

MODELOWANIE RUCHU BEZZAŁOGOWEGO POJAZDU PODWODNEGO W WARUNKACH WYSTĘPOWANIA ZAKŁÓCEŃ

ANDRZEJ ŻAK

*Instytut Hydroakustyki, Akademia Marynarki Wojennej
e-mail: a.zak@amw.gdynia.pl*

Streszczenie. Celem referatu jest przedstawienie wyników badań uzyskanych w trakcie modelowania ruchu bezzałogowego pojazdu podwodnego w warunkach występowania zakłóceń środowiskowych. W związku z tym w referacie scharakteryzowano zakłócenia pochodzenia środowiskowego, jakie mogą oddziaływać na wykonujący zadanie bezzałogowy pojazd podwodny oraz dokonano ich opisu matematycznego. Przedstawiono model matematyczny pojazdu podwodnego będącego na wyposażeniu okrętów Marynarki Wojennej oraz zaprezentowano, w jaki sposób należy uwzględnić wpływ zakłóceń w tym modelu. W referacie przedstawiono w postaci wykresów wyniki badań symulacyjnych modelowania ruchu bezzałogowego pojazdu podwodnego w warunkach występowania zakłóceń środowiskowych. Na zakończenie zaprezentowano wyniki badań uzyskanych w trakcie prób morskich z wykorzystaniem obiektu rzeczywistego, które stanowią podstawę weryfikacji opracowanych modeli.

1. WSTĘP

Modele występują w wielu dziedzinach ludzkiej działalności. Dla inżynierów potrzeba posiadania modelu w fazie projektowej nie wymaga dodatkowych argumentacji, dla naukowców model stanowi podstawę prowadzenia badań nad systemami sterowania oraz umożliwia tworzenie układów symulacji dla potrzeb szkolenia operatorów.

Rozwój robotyki podwodnej jest podyktowany przede wszystkim upowszechnieniem się tej techniki, jej walorami ekonomicznymi oraz w wielu przypadkach brakiem alternatywnych technologii w zastosowaniu do wykonywania niektórych zadań. W przeważającej większości bezzałogowe pojazdy podwodne (BPP) są eksploatowane w rejonach wydobywania surowców naturalnych takich jak gaz czy ropa. Ponieważ technologia wydobywcza sięga do coraz to nowszych złóż położonych w rejonach o dużej głębokości akwenu lub w miejscach występowania silnych zakłóceń środowiskowych, istnieje potrzeba rozpatrzenia wpływu zakłóceń środowiskowych na ruch bezzałogowego pojazdu podwodnego. Należy także wziąć pod uwagę, że dynamika pojazdu ulega znacznym zmianom w przypadku oddziaływania zakłóceń, co utrudnia i wydłuża czas prowadzenia prac podwodnych. Posiadanie modelu pojazdu z uwzględnieniem wpływu zakłóceń środowiskowych pozwala na projektowanie

odpowiednich układów automatycznego sterowania, układów wspomaganie sterowania oraz umożliwiają budowę układów symulacji niezbędnych do kształcenie pilotów BPP.

Przedmiotem badań jest bezzałogowy pojazd podwodny „Ukwiał”, który jest na wyposażeniu okrętów Marynarki Wojennej RP. Pojazd ten jest używany do rozpoznania oraz rozminowywania akwenów podwodnych. Wykorzystywany jest także w poszukiwaniach ratowniczych, inspekcji obiektów oceanotechnicznych oraz części podwodnej statków i okrętów.

2. MODEL DYNAMIKI BEZZAŁOGOWEGO POJAZDU PODWODNEGO

Ruchu obiektu pływającego o sześciu stopniach swobody rozpatrywany jest w dwóch układach współrzędnych kartezjańskich, które przedstawiono na rys. 1. Ruchomy układ współrzędnych jest związany z obiektem pływającym i potocznie nazywa się go układem odniesienia pojazdu. Układ ten jest zazwyczaj tak dobierany, aby jego początek pokrywał się ze środkiem masy (SM) a jego osie z osiami inercji pojazdu. Drugi układ współrzędnych związany jest z ziemią i przyjęto go nazywać stałym układem odniesienia. Sugeruje się, aby orientację pojazdu opisywać w stałym układzie odniesienia, zaś prędkości kątowe i liniowe powinny być opisywane w układzie odniesienia związanym z pojazdem. Wielkości opisujące ruch pojazdu są zdefiniowane zgodnie z notacją SNAME [4], określającą nomenklaturę dla ruchu ciał zanurzonych w płynie, którą przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Notacja używana przy opisie ruchu pojazdów podwodnych

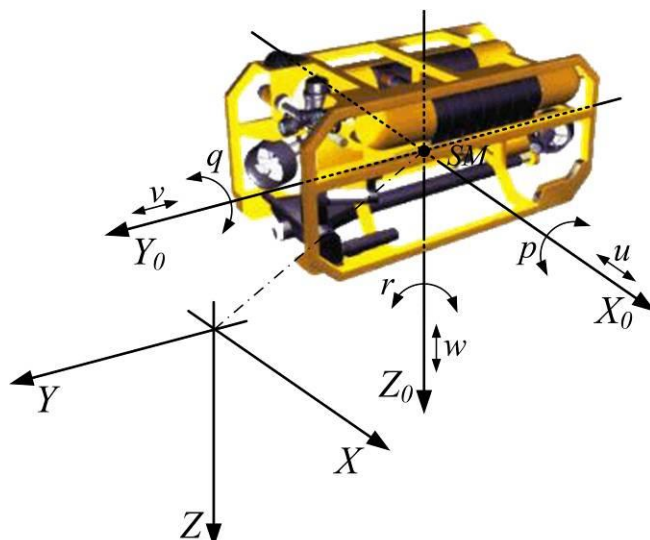
Stopień swobody	Nazwa ruchu	Siły i momenty	Prędkości kątowe i liniowe	Pozycja i kąty Eulera
1	ruch postępowy (w kierunku osi x)	X	u	x
2	dryf (w kierunku osi y)	Y	v	y
3	ruch pionowy (w kierunku osi z)	Z	w	z
4	kołysanie boczne (wokół osi x)	K	p	ϕ
5	przygłębienie (wokół osi y)	M	q	θ
6	myszowanie (wokół osi z)	N	r	ψ

Ogólnie ruch pojazdu o sześciu stopniach swobody może być zdefiniowany przez następujące wektory:

$$\begin{aligned}\eta &= [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T \\ \upsilon &= [u, v, w, p, q, r]^T \\ \tau &= [X, Y, Z, K, M, N]^T\end{aligned}\tag{1}$$

gdzie:

- η - wektor opisujący orientację w układzie współrzędnych związanych z ziemią;
- υ - wektor opisujący prędkości w układzie współrzędnych związanych z pojazdem;
- τ - wektor używany do opisu momentów i sił oddziałujących na pojazd.



Rys.1. Układ odniesienia stosowane do opisu ruchu pojazdu podwodnego o sześciu stopniach swobody

Zakładając, że pojazd podwodny jest ciałem sztywnym, można zapisać następujące równania ruchu [1, 2, 3]:

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + \omega q - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= X \\
 m[\dot{v} - \omega p + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= Y \\
 m[\dot{\omega} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] &= Z \\
 I_x \dot{p} + (I_x - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - q)I_{xy} & \\
 + m[y_G(\dot{\omega} - uq + vp) - z_G(v - \omega p + ur)] &= K \\
 I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} & \\
 + m[z_G(\dot{u} - vr + \omega q) - x_G(\dot{\omega} - uq + vp)] &= M \\
 I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} & \\
 + m[x_G(v - \omega p + ur) - y_G(\dot{u} - vr + \omega q)] &= N
 \end{aligned} \tag{2}$$

gdzie:

m – masa pojazdu;

I_x, I_y, I_z – momenty bezwładności względem odpowiedniej osi symetrii;

x_G, y_G, z_G – współrzędne środka ciężkości.

Reprezentację równania ruchu w układzie związanym z ciałem można przedstawić jako:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \tag{3}$$

gdzie:

M – macierz mas pojazdu i mas wody dołączonej;

$C(v)$ – macierz sił dośrodkowych i Coriolisa;

$D(v)$ – macierz oporów hydrodynamicznych w tym w tym: promieniście indukowanych oporów potencjalnych zgodnych z wymuszeniami oscylacyjnymi ciała, liniowego tarcia przy przepływie laminarnym i nieliniowego tarcia przy przepływie nieuporządkowanym, opory powodowane przez fale, opory wynikające z wirów;

$g(\eta)$ – macierz momentów i sił przywracających.

To samo równanie ruchu w układzie związanym z ziemią będzie miało postać [1, 2, 3]:

$$M_{\eta}(\eta)\ddot{\eta} + C_{\eta}(\nu, \eta)\dot{\eta} + D_{\eta}(\nu, \eta)\eta + g_{\eta}(\eta) = \tau_{\eta} \quad (4)$$

Większość parametry równań ruchu pojazdu podwodnego występujące w wymienionych powyżej macierzach wyznacza się w trakcie badań eksperymentalnych.

3. ZAKŁÓCENIA POCHODZENIA ŚRODOWISKOWEGO

3.1. Opis zakłóceń

Do podstawowych zakłóceń środowiskowych rozpatrywanych przy analizie obiektów pływających należą: falowanie, wiatr i prądy podwodne.

Przy rozpatrywaniu obiektów całkowicie zanurzonych, jakimi są roboty podwodne, można pominąć wpływ wiatru, zaś falowanie ma znaczenie jedynie do głębokości 10 m. Zakładając, że prace wykonywane z użyciem bezzałogowych pojazdów podwodnych są prowadzone na głębokościach poniżej 10 m (do tej głębokości przeważająca większość prac podwodnych jest wykonywana przez pływonurków, bez konieczności użycia specjalistycznego sprzętu nurkowego), można to zakłócenie zaniedbać w dalszych rozważaniach. Z tych powodów w dalszej części rozpatrywane będą jedynie zakłócenia powodowane przez prądy podwodne.

Prędkość prądu podwodnego można zapisać jako sumę poszczególnych składowych prędkości [1]:

$$V_c = V_t + V_{nw} + V_s + V_m + V_a + V_d \quad (5)$$

gdzie:

V_t – składowa związana z pływami;

V_{nw} – składowa generowana przez wiatry lokalne;

V_s – składowa generowana przez fale nieliniowe;

V_m – składowa pochodząca od podstawowych cyrkulacji (np. prąd Gulf);

V_a – składowa związana ze zjawiskami atmosferycznymi i sztormami;

V_d – składowa związana z ruchem wody pod wpływem różnicy gęstości.

Niech składowa pionowa z będzie skierowana i mierzalna dodatnio w dół. Stąd prędkość składowej związanej z pływami może być zapisany jako [1]:

$$V_t(z) = \begin{cases} V_t(0) & \text{dla } 0 \leq z \leq d-10 \\ V_t(0) \log_{10} \left(1 + \frac{9z}{d-10}\right) & \text{dla } d-10 < z < d \end{cases} \quad (6)$$

gdzie:

$V_t(0)$ – jest prędkością powierzchniową pływów;

d – jest głębokością wody.

Rozpatrując składową generowaną przez wiatry lokalne, można zapisać, że [1]:

$$V_{nw}(z) = \begin{cases} V_{nw}(0) \frac{d_0 - z}{d_0} & \text{dla } 0 \leq z \leq d_0 \\ 0 & \text{dla } z > d_0 \end{cases} \quad (7)$$

gdzie:

d_0 – głębokość odniesienia dla prądu generowanego przez wiatr zazwyczaj równą 50 m.

Składowa generowana przez wiatr może być aproksymowana poprzez zastosowanie wyrażenia [1]:

$$V_{tw}(0) = 0.02V_{10} \quad (8)$$

gdzie:

V_{10} – prędkość wiatru mierzona na wysokości 10 m nad poziomem morza.

Składowe generowane przez fale nieliniowe to zakłócenia falowe drugiego rzędu, tak zwane prądy fal, które mogą być traktowane jako dodatkowe składowe prądu podwodnego. Przyczynę do prądu powierzchniowego pochodzące z nierotacyjnych własności fal można zapisać jako [1]:

$$V_s(z) = \sum_{i=1}^N \frac{4\pi^2 A_i^2}{T_i \lambda_i} \exp\left(-4\pi \frac{z}{\lambda_i}\right) \quad (9)$$

gdzie:

A – wysokość fali;
 T – czas pomiędzy kolejnymi falami;
 λ – długość fali.

3.2. Metoda uwzględniania zakłóceń w modelu

Siły i momenty indukowane przez prądy podwodne mogą być uwzględnione w równaniach dynamiki ruchu przy założeniu, że równania ruchu mogą być zapisane z użyciem prędkości relatywnych:

$$v_r = v - v_c \quad (10)$$

gdzie:

$v_r = [u_c^E, v_c^E, w_c^E, 0, 0, 0]$ – jest wektorem nierotacyjnych prędkości prądów w układzie odniesienia związanym z ciałem.

Wektor prędkości prądu podwodnego w układzie odniesienia związanym z ziemią będzie zapisany jako: $[u_c^E, v_c^E, w_c^E]$. Stąd możemy obliczyć składowe występujące w układzie współrzędnych związanym z ciałem jako:

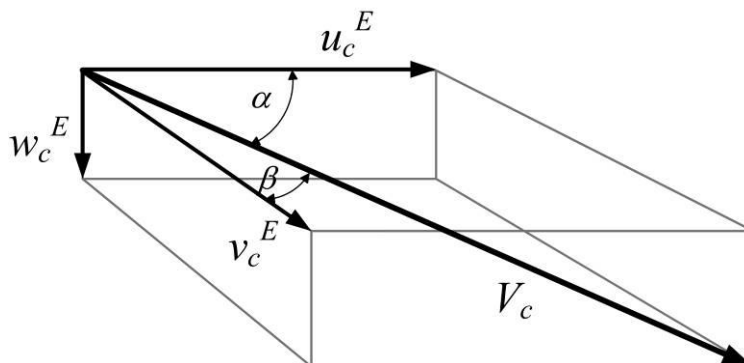
$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ w_c \end{bmatrix} = J_1^T(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} u_c^E \\ v_c^E \\ w_c^E \end{bmatrix} \quad (11)$$

gdzie:

$$J(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\phi s\theta & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\phi s\theta & -c\psi s\phi + s\psi c\phi s\theta \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

Składowe prędkości wody w układzie związanym z ziemią (u_c^E, v_c^E, w_c^E) mogą być powiązane z prędkością wypadkową prądu podwodnego V_c poprzez definicję dwóch kątów: kąta natarcia α i kąta poślizgu β opisujących orientację V_c wokół osi X i Y w następujący sposób (rys. 2):

$$\begin{aligned}
 u_c^E &= V_c \cos \alpha \cos \beta \\
 v_c^E &= V_c \sin \beta \\
 w_c^E &= V_c \sin \alpha \cos \beta
 \end{aligned}
 \tag{13}$$



Rys. 2. Orientacja średniej prędkości prądu w układzie współrzędnych związanym z ziemią

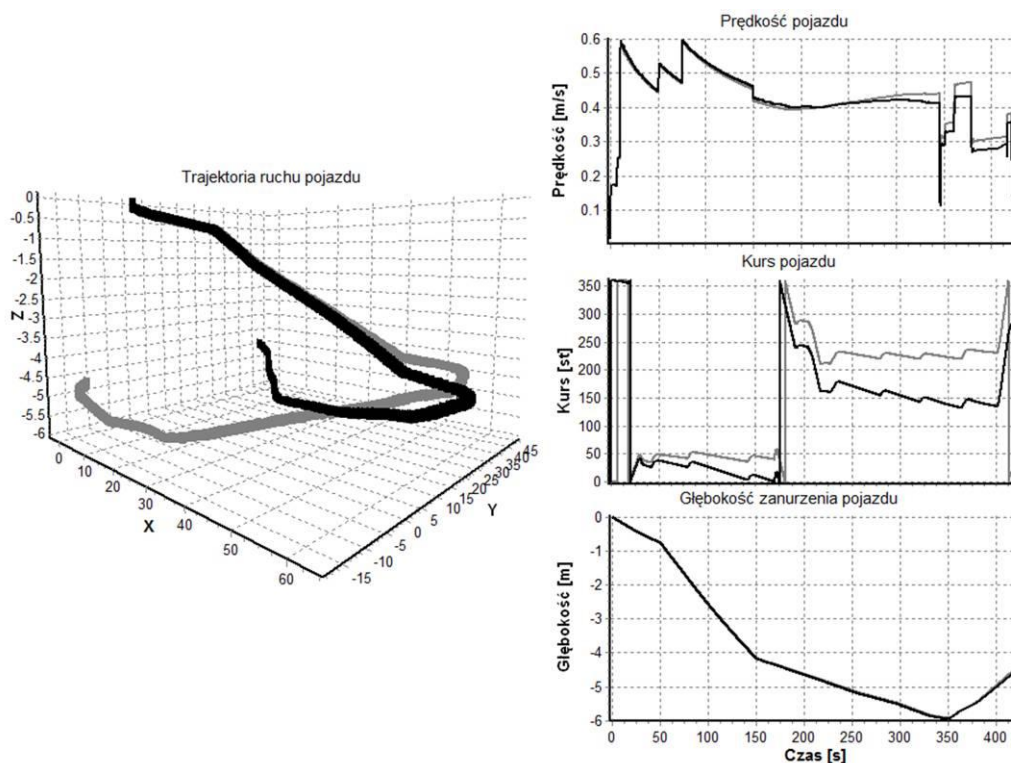
3. WYNIKI BADAŃ

Na podstawie przedstawionych w poprzednich rozdziałach zależności zaimplementowano model matematyczny bezzałogowego pojazdu podwodnego oraz oddziaływający na niego model prądów podwodnych, tworząc w ten sposób środowisko symulacyjne. W środowisku tym przeprowadzono badania polegające na wykonaniu BPP zadania dojścia w określony rejon działania w przypadku braku oddziaływania prądu podwodnego, a następnie, stosując to samo sterowanie, przy oddziaływaniu prądu podwodnego. Poniżej na wykresach przedstawiono wybrane wyniki przeprowadzonych symulacji. Kolorem szarym oznaczono ruch pojazdu w środowisku bez zakłóceń, kolorem czarnym z występowaniem zakłóceń w postaci prądu podwodnego o prędkości 0.02 m/s oraz kursie napływu 30° N (rys. 4) oraz prędkości 0.2 m/s przy tym samym kursie napływu (rys. 5). W czasie badań stwierdzono, że prąd podwodny o prędkości powyżej 0.25 m/s uniemożliwia wykonanie jakiegokolwiek zadania (pomimo stosowania sterowania ekstremalnego brak możliwości wykonania ruchu pojazdem podwodnym w zadanym kierunku). Prędkość ta jest zbliżona do prędkości granicznej prądu podwodnego, przy której rzeczywisty pojazd podwodny (według danych producenta 0.2 m/s), nie może być stosowany.

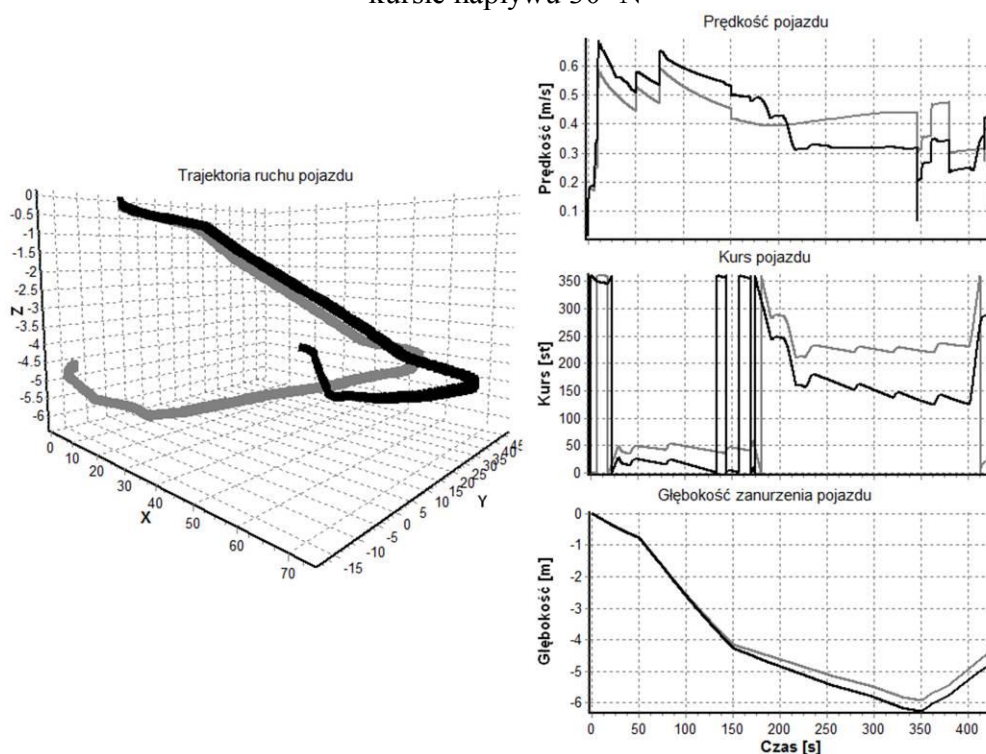
W celu zweryfikowania poprawności utworzonego modelu symulacyjnego wykonano badania porównawcze zachowań modelu symulacyjnego i obiektu rzeczywistego dla zadanych wektorów sterowań. Jakość modelu była oceniana na podstawie błędu średniokwadratowego odpowiedzi utworzonego modelu i obiektu rzeczywistego. Błąd ten zwierał się w przedziale do 0.2, co potwierdza dużą dokładność utworzonego modelu [5].

4. PODSUMOWANIE

Tworzenie symulatorów ma niezaprzeczalne zalety związane przede wszystkim z kosztami, ale także wygodą i skróceniem czasu potrzebnego na szkolenia operatorów robotów podwodnych. Dzięki zastosowaniu symulatorów można także, w łatwy i szybki sposób, przetestować nowo powstające systemy, których działanie ma wpływ na wektor stanu pojazdu.



Rys.3. Trajektoria ruchu oraz wykresy prędkości, kursu i głębokości zanurzenia pojazdu podwodnego. Kolorem szarym oznaczono ruch pojazdu w środowisku bez zakłóceń, kolorem czarnym z występowaniem zakłóceń w postaci prądu podwodnego o prędkości 0.02 m/s oraz kursie napływu 30° N



Rys.4. Trajektoria ruchu oraz wykresy prędkości, kursu i głębokości zanurzenia pojazdu podwodnego. Kolorem szarym oznaczono ruch pojazdu w środowisku bez zakłóceń, kolorem czarnym z występowaniem zakłóceń w postaci prądu podwodnego o prędkości 0.2 m/s oraz kursie napływu 30° N

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych, których wybrane wyniki przedstawiono powyżej, można stwierdzić, że występowanie zakłóceń środowiskowych silnie wpływa na przebieg trajektorii ruchu pojazdu podwodnego w trakcie realizacji zadania. W skrajnych przypadkach może to doprowadzić do całkowitej niemożności wykonania zadania. Opracowany model cechuje się dużą dokładnością działania (mały wskaźnik błędu średniokwadratowego odpowiedzi modelu i obiektu przy tym samym sterowaniu) w porównaniu z obiektem rzeczywistym. Ponadto przyjęty model prądu podwodnego dobrze odwzorowuje warunki rzeczywiste (uzyskano porównywalne z rzeczywistym prędkości prądu podwodnego, przy których BPP nie może prowadzić działań). Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdza się, że opracowany model może być podstawą budowy тренаżera bezzałogowego pojazdu podwodnego przeznaczonego do szkolenia operatorów.

Wyniki uzyskanych badań oraz opracowany model pojazdu podwodnego z uwzględnieniem zakłóceń środowiskowych pozwolą na opracowanie algorytmów sterowania, zapewniających precyzyjne prowadzenie pojazdu po zadanej trajektorii w warunkach występowania zakłóceń, co będzie przedmiotem dalszych prac badawczych.

LITERATURA

1. Fossen Thor I.: Guidance and control of ocean vehicles. Chichester : John Wiley & Sons, 1994.
2. Gerler M., Hagen G.: Standard equations of motion for submarine simulation. Technical Report, Defense Technical Information Center document #A653861, David Taylor Naval Ship Research and Development, June 1967
3. Goheen K., Jefferys E.: The application of alternative modeling techniques to ROV dynamics. Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation 1990, p. 1302–1309.
4. The Society of Naval Architects and Marine Engineers: Nomenclature for treating the motion of submerged body through a fluid. "Technical and Research Bulletin" No. 1-5
5. Żak A.: Identyfikacja dynamiki bezzałogowego pojazdu podwodnego w warunkach eksploatacyjnych. Rozprawa doktorska. AMW, Gdynia 2006

MOVEMENT MODELING OF REMOTELY OPERATED UNDERWATER VEHICLE IN CONDITIONS OF EXISTING ENVIRONMENT DISTURBANCE

Summary. The main aim of paper is to introduce the results of research acquired during modeling of movement of remotely operated underwater vehicle in conditions of environment disturbance presence. According to this in paper there is characterization and mathematical description of environment disturbance which can affect on underwater vehicle during fulfilling task. Next mathematical model of remotely operated vehicle which is equipment of Polish Navy war ship's and method of taking into account the environment disturbance was presented. Paper shows the results of simulation researches of modeling movement of remotely operated underwater vehicle in conditions of existing environment disturbance as drawings. At the end the results acquired during sea tests using real object were introduced.