

**Piotr Szymak**

**kmdr por. dr inż. Piotr Szymak**

Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny,  
81-103, Gdynia, Śmidowicza 69,  
p.szymak@amw.gdynia.pl

## **SYSTEM STABILIZACJI POŁOŻENIA BEZZAŁOGOWEGO POJAZDU NAWODNEGO**

*Specyfika realizacji inspekcji podwodnej przy użyciu zdalnie sterowanego pojazdu podwodnego ROV (ang. Remotely Operated Vehicle) wodowanego z pokładu bezzałogowego pojazdu nawodnego USV (ang. Unmanned Surface Vehicle) wymaga stabilizacji położenia USV z określoną dokładnością. Niniejszy artykuł podejmuje problematykę opracowania systemu stabilizacji położenia polskiego USV edredon.*

*W artykule zaprezentowano założenia do zadania stabilizacji położenia, a następnie architekturę systemu stabilizacji oraz wybrane wyniki badań numerycznych tego systemu. Ponadto zaprezentowano metodę przeciwdziałania zakłóceniom oddziałującym na kadłub bezzałogowego pojazdu nawodnego oraz wybrane wyniki działania w środowisku symulacyjnym systemu sterowania USV edredon z zastosowaniem tej metody.*

**Słowa kluczowe:** *bezzałogowy pojazd nawodny, system stabilizacji położenia USV, przeciwdziałanie zakłóceniom oddziałującym na kadłub jednostki pływającej.*

## **POSITION STABILIZATION SYSTEM FOR AN UNMANNED SURFACE VEHICLE**

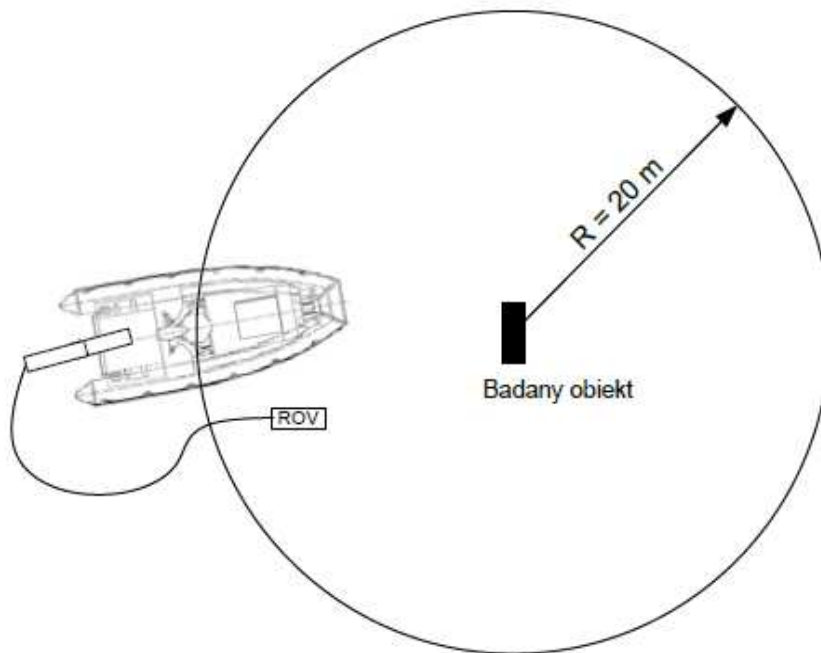
*The specifics of realization of underwater inspection with the use of a Remotely Operated Vehicle (ROV) launched from the deck of an Unmanned Surface Vehicle (USV) requires precise positioning of the USV. The following article tackles the problem of preparation of a position stabilization system for a Polish USV – Ededron.*

*The article presents the assumptions made for the position stabilization task, followed by an overview of the stabilization system as well as selected numerical research results regarding this system. Moreover, it demonstrates a method for counteracting the disturbances that have an impact on the hull of the vehicle with selected operational results for the control system of Ededron in a simulation environment with the use of the said method.*

**Key words:** *unmanned surface vehicle, USV position stabilization system, counteracting disturbances with an impact on the hull of a vessel.*

### ZADANIE STABILIZACJI POŁOŻENIA

Po przeprowadzonej w trakcie wcześniejszych prac analizie [3], przewiduje się, iż USV edredon w trakcie prowadzenia niektórych zadań (w szczególności prac podwodnych przy zastosowaniu zdalnie sterowanego pojazdu podwodnego ROV) będzie musiał utrzymywać zadaną pozycję z określoną dokładnością (Rys. 1). W pracy [3] określono, iż pozycja USV powinna się mieścić w kole o średnicy 20 m.



Rys. 1. Zadanie stabilizacji położenia USV w trakcie realizacji prac podwodnych z użyciem ROV (rys. z [3]).

Pojazd podwodny jest zasilany i sterowany przez kablolinę, która ma ograniczoną długość. Poza tym im więcej kabloliny zostało rozwiniętej z bębna zlokalizowanego na pokładzie USV, tym większe tłumienie hydrodynamiczne ruchu ROV, zmniejszające jego możliwości manewrowe. Dlatego też prowadzenie prac podwodnych przy użyciu ROV zasilanego z pokładu USV, który działa w obecności oddziaływujących zakłóceń środowiska morskiego (wiatru, prądu morskiego i falowania) wymaga opracowania systemu stabilizacji położenia.

USV edredon nie został wyposażony w urządzenia pozwalające na utrzymywanie pozycji w zadanym punkcie, np. stery strumieniowe, kotwica. Jedynymi urządzeniami wykonawczymi, które mogą zostać zastosowane do stabilizacji położenia to klasyczne urządzenie sterowe i pędnik śrubowy. W tym przypadku niezbędne jest opracowanie algorytmów sterowania tymi urządzeniami w celu stabilizacji położenia USV edredon.

### MODEL MATEMATYCZNY RUCHU USV

W celu przeprowadzenia badań numerycznych systemu stabilizacji położenia USV istotne jest wiarygodne zamodelowanie jego ruchu. Model matematyczny bezzałogowego pojazdu nawodnego USV pozwala na przeprowadzenie badań symulacyjnych pojazdu w obecności różnych zakłóceń środowiskowych, w celu dostrojenia i przebadania jego systemu sterowania.

### **POSITION STABILIZATION TASK**

After an analysis conducted in the course of previous works [3], it was determined that the USV Ededron would be required to maintain a certain position with a particular precision when carrying out some of its tasks (especially underwater works with the use of a remotely operated vehicle - ROV) (Fig. 1). In work [3] it has been specified that the USV's position should be limited to a circle with the diameter of 20 m.

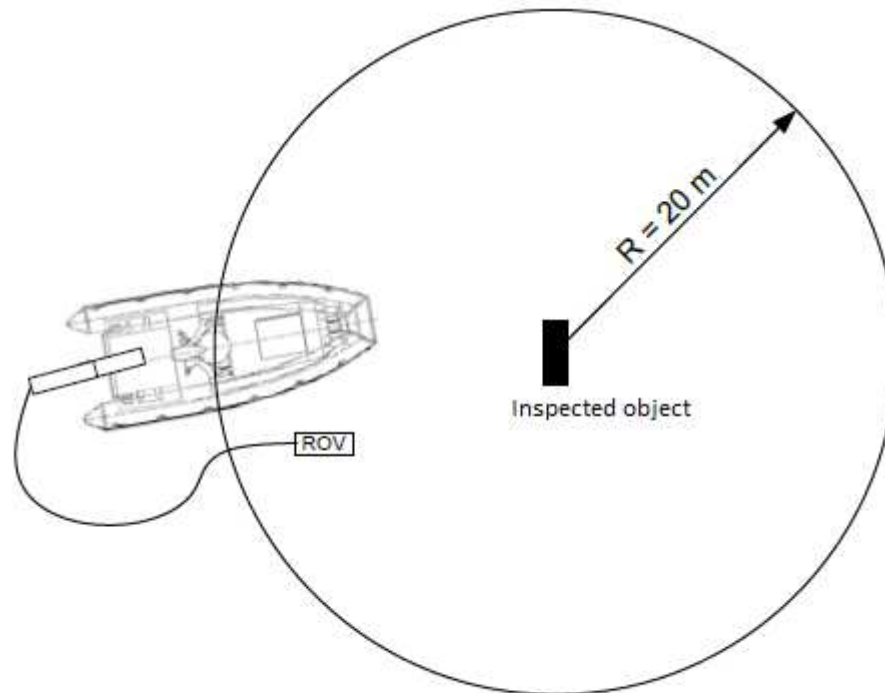


Fig. 1. USV position stabilization task in the course of underwater works with the use of an ROV (fig. from [3]).

An underwater vehicle is driven and controlled with an umbilical of a limited length. Besides that, the more umbilical that has been unrolled from the drum located on the deck of the USV, the larger the restraint on the ROV's hydrodynamic movement decreasing its manoeuvre capabilities. Thus, carrying out underwater works with the use of an ROV launched from the deck of a USV operating in the presence of disturbances characteristic of the marine environment (wind, sea current and waves) requires preparation of a proper position stabilization system.

The USV Ededron has not been equipped with devices allowing position maintenance in a given point, e.g. thrusters or an anchor. The only devices that may be used in position stabilization are a classical steering device and a screw propeller. In such a situation it is necessary to work out control algorithms for those devices with the purpose of stabilizing the position of Ededron.

### **USV MOVEMENT MATHEMATICAL MODEL**

In order to conduct a numerical research with regard to the USV's position stabilization system, it is crucial to provide credible modelling of its movement.

Dla potrzeb modelowania ruchu bezzałogowego pojazdu nawodnego USV edredon wykorzystano model ruchu w 6-ciu stopniach swobody [1,4]. Przyjęte do symulacji komputerowej równania ruchu przyjmują następującą postać macierzową:

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

gdzie:

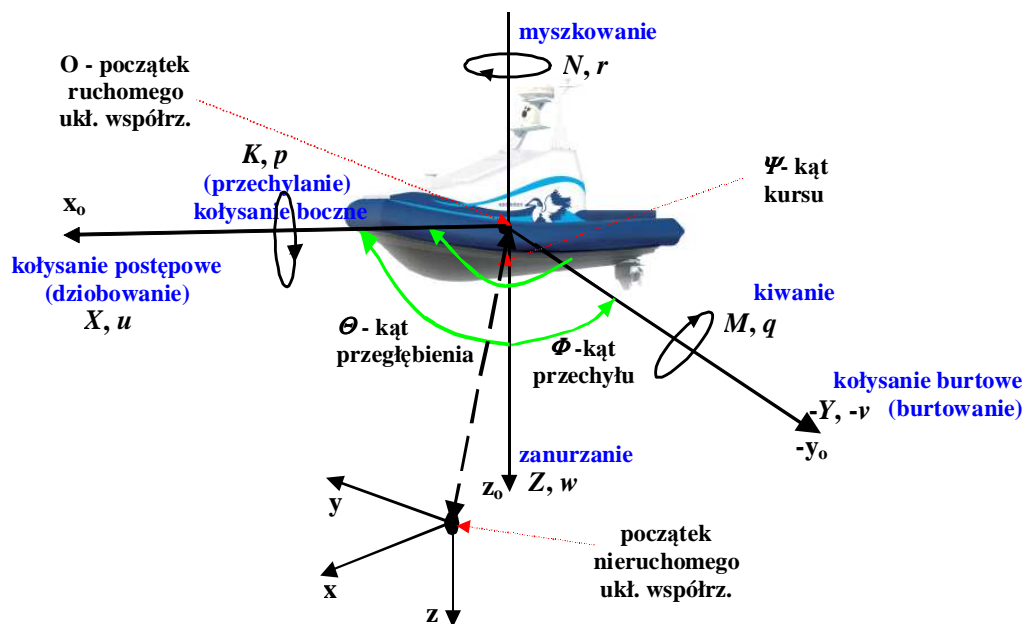
- $v$  – wektor prędkości liniowych i kątowych,
- $M$  – macierz inercji (równa sumie macierzy ciała sztywnego  $M_{RB}$  i macierzy mas towarzyszących  $M_A$ ),
- $D(v)$  – macierz tłumienia hydrodynamicznego,
- $g(\eta)$  – macierz sił przywracających (siły ciężkości  $P$  i siły wyporu  $B$ ),
- $\tau$  – wektor sił i momentów oddziaływujących na pojazd.

Ze względu na pomijalnie małe znaczenie liczbowe, w zależności 1 pominięto wpływ sił Coriolisa. Analiza poszczególnych członów równania 1 zawarta jest w [1,4].

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

- Dla analizy ruchu pojazdu podwodnego przyjęto dwa układy odniesienia (rys. 2):
- 1) ruchomy układ współrzędnych  $x_0$ - $o$ - $y_0$  związany z pojazdem podwodnym,
  - 2) nieruchomy układ współrzędnych  $x$  $z$  związany z Ziemią [1].

W wyniku przeprowadzonej analizy uzyskano nieliniowy model matematyczny ruchu bezzałogowego pojazdu nawodnego. W trakcie analizy dokonano kilku uproszczeń pozwalających na przeprowadzenie symulacji komputerowej modelu matematycznego pojazdu nawodnego. Zastosowane uproszczenia i aproksymacje określonych parametrów i zjawisk wynikają z przyjętych założeń odnośnie obiektu sterowania, czyli bezzałogowego pojazdu nawodnego rozpatrywanego jako ciało sztywne o 3 płaszczyznach symetrii, poruszające się w lepkim płynie.



Rys. 2. USV edredon w układzie odniesienia: związanym z pojazdem i z Ziemi.

The mathematical model for an unmanned surface vehicle (USV) allows carrying out simulation tests on the vehicle, in the presence of various environmental disturbances, with the aim of tuning and checking its control system.

It was decided to apply a model, with six degrees of freedom, for movement modelling of the USV Ededron [1,4]. The movement equations adopted in computer simulation take the following matrix form:

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

where:

- ni- linear and angular velocity vector,
- M – inertia matrix (equal to the sum of the rigid body matrix  $M_{RB}$  and the matrix of added mass  $M_A$ ),
- D(v) – hydrodynamic damping matrix,
- g( $\eta$ ) – restoring forces matrix (gravity P and buoyancy force B),
- tau- vectors of forces and moments of forces having an effect on the vehicle.

Due to the low numerical significance in interrelation 1 the effect of Coriolis forces was omitted. The analysis of particular components of the equation 1 has been presented in [1,4].

In the movement description of an underwater vehicle with six degrees of freedom, linear and angular notation for the vehicle (Fig. 2) were adopted in accordance with SNAME notation (The Society of Naval Architects and Marine Engineers).

The following two frames of reference were adopted in the movement analysis of an underwater vehicle (fig. 2):

- 1) a movable coordinate system  $x_0-y_0-z_0$  in relation to an underwater vehicle,
- 2) a immovable coordinate system  $xyz$  in relation to the Earth [1].

The result of the analysis was a non-linear mathematical movement model for an unmanned surface vehicle. During the analysis several simplifications were made allowing carrying out computer simulation of the model. The applied simplifications and approximations of parameters and phenomena result from the adopted assumptions regarding the controlled object, i.e. an unmanned surface vehicle seen as a rigid body with 3 planes of symmetry moving in a viscous fluid.

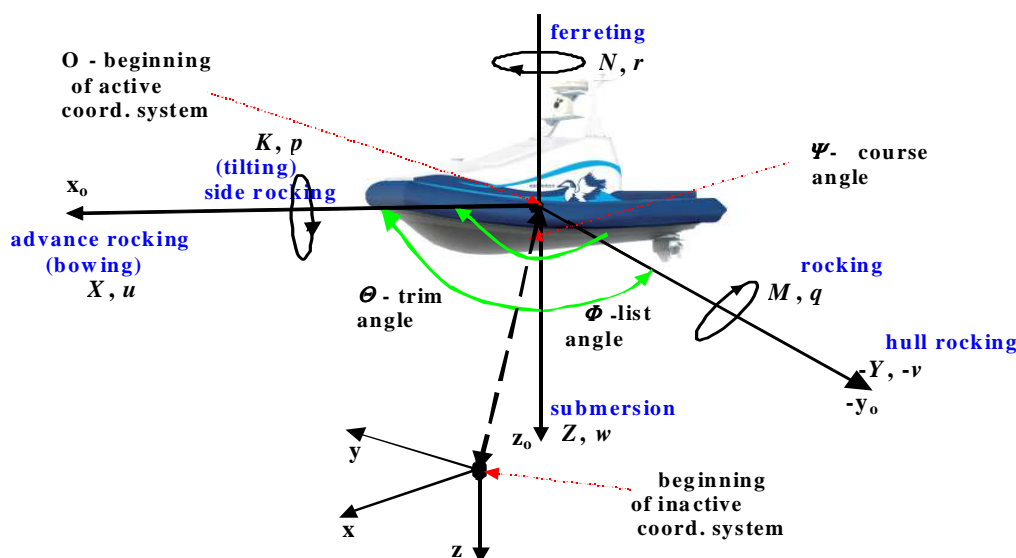


Fig. 2. Ededron USV in the frame of reference: in relation to the vehicle and the Earth.

Na podstawie zależności zamieszczonych w [1,7] obliczono współczynniki hydrodynamiczne modelu ruchu (elementy macierzy w zależności 1), a następnie dostrojono je metodą doświadczalną na podstawie wyników badań statecznościowych i manewrowych (próby cyrkulacji) USV edredon, przeprowadzonych podczas oddawania tej jednostki do użytku [2]. Ponadto należy mieć na uwadze, iż w ruchu tej jednostki można wyróżnić pływanie wypornościowe i ślizgowe, co stanowi dodatkowe utrudnienie w doborze parametrów hydrodynamicznych, tzn. parametry te powinny mieć inne wartości dla obu sposobów pływania pojazdu.

Na podstawie ww. badań statecznościowych i manewrowych ustalono granicę pomiędzy pływaniem wypornościowym a ślizgowym na prędkość pojazdu ok. 11 węzłów, co odpowiada prędkości obrotowej silnika 2650 obr/min. Dla celów symulacji komputerowej przyjęto uproszczenie, że dla prędkości obrotów silnika powyżej 2650 obr/min napór generowany przez pędnik śrubowy zwiększa się razy współczynnik  $3n/3650$  (gdzie  $n$  to aktualna prędkość obrotowa silnika) przy niezmiennych parametrach hydrodynamicznych. Przyjęty doświadczalnie współczynnik zmiany naporu pędnika pozwolił na uzyskanie dobrej jak na warunki morskie wiarygodności modelu w zakresie ruchu postępowego, tzn. osiągnięte postępowe prędkości ruchu dla różnych prędkości obrotowych silnika mieściły się w założonych granicach 10% błędu bezwzględnego w porównaniu do wyników uzyskanych w trakcie ww. badań statecznościowych (trzeba mieć na uwadze, iż badania na obiekcie rzeczywistym mogły być również obarczone błędami).

Natomiast w zakresie właściwości manewrowych model USV zachowuje się podobnie jak rzeczywisty obiekt dla prędkości ruchu 10 węzłów (przy próbach cyrkulacji uzyskuje się jej średnicę równą 17 m), natomiast dla prędkości większych od 11 węzłów, czyli przy pływaniu ślizgowym uzyskuje się niestabilne działanie modelu. Niestabilne zachowanie się model nie pojawia się, gdy pominięty zostaje ww. współczynnik zmiany naporu, ale z kolei w tym przypadku uzyskuje się zbyt małe prędkości ruchu USV. Dlatego też przedstawione w kolejnym rozdziale wyniki działania systemu stabilizacji (w tym regulatorów prędkości postępowej i kursu) zostały przeprowadzone dla całego zakresu prędkości ruchu od 0 do 10 węzłów.

#### **SYSTEM STABILIZACJI POŁOŻENIA USV**

System stabilizacji położenia USV składa się z 3 elementów:

- 1) układu sterowania nadrzędnego, nadzorującego pracę pozostałych elementów, m.in. poprzez włączenie i wyłączenie regulatorów w odpowiednich momentach czasu, generowanie zadanych wartości parametrów regulowanych, itp.,
- 2) regulatora prędkości postępowej, sterującego pracą silnika poprzez generowanie zadanej wartości obrotów silnika,
- 3) regulatora kursu, generującego zadane wychylenia steru.

Hydrodynamic movement model coefficients (the matrix components in interrelation 1) were calculated on the basis of interrelations presented in [1,7], and then adjusted with an experimental method based on the results of stability and manoeuvre tests (circulation trials) on the USV Ededron conducted on its commissioning [2]. Furthermore, it should be remembered that we may distinguish two kinds of vessel movement: displacement and sliding movement, which poses an additional difficulty in the determination of hydrodynamic parameters, i.e. the parameters differing depending on movement type.

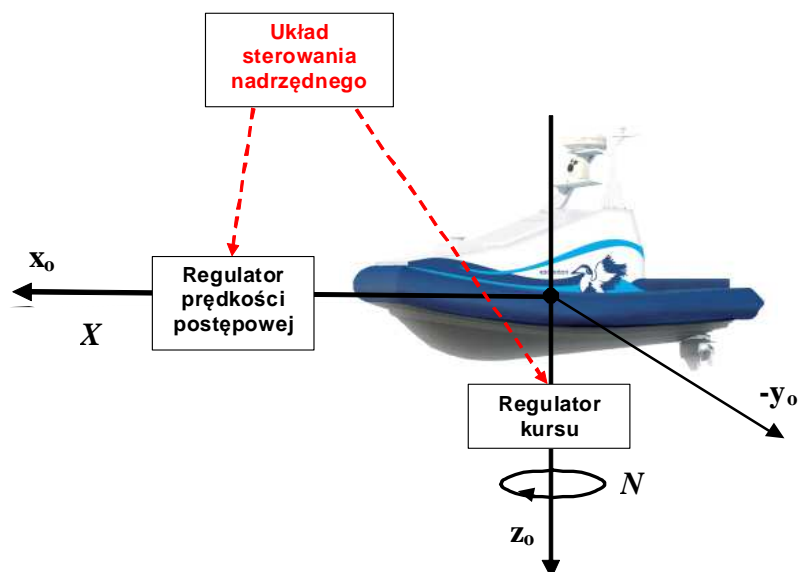
Based on the said stability and manoeuvre tests a boundary between the displacement and sliding movement was set at the vehicle's speed of ca. 11 knots, which corresponds to the engine's rotational speed of 2650 rot/min. In computer simulation a simplification was made that with the rotational speed above 2650 rot/min the impact generated by the screw propeller would cause an increase in the coefficient  $n - 3n/3650$  (where  $n$  is the current rotational speed) in the presence of unchanged hydrodynamic parameters. The adopted propeller impact coefficient change in experiments allowed the achievement of good model credibility (as for marine conditions) with regard to advance movement, i.e. the achieved advance movement speeds for various rotational speed values were within the assumed 10% boundary of the approximation error as compared with the results accomplished during the said stability tests (it must be remembered that tests on an actual object could also be burdened with errors). Whereas with regard to manoeuvre properties the USV model behaves similarly to the actual object at the speed of 10 knots (at circulation trials the diameter was equal to 17 m), while for the speed higher than 11 knots, i.e. for the sliding movement, the model is unstable.

Such an unstable model behaviour does not appear when we omit the said impact change coefficient, however in this case the movement velocity of the USV is too low. Thus the tests concerning the stabilization system presented in the following section (including the advance speed and course regulators) have been conducted for the entire speed range from 0 to 10 knots.

#### **USV POSITION STABILIZATION SYSTEM**

The USV position stabilization system is composed of 3 elements:

- 1) superior control system supervising the work of the remaining components, by switching regulators on or off at particular moments, generating specified parameters, etc.,
- 2) advance speed regulator controlling the work of the engine by generating specified rotation values,
- 3) course regulator generating specified rudder angle.



Rys. 3. Struktura systemu stabilizacji położenia USV.

Układ sterowania nadrzędnego steruje pracą regulatorów w następujący sposób:

- 1) Po uzyskaniu współrzędnych celu misji oblicza zadane wartości kursu i prędkości,
- 2) W trakcie ruchu USV do celu koryguje zadaną wartość kursu w oparciu o algorytm przedstawiony w następnym rozdziale,
- 3) Po dotarciu do punktu oddalonego o ustaloną odległość 5 m od punktu docelowego zatrzymuje silnik,
- 4) Następnie cyklicznie oblicza odległość do celu (stan czuwania), a po uzyskaniu odchylenia od zadanej pozycji równego 20 m ponownie przemieszcza się do celu (realizowane są operacje określone w punkcie 1).

#### ALGORYTM STEROWANIA RUCHEM W OBECNOŚCI ZAKŁÓCEŃ

Wspomniane wcześniej zakłócenia środowiska morskiego powodują „spychanie” pojazdu nawodnego z zadanej trajektorii ruchu (i/lub pozycji). W przypadku, gdy USV jest wyposażony w urządzenia mierzące prędkość i kierunek oddziaływania zakłóceń możliwe jest obliczenie dodatkowego naporu generowanego przez system napędowy, przeciwdziałający zakłóceniom ruchu. Natomiast w przypadku, gdy brak jest informacji o oddziałujących zakłóceniach na USV niezbędne jest korygowanie zadanej wartości kursu. W tym celu wykorzystać można dwie metody:

- 1) ciągła korekcja kursu (w przypadku, gdy pojazd nawodny jest spychany z zadanego toru ruchu, to obliczane są nowe wartości kursu zadanego),
- 2) korekcja kursu zadanego na podstawie namiaru (po wejściu na zadaną trajektorię ruchu obliczane są namiary na cel w płaszczyźnie poziomej; zmiany namiarów w czasie dają pośrednią informację o oddziałujących zakłóceniach).



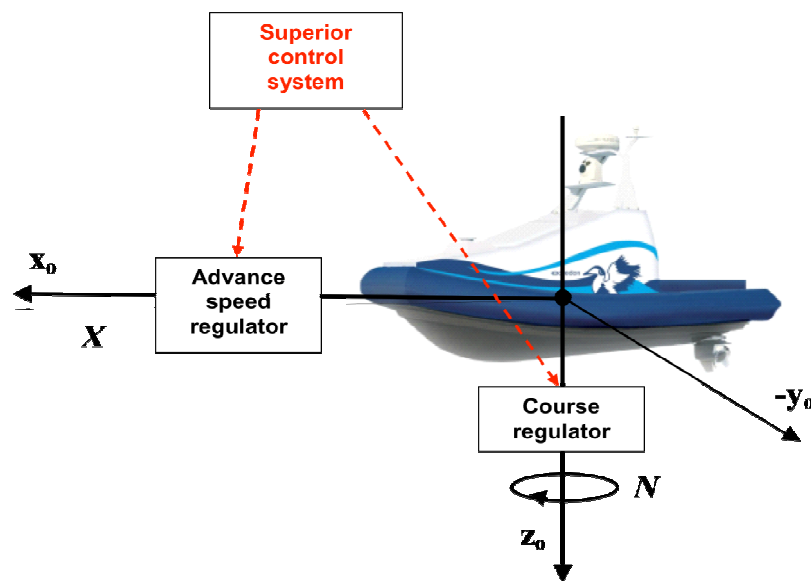


Fig. 3. USV position stabilization system structure.

The superior control system controls the regulators' work in the following manner:

- 1) After receiving mission target coordinates, it calculates the set course and speed values,
- 2) During the USV's movement towards the target, it corrects the set course value based on an algorithm presented in the next section,
- 3) Upon reaching a point 5 m from the target, it stops the engine,
- 4) Next, it cyclically calculates the distance from the target (a stand-by mode), and after reaching the angle to the set position of 20 m it moves again towards the target (the operations defined in pt. 1 are realized).

#### MOVEMENT CONTROL ALGORITHM IN THE PRESENCE OF DISTURBANCES

The mentioned marine environment disturbances cause the surface vehicle to be "pushed away" from the specified movement trajectory (and/or position). In the case of an USV equipped with devices for measuring the speed and direction of disturbances, it is possible to calculate the additional thrust generated by the driving system that counteracts such movement/disturbances. Whereas, in a situation when there is a lack of information on the disturbances having an effect on the USV it is necessary to adjust the course value. We may apply two methods for this purpose:

- 1) a continuous course adjustment method (calculating new course values in the case when the surface vehicle is pushed away from the specified route),
- 2) a set course correction based on coordinates (after reaching the specified movement trajectory, the target coordinates are calculated in a horizontal plane; coordinate changes in time provide indirect information on present disturbances).

Jak pokazały wcześniejsze badania [4,5] druga metoda korekcji jest bardziej efektywna. Metoda ta jest oparta na prostej zależności:

$$\psi_n = \psi_{n-1} + k_b \cdot \Delta b_n \quad (2)$$

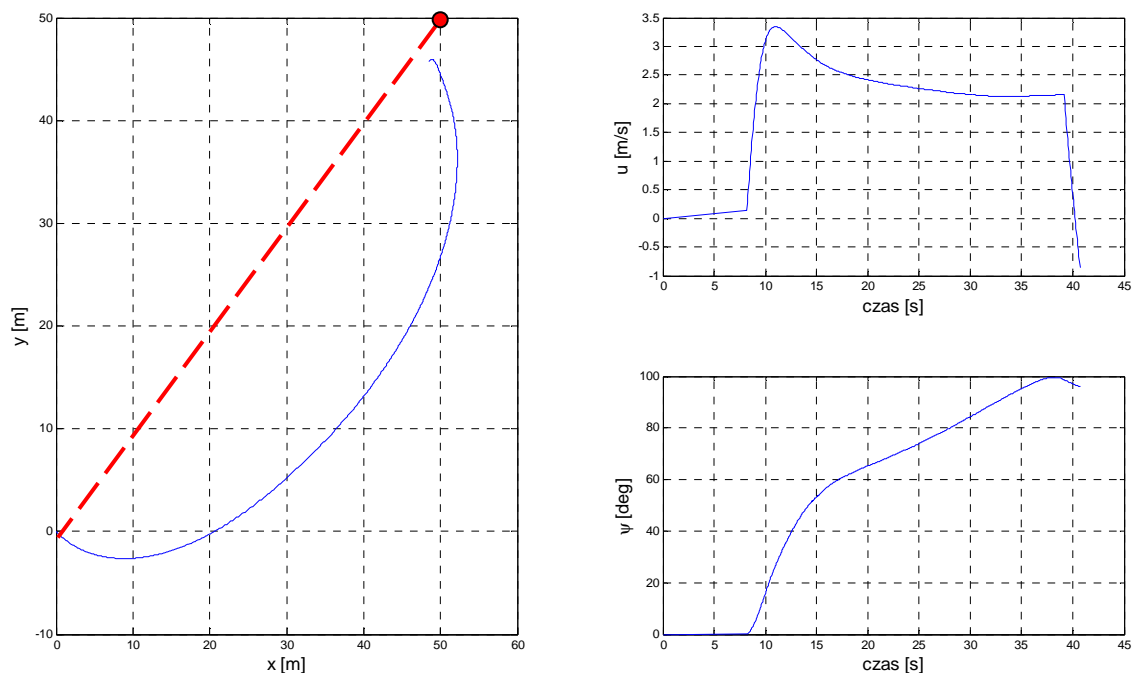
gdzie:

- $\psi_n$  - kurs zadany w  $n$  kroku symulacji,
- $\psi_{n-1}$  - kurs zadany w  $n-1$  kroku symulacji,
- $k_b$  - współczynnik wzmocnienia,
- $\Delta b_n$  - błąd namiaru w  $n$  kroku symulacji.

Na podstawie badań symulacyjnych uproszczonego modelu ruchu USV edredon uzyskano dostrojoną wartość współczynnika wzmocnienia  $k_b$  równą 725. W zakresie modelowania zakłóceń ruchu wykorzystano zasadę superpozycji [1].

Poniżej zobrazowano trajektorie ruchu USV z ciągłą korekcją kursu zadanego (Rys. 4) i z korekcji kursu zadanego na podstawie namiaru (Rys. 5) w środowisku z oddziałującymi zakłóceniami o kierunku oddziaływania  $90^\circ$  i prędkości 1 m/s.

Jak można zauważyć, metoda korekcji kursu zadanego na podstawie namiaru jest bardziej efektywna od ciągłej korekcji kursu zadanego, co obrazuje odchylenie toru ruchu USV od toru ruchu zadanego (zilustrowanego na Rys. 4 i 5 w postaci linii prostej wyznaczonej pomiędzy punktami startu (0,0) i celu (50,50) misji). W przypadku ciągłej korekcji kursu zadanego odchylenie położenia USV od zadanego toru ruchu sięga 25 m, a w przypadku korekcji kursu zadanego na podstawie namiaru tylko 7 m. Dlatego też w dalszej części badań wykorzystano drugą, bardziej efektywną metodę przeciwdziałania zakłóceniom ruchu USV.



Rys. 4. Ciągła korekcja kursu zadanego w środowisku z oddziałującymi zakłóceniami o kierunku działania  $90^\circ$  i prędkości 1 m/s.

As the previous tests showed [4,5] the second correction method is more effective. The method is based on a simple interrelation:

$$\psi_n = \psi_{n-1} + k_b \cdot \Delta b_n \quad (2)$$

where:

- $\psi_n$  - course set at n simulation step,
- $\psi_{n-1}$  - course set at n-1 simulation step,
- $k_b$  - gain factor,
- $\Delta b_n$  - bearing error at n simulation step.

Based on simulation tests on a simplified USV Ededron movement model it was possible to receive an adjusted value of the gain factor  $k_b$  equal to 725. Movement disturbance modelling was carried out on the basis of superposition principle [1]. Below we present USV movement trajectories with continuous set course adjustment (Fig. 4) and set course correction based on coordinates (Fig. 5) in the environment with disturbances of 90° impact direction and the speed of 1 m/s.

As we may observe, the method of set course correction based on coordinates is more effective than the method of continuous set course adjustment, which is depicted in the USV's route deviation from the designated route (as illustrated in Fig. 4 & 5 as a straight line drawn between the starting point (0,0) and target point (50,50)). In the case of continuous set course correction the deviation in the USV's position in relation to the set route reaches 25 m, whereas in the case of set course correction based on coordinates it amounts only to 7 m.

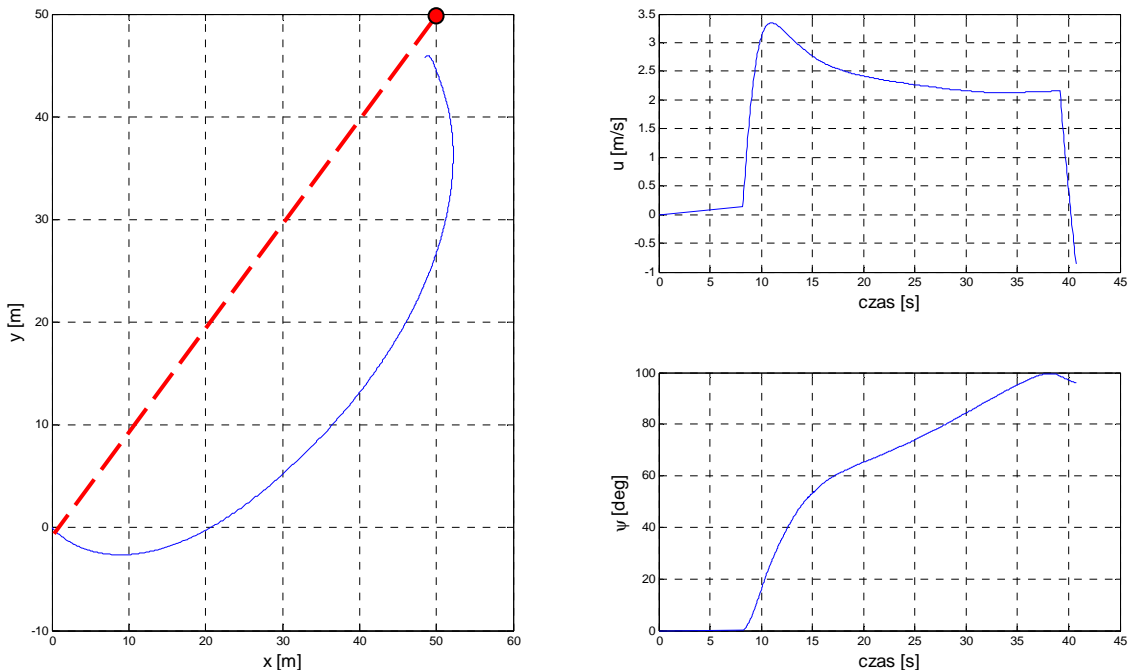
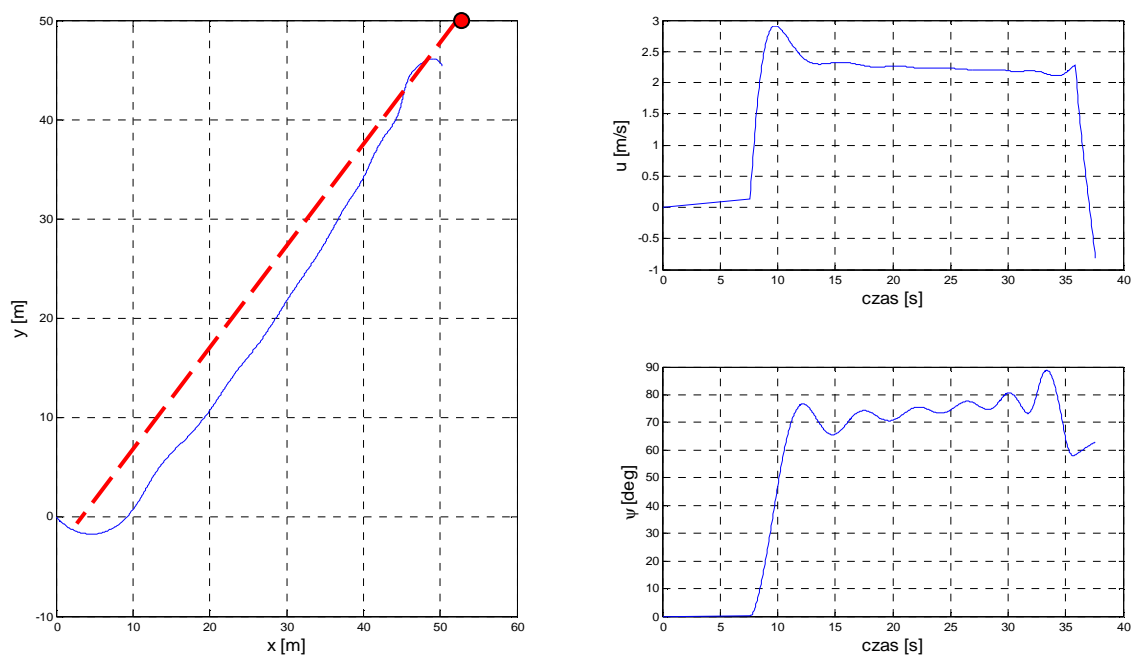


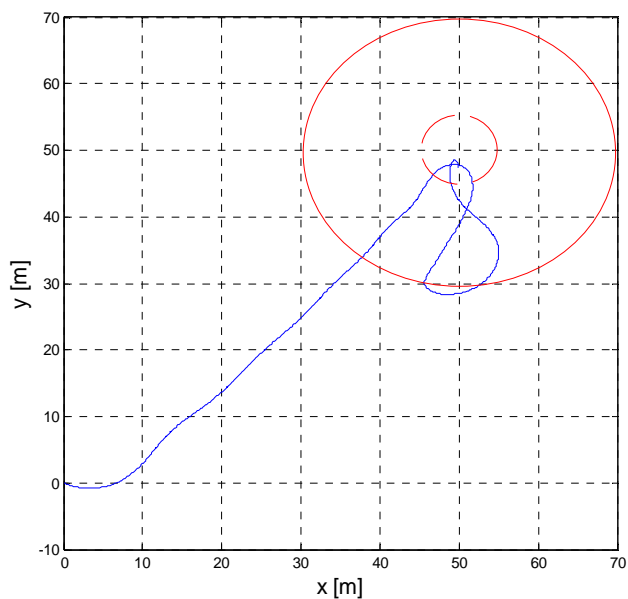
Fig. 4. Continuous set course correction in the environment characterised by the presence of disturbances with 90° impact direction and the speed of 1 m/s.



Rys. 5. Korekcja kursu zadanego na podstawie namiaru w środowisku z oddziałującymi zakłóceniami o kierunku działania  $90^\circ$  i prędkości 1 m/s.

#### WYNIKI BADAŃ NUMERYCZNYCH

Na Rys. 6 przedstawiono trajektorię ruchu USV przy stabilizacji jego położenia w środowisku z oddziałującymi zakłóceniami o kierunku działania  $90^\circ$  i prędkości 1 m/s, natomiast na Rys. 7 przebieg zmian regulowanych parametrów ruchu: kursu i prędkości postępowej.



Rys. 6. Trajektoria ruchu USV przy stabilizacji jego położenia w środowisku z oddziałującymi zakłóceniami o kierunku działania  $90^\circ$  i prędkości 1 m/s.

For this reason in the follow-up part of the research the latter, more effective method for counteracting the USV's movement disturbances was chosen.

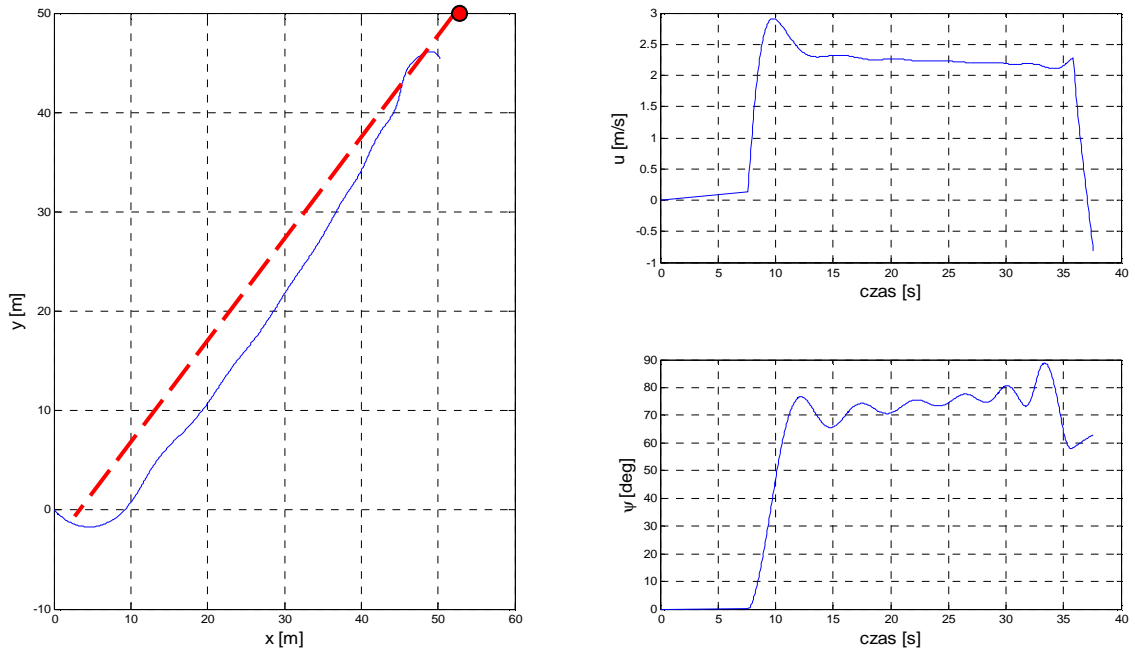


Fig. 5. Set course correction based on coordinates in the environment characterised by the presence of disturbances of 90° impact direction and the speed of 1 m/s.

### NUMERICAL RESEARCH RESULTS

Fig.6 presents the USV's movement trajectory with position stabilization in the environment with the presence of disturbances with 90° impact direction and the speed of 1m/s. Fig 7., on the other hand, shows changes in the regulated movement parameters: course and advanced speed.

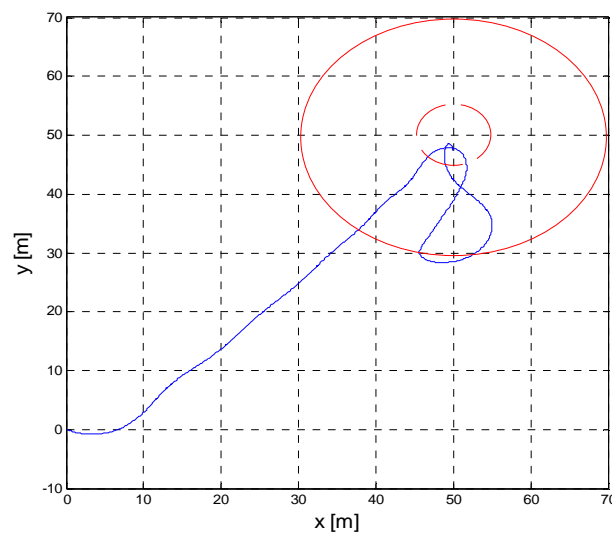
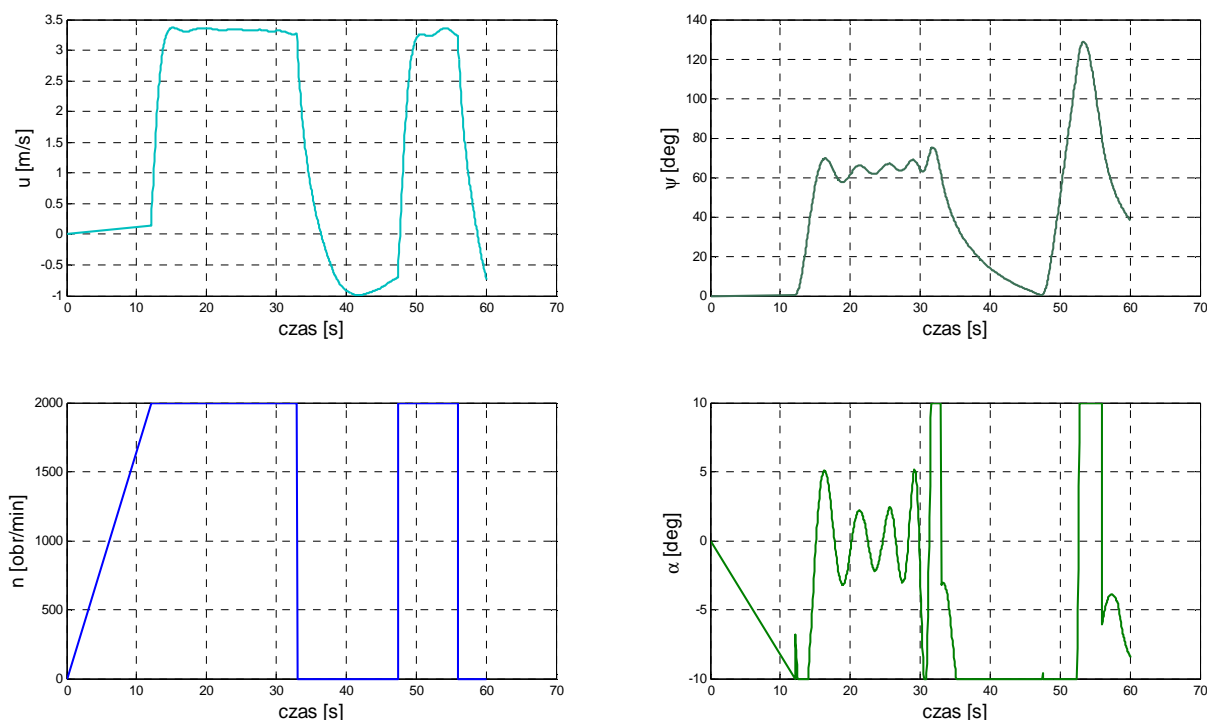


Fig. 6. The USV's movement trajectory with position stabilization in the environment characterised by the presence of disturbances of 90° impact direction and the speed of 1 m/s.



Rys. 7. Regulacja prędkości i kursu USV przy stabilizacji jego położenia w środowisku z oddziałującymi zakłóceniami o kierunku działania  $90^\circ$  i prędkości 1 m/s.

Jak można zauważyć, USV podchodzi do celu, którym jest punkt o współrzędnych (50,50). Założono, że pojazd dociera do celu, gdy znajdzie się w odległości od danego punktu mniejszej niż 5 m, stąd też na Rys. 1.5 można zauważyć strefę kołową oznaczoną czerwoną przerywaną linią. Po dotarciu do celu USV jest zatrzymywany (Rys. 7 – ok. 35 sekunda symulacji). Następnie na pojazd oddziałują zakłócenia środowiska, które powodują jego spychanie z zadanej pozycji. Po zepchaniu USV z kolejnej strefy kołowej oznaczonej czerwoną ciągłą linią (zgodnie z założeniami przedstawionymi powyżej) pojazd bezzałogowy włącza swoje silniki i ponownie podąża do celu. W ten sposób uzyskuje się efekt stabilizacji położenia z zadaną dokładnością 20 m bez specjalnych urządzeń napędowych.

Na Rys. 8 i 9 pokazano ten sam sposób sterowania ruchem USV dla zakłóceń o innym kierunku oddziaływania i innej prędkości. Podobnie jak poprzednio, pojazd bezzałogowy po zepchaniu go przez oddziałujące zakłócenia z strefy kołowej oznaczonej czerwoną ciągłą linią stabilizuje swoją pozycję poprzez przemieszczenie się bliżej punktu danego.

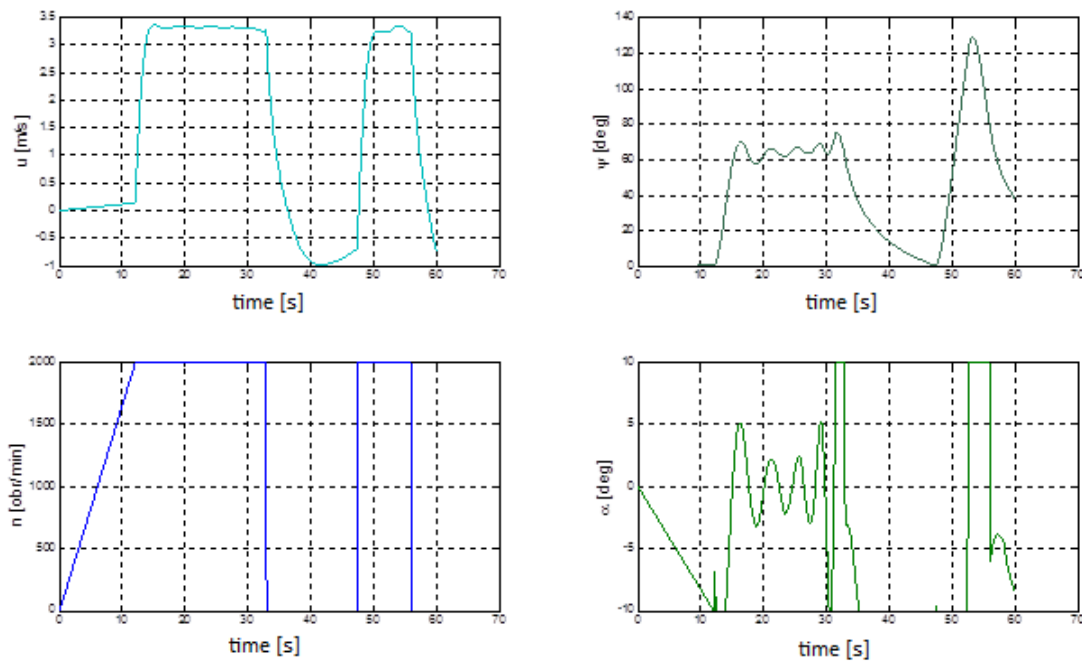
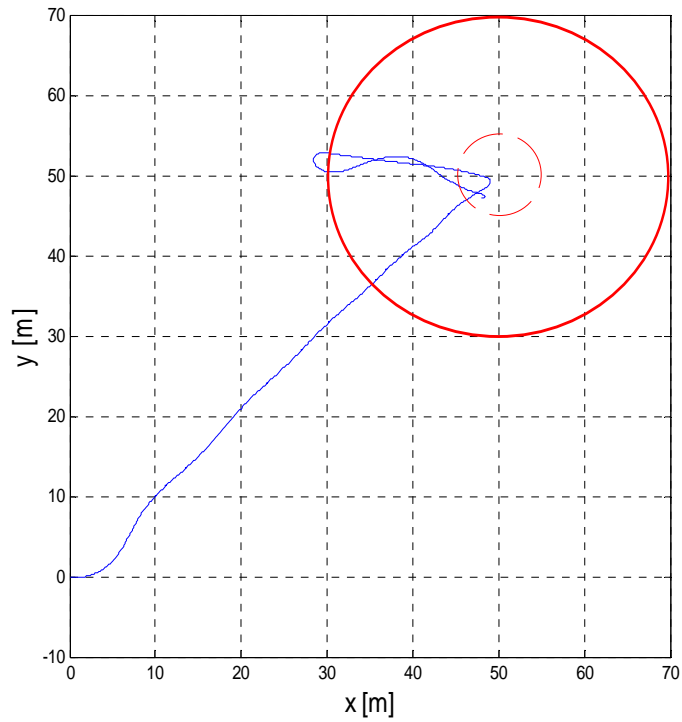


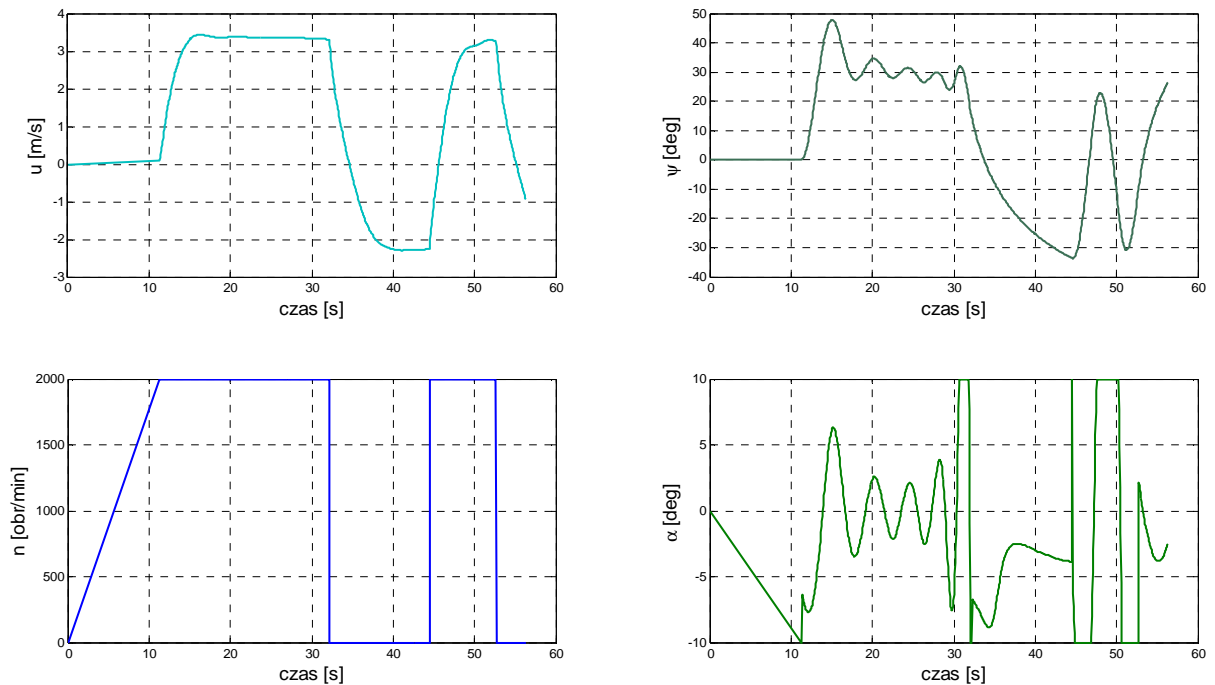
Fig. 7. The USV's speed and course adjustment with position stabilization in the environment characterised by the presence of disturbances of  $90^\circ$  impact direction and the speed of 1 m/s.

As we see, the USV approaches the target, i.e. the point with the coordinates (50,50). It was assumed that the vehicle has reached the target when it was closer than 5 m from the set point, hence in Fig. 5 we observe a circled area marked with a red dashed line. After reaching the target the USV is stopped (Fig. 7 – simulation at ca. 35 sec.). Next, the vehicle is subjected to environmental disturbances causing it to be pushed away from the defined position. After the USV is pushed aside from another circular zone marked with a red line (according to the above assumptions) the unmanned vehicle turns on its engines and moves again towards the target. This allows it to obtain the desired positional stabilization effect with the 20 m accuracy, without the use of any special driving devices.

Fig. 8 & 9 show the same manner for controlling the USV movement with disturbances characterised by a different impact direction and speed. As before, after the USV is pushed by the disturbance from the circular zone marked with a red line, it stabilizes its position by moving closer to a specified point.



Rys. 8. Trajektoria ruchu USV przy stabilizacji jego położenia w środowisku z oddziałującymi zakłóceniami o kierunku działania  $0^\circ$  i prędkości 2,2 m/s.



Rys. 9. Regulacja prędkości i kursu USV przy stabilizacji jego położenia w środowisku z oddziałującymi zakłóceniami o kierunku działania  $0^\circ$  i prędkości 2,2 m/s.



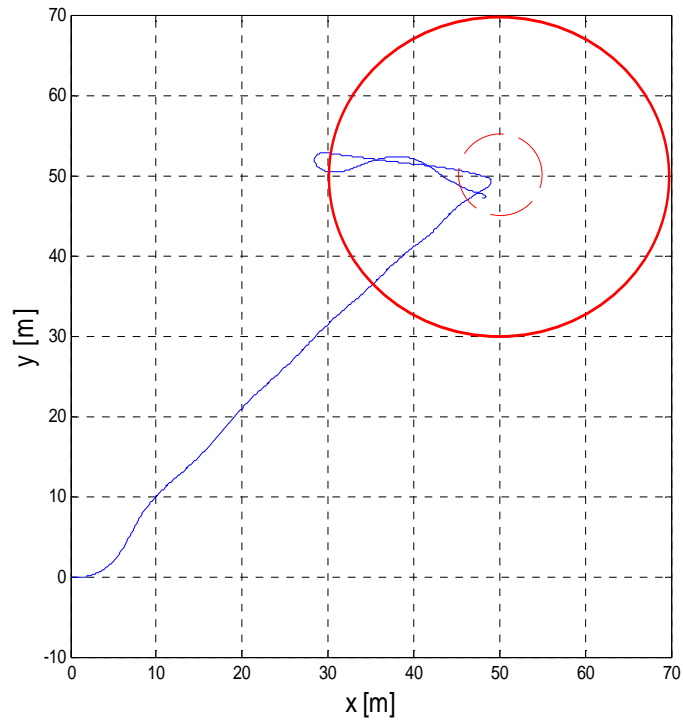


Fig. 8. The USV's movement trajectory at position stabilization in the environment characterised by disturbances with  $0^\circ$  impact direction and the speed of 2.2 m/s.

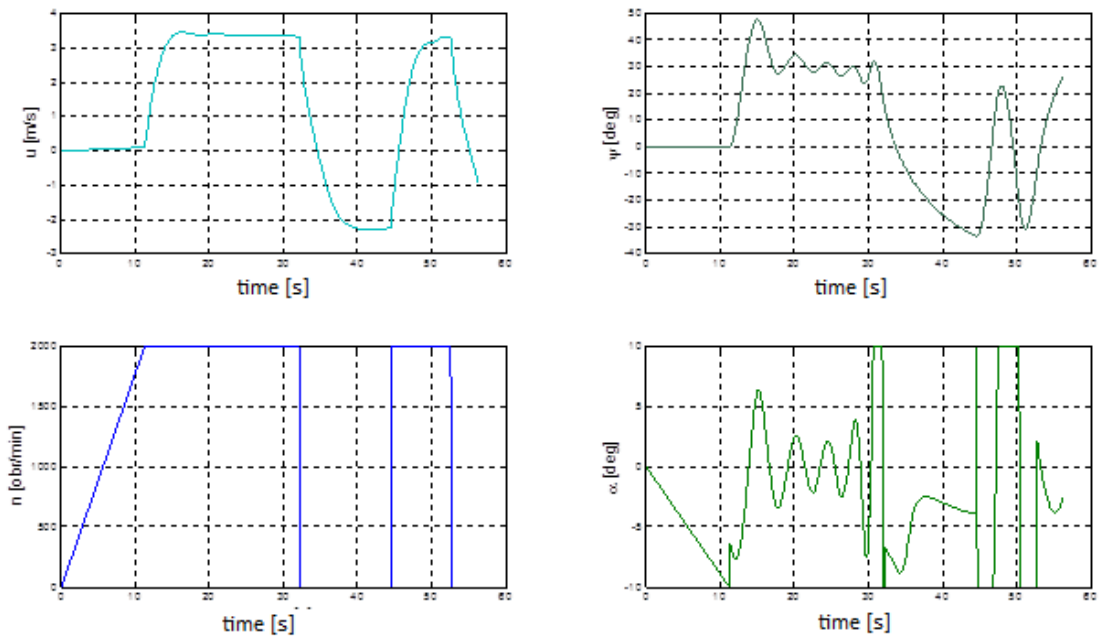


Fig. 9. The USV's speed and course adjustment at position stabilization in the environment characterised by disturbances with  $0^\circ$  impact direction and the speed of 2.2 m/s.

#### PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych można stwierdzić, że:

- 1) system stabilizacji USV poprawnie steruje urządzeniami wykonawczymi (silnikiem i sterem) w celu stabilizacji położenie w określonej odległości od punktu zadanego,
- 2) zastosowana metoda korekcji kursu zadanego na podstawie namiaru pozwala na przeciwdziałanie zakłóceniom nawet w przypadku, gdy pojazd bezzałogowy nie ma odpowiednich urządzeń pomiarowych,
- 3) uzyskane badania numeryczne potwierdzają dobrą jakość sterowania zaprojektowanych regulatorów kursu i prędkości postępowej,
- 5) uzyskane wyniki wymagają weryfikacji na obiekcie rzeczywistym (testy przeprowadzone zostały na uproszczonym modelu bezzałogowego pojazdu nawodnego).

**Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010 – 2012 jako projekt rozwojowy Nr O R 00 0106 12.**

**CONCLUSIONS:**

Based on the conducted numerical tests we may conclude as follows:

- 1) the USV stabilization system correctly controls its executive devices (engine and rudder) with the purpose of achieving position stabilization at a specified distance from the defined point,
- 2) the applied method of set course correction based on coordinates allows the counteraction of disturbances even when an unmanned vehicle is not equipped with proper measurement devices,
- 3) the results of numerical tests confirm good control quality of the designed course and advance speed regulators,
- 5) the achieved results require verification on an actual object (the test were carried out on a simplified model of an unmanned surface vehicle).

**Scientific work financed from educational funds in the years 2010 – 2012 as  
a development project No. O R 00 0106 12.**

#### LITERATURA/ BIBLIOGRAPHY

- [1] Fossen T.I.: *Marine Control Systems*, Marine Cybernetics AS., Trondheim, Norway 2002.
- [2] Kitowski Z., i inni: *Bezzałogowa wielowariantowa platforma pływająca dla wsparcia działalności morskich służb państwowych*, sprawozdania z pracy rozwojowej, 2010.
- [3] Olejnik A., Chrabąszcz P., Jakus B., Polak A.: *Taktyka działania i wykorzystania pojazdu głębinowego (ROV) w działaniach inspekcyjnych*, sprawozdanie z pracy umownej, wydawnictwo AMW, 2012.
- [4] Praczyk T. Szymak P.: *Opracowanie i implementacja regulatorów kursu i prędkości postępowej USV*, sprawozdanie z pracy umownej, wydawnictwo AMW, 2012.
- [5] Szymak P.: *Strategy to Steer of Underwater Vehicle with Torpedo-Shaped Body in Environment with Affecting Sea Currents*, Proceedings of the XVI-th International Scientific and Technical Conference 'The Role of Navigation in Support of Human Activity on the Sea', wydawnictwo AMW, Gdynia, 2008, str. 109-115.
- [6] Szymak P., Praczyk T.: *Comparison of control methods of underwater vehicle in case of lack of sea current measurement*, HARD Publishing Company, Polish Journal of Environmental Studies, Vol.17, No.3C, 2008, str. 101-104.
- [7] Szymak P.: *Wykorzystanie metod logiki rozmytej do sterowania zespołem okrętowym pojazd podwodny - ładunek*, sprawozdanie z pracy badawczej własnej, Akademia Marynarki Wojennej, 2008.

### **СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ МЕСТА БЕСПИЛОТНОГО НАДВОДНОГО АППАРАТА**

Специфика осуществления подводного исследования с использованием дистанционно-управляемых подводных аппаратов ROV (ang. Remotely Operated Vehicle) запускаемого с борта беспилотного надводного транспортного средства USV (ang. Unmanned Surface Vehicle) требует стабилизации положения USV с заданной точностью. Эта статья изучает проблемы разработки системы стабилизации позиции польского USV- 'Edredon'.

В данной статье представлены предположения для задач стабилизации положения, а потом архитектура системы стабилизации и также выбранных исследований численных результатов этой системы. Кроме того, представлено методы профилактики предотвращения помех, которые действуют на корпус беспилотного надводного транспортного средства и выбранные результаты работы в моделированной окружающей среде системы управления USV- 'Edredon' с помощью этого метода.

**Ключевые слова:** беспилотное надводное транспортное средство, системы стабилизации положения USV, предотвращения помех влияющих на корпус судна.