

STEROWANIE MODELEM FIZYCZNYM ZBIORNIKOWCA WZDŁUŻ ZADANEJ TRASY PRZEJŚCIA

Mirosław TOMERA

Akademia Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny
tel: 58 690 1471, e-mail: m.tomera@we.am.gdynia.pl

Streszczenie: W pracy przebadane zostały dwa regulatory zastosowane do sterowania ruchem statku wzdłuż zadanej trasy przejścia. Obiektem sterowania jest model fizyczny statku o nazwie *Blue Lady* wykorzystywany do szkolenia kapitanów w Ośrodku Manewrowania Statkami na jeziorze Silm w Hawie/Kamionce. Trasa ruchu statku określana jest zazwyczaj przy użyciu tzw. punktów drogi. Poprzez łączenie odcinkami kolejnych punktów drogi tworzona jest trajektoria zadana ruchu statku. Wokół każdego punktu drogi definiowany jest okrąg akceptacji, który statek musi osiągnąć. Kiedy statek wpływa w obszar objęty okręgiem akceptacji to wówczas trajektoria zadana przelączana jest na odcinek łączący dwa kolejne punkty drogi. Z każdym odcinkiem drogi jest powiązana prędkość poruszania się statku. Zadanie sterowania polega na jak najdokładniejszym prowadzeniu statku wzdłuż zadanej trajektorii. W tym celu przebadane zostały dwa regulatory. Pierwszy z nich jest regulatorem stanu (LQG), wykorzystującym dyskretny filtr Kalmana do wyznaczania niemierzonych zmiennych stanu statku, drugi natomiast opiera się na klasycznym regulatorze typu PID.

Słowa kluczowe: utrzymywanie trasy przejścia, LQG, PID, sterowanie statkiem.

1. WPROWADZENIE

Wzrost rozmiarów i prędkości poruszania się statków a także coraz bardziej niebezpieczny rodzaj przewożonych ładunków spowodował, że ustalone zostały marginesy bezpieczeństwa na operacje wykonywane w portach i na wodach ograniczonych. Wymaga to odpowiedzialnego przeszkolenia załogi oraz przetestowania opracowywanych algorytmów sterowania, co realizowane jest na specjalistycznych symulatorach komputerowych [12] lub na wykonanych w pewnej skali modelach fizycznych, będących odwzorowaniem zachowania statków morskich [11, 16].

Prawie wszystkie konwencjonalne autopiloty stosowane na pokładach statków morskich od roku 1980 zostały zaprojektowane do sterowania statkiem na kursie. Wykorzystując bezpośrednią informację otrzymywaną z żyrokompasu, taki autopilot jest w stanie sterować statkiem na z góry określonym kursie. Jednakże, problem nawigacji statkiem polega na jego ruchu wzdłuż zadanej trajektorii łączącej dwa kolejne punkty drogi. Statek wyposażony w autopilot do sterowania na kursie może zostać wykorzystany do sterowania wzdłuż zadanej trajektorii, jednak w takim przypadku w związku z działaniem wiatru lub prądów morskich pojawia się duża odchyłka poprzeczna od trajektorii zadanej. Korzystając z dodatkowych urządzeń pomiarowych instalowanych na pokładzie statku, takich jak globalny system pozycjonowania

(GPS), możliwe jest zaprojektowanie systemu sterowania ruchem statku wzdłuż zadanej trajektorii, z pewną dokładnością. Jest to szczególnie konieczne wówczas, gdy statek musi przepłynąć przez wąskie tory wodne.

Analizowanie układów sterowania statkiem wzdłuż zadanych torów wodnych rozpoczęło się w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku. W zasadzie, to można łatwo uzyskać układ do sterowania statkiem wzdłuż danego toru wodnego z konwencjonalnego autopilota do sterowania na kursie, poprzez wykorzystanie informacji z układu pozycjonowania [1]. Jednakże, lepszą jakość uzyskuje się poprzez rozważenie systemu jako całości obejmującego statek, środowisko oddziaływujące na statek oraz regulator, to znaczy że wszystkie istotne zmienne stanu zostaną włączone do syntezy sterowania. Cały taki układ może zostać rozważony poprzez zastosowanie technik określanych mianem „analitycznych strategii sterowania”, takich jak sterowanie samonastrajające [10], LQG [2, 9, 14], adaptacyjne [4] oraz H_∞ [13].

Wspólną cechą wszystkich powyższych, analitycznych strategii sterowania jest ich zależność od wiarygodności modelu matematycznego opisującego manewrową dynamikę statku. Dodatkowo, często jest konieczna linearyzacja modelu statku w celu zastosowania powyższych analitycznych strategii sterowania.

Celem uniknięcia powyższych trudności, związanych z posiadaniem dokładnego modelu matematycznego dynamiki statku rozwijane były również inne strategie sterowania, obejmujące wykorzystanie teorii zbiorów rozmytych [8, 18, 19] i sztucznych sieci neuronowych [20].

2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU STEROWANIA

Ruch statku płynącego po powierzchni wody opisywany jest w trzech stopniach swobody. Do jego opisu stosowane są dwa układy współrzędnych (Rys. 1), pierwszy z nich jest układem współrzędnych nieruchomych (X_N, Y_N), powiązanych z mapą akwenu, gdzie oś X_N wskazuje kierunek północny, natomiast oś Y_N kierunek wschodni. Drugi układ współrzędnych (X_B, Y_B) jest powiązany z poruszającym się statkiem, którego początek znajduje się na linii wody w punkcie zgodnym z położeniem środka ciężkości statku. Zmienne stanu x opisujące ruch statku są zebrane w dwóch wektorach [6]: $\eta = [x, y, \psi]^T$ oraz $v = [u, v, r]^T$. Składowe pierwszego wektora składowego η , zdefiniowane są w nieruchomym układzie współrzędnych odniesienia (X_N, Y_N), natomiast drugiego v w ruchomym

układzie odniesienia (X_B, Y_B) . Cały wektor stanu ruchu statku ma postać

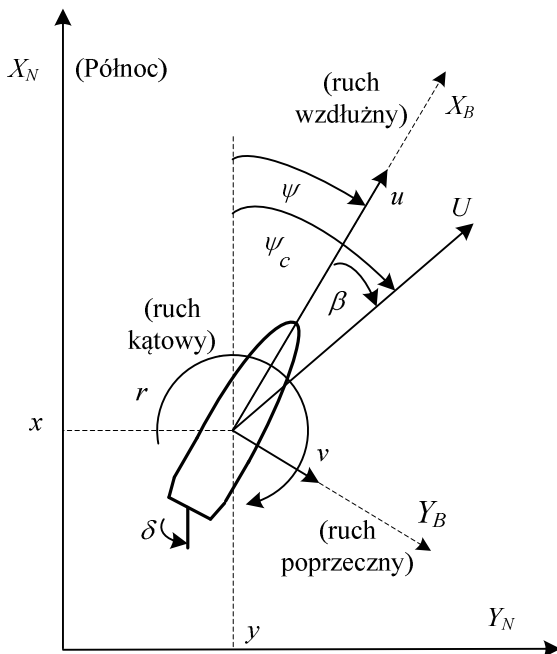
$$\mathbf{x} = [\boldsymbol{\eta} \ \mathbf{v}]^T = [x, y, \psi, u, v, r]^T. \quad (1)$$

Wektor prędkości $\dot{\boldsymbol{\eta}}$, zdefiniowany w nieruchomym układzie współrzędnych odniesienia jest powiązany z wektorem prędkości \mathbf{v} , wyznaczanym w ruchomym układzie współrzędnych odniesienia, przy użyciu poniższej zależności kinematycznej

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{R}(\psi)\mathbf{v} \quad (2)$$

gdzie $\mathbf{R}(\psi)$ jest macierzą rotacji dla trzech stopni swobody, wyznaczaną ze wzoru

$$\mathbf{R}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$



Rys. 1. Wielkości opisujące ruch statku w płaszczyźnie horyzontalnej, (X_N, Y_N) - nieruchomy układ współrzędnych, (X_B, Y_B) - ruchomy układ współrzędnych, (x, y) - współrzędne położenia, ψ - kurs statku, u - prędkość wzdłużna, v - prędkość poprzeczna, r - prędkość kątowna, U - prędkość wypadkowa, δ - wychylenie płetwy sterowej, β - znos statku

Idealna zadana trasa przejścia będzie składała się z pewnej liczby odcinków (N) i dla każdego z nich zostanie przypisana pewna zadana prędkość poruszania się statku u_{zk} (Rys. 2). Prędkość zadana u_{zk} będzie stała na całym odcinku trajektorii zadanej k , ale może zmieniać się wraz ze zmianą odcinka. Kurs ψ_k wynikający z zadanego odcinka trajektorii jest kątem prawoskrętnym, wyznaczanym względem osi X_N

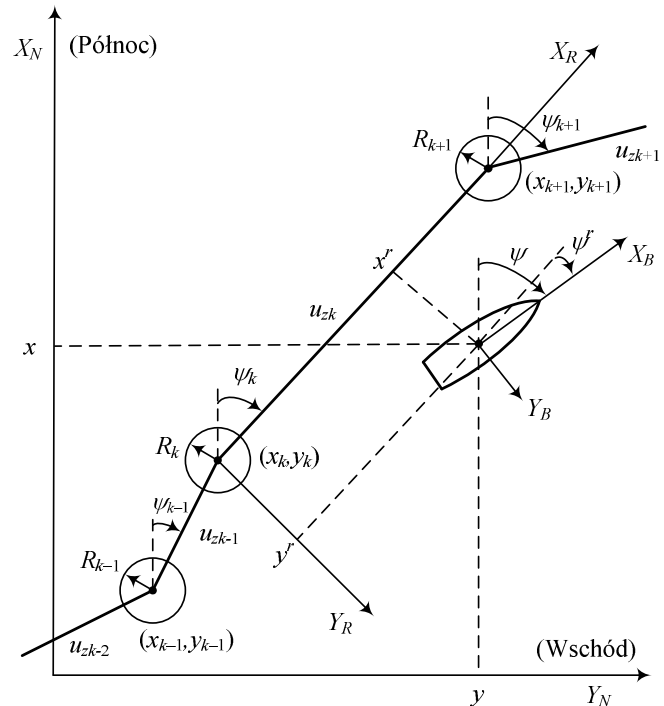
$$\psi_k = \text{atan2}(y_{k+1} - y_k, x_{k+1} - x_k) \quad (4)$$

Wokół każdego punktu drogi (x_k, y_k) definiowany jest okrąg o promieniu R_k . Kiedy pozycja statku (x, y) spełnia w chwili czasu t warunek

$$[x_{k+1} - x(t)]^2 + [y_{k+1} - y(t)]^2 \leq R_{k+1}^2 \quad (5)$$

to powinno nastąpić przełączenie trajektorii zadanej na kolejny odcinek drogi.

W celu łatwego wyznaczania odchyłek położenia statku względem realizowanego odcinka trajektorii zadanej wprowadzony został trzeci układ współrzędnych odniesienia (X_R, Y_R) . Początek tego układu odniesienia znajduje się w punkcie początkowym realizowanego odcinka trajektorii zadanej (x_k, y_k) , natomiast oś X_R pokrywa się z tym odcinkiem, którego drugi koniec znajduje się w punkcie (x_{k+1}, y_{k+1}) .



Rys. 2. Zadana trajektoria ruchu statku, wraz ze zdefiniowanymi układami współrzędnych odniesienia

Problem sterowania polega na znalezieniu takiego algorytmu, który pozwoli na poruszanie się statkiem w sposób zbliżony do idealnej zadanej trasy przejścia (rys. 2). Sygnał sterowania będzie dwuelementowym wektorem o postaci

$$\mathbf{s}_z(t) = [\delta_z(t) \ n_z(t)]^T \quad (6)$$

gdzie $\delta_z(t)$ jest zadaniem wychyleniem płetwy sterowej, natomiast $n_z(t)$ jest zadaną prędkością obrotową śruby napędowej.

3. MODEL MATEMATYCZNY DYNAMIKI STATKU

Obiektem sterowania jest wykonany w skali 1:24 model fizyczny tankowca nazywany *Blue Lady*. Najważniejsze parametry tego modelu zostały zebrane w tabelicy 1.

Tabela 1. Podstawowe parametry statku treningowego *Blue Lady*

Długość całkowita	$L_{OA} = 13.78$ (m)
Szerokość	$B = 2.38$ (m)
Średnie zanurzenie (pełne załadowanie)	$T_d = 0.86$ (m)
Wyporność (pełne załadowanie)	$\Delta = 22.83$ (m ³)
Położenie środka ciężkości	$x_G = 0.00$ (m)

Model matematyczny zbiornikowca opracowany przez Witolda Gierusza uwzględnia wszystkie zainstalowanych na nim pędniki [7]. Model ten obejmuje dynamikę kadłuba, napędu głównego składającego się z pojedynczej śruby nastawnej, steru płetwowego, dwóch poprzecznych tunelowych sterów strumieniowych: dziobowego i rufowego oraz dwóch obrotowych sterów strumieniowych: na dziobie i na rufie. Uwzględnia również wpływ zakłóceń pochodzenia wiatrowego. Ponadto odwzorowuje zachowanie się zbiornikowca w pełnym zakresie prędkości przy dwóch stanach załadowania: pod balastem i przy pełnym załadunku.

W ogólnej postaci model matematyczny dynamiki statku opisany jest w następujący sposób

$$M\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} \quad (7)$$

Macierz M zawiera parametry bezwładności bryły sztywnej jego wymiary, wagę, rozkład masy, objętość, itd. oraz współczynniki masy dodanej

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mX_G - Y_{\dot{r}} \\ 0 & mX_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Macierz sił dośrodkowych i Coriolisa C zawiera współczynniki hydrodynamiczne powiązane z cieżką, w której porusza się statek.

$$C(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -c_{31} \\ 0 & 0 & (m - X_{\dot{u}})u \\ c_{31} & -(m - X_{\dot{u}})u & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

gdzie $c_{31} = m(x_G r + v) - Y_{\dot{v}}v - Y_{\dot{r}}r$.

Macierz tłumienia D jest powiązana z hydrodynamicznymi siłami tłumiącymi i umożliwia określenie hydrodynamicznych sił tłumiących dla dużych prędkości.

$$D(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} -d_{11}(\mathbf{v}) & 0 & 0 \\ 0 & -d_{22}(\mathbf{v}) & -d_{23}(\mathbf{v}) \\ 0 & -d_{32}(\mathbf{v}) & -d_{33}(\mathbf{v}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

gdzie $d_{11}(\mathbf{v}) = X_{|u|u} |u|$,

$$d_{22}(\mathbf{v}) = Y_{|u|v} |u| + Y_{|v|v} |v| + Y_{|r|v} |r|,$$

$$d_{23}(\mathbf{v}) = Y_{|u|r} |u| + Y_{|v|r} |v| + Y_{|r|r} |r|,$$

$$d_{32}(\mathbf{v}) = N_{|u|v} |u| + N_{|v|v} |v| + N_{|r|v} |r|,$$

$$d_{33}(\mathbf{v}) = N_{|u|r} |u| + N_{|v|r} |v| + N_{|r|r} |r|.$$

W tabelicy 2 zebrane zostały wszystkie parametry związane z modelem matematycznym dynamiki statku *Blue Lady*, opisanym wzorem 7.

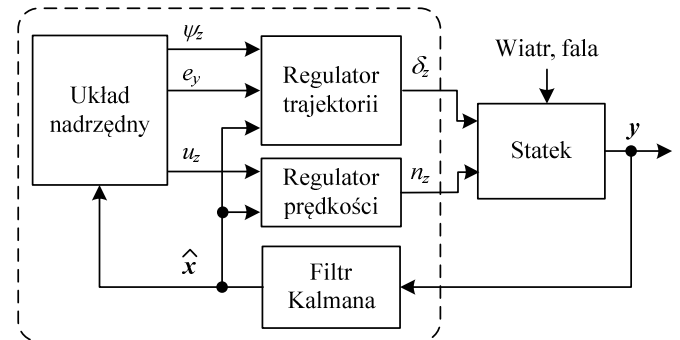
4. SYNTEZA UKŁADU STEROWANIA

Realizacja, wcześniej zdefiniowanego problemu sterowania, wykonana została w układzie pokazanym na rysunku 3. Bloki obsługujące wykonanie problemu sterowania objęte zostały linią przerywaną. Sygnały zadane dla śruby napędu głównego (n_z) i maszyny sterowej (δ_z) wyznaczane są przez dwa oddzielne regulatory: prędkości i trajektorii.

Tabela 2. Parametry złożonego modelu matematycznego statku treningowego *Blue Lady*

Lp	Zmienna	Wartość	Lp	Zmienna	Wartość
1.	m	22 934.4	11.	$Y_{ r v}$	29 634.8
2.	I_z	436 830.2	12.	$Y_{ u r}$	-7 841.9
3.	$X_{\dot{u}}$	-730.5	13.	$Y_{ v r}$	-18 521.8
4.	$Y_{\dot{v}}$	-18 961.8	14.	$Y_{ r r}$	-12 502.0
5.	$Y_{\dot{r}}$	-183 519.1	15.	$N_{ u v}$	0.0
6.	$N_{\dot{v}}$	0.0	16.	$N_{ v v}$	0.0
7.	$N_{\dot{r}}$	0.0	17.	$N_{ r v}$	-40 007.0
8.	$X_{ u u}$	193.9	18.	$N_{ u r}$	55 614.0
9.	$Y_{ u v}$	2 350.9	19.	$N_{ v r}$	12 502.0
10.	$Y_{ v v}$	6 859.9	20.	$N_{ r r}$	843 900.0

Problem sterowania, zapisany w trajektorii zadanej (Rys. 2) jest analizowany w układzie nadrzędnym, który wyznacza wartości zadane prędkości wzdłużnej u_z i kursu statku ψ_z dla regulatorów składowych oraz odchyłkę boczną (e_y) od realizowanego odcinka trajektorii zadanej. Sygnał wyjściowy statku y składa z wektora $\boldsymbol{\eta}$. W celu wyznaczenia pełnego wektora stanu ruchu statku (1), zastosowany został dyskretny filtr Kalmana.



Rys. 3. Schemat blokowy układu sterowania

Na potrzeby syntezy regulatorów trajektorii i prędkości, dynamika statku opisana wzorem (7) została uproszczona, przy założeniu stałej prędkości wzdłużnej statku $u = u_0 \approx \text{constant}$, i małych wartości prędkości v i r . Pozwoliło to na zlinearyzowanie nieliniowej macierzy D opisana wzorem (9), do następującej postaci

$$D \approx D_L = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & -N_r \end{bmatrix} \quad (11)$$

Po linearyzacji równania (6), dynamika wzdłużna jest oddzielana przy założeniu symetrii wzdłużnej statku. Siła wzdłużna jest zależna od prędkości obrotowej śruby napędu głównego n i została zlinearyzowana do postaci $\tau_x = X_n n$. Siły działające na kadłub statku są zazwyczaj liniowo zależne od wychylenia płetwy sterowej δ , stosownie do zależności $\tau_Y = -Y_\delta \delta$ oraz $\tau_N = -N_\delta \delta$. W wyniku tego

uzyskiwany model manewrowy składa się z wyłączonej dynamiki wzdłużnej statku

$$(m - X_{\dot{u}})\dot{u} - X_u u - (m - Y_{\dot{v}})vr - (m x_G - Y_{\dot{r}})r^2 = X_n n \quad (12)$$

oraz dynamiki kątoowo–poprzecznej, będącej modelem Davidsona i Schiffa [5] uzyskiwanego na podstawie linearyzacji równania (7)

$$\mathbf{M}_1 \dot{\mathbf{v}}_1 + \mathbf{N}(u_0) \mathbf{v}_1 = \mathbf{B} \delta \quad (13)$$

gdzie $\mathbf{v}_1 = [v \ r]^T$ jest wektorem stanu, δ jest wychyleniem płetwy sterowej, natomiast macierze \mathbf{M}_1 , $\mathbf{N}(u_0)$ oraz \mathbf{B} w równaniu (13) definiowane są następująco [6]

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & m x_G - Y_{\dot{r}} \\ m x_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{N}(u_0) = \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_r + (m - X_{\dot{u}})u_0 \\ -N_v + (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})u_0 & -N_r + (m x_G - Y_{\dot{r}})u_0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -Y_{\delta} \\ -N_{\delta} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Po przekształceniu równania (13) uzyskuje się

$$\dot{\mathbf{v}}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{v}_1 + \mathbf{B}_1 \delta \quad (17)$$

gdzie macierze \mathbf{A}_1 i \mathbf{B}_1 są zdefiniowane następująco

$$\mathbf{A}_1 = -\mathbf{M}_1^{-1} \mathbf{N}(u_0) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{M}_1^{-1} \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Tablica 3. Wartości parametrów uproszczonego modelu matematycznego *Blue Lady* ($u_0 = 0.5$ [m/s])

Lp	Zmienna	Wartość	Lp	Zmienna	Wartość
1.	X_u	-97.2	5.	N_r	-27 910.80
2.	Y_v	-1 192.9	6.	Y_{δ}	-115.50
3.	Y_r	3 970.1	7.	N_{δ}	471.70
4.	N_v	196.2	8.	X_n	1.96

4.1. Regulator trajektorii LQG

W celu zaprojektowania regulatora trajektorii, dogodnie jest zapisać równania kinematyczne ruchu statku (1) w postaci [9]:

$$\dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi \quad (20)$$

$$\dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi \quad (21)$$

$$\dot{\psi} = r \quad (22)$$

Powyższe równania są nieliniowe i zależą od wartości stanów u , v oraz ψ . Jednakże mogą zostać wyprowadzone

liniowe aproksymacje tych równań, przy założeniu że układ współrzędnych nieruchomych będzie obracany w taki sposób, że kurs zadany ψ_z będzie równy zero ($\psi_z = 0$). W związku z tym, sterowanie statkiem wzdłuż zadanej trajektorii będzie realizowane w układzie współrzędnych (X_R, Y_R) powiązanych z realizowanym odcinkiem trajektorii. Stąd, kurs statku ψ^r będzie miał małą wartość w trakcie sterowania wzdłuż zadanej trajektorii, wobec tego można przyjąć, że

$$\sin \psi^r \approx \psi^r \quad \cos \psi^r = 1 \quad (23)$$

Po dokonaniu założenia ($u \approx U$) równania kinematyczne ruchu statku redukują się do zbioru równań liniowych

$$\dot{x}^r = U + d_x \quad (24)$$

$$\dot{y}^r = U \psi^r + v + d_y \quad (25)$$

$$\dot{\psi}^r = r \quad (26)$$

W równaniach powyższych wprowadzone zostały dwa dodatkowe elementy (d_x, d_y), opisujące błędy związane linearyzacją i znosem powodowanym przez zakłócenia środowiskowe. W równaniu (25) y^r jest odchyłką boczną statku od trajektorii zadanej, wyznaczaną ze wzoru

$$y^r = e_y = (x - x_k) \sin \psi_k - (y - y_k) \cos \psi_k \quad (27)$$

i bardzo silnie zależy od zmian prędkości wzdłużnej U .

Zadaniem regulatora trajektorii jest sterowanie ruchem statku wzdłuż zadanego odcinka trajektorii, o współrzędnych końców (x_k, y_k) i (x_{k+1}, y_{k+1}) przy minimalizacji kursu ψ^r oraz bocznej odchyłki położenia statku od tego odcinka y^r . Kurs zadany wynikający z zadanego odcinka trajektorii wyznaczany jest ze wzoru (4) i będzie zmieniany po osiągnięciu nowego punktu drogi. W regulatorze trajektorii, poprzez sprzężenie, na jego wejście wprowadzona zostanie całka z odchyłki bocznej statku od trajektorii zadanej y^r , stąd pojawia się nowy stan w obiekcie

$$\dot{y}_I^r = y^r \quad (28)$$

Projektowany regulator trajektorii nie będzie sterował prędkością wzdłużną statku, dlatego też w dalszej analizie można pominąć równanie (24). Na podstawie równań (17), (25), (26) i (28) można zapisać równania dynamiczne uproszczonego modelu matematycznego procesu do syntezy regulatora trajektorii

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi}^r \\ \dot{y}^r \\ \dot{y}_I^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & U & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi^r \\ y^r \\ y_I^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \delta + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot d_y \quad (29)$$

Zmienne sterowane ψ^r oraz y^r są wyznaczane następująco

$$\begin{bmatrix} \psi^r \\ y^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi^r \\ y^r \\ \dot{y}_I^r \end{bmatrix} \quad (30)$$

gdzie $\psi^r = \psi - \psi_k$, natomiast ψ jest kursem statku, ψ_k jest kursem wynikającym z realizowanego odcinka trajektorii.

Projektowany regulator trajektorii ruchu statku będzie regulatorem stanu o postaci

$$\delta_z = -k_1 v - k_2 r - k_3 (\psi - \psi_k) - k_4 y^r - k_5 y_I^r \quad (31)$$

Niemierzone prędkości v i r będą estymowane przez dyskretny filtr Kalmana.

Parametry regulatora trajektorii wyznaczone zostały metodą lokowania biegunów, na podstawie zlinearyzowanego procesu dla stałej prędkości wzdłużnej $u_0 = 0.5$ (m/s). Uzyskane wartości wzmocnień regulatora trajektorii zebrane zostały w tabelicy 4.

Tabela 4. Wyznaczone wartości wzmocnień regulatora trajektorii

Regulator trajektorii	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
	10.67	19.92	1.60	2.1215	0.01

4.2. Regulator trajektorii PDPI

Kolejny badany regulator trajektorii został złożony z dwóch równoległe połączonych regulatorów składowych. Pierwszym z nich jest regulator kursu PD, służący do minimalizacji uchybu kursu, natomiast drugim jest regulator PI służący do minimalizacji odchyłki bocznej od zadanego odcinka trajektorii odniesienia.

$$\delta_z = u_{PD} + u_{PI} = K_P e_\psi + K_D r_\psi + k_4 y^r + k_5 y_I^r \quad (32)$$

gdzie $e_\psi(t) = \psi_z(t) - \psi(t)$, ψ_z jest kursem zadanym (4), ψ jest pomierzonym kursem statku, natomiast r_ψ jest pochodną uchybu kursu $r_\psi = \dot{e}_\psi$.

Parametry regulatora PI służącego do minimalizacji odchyłki bocznej zostały zaczerpnięte z wyznaczonego wcześniej regulatora trajektorii LQG (31). Natomiast do wyznaczenia parametry regulatora kursu (K_P , K_D) zastosowany został model Nomoto [15], uzyskanego na podstawie zlinearyzowanego modelu dynamiki statku Davidsona i Schiffa opisanego wzorem (13), po wyeliminowaniu z tych równań prędkości poprzecznej v .

$$\frac{r(s)}{\delta(s)} = \frac{K(sT_3 + 1)}{(sT_1 + 1)(sT_2 + 1)} \quad (33)$$

gdzie K jest wzmocnieniem statycznym prędkości kątowej, T_1 , T_2 oraz T_3 są stałymi czasowymi, r jest prędkością kątową statku $r = \dot{\psi}$. Parametry transmitancji (33) odnoszą się do współczynników hydrodynamicznych zgodnie z następującymi zależnościami

$$T_1 T_2 = \frac{|M|}{|N|} \quad (34)$$

$$T_1 + T_2 = \frac{n_{11}m_{22} + n_{22}m_{11} - n_{12}m_{21} - n_{21}m_{12}}{|N|} \quad (35)$$

$$K_R = \frac{n_{21}b_1 - n_{11}b_2}{|N|} \quad (36)$$

$$K_R T_3 = \frac{m_{21}b_1 - m_{11}b_2}{|N|} \quad (37)$$

$$K = -K_R \quad (38)$$

gdzie współczynniki m_{ij} , n_{ij} oraz b_i ($i=1,2$; $j=1,2$) są współczynnikami macierzy M , N i B (14)–(16), natomiast $|M|$, $|N|$ są wyznacznikami odpowiednio macierzy M i N .

Identyfikacja parametrów modelu Nomoto na podstawie morskich prób manewrowych wykazała, że wartości parametrów T_2 i T_3 w równaniu (33) niewiele różnią się od siebie [6]. Pozwala to na dalsze uproszczenia transmitancji (33), po których uzyskuje się model Nomoto pierwszego rzędu o postaci

$$\frac{r(s)}{\delta(s)} = \frac{K}{sT + 1} \quad (39)$$

gdzie $T = T_1 + T_2 - T_3$ jest efektywną stałą czasową prędkości kątowej. Ponieważ prędkość kątowa jest pochodną kąta kursu statku $\dot{\psi} = r$ to powyższy model może zostać zapisany w dziedzinie czasowej następująco

$$T\ddot{\psi} + \dot{\psi} = K\delta \quad (40)$$

Parametry liniowego regulatora PD mogą zostać łatwo wyznaczone metodą lokowania biegunów na podstawie modelu Nomoto (39), szczegóły przekształceń można znaleźć w pracy [6], gdzie

$$K_P = \frac{\omega_n^2 T}{K} \quad (41)$$

$$K_D = \frac{2\zeta\omega_n T - 1}{k} \quad (42)$$

W równaniach (41) i (42) częstotliwość drgań własnych wyznaczana jest na podstawie poniższej zależności

$$\omega_n = \frac{\omega_b}{\sqrt{1 - 2\zeta^2 + \sqrt{4\zeta^4 - 4\zeta^2 + 2}}} \quad (43)$$

gdzie ω_b jest szerokością pasma, natomiast ζ jest względnym współczynnikiem tłumienia projektowanego układu sterowania.

Na podstawie częstotliwościowej charakterystyki amplitudowej modelu Nomoto wyznaczona została szerokość pasma, jako częstotliwość graniczną ω_b przyjęto wartość przy której charakterystyka ta osiąga wartość -3 dB ($\omega_b = 0.0247$). Do dalszych obliczeń przyjęto współczynnik tłumienia $\zeta = 0.83$. Na podstawie wzorów (41) i (42) wyznaczone zostały wartości wzmocnień składowego regulatora kursu, które znajdują się w tabelicy 5.

Tabela 5. Wyznaczone wartości wzmocnień regulatora PDPI

Regulator trajektorii	K_P	K_D	k_4	k_5
	1.95	92.5	2.1215	0.01

4.3. Regulator prędkości

Synteza regulatora prędkości przeprowadzona została w oparciu o równanie (12), opisujące dynamikę w torze wzdłużnym. Po usunięciu z tego równania składowych nieliniowych, przyjmuje ono postać

$$(m - X_u)\ddot{u} - X_u u = X_n n \quad (44)$$

Uzyskany został prosty model typu inercja I rzędu, w którym zmienną wejściową jest prędkość obrotowa śruby napędowej n , natomiast wyjściem jest prędkość wzdłużna statku u . Układy regulacji z tego typu obiektami są układami typu zero i do sterowania takim obiektem wystarczy zastosowanie regulatora typu PI o postaci [3]

$$n_z = f(u_z) + K_{Pu} e_u + K_{Iu} \xi_u \quad (45)$$

gdzie

$$\dot{\xi}_u = e_u \quad (46)$$

We wzorach (45) i (46) u_z jest prędkością zadaną, e_u jest uchybem prędkości ($e_u = u_z - u$), $K_{Pu} > K_{Iu} > 0$.

Charakterystyka $f(u_z)$ przedstawia wyznaczoną eksperymentalnie zależność w stanie ustalonym, pomiędzy zadaną prędkością obrotową śruby n , a ustaloną prędkością wzdłużną statku u , i opisana jest wzorem

$$f(u_z) = au_z + b \quad (47)$$

gdzie $a = 292.0$, $b = 84.8$.

Obliczenie parametrów regulatora opisanego wzorem (45), wykonane zostało metodą lokowania biegunów. Wyznaczone parametry regulatora prędkości znajdują się w tablicy 6.

Tablica 6. Wyznaczone wartości wzmocnień regulatora prędkości

Regulator prędkości	K_{Pu}	K_{Iu}
	500.0	0.01

4.4. Filtr Kalmana

Współrzędne pozycji statku (x , y) są mierzone przez układ różnicowego systemu globalnego pozycjonowania (DGPS), natomiast kurs statku (ψ) jest mierzony przez żyrokompas. Te trzy zmienne stanu ruchu statku zebrane są w wektorze $\eta = [x, y, \psi]^T$. Trzy pozostałe zmienne stanu, zebrane w wektorze $v = [u, v, r]^T$ nie są mierzone i muszą być estymowane. Wektor prędkości v wyrażony w ruchomym układzie współrzędnych odniesienia $\{X_B, Y_B\}$, może zostać wyznaczony na podstawie prędkości (u_x, v_y, r) określonych w nieruchomym układzie odniesienia (X_N, Y_N), przy użyciu następującej zależności

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_x \\ v_y \\ r \end{bmatrix} \quad (48)$$

gdzie $u_x = dx/dt$, $v_y = dy/dt$, $r = d\psi/dt$.

Prędkości (u_x, v_y, r) były wyznaczane przy użyciu stacjonarnego, dyskretnego filtru Kalmana na podstawie pomierzonego wektora $y = \eta = [x, y, \psi]^T$. Każda z tych prędkości określana była w oddzielnym torze estymacji. Wzmocnienia filtru Kalmana wyznaczone zostały przy użyciu funkcji `lqr` znajdującej się w bibliotece Matlaba i były identyczne w każdym torze estymacji.

$$L = \begin{bmatrix} 0.07945 \\ 0.36869 \end{bmatrix} \quad (49)$$

Szczegóły związane z zastosowaniem, dyskretnego filtru Kalmana do estymacji niemierzonych prędkości dla statku treningowego *Blue Lady* można znaleźć w pracy [17].

4. BADANIA EKSPERYMENTALNE

W celu sprawdzenia poprawności zaprojektowanego układu sterowania, przeprowadzone zostały zarówno badania symulacyjne jak i badania eksperymentalne. Badania eksperymentalne przeprowadzone zostały na statku treningowym *Blue Lady* w Ośrodku Manewrowania Statkami na jeziorze Silm w Hawie/Kamionce. Statek znajdował się w stanie pełnego załadowania. W czasie badań prędkość wiatru nie przekraczała 4 m/s. Wykonana została próba przepłynięcia statku wzdłuż trajektorii zadanej składającej się z trzech odcinków. Przykładowa, zarejestrowana trasa przejścia znajduje się na rysunku 4. Prędkość wzdłużna stabilizowana była na jednej, stałej prędkości 0.8 m/s.

Ocena jakości pracy układów sterowania z badanymi regulatorami trajektorii LQG i PDPI dokonana została przy użyciu całkowitych wskaźników jakości wyznaczanych dla prędkości poprzecznej (v_E), prędkości kątowej (r_E), uchybu kursu (ψ_E), odchyłki poprzecznej statku od trajektorii zadanej (e_{yE}) oraz zadanego wychylenia płetwy sterowej (δ_E). Wskaźniki te rozważone zostały w ich dyskretniej formie jako:

$$v_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |v_i|, \quad r_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |r_i| \quad (50)$$

$$\psi_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |e_{\psi i}|, \quad e_{yE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |e_{y i}| \quad (51)$$

$$\delta_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\delta_{z i}| \quad (52)$$

Wskaźnik opisany wzorem (52) wyznaczany był na podstawie zadanego wychylenia płetwy sterowej, gdyż w układzie rzeczywistym podczas prowadzenia badań eksperymentalnych nie było możliwości pomiaru rzeczywistego położenia płetwy sterowej.

Wielkości, które posłużyły do oceny jakości regulacji pokazane zostały na rysunku 5. Na podstawie tych wielkości wyznaczone zostały dyskretnie wskaźniki jakości, które zawarte zostały w tabeli 7. Analizując uzyskane wyniki łatwo stwierdzić, że w obydwu przypadkach uzyskano podobną jakość sterowania, przy czym zwraca uwagę, że mniejsza aktywność działania płetwy sterowej uzyskiwana jest po zastosowaniu regulatora PDPI.

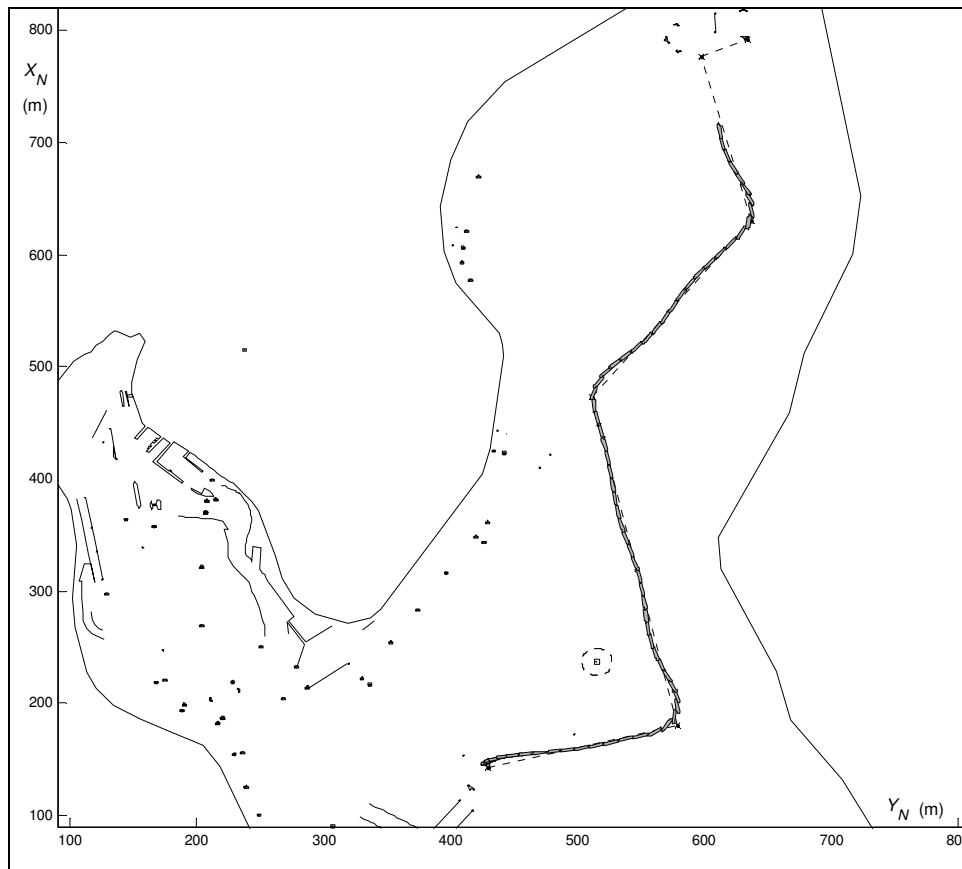
Tablica 7. Wyznaczone wskaźniki jakości (49)-(51).

	v_E	r_E	ψ_E	e_{yE}	δ_E
LQG	0.0929	0.3853	13.3536	3.7842	11.4962
PDPI	0.0887	0.3859	14.0526	3.9659	10.4993

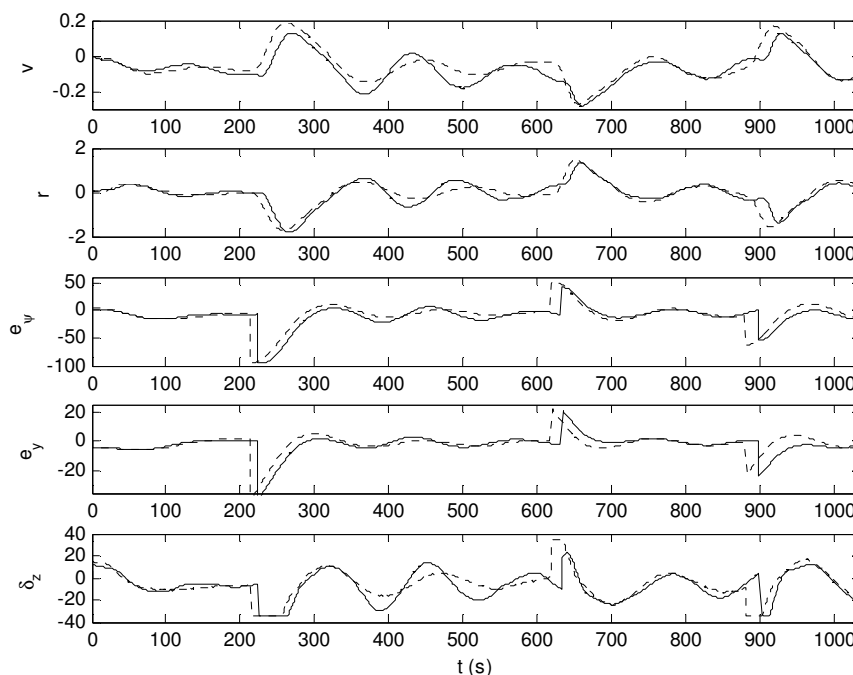
5. WNIOSKI KOŃCOWE

W pracy przedstawiony został problem związany z syntezą regulatora trajektorii. Do stabilizacji położenia statku względem trajektorii zadanej, przebadane zostały dwa regulatory LQG i PDPI. W obydwu przypadkach wielkością sterującą był kąt wychylenia płetwy sterowej. W analizie

rozpatrzony został przypadek stabilizacji położenia statku na trajektorii zadanej przy nie zmieniającej się prędkości zadanej ruchu statku. Badania eksperymentalne przeprowadzone zostały na modelu fizycznym zbiornikowca na jeziorze Silm w Iławie/Kamionce. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że w obydwu przypadkach uzyskana została podobna jakość sterowania.



Rys. 4. Przykładowa, zarejestrowana trasa przejścia z badanym układem sterowania z regulatorem trajektorii PDPI



Rys. 5. Porównanie charakterystycznych wielkości związanych z jakością pracy badanych regulatorów trajektorii, (LQG – linia ciągła, PDPI – linia przerywana), v_e – estymowana prędkość poprzeczna, r_e – estymowana prędkość kątowna, e_ψ – uchyb kursu, e_y – odchyłka poprzeczna, δ_z – zadane wychylenie płetwy sterowej.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Amerongen J. V., Nauta Lemke H.R.V., Recent development in automatic steering of ships, *Journal of Navigation*, Vol. 39, No. 3, pp. 349-362, 1986.
2. Bertin D., Track-keeping controller for a precision manoeuvring autopilot, *Proceedings of the IFAC Conference Control Application in Marine Systems (CAMS'98)*, Fukuoka, Japan, October 27 – 30, pp. 155-160, 1998.
3. Breivik M., Hovstein V. E., Fossen T. I., Stright-line target tracking for unmanned surface vehicles, *Modeling, Identification and Control*, Vol. 29, No. 4, pp. 131-149, 2008.
4. Chocianowicz W., Pejaś J., Adaptive control system for steering the ship along the desired trajectory – based on the optimal control and filtering theory, *Proceedings of Control Applications in Marine Systems (CAMS-92)*, Genova, Italy, April 8-10, pp. 319-335, 1992.
5. Davidson K. S. M., Schiff L. I., Turning and course keeping qualities, *Transactions of Society of Naval Architects Marine Engineers*, Vol. 54, pp. 152-190, 1946.
6. Fossen T.I., *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
7. Gierusz W., Simulation model of the shiphandling training boat Blue Lady, *Proceedings of the 5th IFAC Conference on Control Application in Marine Systems (CAMS-2001)*, 18-20 July, Glasgow, Scotland, 2001.
8. Gierusz W., Nguyen Cong V., Rak A., Maneuvering control and trajectory tracking of very large crude carrier, *Ocean Engineering*, vol. 34, No 7, pp. 932-945, 2007.
9. Holzhuter T., A high precision track controller for ships, *Proceedings of the 11th IFAC World Congress*, pp. 118-123, Tallin, Estonian USSR, 1990.
10. Kallstrom C.G., Identification and adaptive control applied to ship steering, *PhD thesis*, Lund Institute of Technology, 1982.
11. Marine cybernetics laboratory (MC-lab), Trondheim, Norway, (<https://www.ntnu.edu/imt/lab/cybernetics>).
12. Maritime Simulation & Training Centre, Kongsberg, Norway, (<https://www.km.kongsberg.com/>)
13. Messer A.C., Grimble M.J., Introduction to robust ship track-keeping control design, *Transactions of Instrumental Measurement and Control*, Vol. 15, No 3, pp. 104-110, 1993.
14. Morawski L., Pomirski J., Ship track-keeping: experiments with a physical tanker model, *Control Engineering Practice*, Vol. 6, pp. 763-769, 1998.
15. Nomoto, K., Taguchi, T., Honda, K., Hirano, S., On the steering Qualities of Ships. Technical Report, *International Shipbuilding Progress*, Vol. 4, No. 35, pp. 354-370, 1957.
16. Ship Handling Research and Training Centre Hława, Poland, (<http://www.ilawashiphhandling.com.pl/>)
17. Tomera M., Discrete Kalman filter design for multivariable ship motion control: experimental results with training ship, *Joint Proceedings, Akademia Morska Gdynia & Hochschule Bremerhaven*, pp. 26-34, 2010.
18. Velagic J., Vukic Z., Omerdic E., Adaptive fuzzy ship autopilot for track-keeping, *Control Engineering Practice*, Vol. 11, No. 4, pp. 433-443, 2003.
19. Vukic Z., Omerdic E., Kuljaca L., Improved fuzzy autopilot for track-keeping, *Proceedings of IFAC Conference on Control Application in Marine Systems (CAMS'98)*, Fukuoka, Japan, October, 27-30, pp. 135-140, 1998.
20. Zhang Y., Hearn G. E., Sen P., A neural network approach to ship track-keeping control, *IEEE Journal of Ocean Engineering*, Vol. 21, No. 4, pp. 513-527, 1996.

TRACK-KEEPING OF A PHYSICAL MODEL OF THE TANKER ALONG A SPECIFIED ROUTE

The study tested two controllers, which were used to control the movement of a ship along a specified route. The control plant is a physical model of a ship called the *Blue Lady* used for training captains in the Ship Handling Research and Training Center on the lake Silm in Hława/Kamionka, in Poland. The route of the vessel is usually determined using so-called waypoints. The reference trajectory of ship movement is created by combining sections of the successive waypoints. A circle of acceptance, that the ship must achieve is defined around each waypoint. When the ship enters the area of a circle of acceptance then the reference trajectory is switched on the segment connecting two consecutive waypoints. A specified speed of the ship is linked with each section of the road. The task of controlling consists on the most accurate sailing along the ship's trajectory. The first one is a state controller (LQG), which uses discrete-time Kalman filter to determine the unmeasured variables of the ship's state and the other is based on a classical PID controller.

Keywords: track-keeping, LQG control, PID control, ship control.