

## ANALIZA DOKŁADNOŚCI PROWADZENIA WYPORNOŚCIOWYCH OBIEKTÓW NAWODNYCH PO ZADANEJ TRAJEKTORII W RÓŻNYCH WARUNKACH HYDROMETEOROLOGICZNYCH

ZYGMUNT KITOWSKI

*Wyższa Szkoła Marynarki Wojennej, Gdynia*

### Streszczenie

W artykule przedstawione zostały wnioski dotyczące dokładności utrzymania wypornościowych obiektów nawodnych różnej wyporności na zadanym prostoliniowym odcinku trajektorii (pracujących w oparciu o regulator przedstawiony w pracy [2]) w różnych warunkach hydrometeorologicznych, wynikające z przeprowadzonych badań modelowych.

### 1. Wprowadzenie

Wypornościowe obiekty nawodne należy zaliczyć do tej klasy obiektów, których ze względu na ich właściwości dynamiczne w chwili obecnej nie można w pełni zautomatyzować. W czasie pływania na otwartych akwenach sterowanie obiektem nawodnym realizowane jest najczęściej za pomocą autopilota kursu odpowiedniej konstrukcji. Znaczna część czasu obejmuje jednak pływanie w warunkach ograniczeń na trajektorię ruchu (brzegi, mielizny, tory wodne, inne obiekty stacjonarne i nawodne, wykonywanie zadań specjalnych itp.). W wymienionych przypadkach sterowanie przejmuje najczęściej doświadczony sternik, ponieważ układy automatycznego prowadzenia obiektów pływających po zadanej trajektorii praktycznie nie weszły jeszcze do eksploatacji. Sterowanie ręczne jest jednak niedoskonałe, prowadzić może do powstania niebezpiecznych sytuacji i w efekcie do, kolizji i awarii. Z tego względu najnowszymi rozwiązaniami autopilotów coraz częściej stawiane jest zadanie polegające na realizacji możliwości prowadzenia obiektu przez wąskie tory wodne, kanały, manewrowanie na wodach ograniczonych itp.

Działające w tym czasie na obiekt siły zewnętrzne jak wiatr, falowanie, przechył boczny, niesymetryczne działanie śrub na obiektach dwuśrubowych, niesymetria kadłuba itp., przy wymogu precyzyjnej nawigacji nabierają szczególnego znaczenia i muszą być uwzględnione w procesie sterowania.

W proponowanych obecnie rozwiązaniach rozróżnia się dwa zasadnicze typy autopilotów umożliwiających stabilizację trajektorii: ,

— w pierwszym stabilizację trajektorii realizuje się za pomocą kolejnych zmian kursu zadawo-  
nego obliczanego przez maszynę cyfrową i podawanego na konwencjonalnego auto-

pilota kursu, pracującego w układzie stabilizacji kursu — do grupy tej można zaliczyć te autopiloty, które mają możliwość zmiany kursu obiektu z określoną prędkością kątową zwrotu. Problem prowadzenia obiektu po zadanej trajektorii sprowadza się w tym przypadku do odpowiednio wcześniejszego wyznaczenia momentu rozpoczęcia manewru zmiany kursu obiektu w zależności od żądanej wartości zmiany kursu, prędkości postępowej obiektu i warunków pogodowych tak, aby wyszedł on dokładnie na zadaną trajektorię. Układy te pracujące najczęściej w oparciu o regulatory typu PID w czasie zmiany trajektorii wymagają zmiany struktury np. na PD.

- w drugim stabilizację trajektorii realizuje się wykorzystując maszynę cyfrową do bezpośredniego sterowania trajektorią. Układy te wymagają wprowadzenia do zasady sterowania wartości wielkości odchylenia poprzecznego od zadanej trajektorii. W układach tych można spotkać takie, które do wypracowania części zasady sterowania wykorzystują stosowane do tej pory autopiloty kursu oraz takie w których sygnał sterujący jest realizowany bezpośrednio przez maszynę cyfrową, te ostatnie nie zostały jednak jeszcze sprawdzone w warunkach rzeczywistych.

Wymienione układy przy odpowiednim doborze parametrów i struktury regulatora zapewniają dobrą jakość prowadzenia obiektu po trajektorii. Wymagają one jednak każdorazowej zmiany parametrów regulatora w zależności od warunków pływania i zmian właściwości dynamicznych obiektu. W warunkach eksploatacyjnych jest to praktycznie niemożliwe i wymaga co najmniej przeprowadzenia odpowiednich prób manewrowych przed oddaniem jednostki do eksploatacji.

*Trudności te zmuszają do poszukiwania nowych dróg konstrukcji układów sterowania kursem i trajektorią wypornościowych obiektów nawodnych.* Przeprowadzona analiza istniejących rozwiązań, pozwoliła na wysunięcie tezy, że możliwe jest zaprojektowanie układu prowadzenia obiektów nawodnych po zadanej trajektorii z dokładnością  $\pm 0,25L$  ( $L$  — długość obiektu na wodnicy). Taką dokładność prowadzenia obiektów nawodnych po zadanej trajektorii zapewnić może regulator stanu realizujący bezpośrednie sterowanie cyfrowe. Istota pracy regulatora oparta jest o analizę stanów układu w każdej chwili próbkowania oraz zadanego stanu końcowego. Na podstawie porównania stanu aktualnego z zadanym stanem końcowym maszyna cyfrową wypracowuje odpowiednią poprawkę do sygnału otrzymywanego ze sprzężeń zwrotnych. Suma obu sygnałów podawana jest na urządzenie wykonawcze — maszynę sterową. Zaletą takiego regulatora jest jego prostota. Nie zmienia on swojej struktury przy przejściu z jednego stanu pracy do drugiego. Stałe pozostają również współczynniki sprzężeń zwrotnych układu, których zadaniem jest zapewnienie stateczności kursowej obiektu nawodnego (w praktyce spotykane są obiekty nawodne stateczne i niestateczne kursowo), co jest warunkiem koniecznym stateczności układu prowadzenia obiektu nawodnego po zadanej trajektorii.

Zasada sterowania regulatora ma postać\*

$$m(kT) = - \sum_{i=0}^{n-1} k_i X_i(kT) + m^*(kT), \quad (1)$$

gdzie:

\* ) Jeżeli układ otwarty prowadzenia obiektu po trajektorii jest stateczny, sterowanie realizowane jest tylko za pomocą sygnału  $m^*(kT)$ .

- $k_i$  — współczynniki sprzężeń zwrotnych,  
 $m^*(kT)$  — bieżąca poprawka wypracowywana przez maszynę cyfrową w zależności od zmian warunków pogodowych i charakterystyk dynamicznych obiektu sterowania,  
 $m(kT)$  — sygnał podawany na maszynę sterową.

W artykule została dokonana analiza dokładności prowadzenia wypornościowych obiektów nawodnych po zadanej trajektorii w różnych warunkach hydrometeorologicznych. Jako przykład poprawnej pracy regulatora przedstawiono realizację odchylenia poprzecznego od zadanej trajektorii kilku jednostek o różnych wypornościach.

## 2. Układ bezpośredniego cyfrowego prowadzenia wypornościowych obiektów nawodnych po zadanej trajektorii

Równania różniczkowe opisujące ruch nieliniowego układu prowadzenia obiektu nawodnego po zadanej trajektorii mają postać:

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2, \\ \dot{X}_2 &= -r_{31}X_2 - q_{31}X_3 + s_{31}X_4 + p_{31}\dot{\alpha}_b, \\ \dot{X}_3 &= -r_{21}X_2 - a|X_3|X_3 - bX_3 + s_{21}X_4 + p_{21}\alpha_b, \\ \dot{X}_4 &= X_5, \\ \dot{X}_5 &= -1/T_{MS}X_5 + k_{MS}/T_{MS}m, \\ \dot{X}_6 &= v \sin(X_1 - \Psi_Z - X_3) \pm v_{ZNP}, \\ \dot{X}_7 &= v \cos(X_1 - \Psi_Z - X_3) \pm v_{ZNW}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

gdzie:

- $X_1 \div X_7$  — zmienne stanu układu (kurs, prędkość kątowna zwrotu, kąt dryfu, kąt wychylenia płetwy sterowej, prędkość kątowna wychylenia płetwy sterowej, poprzeczne odchylenie od trajektorii, przemieszczenie obiektu wzdłuż trajektorii),  
 $q_{ij}, r_{ij}, s_{ij}$  — współczynniki hydrodynamiczne kadłuba i steru,  
 $k_{MS}$  — współczynnik wzmocnienia maszyny sterowej,  
 $T_{MS}$  — stała czasowa maszyny sterowej,  
 $m$  — sygnał sterujący podawany na maszynę sterową,  
 $\alpha_b, \dot{\alpha}_b$  — wymuszenia od falowania działające na kadłub obiektu (kąt nachylenia stycznej do fali i jego pochodna),  
 $v$  — prędkość postępową obiektu,  
 $v_{ZNP}$  — prędkość znosu obiektu w kierunku poprzecznym do trajektorii będąca wynikiem działania wiatru i prądu,  
 $v_{ZNW}$  — prędkość przemieszczania się obiektu wzdłuż zadanej trajektorii wskutek działania wiatru i prądu,  
 $\Psi_Z$  — kurs zadany.

Równanie (2) zapisane jako wektorowo-macierzowe równanie różniczkowe ma postać:

$$\dot{X}(t) = \mathbf{A}(t)X(t) + B(t)m(t) + C(x, t) \quad (3)$$

gdzie:

- $\mathbf{A}(t)$  — macierz obiektu  $n \cdot n$ , której elementy są funkcją prędkości postępowej obiektu  $v$ , zanurzenia obiektu  $T_z$ , głębokości wody pod stępką  $H$ , parametrów maszyny sterowej itp.,
- $\mathbf{B}(t)$  — wektor sterowania  $n \times 1$ , którego elementy są funkcją parametrów maszyny sterowej
- $\mathbf{X}(t)$  — wektor stanu  $n \times 1$ , charakteryzujący stan obiektu sterowania i maszyny sterowej,
- $m(t)$  — sygnał sterujący podawany na maszynę sterową,
- $\mathbf{C}(x, t)$  — wektor zakłóceń  $n \times 1$ , będący funkcją nieliniowości układu, falowania, wiatru i prądu.

W przypadku zastosowania do sterowania maszyny cyfrowej równanie (3) przyjmuje postać

$$\mathbf{X}(k+1)T = \Phi(kT)\mathbf{X}(kT) + \mathbf{G}(kT)m(kT) + \mathbf{N}(kT)\mathbf{C}(kT) \quad (4)$$

Przyjmując, że czas zmian właściwości dynamicznych układu prowadzenia obiektu po zadanej trajektorii, w porównaniu z czasem wypracowania sygnału sterującego jest duży (rzędu minut lub większy) można przyjąć, że

$$\mathbf{X}(k+1)T = \Phi(T)\mathbf{X}(kT) + \mathbf{G}(T)m(kT) + \mathbf{N}(T)\mathbf{C}(kT) \quad (5)$$

Optymalny ciąg sygnałów sterujących przeprowadzających układ opisany równaniem (5) z dowolnego stanu początkowego  $\mathbf{X}(0)$  do dowolnego stanu  $\mathbf{X}(k)$  (przy założeniu sterowalności i obserwowalności układu) w minimalnym czasie otrzymywany jest z rozwiązania układu

$$\mathbf{M}_1(T)m^T(iT) = \mathbf{X}(k) - \Phi(nT)\mathbf{X}(0) - \mathbf{M}_2(T), \quad i = 0, \dots, n-1 \quad (6)$$

gdzie:

- $m^T(iT)$  — wektor sygnałów sterujących,
- $\mathbf{X}(0)$  — wektor stanu początkowego układu,
- $\mathbf{X}(k)$  — wektor stanu końcowego układu,

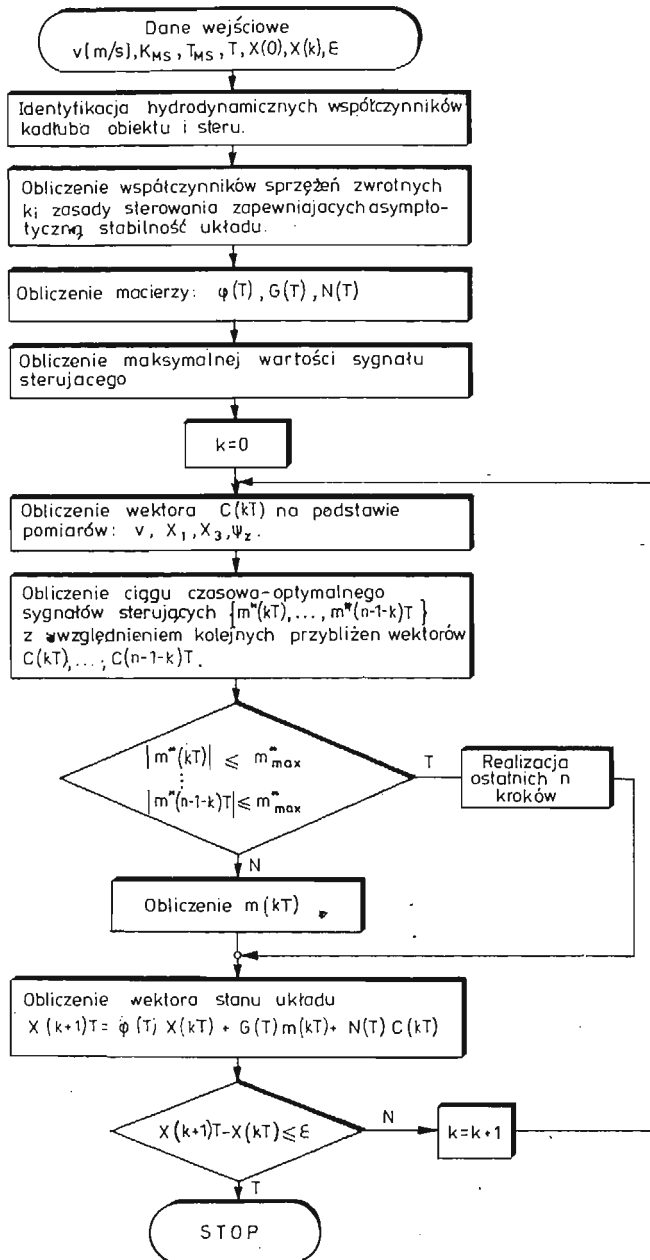
$$\begin{aligned} \mathbf{M}_1(T) &= [\Phi(n-1)T\mathbf{G}(T); \Phi(n-2)T\mathbf{G}(T); \dots; \Phi(T)\mathbf{G}(T); \mathbf{G}(T)], \\ \mathbf{M}_2(T) &= \Phi(n-1)T\mathbf{N}(T)\mathbf{C}(0) + \Phi(n-2)T\mathbf{N}(T)\mathbf{C}(T) + \dots + \\ &\quad + \Phi(T)\mathbf{N}(T)\mathbf{C}(n-2)T + \mathbf{N}(T)\mathbf{C}(n-1)T \end{aligned}$$

Algorytm obliczania optymalnego ciągu sygnałów sterujących  $\{m(0); m(T); \dots; m(n-1)T\}$  omówiony został w pracy [2], a jego schemat przedstawiono na rys. 1.

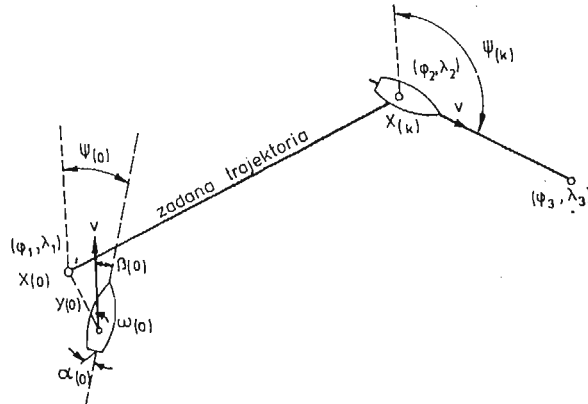
Ilustracja graficzna zadania wykonywanego przez regulator, polegającego na przeprowadzeniu obiektu z dowolnego stanu początkowego  $\mathbf{X}(0)$  do dowolnego stanu końcowego  $\mathbf{X}(k)$  w minimalnym czasie, przy minimalnych wartościach odchylenia poprzecznego obiektu od zadanej trajektorii została przedstawiona na rys. 2.

### 3. Wyniki modelowania układu prowadzenia wypornościowych obiektów nawodnych po zadanej trajektorii

Badania modelowe układu prowadzenia obiektów nawodnych po zadanej trajektorii przeprowadzone zostały z uwzględnieniem falowania morskiego [1] oraz wpływu działania wiatru i prądu.



Rys. 1. Algorytm nieliniowego dyskretnego układu prowadzenia obiektu nawodnego po zadanej trajektorii



Rys. 2. Ilustracja graficzna zadania sterowania obiektem nawodnym po zadanej trajektorii wykonywanego przez cyfrowy regulator sterowania bezpośredniego:

$$X^T(0) = [\psi(0) = 15^\circ, \omega(0) = 1^\circ/\text{s}, \beta(0) = 5^\circ, \alpha(0) = -10^\circ, \dot{\alpha}(0) = 3^\circ/\text{s}, y(0) = 20 \text{ m}, X(0) = 0 \text{ m}]$$

$$X^T = [\psi(k) = 120^\circ, \omega(k) = 0^\circ/\text{s}, \beta(k) = 0^\circ, \alpha(k) = 0^\circ, \dot{\alpha}(k) = 0^\circ/\text{s}, y(k) = 0 \text{ m}, X(k) = 1500 \text{ m}]$$

Dla udowodnienia tezy, że przedstawiony układ może być wykorzystany do prowadzenia po zadanej trajektorii z założoną dokładnością obiektów nawodnych o różnej wyporności, przeprowadzona została analiza dokładności sterowania dla jednostek o następujących parametrach:

- 1)  $V = 5000 \text{ m}^3$   
 $L = 100 \text{ m}$   
 $B = 17 \text{ m}$   
 $T_z = 4,6 \text{ m}$

jednostka wyposażona jest w dwie śruby i jeden ster płetwowy umieszczony między nimi.

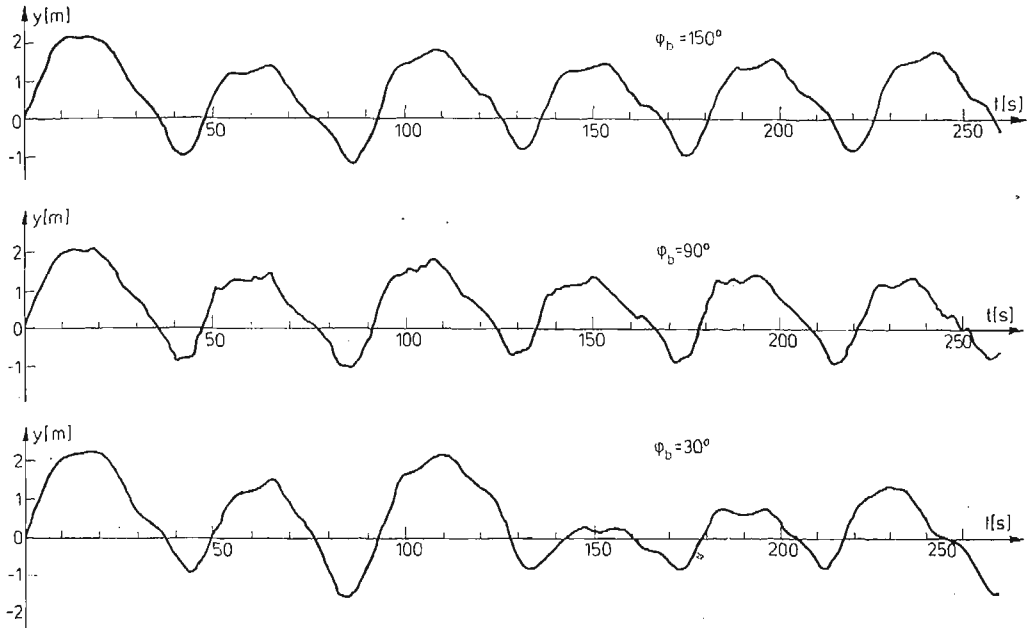
- 2)  $V = 213,76 \text{ m}^3$   
 $L = 36,3 \text{ m}$   
 $B = 7 \text{ m}$   
 $T_z = 1,742 \text{ m}$

jednostka wyposażona jest w dwie śruby i dwa stery płetwowe

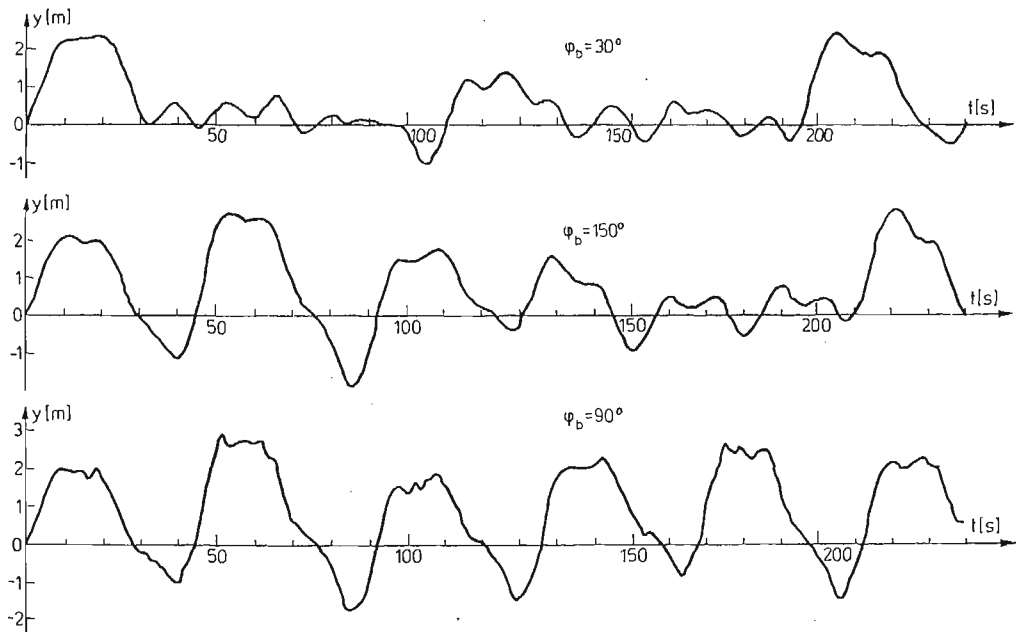
- 3)  $V = 92,12 \text{ m}^3$   
 $L = 29 \text{ m}$   
 $B = 4,7 \text{ m}$   
 $T_z = 1,4 \text{ m}$

jednostka wyposażona jest w jedną śrubę i jeden ster płetwowy.

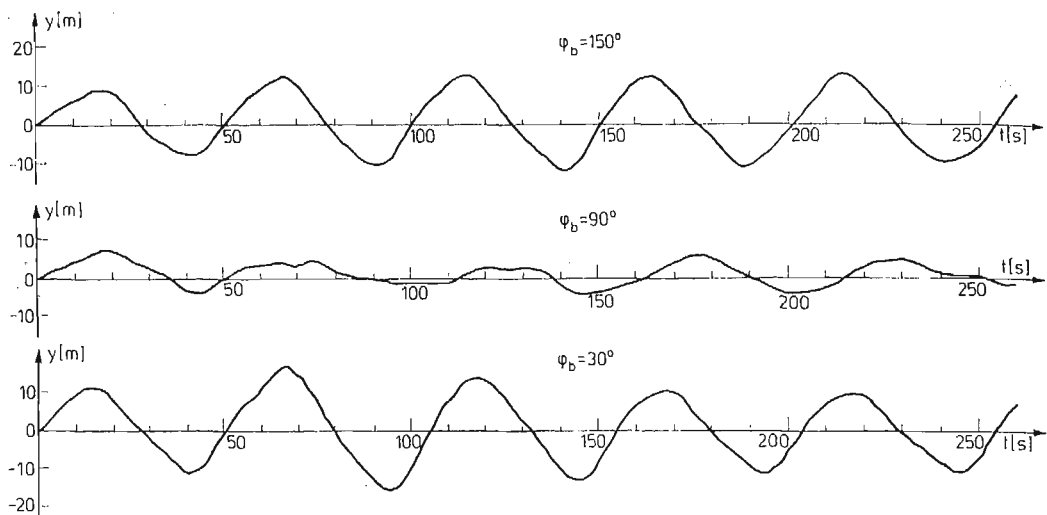
Przykładowe realizacje odchylenia poprzecznego obiektów od zadanej trajektorii dla różnych warunków hydrometeorologicznych oraz różnej prędkości obiektów w czasie stabilizacji na trajektorii i przejściu z jednego prostoliniowego odcinka trajektorii na drugi, przedstawione zostały na rys. 3 ÷ rys. 6.



Rys. 3. Realizacje odchylenia poprzecznego obiektu nawodnego od zadanej trajektorii w czasie stabilizacji obiektu na trajektorii:  $L = 29 \text{ m}$ ,  $v = 4.1156 \text{ m/s}$ ,  $\zeta_{w3\%} = 2 \text{ m}$ ,  $v_{ZNP} = 0,25 \text{ m/s}$

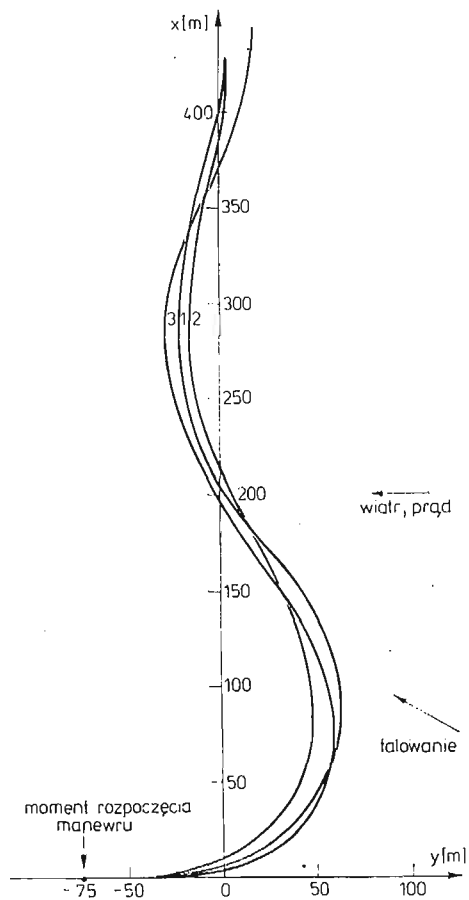


Rys. 4. Realizacje odchylenia poprzecznego obiektu nawodnego od zadanej trajektorii w czasie stabilizacji obiektu na trajektorii:  $L = 36,3 \text{ m}$ ,  $v = 4.1156 \text{ m/s}$ ,  $\zeta_{w3\%} = 2 \text{ m}$ ,  $v_{ZNP} = 0,25 \text{ m/s}$



Rys. 5. Realizacje odchylenia poprzecznego obiektu od zadanej trajektorii w czasie stabilizacji obiektu na trajektorii:

$$L = 100 \text{ m}, \quad v = 7,2023 \text{ m/s}, \quad v_{ZNP} = 0,25 \text{ m/s}$$



Rys. 6. Realizacje odchylenia poprzecznego obiektu od zadanej trajektorii przy przejściu z jednego prostoliniowego odcinka trajektorii na drugi:  $v = 7.2023 \text{ m/s}$ ,  $\varphi_b = 150^\circ$ ,  $\zeta_{w3\%} = 2 \text{ m}$ ,  $v_{ZNP} = 0,25 \text{ m/s}$

1. —  $L = 29 \text{ m}$ , 2. —  $L = 36,3 \text{ m}$ , 3. —  $L = 100 \text{ m}$



#### 4. Wnioski

1. Analiza realizacji odchyień poprzecznych rozpatrywanych obiektów nawodnych, otrzymanych dla różnych prędkości tych obiektów i różnych warunków hydrometeorologicznych, potwierdziła wysoką dokładność pracy proponowanego regulatora. We wszystkich przypadkach wartości  $y$  były mniejsze od  $\pm 0,25 L$ .
2. Stałość struktury regulatora i zastosowanych współczynników sprzężeń zwrotnych nie wpływa na pracę regulatora zarówno przy stabilizacji obiektu nawodnego na zadanej trajektorii jak i przy przejściu z jednego prostoliniowego odcinka trajektorii na drugi.
3. Dla danego kąta kursowego obiektu względem fali  $\varphi_b$  i wysokości fali  $\zeta_{w,3\%}$  — ze wzrostem prędkości postępowej obiektu (w wyniku wzrostu efektywności działania sterów), maleje wartość odchylenia poprzecznego obiektu od zadanej trajektorii.
4. Dla falowania bocznego ( $\varphi_b = 90^\circ$ ), prędkość postępową obiektu ma nieznaczny wpływ na wartości odchylenia poprzecznego od zadanej trajektorii. Zdecydowany wpływ w powyższym przypadku wykazuje wysokość fali  $\zeta_{w,3\%}$ . Ze wzrostem wysokości fali rośnie wartość odchylenia poprzecznego zwłaszcza dla małych jednostek, dla jednostek dużych wpływ ten jest mniej wyraźny.
5. W przypadku małych jednostek i niewielkich prędkości kierunek falowania nie ma w zasadzie wpływu na wartości odchylenia poprzecznego od zadanej trajektorii (odchylenia te dla różnych kierunków fali są porównywalne). Ze wzrostem prędkości tych jednostek uwidacznia się jednak wpływ falowania baksztagowego.
6. W przypadku jednostek dużych uwidacznia się wyraźny wpływ falowania skośnego i baksztagowego (z przewagą falowania baksztagowego) na wartość odchylenia poprzecznego od zadanej trajektorii.
7. Wpływ  $v_{ZNP}$  uwidacznia się przede wszystkim dla jednostek małych. Ze wzrostem wyporności jednostki staje się on coraz mniej widoczny.
8. Prowadzenie obiektu po zadanej trajektorii wymaga większych odchyień od zadanego kursu niż w przypadku stabilizacji kursu. W związku z powyższym rosną straty związane ze wzrostem oporów wynikających ze zwiększenia się kąta dryfu, co powoduje większy spadek prędkości niż przy sterowaniu kursem.

#### Literatura

1. KITOWSKI Z., *Liniowy stochastyczny model falowania morskiego*. Postępy Cybernetyki Nr 1/1985.
2. KITOWSKI Z., *Synteza układu utrzymania okrętu na zadanej trajektorii z dużą dokładnością*, ZN 87A, WSMW, Gdynia 1985.

## Резюме

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОИЗМЕЩАЮЩИМИ ОБЪЕКТАМИ ПО ЗА-  
|ДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ В РАЗНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

В работе представлены результаты математического моделирования системы управления водоизмещающими объектами (при использовании регулятора описанного в [2]) по заданной траектории, работающей в разных гидрометеорологических условиях.

## Summary

ANALYSIS OF THE ACCURACY OF THE SURFACE VESSEL GUIDANCE OVER ALONG  
A TRAJECTORY FOR VARIOUS METHEOROLOGICAL CONDITIONS

In the paper we present the results of the mathematical modelling of the accuracy of surface vessel guidance on a given straight segment trajectory (with the controller described in [2]) for various hydro-meteorological conditions.

*Praca wpłynęła do Redakcji dnia 14 marca 1986 roku*

---