

Prof. dr hab. inż. Zygmunt Kitowski
Dr inż. Bogdan Żak
Akademia Marynarki Wojennej

STABILIZACJA ODLEGŁOŚCI OD DNA MORSKIEGO BEZZAŁOGOWEGO POJAZDU PODWODNEGO

W pracy przedstawiono dwie metody stabilizacji położenia bezzałogowego pojazdu podwodnego. Określono zakres stosowalności obu metod w zależności od wyposażenia pojazdu jak również od profilu dna morskiego nad którym będzie się on poruszał. Dla obu metod określono zasadę sterowania wykorzystywaną w procesie stabilizacji odległości.

STABILIZATION THE DISTANCE BETWEEN THE SEA BOTTOM AND THE UNDERWATER VEHICLE

In the paper are present two methods of stabilization of position the underwater vehicle. Defined range application both methods taking accessories the vehicle and outline sea bottom into consideration. For both methods defined principle control to use of process stabilization distance.

1. WPROWADZENIE

Podstawowym problemem w czasie eksploatacji pojazdu podwodnego jest zapewnienie mu odpowiednich właściwości manewrowych tj. problem przystosowywania się pojazdu do zmieniającej się sytuacji zewnętrznej i wyboru takiego sterowania, który zapewniaby odpowiednią dokładność i bezpieczeństwo ruchu.

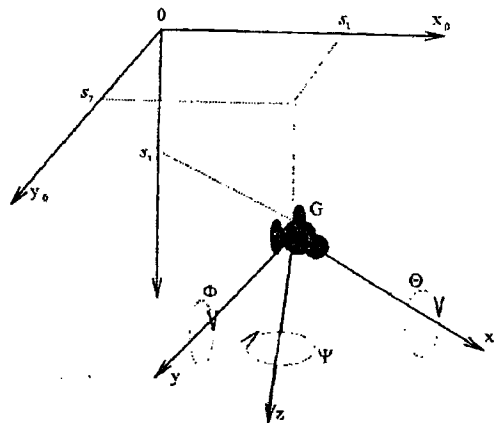
Opis matematyczny wymaganych właściwości poruszania się pojazdu wyrażony jest najczęściej w postaci specjalnych algorytmów, które wiążą między sobą parametry środowiska zewnętrznego i współrzędne pojazdu lub ich pochodne. Każdy z algorytmów zapewniający określony ruch pojazdu, realizowany jest w określonych warunkach w jakich może się znaleźć pojazd. Inaczej mówiąc aktualnie, w większości przypadków konieczne jest wcześniejsze rozpatrzenie różnorodnych sytuacji, których zaistnienie jest bardzo prawdopodobne w czasie ruchu pojazdu, zwłaszcza w pobliżu dna o złożonym profilu. W przypadku zmiany sytuacji następuje zmiana programu (algorytmu) ruchu. W ten sposób osiąga się wymagane przystosowanie się pojazdu do zmian środowiska zewnętrznego. System informacyjno-obliczeniowy pojazdu dokonuje klasyfikacji sytuacji, przełączania algorytmów ruchu, pomiaru odchylenia położenia i prędkości pojazdu od wartości zadanych itp. Ponieważ programowe położenie pojazdu zadawane jest poprzez algorytmu ruchu to analiza tych algorytmów pozwala określać konieczne strumienie przepływu informacji i sposoby ich przetwarzania. Tak więc algorytmy ruchu adaptacyjnego pojazdu mają w tym przypadku charakter algorytmów kinematycznych. Związane jest to z tym, że początkowo przyjmujemy jaki powinien być ruch, nie uwzględniając jego zależności od sił sterujących. Jednak aby realizacja tego ruchu była możliwa, pojazd powinien posiadać możliwość wypracowywania wymaganych wartości sił sterujących. Jedynym środkiem sterowania pojazdem podwodnym bardzo często są pędniki, których liczba i usytuowanie na pojeździe określają liczbę stopni swobody w jakich pojazd może być sterowany. Dlatego też algorytmy ruchu pojazdu muszą

uwzględniać konieczną liczbę sterowanych stopni swobody. Problem wyboru struktury układu napędowego pojazdu tj. różnego typu pędników i ich rozmieszczenia na pojeździe do tej pory opiera się na doświadczeniu.

Teoretycznego uzasadnienia struktury układów napędowych pojazdów podwodnych i możliwości danego układu napędowego do realizacji tych lub innych stanów ruchu nie ma. Zaproponowany poniżej algorytm pozwala (dla określonej struktury układu napędowego pojazdu podwodnego), na prowadzenie w czasie rzeczywistym identyfikacji parametrów dynamicznych pojazdu. Pozwala to na ciągłe uwzględnianie w algorytmach sterowania wpływu zmieniającej się dynamiki i oddziaływania na niego stochastycznych wymuszeń zewnętrznych.

2. DYNAMIKA BEZZAŁOGOWEGO POJAZDU PODWODNEGO

Dynamikę pojazdu podwodnego przedstawia się jako ruch ciała sztywnego o sześciu stopniach swobody w trójwymiarowym układzie współrzędnych kartezjańskich. Do opisu ruchu pojazdu niezbędne są dwa układy współrzędnych: ruchomy, związany z pojazdem ($Gxyz$) i geograficzny układ odniesienia, stały względem Ziemi ($0x_0y_0z_0$) rys.1.



Rys.1 Układy współrzędnych związane z ruchem pojazdu podwodnego.

Przy opisie ruchu pojazdu w płaszczyźnie pionowej (bez uwzględnienia kołysań bocznych) używa się równań sił względem osi x i z oraz równania momentów względem osi y :

$$\begin{aligned} (m + \lambda_{33})\dot{v}_x - (m + \lambda_{11})v_x\omega_y &= P \sin \Phi + C_{23} \frac{\rho v^2}{2} S + F_1 \\ (m + \lambda_{11})\dot{v}_z + (m + \lambda_{33})v_z\omega_y &= P \cos \Phi + C_{21} \frac{\rho v^2}{2} S + F_3 \\ (I_{22} + \lambda_{55})\dot{\omega}_y &= -h_0 \rho g V \sin \Phi + m_2 \frac{\rho v^2}{2} V + M_2 \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

- m - masa pojazdu,
- $\lambda_{11}, \lambda_{33}, \lambda_{55}$ - współczynniki mas wody towarzyszącej i momentu inercji,
- v_x, v_z - składowa wzdłużna i pionowa prędkości pojazdu,
- ω_y - prędkość kątowna,
- h_0 - wysokość metacentryczna,

- P - siła od pływerności szczałkowej,
 Φ - kąt przegłębienia,
 C_{21}, C_{23}, m_2 - współczynniki sił i momentu oporu,
 S - płaszczyzna przekroju bocznego pojazdu,
 V - objętość pojazdu,
 F_1, F_3, M_2 - siły i moment wytworzone przez układ napędowy.

Położenie pojazdu określone jest współrzędnymi punktu G w nieruchomym układzie współrzędnych i trzema kątami Eulera. Oznaczmy współrzędne punktu G przez (s_1, s_2, s_3) , kąt kursowy przez Ψ , przegłębienie przez Φ oraz przechył boczny przez Θ . Wówczas położenie pojazdu względem dna morza można opisać w następujący sposób:

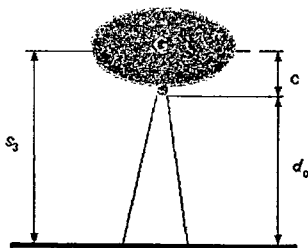
$$s_3 - c = d_0 = const$$

$$\Theta = 0$$

(2)

$$\Phi = 0$$

gdzie: c - odległość zamontowanego na pojeździe hydrolokatora od środka ciężkości pojazdu,
 d_0 - odległość do dna (rys.2).



Rys.2 Położenie pojazdu względem dna morza

3. STABILIZACJA BEZZAŁOGOWEGO POJAZDU PODWODNEGO NA ZADANEJ ODLEGŁOŚCI OD DNA

Wykorzystanie pojazdu podwodnego do obserwacji dna morskiego, badania obiektów leżących na dnie itp., związane jest z zapewnieniem ruchu pojazdu w określonej stałej odległości od dna. W ogólnym przypadku ruch ten polega na manewrowaniu pojazdem w przestrzeni w taki sposób aby pojazd realizując postawione zadanie omijał wykryte przeszkody podwodne w postaci zatopionych obiektów i nierówności dna. Pojazd powinien być wyposażony w urządzenia zapewniające określenie jego pozycji i wykrywanie wszystkich obiektów i przeszkód ruchomych i nieruchomych w otaczającej go przestrzeni. W najprostszym wariantcie, umożliwiającym ruch pojazdu na zadanej odległości od dna, układ sterowania powinien wykorzystywać: układ stabilizacji kursu, pracujący według programu, który nie zależy od profilu dna oraz układ stabilizacji pojazdu na zadanej odległości od dna, wyposażony w hydrolokatory dostarczające informacji związanej z profilem dna i pojawiającymi się przeszkodami. Omijanie niewielkich nierówności dna jest możliwe przy wykorzystaniu w układzie stabilizacji jednego hydrolokatora pod warunkiem, że pojazd charakteryzuje się dobrymi właściwościami manewrowymi. Przy bardziej złożonym profilu dna, konieczne jest ciągłe określanie jego średniego nachylenia. Cel ten można osiągnąć poprzez zastosowanie hydrolokatora skanującego lub kilku (dwóch, trzech) hydrolokatorów, których wiązki promieniujące zorientowane są pod różnymi kątami w stosunku do osi

wzdłużnej pojazdu. W oparciu o pomiar kilku odległości uzyskiwana jest wówczas informacja o kształcie dna oraz wyznaczony zostaje sygnał sterujący, utrzymujący pojazd na zadanej odległości od dna i w bezpiecznej odległości od pojawiających się przeszkód.

Przy budowie modelu matematycznego, opisującego proces omijania przez pojazd przeszkód znajdujących się na dnie morskim, przyjmujemy następujące założenia:

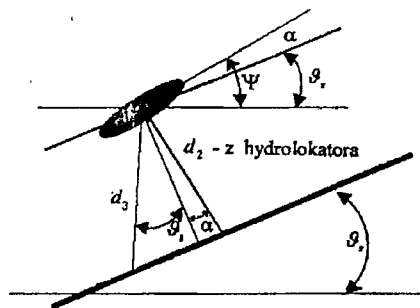
- profil dna przedstawiony jest w postaci pojedynczych lub grupowych przeszkód o dowolnym kształcie,
- jako trajektorię wzorcową po której porusza się pojazd w trakcie omijania przeszkód przyjmowana jest krzywa jednakowych odległości względem profilu dna. Położenie środka ciężkości pojazdu względem profilu dna, scharakteryzowane jest odległością d_2 do dna w kierunku prostopadłym do osi wzdłużnej pojazdu,
- celem stabilizacji jest utrzymanie zadanej odległości od dna, minimalnej dopuszczalnej bezpiecznej odległości pojazdu od przeszkody oraz orientacja osi wzdłużnej pojazdu zgodnie z krzywizną profilu dna lub przeszkody,
- odległości mierzone są za pomocą hydrolokatorów o ustalonym kierunku promieniowania.

3.1. Stabilizacja przy wykorzystaniu jednego hydrolokatora i miernika kąta przegłębienia.

Stabilizacja odległości od dna pojazdów podwodnych w przypadku małego nachylenia dna jak wspomniano wyżej jest stosunkowo prosta. Realizowana jest ona analogicznie do stabilizacji głębokości. Różnica polega jedynie na rodzaju wykorzystywanych czujników pomiarowych i dokładności stabilizacji.

Rozpatrzmy najprostszы wariant ruchu pojazdu na zadanej odległości od dna, realizowany w oparciu o jeden hydrolokator oraz miernik przegłębienia Ψ . Zmiana głębokości wody pod kilem lub co jest równoważne odległości d_3 (w linii prostopadłej) do dna, którego profil opisany jest funkcją $\vartheta(x)$, wynosi:

$$d_3 = \nu \sin[\vartheta - \vartheta(x)] \quad (3)$$



Rys.3 Określenie dokładności stabilizacji odległości pojazdu od dna.

Przyjmujemy, że profil dna $\vartheta(x)$ jest płaski o niewielkim nachyleniu (stromości $\vartheta(x) = \vartheta_s$). Zadanie stabilizacji polega na tym, aby rzeczywista trajektoria ruchu pojazdu z określoną dokładnością odtwarzała profil dna (przy jednoczesnym utrzymaniu zadanej odległości od dna). Przy ruchu pojazdu wzdłuż zbocza dna konieczne jest w rozpatrywanym przypadku utrzymanie wartości: $\vartheta = \pm \vartheta_s$ i $d_3 = d_{3z}$. W praktyce trudno jest realizować pomiar wielkości d_3 . Dlatego też najprościej jest za odległość od dna przyjąć odległość d_2 wzdłuż linii

prostopadłej do osi wzdłużnej pojazdu, która jest mierzona przez hydrolokator na sztywno związany z kadłubem pojazdu (rys.3). W powyższym przypadku powstaje jednak dodatkowy uchyb pomiaru wynikający z faktu, że odległość d_2 nie jest odległością mierzoną prostopadle do profilu dna. Mierzona za pomocą hydrolokatora głębokość d_2 związana jest z wartością d_3 zależnością: $d_2 = d_3 \cos \vartheta_1 / \cos \alpha$ (α - kąt ataku przy ruchu pojazdu podwodnego wzdłuż dna).

Przy dużym nachyleniu dna, różnica między mierzoną wartością d_2 i głębokością wzdłuż linii pionowej $d_3 \approx d_2 \cos \Psi (1 + \operatorname{tg} \Psi \operatorname{tg} \vartheta_1)$ może być znaczna. Jak wynika z rys.3, zmiana wielkości d_2 w czasie ruchu powinna spełnić równość:

$$d_2 \approx v \sin \alpha \approx v \alpha \quad (4)$$

W stanie ustalonym dla zasady sterowania:

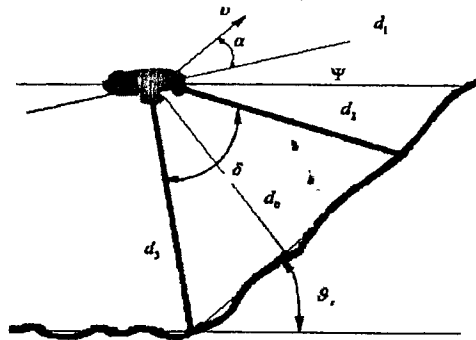
$$M_{zster} = k_\Psi \Psi + k_d \Delta d = k_\Psi \Psi + k_d (d_2 - d_{2z}) \quad (5)$$

mamy: $\alpha = 0$, $\vartheta = \Psi = \vartheta_z$ oraz $\Delta d = -\frac{k_\Psi + M_0}{k_d} \vartheta_z$,

stąd wynika, że uchyb regulacji (proporcjonalny do kąta nachylenia dna) jest ujemny przy wynurzeniu się pojazdu i dodatni przy zanurzaniu się.

3.2. Stabilizacja pojazdu przy wykorzystaniu kilku hydrolokatorów

Możliwość manewrowania pojazdem w płaszczyźnie pionowej określona jest maksymalnym kątem nachylenia trajektorii i odpowiadającej mu maksymalnie dopuszczalnej odległości od przeszkody, przy której zachodzi jej obejście. Układ sterowania jest stosunkowo prosty, jeżeli minimalna odległość od przeszkody, kąt trajektorii i kąt nachylenia profilu dna określane są w przybliżeniu w oparciu o pomiar kilku odległości mierzonych za pomocą hydrolokatorów umieszczonych w dziobowym sektorze obserwacji pojazdu (urządzenia hydrolokacyjne zorientowane są do przodu, w dół i pod kątem δ do osi pionowej pojazdu. Rozpatrzmy przedstawiony powyżej sposób sterowania (rys. 4).



Rys.4. Schemat pomiaru odległości za pomocą trzech hydrolokatorów. d_1 , d_2 , d_3 odległości mierzony w kierunku monitorowania poszczególnych hydrolokatorów, d_0 - najkrótsza odległość, α - kąt ataku, δ - kąt między normalną do osi wzdłużnej i linii monitorowania środkowego hydrolokatora, Ψ - kąt przegięcia.

Odległości d_1 , d_2 , d_3 mierzone są odpowiednio w kierunku osi wzdłużnej, pod kątem δ do

osi normalnej i w kierunku osi normalnej, tj. d_1 - jest odległością do przeszkody mierzoną w kierunku ruchu pojazdu, d_2 - odległością mierzoną pod kątem δ do osi normalnej i d_3 - odległością mierzoną w kierunku prostopadłym do ruchu pojazdu.

Stabilizacja ruchu środka ciężkości pojazdu w oparciu o kąt trajektorii przy przemieszczaniu się pojazdu wzdłuż profilu dna oznacza utrzymywanie kierunku wektora prędkości postępowej równoległe do kierunku stycznej do profilu w dowolnym momencie czasu. Warunek przy którym wymagane to jest spełnione sprowadza się do utrzymania odpowiedniej wartości kąta ataku α wyznaczonej na podstawie pomiaru odległości d_2 i d_3 :

$$\operatorname{tg} \alpha = -\operatorname{ctg} \delta + \frac{d_2}{d_3 \sin \delta} \quad (6)$$

Powyższy wzór otrzymano w rezultacie zamiany linii profilu dna odcinkiem prostej, zawartej między dwoma promieniami d_2 i d_3 . Zastosowana aproksymacja jest dopuszczalna pod warunkiem uśrednienia pomiarów w czasie tj. "ślizgania się" promieni wzdłuż rozpatrywanego profilu. Przy sterowaniu pojazdem w oparciu o różnicę kątów α i δ , należy wyznaczyć sygnał proporcjonalny do wielkości:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{d_2}{d_3 \sin \delta} - \operatorname{ctg} \delta \right) \quad (7)$$

który, zapewniłby stały zadany kierunek wektora prędkości postępowej pojazdu. Ponieważ ruch pojazdu odbywa się przy wartości kąta ataku różnej od zera to oś wzdłużna pojazdu nie jest równoległa do nachylenia (profilu) dna. Powoduje to, że uchyb stabilizacji wysokości pojazdu nad dnem jest proporcjonalny do kąta nachylenia profilu dna. Powoduje to, że w przypadku wykorzystywania np. kamery do obserwacji dna, jej oś optyczna która jest prostopadła do osi wzdłużnej pojazdu, nie będzie skierowana prostopadle do dna. W związku z tym powstaje problem sterowania pojazdem nie według kąta ataku (kąta trajektorii), a według orientacji osi wzdłużnej. Warunek przy którym oś wzdłużna pojazdu jest równoległa do nachylenia dna ma postać:

$$d_3 - d_2 \cos \delta = 0 \quad (8)$$

Różnica $d_3 - d_2 \cos \delta$ może być wykorzystana jako jeden z sygnałów sterujących. Wielkość kąta δ wybieramy tak, aby przy ślizganiu się promienia wzdłuż powierzchni dna miało miejsce dostatecznie silne odbicie sygnałów, które osiąga się przy wartościach δ , zbliżonych do 45° .

Sygnał, proporcjonalny do wielkości $d_3 - d_2 \cos \delta$, zapewnia odpowiednią jakość sterowania na odcinkach o płynnie (łagodnie) zmieniającym się profilu dna. Hydrolokator umieszczony w osi wzdłużnej pojazdu musi w tym przypadku zapewnić wykrycie przeszkody w odległości umożliwiającej wykonanie bezpiecznego manewru. W tym celu zadaje się pewną odległość krytyczną, po osiągnięciu której pojazd wykonuje manewr w ten sposób aby jego oś była zorientowana na wierzchołek przeszkody. Zwrot o wymagany kąt realizowany jest poprzez wyznaczenie sygnału proporcjonalnego do wielkości $d_2 - d_1 a_1$, gdzie parametr a_1 wybiera się z warunku dążenia danej wielkości do zera przy braku sygnału d_1 (brak przeszkody na kursie pojazdu), przy ruchu prostoliniowym ($d_1 \geq d_{1\max}$), tj.

$$a_1 = \frac{d_{3z}}{d_{1\max}} = \frac{d_{2z}}{d_{1\max} \cos \delta} \quad (9)$$

gdzie: d_{2z} , d_{3z} - zadane wartości odległości,

$d_{1\max}$ - zasięg hydrolokatora umieszczonego na dziobie pojazdu.

Przy podejściu do przeszkody sygnały $d_2 - d_1 a_1$ i $d_3 - d_2 \cos \delta$ działają przeciwnie, dlatego też konieczne jest ich przełączanie, co osiąga się poprzez wprowadzenie funkcji kary odległości d_1^0 i określenie znaku wielkości $d_1 - d_1^0$.

Dla utrzymania pojazdu w zadanej odległości od dna, do zasady sterowania wprowadza się sygnał różnicy bieżących wartości trzech odległości od ich wartości zadanych, wziętych z określoną wagą odpowiadającą kierunkom promieniowania hydrolokatorów. Postępowanie takie jest równoważne stabilizacji pewnej średniej odległości d_1 , zamiast stabilizacji minimalnej odległości do trajektorii. Sumaryczny sygnał pozycyjny jest wówczas następujący:

$$\sum_{i=1}^3 \left(d_i - \frac{d_{2z}}{a_i} \right) \quad (10)$$

$$\text{gdzie: } a_1 = \frac{d_{3z}}{d_{1\max}}, \quad a_2 = \frac{d_{2z}}{d_{3z}} = \cos \delta, \quad a_3 = 1.$$

Ostatecznie zasada sterowania pojazdem podwodnym w płaszczyźnie pionowej ma postać:

$$\sigma = A \sum_{i=1}^3 \left(d_i - \frac{d_{2z}}{a_i} \right) + B\Psi + C(d_2 - d_3 a_2) \quad \text{dla } d_1 > d_1^0 \quad (11)$$

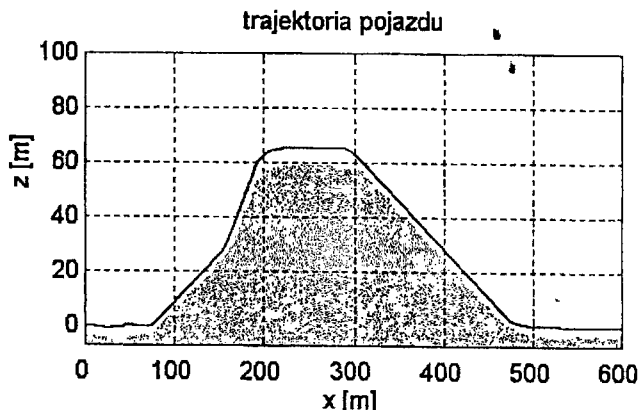
$$\sigma = A \sum_{i=1}^3 \left(d_i - \frac{d_{2z}}{a_i} \right) + B\Psi + C(d_2 - d_1 a_1) \quad \text{dla } d_1 \leq d_1^0$$

gdzie: A, B, C – współczynniki stałe zapewniające żądane charakterystyki dynamiczne.

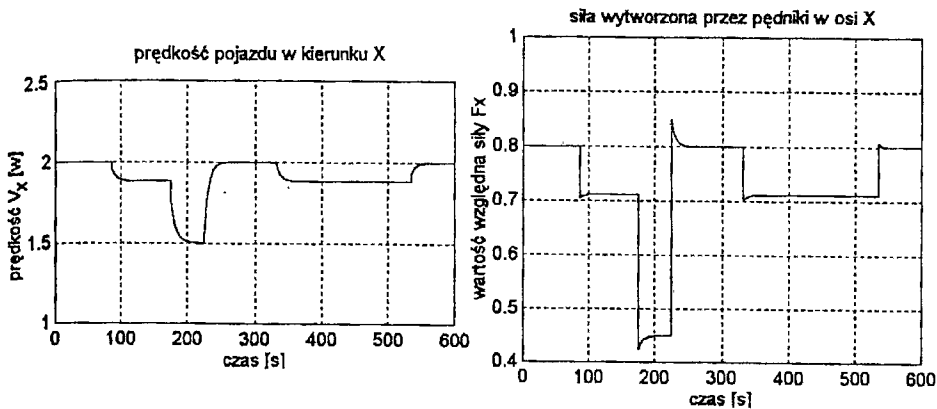
Wybór parametrów zasady sterowania dla konkretnego typu pojazdu podwodnego realizującego zadanie stabilizacji stałej odległości od dna morskiego w oparciu o przedstawione powyżej sposoby sterowania, najprościej jest realizować w oparciu o modelowanie matematyczne.

4. BADANIA SYMULACYJNE

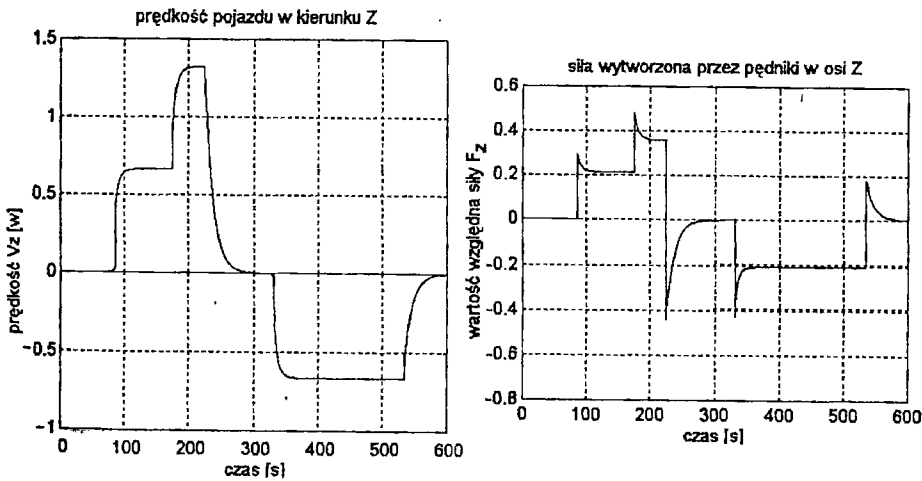
Dla bezzałogowego pojazdu podwodnego przeprowadzono badania symulacyjne dla przypadku omijania przeszkody podwodnej w kształcie wzniesienie o wysokości 60[m]. Badania przeprowadzono dla stabilizacji z wykorzystaniem jednego hydrolokatora i miernika przechyłu oraz przy założeniu że prędkość wypadkowa pojazdu $v = const$. Wyniki symulacji przedstawiono na rys.5-7.



Rys.5 Trajektoria pojazdu przy mijaniu wzniesienia



Rys.6 Przebieg prędkości pojazdu oraz siły działającej w osi X przy mijaniu wzniesienia



Rys.7 Przebieg prędkości oraz siły działającej w osi Z przy mijaniu wzniesienia

LITERATURA

- [1] Kitowski Z.: *Sterowanie pojazdem podwodnym w czasie jego ruchu w pobliżu dna*. V Sympozjum Wojskowej Techniki Morskiej, Gdynia, październik 1995, s.268-273.
- [2] Kitowski Z., Garus J.: *A self-Adapting control system of underwater vehicle's motion*. First International Conference on Marine Technology, Szczecin 1995, s.159-164.
- [3] Kitowski Z., Żak B., Pekała J.: *About method of determine underwater vehicle's motion trajectory*. International Conference on Communication, Signals and Systems. Republika Czeska, Brno, wrzesień 1996, s.347-351.
- [4] Tadeusz LISTKOWSKI i inni, Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego p.n.: „Identyfikacja w czasie rzeczywistym obiektów podwodnych przy wykorzystaniu statku głębinowego oraz zestawu do przekazu, odbioru i zapisu obrazu wizyjnego w kanale radiowym”. Praca realizowana w ramach grantu Nr 0 T00A 036 12. AMW, Gdynia 2000.