie metod logiki rozmytej do sterowanie zespołem okrętowym pojazd podwodny - ładunek”, Gdynia 2006.