

## SYMULACJA RUCHU OKRĘTU WYKORZYSTUJĄCEGO PĘDNIK CYKLOIDALNY

*W referacie przedstawiony jest problem sterowania jednostką pływającą poruszającą się z niewielką prędkością za pomocą pędnika cykloidalnego. Sterowanie odbywa się w zamkniętym układzie sterowania. Jako obiektu sterowania użyto modelu matematycznego opisującego okręt wsparcia logistycznego. Opracowano program pozwalający na symulację procesu sterowania, zamieszczono i opisano wybrane wyniki jego działania.*

### Simulation Movement of Ship Using the Cycloidal Propeller

*In this paper is presented problem precision control of ship's motion of assistance the cycloidal truster. Control of ship's is in automatic control system. The control object is mathematical model of navy ship with cycloidal thrusters. Make simulation computer program works in automatic control of ship's. The chosen results of his actions are described.*

### 1. WPROWADZENIE

Jednym z ważniejszych zagadnień występujących obecnie w nawigacji jest zapewnienie bezpiecznej żeglugi jednostki pływającej poruszającej się z małą prędkością na wodach ograniczonych: na torach wodnych, w basenach portowych, przy pracach wiertniczych, czy hydrograficznych aż do zacumowania do nabrzeża. Określane jest ono mianem sterowania precyzyjnego. W procesie sterowania ruchem okrętu na wodach ograniczonych wykorzystuje się pędniki cykloidalne. Szczególne znacznie tego typu napęd może mieć w układach dynamicznego pozycjonowania okrętu. Występują one głównie w układach sterowania okrętów zwalczania min, podczas poszukiwania i ich unieszkodliwiania lub okrętów wsparcia logistycznego podczas operacji tankowania w morzu. Takie okręty, manewrujące z małą prędkością poddane działaniu napędu głównego, sterów strumieniowych, płetwowych czy też napędu cykloidalnego, podlegające działaniu wiatru, prądu i falowania są wielowymiarowym, niestacjonarnym i nieliniowym obiektem sterowania.

W artykule przedstawiono opracowany program symulacyjny, którego zadaniem jest symulacja i zobrazowanie wybranych parametrów ruchu okrętu wykorzystującego między innymi napęd cykloidalny przy działaniu zakłóceń zewnętrznych. Opracowano model symulacyjny okrętu z dwoma liniami wałów, sterem klasycznym, napędem cykloidalnym i sterem strumieniowym. Umożliwia on przeprowadzenie analizy ruchu okrętu przy różnych wariantach pracy układu napędowego oraz przy wpływie zakłóceń

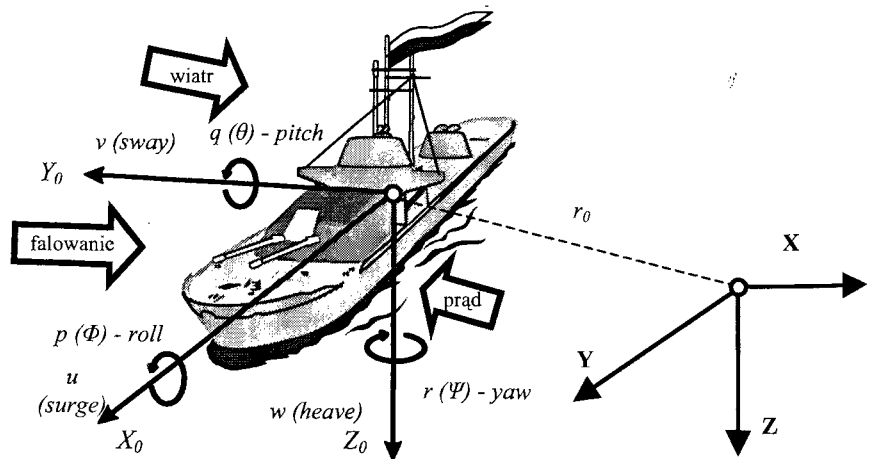
środowiska morskiego. Jako jednostkę modelową wzięto pod uwagę okręt wsparcia logistycznego.

## 2. MODELOWANIE RUCHU OKRĘTU

Współcześnie można przeprowadzić symulację prawie każdego rzeczywistego obiektu, ale zanim się tego dokona musi on zostać opisany przez szereg równań, które będą przybliżonym odzwierciedleniem tego obiektu. Po podstawieniu do tych równań wartości, które będą precyzowały warunki, w jakich dany model będzie symulowany otrzymamy w wyniku dane obrazujące zbliżone do rzeczywistości zachowanie się obiektu.

### 1.1. Model matematyczny jednostki

Modelowanie obiektów rzeczywistych pozwala na ich komputerową symulację, co z kolei umożliwia przeprowadzenie badań zachowania się obiektów w warunkach laboratoryjnych, czyli przy stosunkowo niewielkim nakładzie kosztów finansowych. Wirtualny, symulowany komputerowo obiekt badań jest pewnym przybliżeniem obiektu rzeczywistego a jakość tego przybliżenia wpływa na jakość przeprowadzonych badań symulacyjnych. Modelowanie matematyczne jednostki pływającej pozwala na przeprowadzenie badań symulacyjnych okrętu w obecności różnych zakłóceń środowiskowych, w celu dostrojenia i przebadania zaproponowanych systemów automatycznego sterowania okrętem.



Rys. 1. Układy odniesienia związane z okrętem i Ziemią

Przy modelowaniu istotnym jest rozwiązanie równań ruchu okrętu w 6-ciu stopniach swobody. Przyjęte, jako wejściowe, równania ruchu mają następującą postać macierzową [1]:

$$\begin{aligned}
 M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) &= \tau \\
 \dot{\eta} &= J(\eta)v
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

gdzie:

- $v$  – wektor prędkości liniowych i kątowych  $v = [u, v, w, p, q, r]$ ,  
 $M$  – macierz inercji - suma macierzy ciała sztywnego  $M_{RB}$  i macierzy mas towarzyszących  $M_A - M = M_{RB} + M_A$ ,  
 $C(v)$  – macierz sił odśrodkowych i dośrodkowych Coriolisa - suma macierzy Coriolisa okrętu jako ciała sztywnego  $C_{RB}$  i macierzy uwzględniającej masy towarzyszące  $C_A - C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v)$ ,  
 $D(v)$  – macierz tłumienia hydrodynamicznego,  
 $g(\eta)$  – macierz sił przywracających - siły ciężkości  $P$  i siły wyporu  $B$ ,  
 $\tau$  – wektor sił i momentów oddziaływujących na jednostkę pływającą  
 $J(\eta)v$  – macierz transformacji odnosząca się do kątów Eulera,  
 $\eta$  – wektory pozycji i położenia ze współrzędnymi w układzie inercjalnym,  
 $v$  – wektory prędkości ze współrzędnymi w układzie związanym z okrętem.

## 1.2. Uprozczone równania ruchu okrętu

Dla potrzeb programu symulacyjnego pozwalającego na sterowanie okrętem przy małych prędkościach ruchu, konieczne jest sprowadzenie dokładnego modelu procesu do takiej uproszczonej postaci, która zapewni sterowanie w czasie rzeczywistym. W przypadku powolnego ruchu okrętu istotnym staje się możliwość rozpatrywania ruchu na płaszczyźnie, ograniczając się do zmian kursu i prędkości wzdłuż osi  $X$  i  $Y$ . Aby taki model był adekwatny do rzeczywistości należy zastąpić wpływ przechyłów bocznych zależnością funkcyjną pomiędzy oddziaływaniami zewnętrznymi zakładając, że znana jest charakterystyka statecznościowa i zmiana oporów dla różnych prędkości. Przyjmując założenie, że  $XZ$  jest płaszczyzną symetrii kadłuba  $y_G = 0$ ,  $J_{xy} = J_{yz} = 0$  oraz pomijając zgodnie z założeniem nurzanie, kołysanie i kiwanie  $w = p = q = \dot{w} = \dot{p} = \dot{q} = 0$  podstawowe równania upraszczają się do postaci [1]:

$$\begin{aligned} m(u - vr - x_G r^2) &= X \\ m(v + ur + x_G r) &= Y \\ J_z r + m x_G (v + ur) &= N \end{aligned} \quad (2)$$

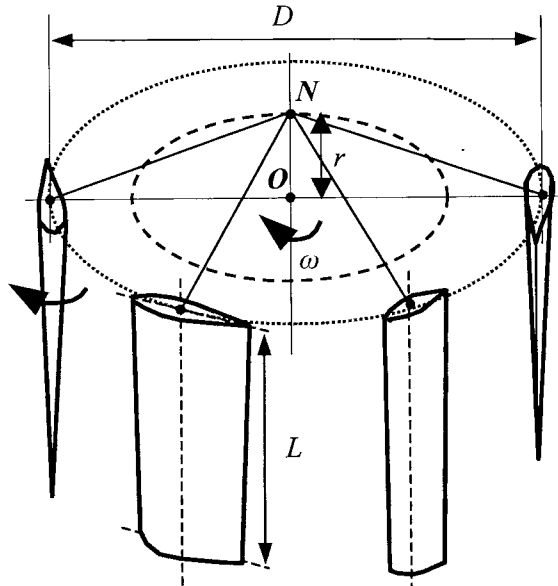
gdzie:

$$\begin{aligned} X &= X_K + X_C + X_R + X_S + X_{SS} + X_Z \\ Y &= Y_K + Y_C + Y_R + Y_S + Y_{SS} + Y_Z \\ N &= N_K + N_C + N_R + N_S + N_{SS} + N_Z \end{aligned}$$

- $X_K, Y_K, N_K$  – siły i moment wywołane hydrodynamiką okrętu w wodzie;  
 $X_R, Y_R, N_R$  – siły i moment wywołane działaniami steru płetwowego;  
 $X_C, Y_C, N_C$  – siły i moment wywołane działaniami napędu cykloidalnego;  
 $X_S, Y_S, N_S$  – siły i moment wywołane pracą napędu głównego;  
 $X_{SS}, Y_{SS}, N_{SS}$  – siły i moment wywołane działaniami steru strumieniowego;  
 $X_Z, Y_Z, N_Z$  – siły i moment wywołane działaniem zakłóceń środowiska.

## 2. NAPĘD CYKLOIDALNY

Zainstalowanie pędnika cykloidalnego, zwanego też napędem Voitha-Schneidera, na jednostce pływającej jest czynnikiem decydującym o jej zdolnościach manewrowych i bezpieczeństwie zwłaszcza, że pędnik ten jest całkowicie niezależny od napędu głównego [3]. W przypadku awarii głównego napędu, pędnik cykloidalny w trakcie swojego czynnego trybu pracy przejmuje funkcję układu napędowego awaryjnego, który jest w stanie zapewnić jednostce pełne zdolności manewrowe.



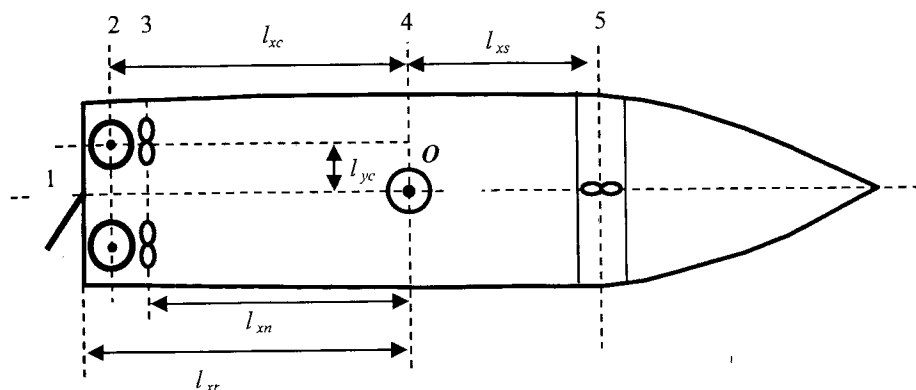
Rys. 2. Schematyczny widok pędnika cykloidalnego:  $D$  – średnica,  $L$  – długość łopaty,  $\omega$  – prędkość obrotowa

Jeśli zamontowane zostaną dwa stery cykloidalne umieszczone na rufie, jednostka pływająca uzyskuje własności dające możliwość wykonywania wszystkich manewrów niezbędnych przy ruchu precyzyjnym. Wskutek możliwości zmiany siły naporu w pełnym zakresie kąta obrotu oraz jej relatywnie duże wartości, manewry mogą być wykonywane precyzyjnie i bez korzystania z asysty holownika. Przejście od płynięcia wstecz, wykonywania zwrotu w dowolnym kierunku do płynięcia w przód odbywa się w sposób płynny. Zastosowanie pędnika ma duże znaczenie podczas manewrowania jednostką, podczas sterowania precyzyjnego przy dojściu i utrzymaniu się na określonej pozycji.

Innymi obszarami zastosowań pędników są okręty wojenne – zwłaszcza jednostki zwalczania min. Operacyjna strefa działań musi być osiągnięta przez tego typu jednostki możliwie szybko, natomiast sama praca w tej strefie wymaga małych prędkości, dodatkowo ważną rzeczą jest minimalny poziom emisji hałasu przy zachowaniu maksymalnych własności manewrowych. Wymagania te zwykle mogą być spełnione przez zastosowanie kombinacji jednego (lub dwóch) pędnika konwencjonalnego z dwoma pędnikami cykloidalnymi.

### 3. OPIS PROGRAMU SYMULACYJNEGO

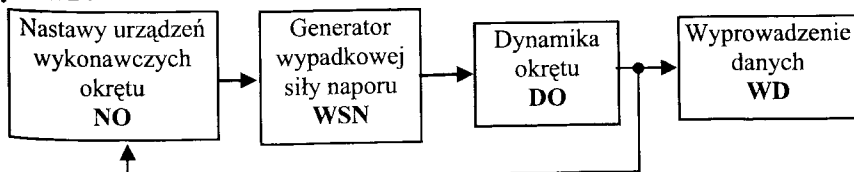
Program symulacyjny napisany został w środowisku języka MATLAB z wykorzystaniem pakietu SIMULINK – [5]. Jako podstawę do opracowania programu przyjęto dane rzeczywistej jednostki pływającej – okrętu wsparcia logistycznego. Konfigurację elementów napędowych i sterujących modelowanej jednostki przedstawia rys. 4. Program pozwala dowolnie konfigurować system napędowy, korzystając z zamieszczonych elementów.



Rys. 4. Przykładowy układ rozmieszczenia urządzeń wykonawczych na jednostce pływającej: 1 – ster klasyczny, 2 – napęd cykloidalny, 3 – napęd śrubowy, 4 – pędnik azymutalny, 5 – ster strumieniowy

Zamieszczone na rys. 4 elementy wykonawcze można podzielić na typowo sterujące (ster klasyczny, ster strumieniowy), typowo wykonawcze (śruba napędu głównego) i wykonawczo-sterujące (napęd cykloidalny, pędnik azymutalny) i mogą zostać wykorzystane w programie w zależności od potrzeb. Należy zwrócić uwagę na usytuowanie pędnika azymutalnego (poz. 4 na rys. 4), znajduje się on w geometrycznym centrum okrętu i wykorzystywany jest w programie symulacyjnym jako generator zakłóceń środowiskowych. Taka generacja sił zakłócających na obrotowym pędniku azymutalnym pozwala na rozwiązanie problemu ich addytywności [4]. Poszczególne elementy napędowe i sterujące służą do wypracowania odpowiednich sił i momentów wykorzystywanych przez program symulacyjny.

Struktura blokowa opracowanego programu symulacyjnego przedstawiona została na rys. 5. Składa się ona z następujących bloków: nastawy urządzeń wykonawczych okrętu NO, generatora wypadkowej siły naporu WSN, dynamiki okrętu DO i wyprowadzenie danych WD.



Rys. 5. Struktura blokowa programu symulacyjnego

Blok NO jest elementem pozwalającym na określenie konfiguracji układu napędowego, co do wyboru elementów wykonawczych, i wprowadzenie do programu symulacyjnego wartości początkowych z graficznego interfejsu użytkownika. Te wartości to określenie m.in.: kątów ustawień pędników, maksymalnych wartości sił naporu, wartości skoków śrub nastawnych, początkowych kątów działania zewnętrznych sił zakłócających. Są one modyfikowane przez wartości uzyskane w wyniku zmiany kinematyki okrętu. Na wyjściu bloku otrzymywane są kierunki działania i wartości sił generowane na podstawie nastaw uzyskane na poszczególnych urządzeniach wykonawczych. W bloku WSN, oprócz ustawienia konfiguracji układu pędników względem środka ciężkości okrętu, określana jest, co do wartości i kierunku, wypadkowa siła naporu pozwalająca sterować okrętem oraz modyfikować nastawy bloku NO. Element opisany jako DO zawiera wprowadzone macierze  $D$  i  $M$ , obliczone na podstawie współczynników hydrodynamicznych rzeczywistego okrętu. Blok WD wyprowadza wyliczone wyjściowe parametry do zmiennych w przestrzeni roboczej, aby można było na ich podstawie zbudować charakterystyki dynamiczne badanego okrętu.

Rys. 6. Fragment graficznego interfejsu użytkownika do wprowadzania danych w bloku NO

Danymi wyjściowymi są: prędkość postępową okrętu; średnice, prędkości obrotowe i skok śrub napędów głównych; początkowe wychylenie oraz wychylenie po określonym czasie steru klasycznego; kierunek wiatru oraz jego losowo generowana siła w ustalonym zakresie prędkości; prędkość obrotowa i skok śruby steru strumieniowego oraz średnica i długość łopat pędnika cykloidalnego [3].

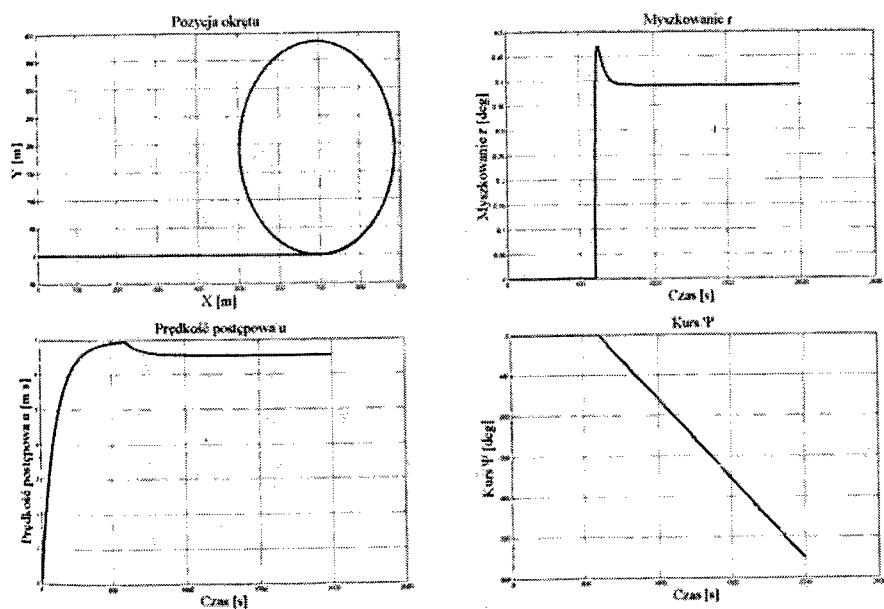
Danymi wyjściowymi są: prędkość postępową  $u$ , prędkość poprzeczną  $v$ , myszkowanie  $r$ , pozycja określona w metrach  $(x,y)$ , kurs oraz prędkość zmiany kursu. W wyniku przeprowadzonej symulacji dane wyjściowe są przedstawiane w formie charakterystyk dynamicznych.

## 4. BADANIA SYMULACYJNE

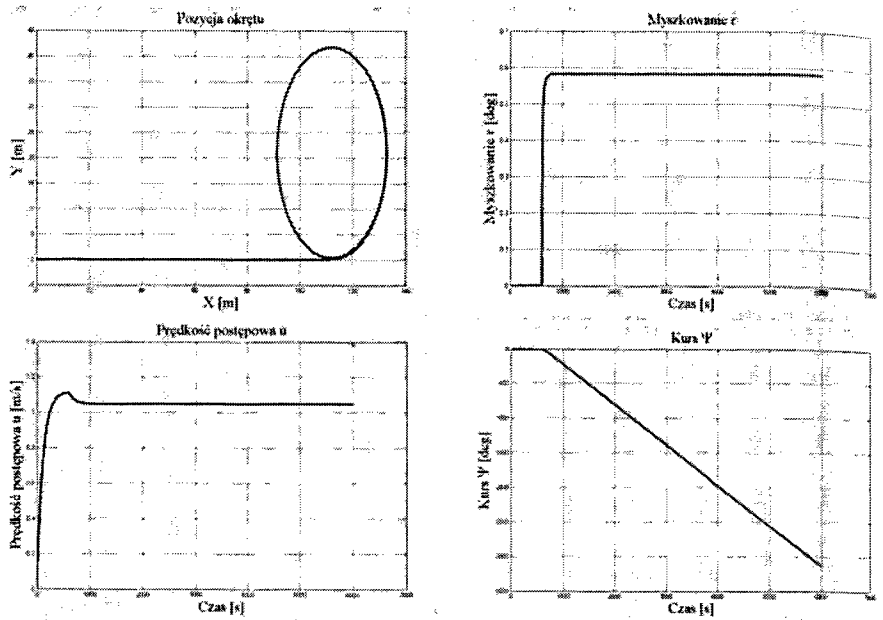
W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych należy wykonać następującą procedurę:

- określić parametry dynamiki okrętu,
- podać podstawowe parametry i ustawić napory oraz nastawy elementów wykonawczych,
- włączyć bądź wyłączyć zakłócenia,
- wykonać symulację.

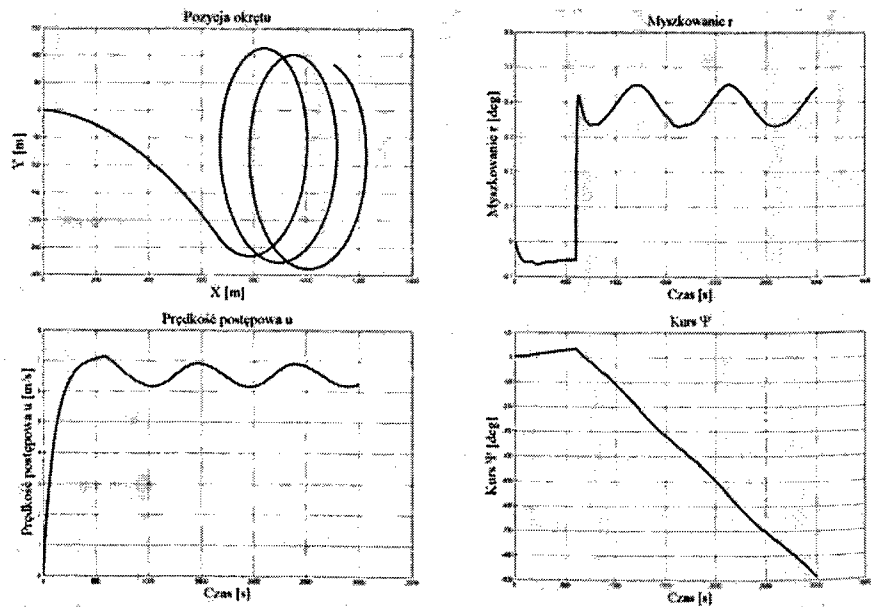
Niniejszy rozdział zawiera wybrane wyniki wybranych symulacyjnych prób manewrowych dla przyjętego modelu okrętu (patrz Załącznik). Określone na ich podstawie wybrane charakterystyki dynamiczne, które posłużyły jako źródło odniesienia przy ocenie dokładności modelu okrętu będącego przedmiotem badań symulacyjnych. Symulacje przeprowadzono na komputerze PC dla różnych konfiguracji i początkowych nastaw urządzeń wykonawczych i sterujących, bez i przy występowaniu zakłóceń środowiskowych.



Rys. 7. Prędkość okrętu ekonomiczna - napęd główny, ster klasyczny, bez oddziaływania zakłóceń

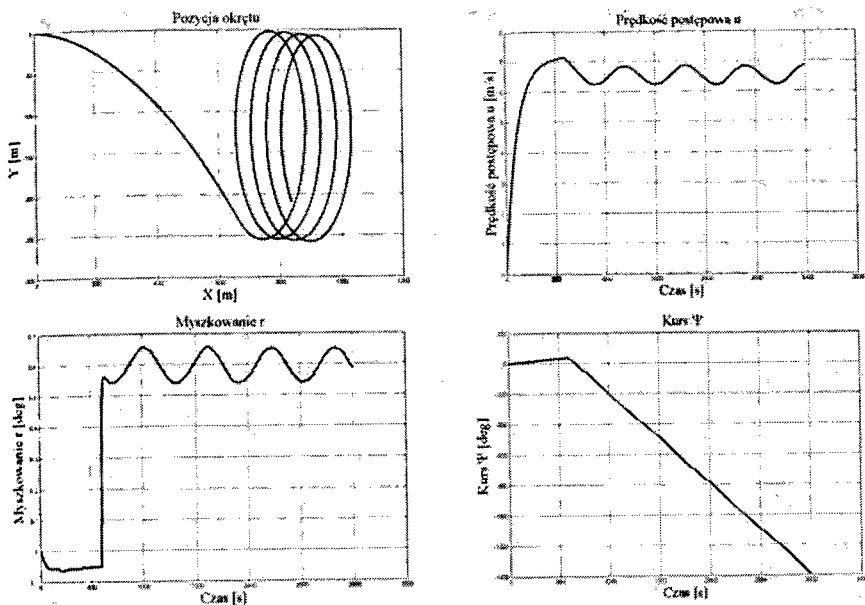


Rys. 8. Prędkość okrętu bardzo mała, napęd i sterowanie poprzez pędnik cykloidalny, bez oddziaływania zakłóceń



Rys. 9. Prędkość okrętu ekonomiczna - napęd główny, ster klasyczny, oddziaływanie zakłóceń





Rys. 10. Prędkość okrętu bardzo mała, napęd i sterowanie poprzez pędnik cykloidalny, oddziaływanie zakłóceń

Na rys. 8 – 10 przedstawiono wybrane parametry dynamiki okrętu. Wyniki badań zestawiono dla dwóch zakresów prędkości: ekonomicznej, pozwalającej na wykorzystanie steru klasycznego oraz bardzo małej, niepozwalającej na wykorzystanie steru klasycznego. W przypadku bardzo małej prędkości jako napęd i jednocześnie sterowanie wykorzystany jest pędnik cykloidalny [2, 3].

## 5. WNIOSKI

Wykonane badania symulacyjne wykazały, że przyjęty do badań model jednostki pływającej w sposób właściwy odwzorowuje dynamikę rzeczywistego okrętu. Poprawnie również zamodelowane są urządzenia sterujące i wykonawcze, których skuteczność działania, zależy w dużym stopniu od prędkości ruchu statku względem wody. Wyniki badań symulacyjnych zostały odniesione do podobnych wykonanych na symulatorze Mostka Nawigacyjnego AMW w Gdyni.

Napęd cykloidalny może nie tylko pełnić funkcję awaryjnego napędu, ale może być także podstawowym, służącym do prac, przy małych prędkościach. Doświadczenia wskazują jak trudne jest prowadzenie jednostki na ograniczonych akwenach i dodatkowo ze zredukowaną prędkością. Okręty niewyposażone w aktywne urządzenia sterowe, muszą utrzymywać wyższe prędkości lub korzystać z pomocy holowników.

Podsumowując można stwierdzić, że przedstawiony w artykule model okrętu, przyjęty do sterowania precyzyjnego okrętem, poprawnie odwzorowuje charakterystyki manewrowe rzeczywistej jednostki. Mimo pewnych różnic występujących pomiędzy wynikami prób na Mostku Nawigacyjnym a wynikami symulacji komputerowych, przedstawiony dla celów sterowania model można traktować jako opis matematyczny

rzeczywistego okrętu, zbliżonego kształtem i wielkością do jednostki, której podstawowe parametry zostały przedstawione w załączniku.

## LITERATURA

1. Fossen T., I.: Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley & Sons, Chichester – New York – Brisbane – Toronto – Singapore, 1994
2. Małecki J.: Badania dynamiki okrętu sterowanego sterem strumieniowym, AMW 2003, ISBN 83-87280-60-7
3. Małecki J.: Pędnik cykloidalny – urządzenie napędowe i sterujące, materiały Konferencji Naukowo-Technicznej AUTOMATION 2005, Warszawa 2005
4. Małecki J.: Zakłócenia środowiskowe w precyzyjnym ruchu okrętu, AMW 2003, ISBN 83-87280-60-7
5. Tomera M.: Modelowanie środowiska morskiego dla systemu sterowania statkiem, AMW 2005, ISBN 83-87280-78-X

### Wybrane parametry okrętu i modelu przyjętego do badań symulacyjnych:

Ważniejsze dane okrętu:

- wyporność 2200 t
- długość całkowita 75 m
- szerokość 14 m
- zanurzenie 4,5 m

$$M\dot{v} + D(v)v = \tau - \text{model jednostki pływającej}$$

$M$  – macierz inercji

$D(v)$  – macierz tłumienia hydrodynamicznego

$\tau$  – wektor sił i momentów oddziaływujących na jednostkę pływającą

Współczynniki macierzy zostały wyliczone na podstawie współczynników hydrodynamicznych według [1].

Macierz inercji:

$$M = \begin{bmatrix} 5.3122 \cdot 10^6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8.2831 \cdot 10^6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.7454 \cdot 10^9 \end{bmatrix}$$

Macierz tłumienia hydrodynamicznego:

$$D = \begin{bmatrix} 5.0242 \cdot 10^4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.7229 \cdot 10^5 & -4.3933 \cdot 10^6 & 0 \\ 0 & -4.3933 \cdot 10^6 & 4.1894 \cdot 10^8 & 0 \end{bmatrix}$$