

dr inż. Józef Małecki  
mgr inż. Marcin Szulc  
Akademia Marynarki Wojennej

## **WYBRANE PROBLEMY WIZUALIZACJI RUCHU POJAZDU PODWODNEGO W SYMULATORZE**

*Proces precyzyjnego sterowania bezzałogowym pojazdem podwodnym wymaga od operatora stałego monitorowania jego położenia i ruchu. Prezentowany w referacie program symulacyjny zapewnia operatorowi na okęcie zobrazowanie pozycji i ruchu statku głębinowego względem okrętu-matki i względem dna akwenu oraz jego usytuowania i ruchu w toni morskiej. W referacie przedstawiono problem trójwymiarowego zobrazowania na ekranie komputerowym położenia zdalnie sterowanego statku głębinowego.*

## **SELECTED PROBLEMS OF VISUALISATION OF MOTION OF UNDERWATER VEHICLE IN SIMULATION PROGRAM**

*In the paper hardware and software description of the virtual visualisation module of the simulator of ship stand of control of unmanned underwater vessel's motion is presented. A technology of processing of digital hydrographical data for 3D presentation of a shape of the sea bottom and navigational obstacles in the undersea space using GIS software is described.*

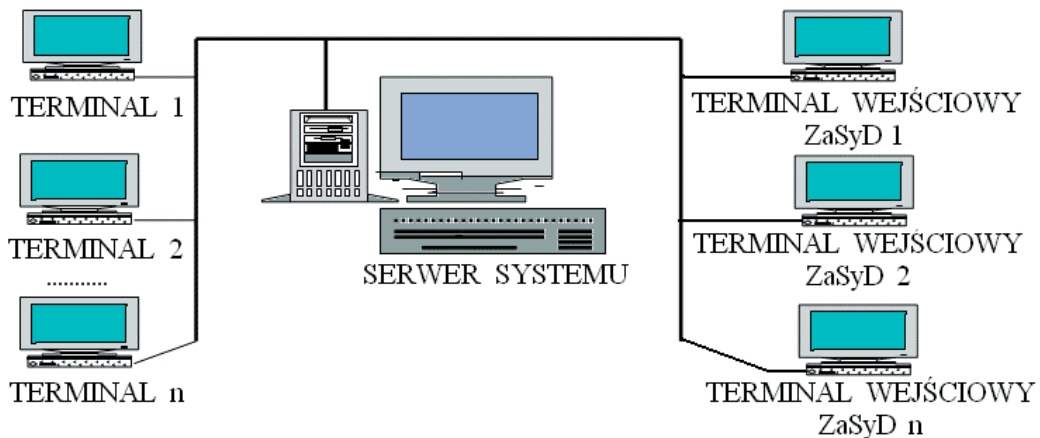
### **1. WPROWADZENIE**

Współcześnie bezzałogowe pojazdy-roboty głębinowe w stały się ważnym elementem badania przestrzeni podwodnej. Stają się też ważnym narzędziem służącym do wykonywania prac podwodnych w różnorodnych dziedzinach działalności człowieka na morzu. Jednym z podstawowych zadań, jakie są realizowane przez pojazd-robot głębinowy jest celowe przemieszczanie się z położenia początkowego do określonego położenia końcowego. Ostatnimi laty w literaturze przedmiotu można znaleźć się wiele publikacji dotyczących problematyki sterowania zdalnymi i autonomicznymi statkami i robotami głębinowymi [1, 2, 4, 10, 11].

Wśród wielkiej gamy różnorodnych środków technicznych służących do eksploracji głębin morskich znaczącą rolę odgrywają roboty podwodne (ang. URV – Underwater Robotic Vehicle). Tego typu bezzałogowe, zdalnie sterowane pojazdy-roboty pływające, wyposażone w napęd i posiadające zdolności manewrowe, projektowane są w celu zastępowania pracy nurków i wykonywania ich zadań, na głębokościach nawet do kilku tysięcy metrów [5, 6].

Za kontrolę pracy wszystkich urządzeń pojazdu-roboty odpowiada system sterowania, który sprawuje nadzór, poczynając od napędu, a kończąc na przełączaniu sensorów i aktuatorów. W układzie sterowania takim pojazdem-robotem funkcje regulatora w torze sprzężenia zwrotnego spełnia najczęściej operator. Pilotowanie URV nie jest sprawą łatwą i wymaga dużej wprawy oraz wielu godzin praktyki i dlatego buduje się symulatory bezzałogowych pojazdów podwodnych. Przy budowie ich podstawowym problemem jest modelowanie dynamiki pojazdu, dla którego budowany jest symulator.

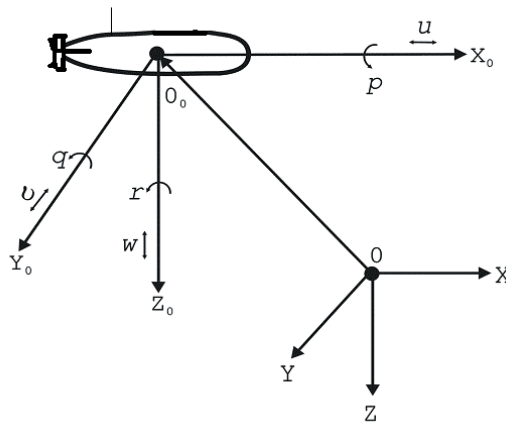
W Instytucie Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej Akademii Marynarki Wojennej od kilkunastu lat prowadzone są prace nad budową i integracją sprzętowo-programową symulatora stanowiska sterowania bezzałogowym pojazdem-robotem głębinowym [5]. Symulator składa się ze stanowiska głównego - serwera systemu, pozwalającego na kierowanie przebiegiem misji podwodnej i ze stanowisk operatorskich - terminali, zawierających specjalistyczne oprogramowanie użytkowe, pozwalających na szkolenie operatorów pojazdów-robotów podwodnych – rys. 1.



Rys.1. Struktura stanowiska symulatora ruchu małego robota podwodnego

## 2. MODEL MATEMATYCZNY POJAZDU-ROBOTA GŁĘBINOWEGO

Aby dokonać opisu dynamiki pojazdu-robota jego przemieszczanie przedstawia się jako ruch ciała sztywnego o 6 stopniach swobody w trójwymiarowym układzie współrzędnych kartezjańskich. Do opisu dynamiki przyjmuje się dwa układy współrzędnych – rys. 2: ruchomy związany z kadłubem pojazdu-robota i stały względem środka Ziemi [4, 11].



Rys. 2. Układy odniesienia współrzędnych kartezjańskich oraz notacja przyjęta do opisu precyzyjnego ruchu pojazdu-robota:  $O_0X_0Y_0Z_0$  – układ związany z pojazdem-robotem,  $OXYZ$  – układ związany z Ziemią,  $[u \ v \ w]$  – wektor prędkości liniowych, występujących odpowiednio w kierunku osi  $X_0$ ,  $Y_0$  i  $Z_0$ ,  $[p \ q \ r]$  – wektor prędkości kątowych względem osi  $X_0$ ,  $Y_0$  i  $Z_0$

Tak przyjęte układy umożliwiają opis ruchu pojazdu-robota głębinowego za pomocą układu równań kinetycznych i kinematycznych. Równania kinetyczne, opisujące dynamikę pojazdu-robota w układzie związanym ze z kadłubem pojazdu oraz równania kinematyczne określające geometryczne własności ruchu w układzie związanym z Ziemią przedstawia poniższy układ równań różniczkowych (1) [4]:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M^{-1}[C(v)+D] & 0 \\ J(\eta) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \eta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M^{-1} \\ 0 \end{bmatrix} \tau \quad (1)$$

gdzie:

- $M$  – macierz sił bezwładności pojazdu-roboty,
- $C(v)$  – macierz grupująca siły odśrodkowe i siły Coriolisa,
- $D$  – macierz tłumienia hydrodynamicznego,
- $J(\eta)$  – macierz transformacji,
- $v = [u, v, w, p, q, r]^T$  – wektor prędkości liniowych i kątowych w układzie związanym z pojazdem-robotem,
- $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$  – wektor położenia i orientacji pojazdu-roboty w układzie związanym z Ziemią,
- $\tau = [X, Y, Z, K, M, N]^T$  – wektor sterowań pojazdu-roboty.

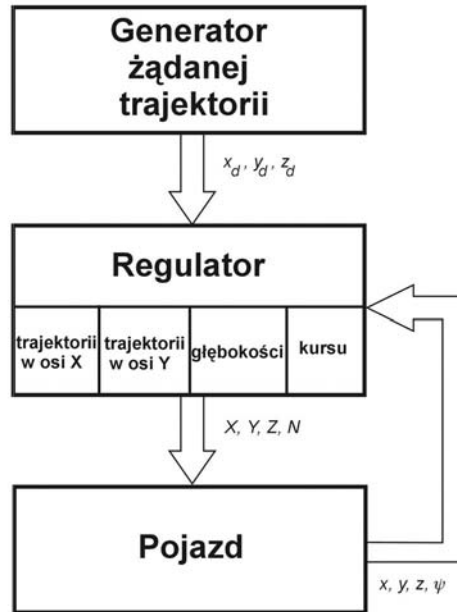
### 3. SYSTEM STEROWANIA POJAZDU-ROBOTA W SYMULATORZE

Głównym zadaniem systemu sterowania pojazdu-roboty w symulatorze jest zapewnienie dokładnego poruszania się statku wzdłuż zadanej trajektorii ruchu w warunkach niepełnej bieżącej informacji o stanie obiektu sterowania. Dla zdalnie sterowanego pojazdu-roboty głębinowego podstawowym ruchem jest przemieszczanie się w płaszczyźnie poziomej z niewielkimi zmianami w płaszczyźnie pionowej (ruch w czterech stopniach swobody z małymi kątami kołysań wzdłużnych i bocznych). Stąd też celem jest rozpatrywanie jego ruchu przestrzennego jako złożenia dwóch przemieszczeń: ruchu płaskiego w płaszczyźnie poziomej i ruchu w płaszczyźnie pionowej [2, 6, 10, 11].

System sterowania w symulatorze zaprojektowano przy założeniu, że:

- pojazd-robot porusza się ze zmiennymi prędkościami liniowymi  $u$ ,  $v$ ,  $w$  i prędkością kątową  $r$ ;
- wielkościami dostępnymi pomiarowo są: położenie pojazdu-roboty  $x$ ,  $y$ ,  $z$  i kurs  $\psi$ ;
- sygnałem sterującym jest wektor  $\tau = [X, Y, Z, N]^T$ , którego składowe oznaczają odpowiednio: siłę w kierunku osi wzdłużnej  $X_0$ , poprzecznej  $Y_0$  i pionowej  $Z_0$  oraz moment obracający wokół osi pionowej  $N_0$ .

Strukturę przyjętego w symulatorze systemu sterowania przedstawiono na rys. 3.

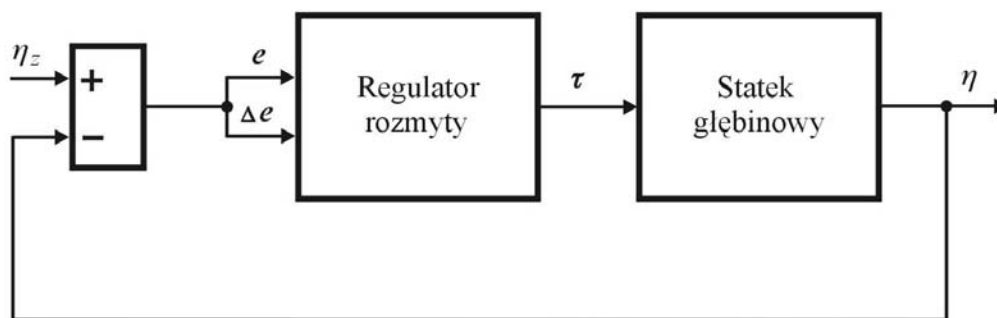


Rys. 3. Struktura systemu sterowania pojazdu-robota w symulatorze

### 3.1. Zasada sterowania rozmytego

Regulator w logice rozmytej jest rodzajem systemu ekspertowego na bazie wiedzy, który zawiera algorytm sterowania zapisany w postaci prostej bazy reguł. Wiedza zakodowana w bazie reguł jest wyprowadzona zarówno na podstawie ludzkiego doświadczenia oraz intuicji jak i teoretycznego i praktycznego zrozumienia dynamiki obiektu sterowanego. Nerozmyty algorytm sterowania uzyskiwany jest w wyniku przekształcenia wiedzy wpisanej w bazę reguł w procesie wnioskowania przybliżonego [3, 4, 9].

Do realizacji zadania sterowania statkiem głębinowym wybrany został regulator rozmyty typu PD [6] pracujący w układzie przedstawionym na rys. 4.



Rys. 4. Schemat blokowy regulatora rozmytego ze sprzężeniem:  $\eta_z$  – wielkość zadana,  $e(k)$  – uchyb sygnału  $e(k) = \eta_z - \eta(k)$ ,  $\Delta e(k)$  – zmiana uchybu sygnału  $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$

Dla zmiennych wejściowych  $e$  i  $\Delta e$  regulatora rozmytego oraz sygnału sterującego  $\tau_i$  zostały dobrane funkcje przynależności przedstawione odpowiednio na rys. 4. Znaczenie symboli przyjętych do opisu zmiennych lingwistycznych jest następujące:

U – ujemne, Z – zero, D – dodatnie, M – małe, S – średnie, D – duże. W tab. 1 zostały przedstawione reguły sterowania opracowane na podstawie standardowej bazy reguł Mac Vicar-Whelana [3, 6].

Tab. 1. Baza reguł regulatora rozmytego

		uchyb $e$				
		UD	US	Z	DS	DD
zmiana uchybu $\Delta e$	U	UD	US	UM	Z	DM
	Z	US	UM	Z	DM	DS
	D	UM	Z	DM	DS	DD
		sygnał sterujący $\tau$				

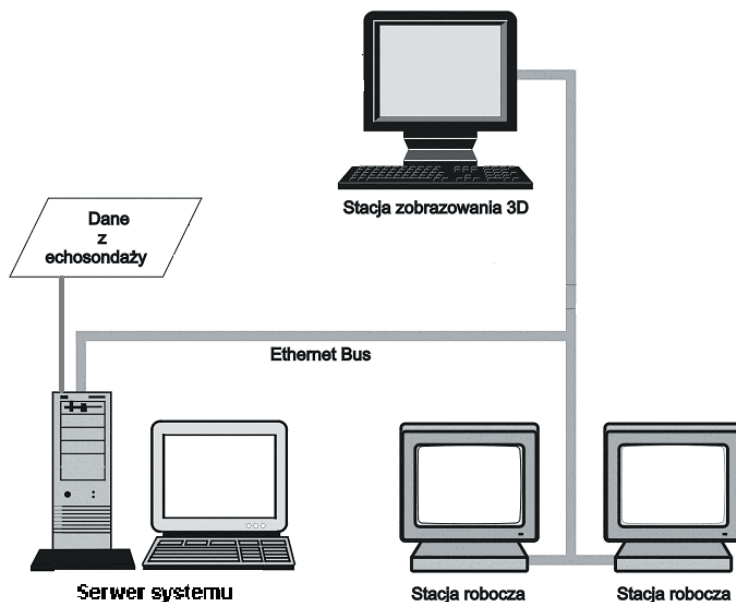
### 3.2. Opis ogólny symulatora

Symulator ruchu małego pojazdu-robota podwodnego może współpracować z okrętowym systemami dowodzenia oraz innymi systemami wykorzystującymi jako wejścia informacyjne źródła danych nawigacyjnych i hydrolokacyjnych. W symulatorze wszystkie dane wejściowe i wyjściowe spełniają standardy transmisji znakowej określone wymogami NMEA 0183 oraz RS-232. Wszystkie dane pozyskiwane z sensorów oraz terminali są przesyłane do systemowej bazy danych w serwerze systemu, które po zobrazowaniu na ekranie komputera zapewniają prowadzącemu ćwiczenie czytelny obraz sytuacji, w jakiej pracują poszczególne terminale [5].

Do podstawowych funkcji symulatora należy zaliczyć:

- akwizycję i archiwizowanie danych uzyskiwanych z rzeczywistych źródeł hydrolokacyjnych w bazie danych,
- możliwość generacji dowolnej sytuacji podwodnej i archiwizowanie jej w bazie danych,
- zobrazowanie sytuacji podwodnej uzyskanej z bazy danych systemu na ekranie monitora komputerowego,
- zapewnienie powtarzalności sytuacji podwodnej dla celów szkoleniowych i analizy sytuacji nawigacyjno-taktycznej.

Na rys. 5 przedstawiono ideę rozwiązania laboratoryjnej wersji symulatora sytuacji podwodnej. Realizacja założonych funkcji systemu wymusiła dobór właściwej platformy sprzętowej i programowej. Oprogramowanie systemowe zostało wzbogacone o procedury, uwzględniające obieg informacji w ramach zaproponowanej struktury systemu symulacyjnego. Użyty do realizacji sprzęt komputerowy jest jednorodny pod względem styku operatora z systemem – standard OSF/Motif na bazie X-Window. Komunikacja pomiędzy poszczególnymi stanowiskami symulatora spełnia standard TCP/IP, realizując model klient-serwer.



Rys. 5. Struktura techniczna zintegrowanego laboratoryjnego stanowiska symulatora

#### 4. ZARYS TECHNOLOGII PRZESTRZENNEGO ZOBRAZOWANIA TONI PODWODNEJ W SYMULATORZE

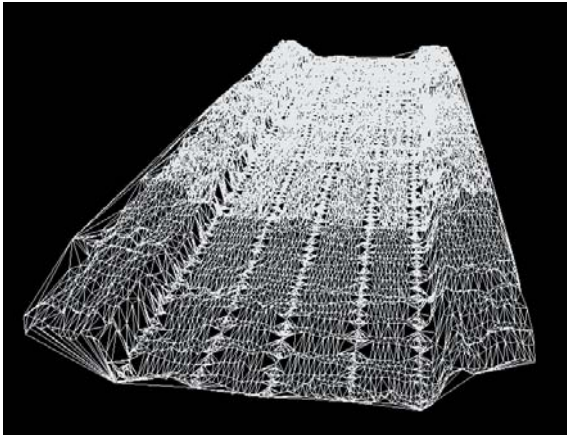
Dane pomiarowe uzyskane podczas prac echosondażowych przechowywane są w plikach tekstowych, zawierających informacje o kolejnych pozycjach okrętu i pomierzonych głębokościach przydatnych dla sterowania pojazdem-robotem podwodnym.

Z pliku tekstowego, dla każdej z echosond należy wydobyć informację o zmierzonych głębokościach i pozycjach okrętu odpowiadających temu pomiarowi. Dane te łączy się na podstawie informacji o czasie pomiaru, która znajduje się w każdym wierszu. Dla potrzeb programu ARC/INFO dla każdej z echosond trzeba stworzyć dwa pliki, z których jeden zawiera kolejne pozycje okrętu podczas pomiarów a drugi, kolejne, zmierzone głębokości. Każdy wiersz musi zaczynać się od indeksu pozwalającego powiązać dane z obu plików. W programie ARC/INFO na podstawie pliku z pozycjami okrętu tworzymy warstwę punktów. Każdy z punktów jako identyfikator będzie posiadał numer indeksu z pliku. Z pliku głębokości tworzy się tabelę, w której pierwsza kolumna zawiera numery indeksów, a druga wartości głębokości. Następnie dołącza się dane z tabeli do warstwy punktów, wiążąc odpowiednie wiersze na podstawie indeksów. Do dalszej interpretacji danych należy użyć programu ArcView GIS z rozszerzeniem 3D Analyst. Wczytuje się do niego warstwę punktów z informacją o głębokościach i generuje się, na jej podstawie, siatkę trójkątów (TIN) [7, 8].

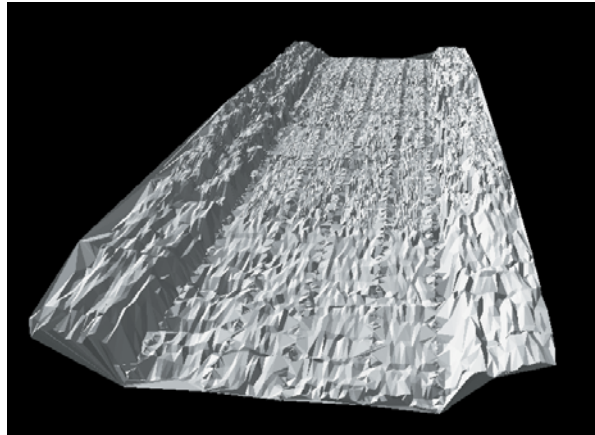
W celu uzyskania obrazu trójwymiarowego, należy w programie ArcView otworzyć widok 3D i wczytać do niego wygenerowaną siatkę trójkątów. Następnie, w tzw. właściwościach widoku, określamy rodzaj interpretacji danych. Najciekawszymi i posiadającymi największy ładunek informacyjny są otrzymywane zobrazenia kolorowe, z paletą barw, ściśle przyporządkowaną prezentowanym wysokościami (głębokościami) punktów. Przykłady, niektórych, uzyskanych zobrażeń monochromatycznych przedstawiono poniżej na rys. 6 i rys. 7.



Opracowane środowisko sprzętowo-programowe modułu zobrazowania symulatora okrętowego stanowiska sterowania bezzałogowym statkiem głębinowym poddawane jest obecnie funkcjonalnym próbom i testom laboratoryjnym. Zebrane doświadczenia z zakresu trójwymiarowego zobrazowania przestrzeni podwodnej na podstawie danych z echosondaży w pełni potwierdzają ich przydatność do szkolenia operatorów pojazdów-robotów podwodnych.

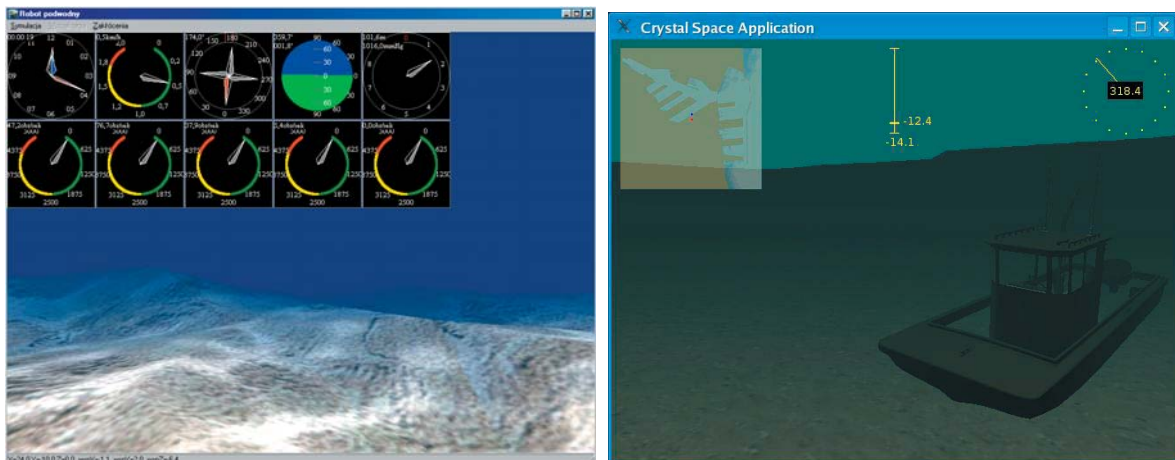


Rys. 6. Zobrazowanie trójwymiarowe ilustrujące fragment rynny toru wodnego, wyświetlające siatkę trójkątów (TIN)



Rys. 7. Zobrazowanie identycznego, jak na rys. 6, fragmentu toru wodnego, z zastosowaniem jednorodnej tekstury i światło-cienia

Obraz widziany na ekranie przez operatora ćwiczącego na symulatorze przedstawia rys. 8 [5].



Rys. 8. Wygląd ekranu symulatora podczas pracy

W celu wiernego oddania warunków pracy operatora zastało stworzone wirtualne środowisko 3D, w którym pojazd może się poruszać a operator ma możliwość wykonywania pewnych zadań. Sterowanie pojazdem odbywa się poprzez wychylenie drążka dwóch manipulatorów-joysticków. Jeden z nich odpowiada za zadawanie naporów wzdłuż osi X, Y, drugi zaś odpowiada za zadawanie naporu wzdłuż osi Z.

## 5. PODSUMOWANIE

W Instytucie Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej Akademii Marynarki Wojennej zrealizowano model laboratoryjny symulacyjnego systemu zobrazowania ruchu pojazdu-robota podwodnego, sterowanego drogą przewodową [5]. Oprogramowanie użytkowe systemu zobrazowania jest przeznaczone do zapewnienia skutecznego podglądu sytuacji nawigacyjno-taktycznej pojazdu na konsoli operatorskiej i służy do szkolenia operatorów, którzy w przyszłości będą sterować rzeczywistymi statkami głębinowymi. Stąd też przeprowadzone prace projektowe i programowe zrealizowane w ramach konstruowania modułu symulatora ukierunkowane były na ich przyszłe wykorzystanie dla potrzeb szkolenia pilotów-operatorów podwodnych pojazdów-robotów.

## LITERATURA

1. Bhattacharyya R., Dynamics of Marine Vehicles. John Wiley and Sons, Chichester 1978.
2. Craven J., Sutton R, Burns, R. S., Control Strategies for Unmanned Underwater Vehicles. *Journal of Navigation*, No. 51, 1998, pp. 79-105.
3. Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M., Wprowadzenie do sterowania rozmytego, WNT, Warszawa, 1996.
4. Fossen T. I.: Marine Control Systems. Marine Cybernetics AS, Trondheim 2002.
5. Garus J., Małecki J. i inni, Sprawozdanie z pracy nb. p.k. Okoń. Gdynia AMW 2007.
6. Garus J., Dynamical Control of Motion of Underwater Vehicle in Horizontal Plane. Proc. of the 8<sup>th</sup> IEEE Int. Conf. on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR '02, Szczecin 2002, pp. 891 – 896.
7. Litwin L., Myrda G., Systemy informacji geograficznej. Zarządzanie danymi przestrzennymi. Gliwice Wydawnictwo Helion 2005.
8. Morain S., Baros S. L., Raster Imaginery in Geographic Information Systems. New York on Words Press 1996.
9. Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte, PWN, Warszawa, 1999.
10. Spong M. W., Vidyasagar M., Dynamika i sterowanie robotów. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
11. Yoerger D.R., Slotine J.E., Robust Trajectory Control of Underwater Vehicles. IEEE Journal of Oceanic Engineering, No. 4, 1985, pp. 462-470.