

Nr 98/2017, 232–244
ISSN 1644-1818
e-ISSN 2451-2486

STEROWANIE HYBRYDOWE RUCHEM STATKU

HYBRID CONTROL OF THE SHIP MOVEMENT

Mirosław Tomera

Akademia Morska w Gdyni, Morska 81–87, 81-581 Gdynia, Wydział Elektryczny,
Katedra Automatyki Okrętowej, e-mail: m.tomera@we.am.gdynia.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono hybrydowy układ sterowania ruchem statku w różnych trybach operacyjnych. Opracowany układ integruje takie tryby operacyjne jak: precyzyjne manewrowanie statkiem przy małych prędkościach, sterowanie statkiem przy różnych prędkościach na kursie lub wzdłuż zadanej trajektorii oraz zatrzymywanie statku na trasie. Zrealizowanie tych rodzajów pracy wymagało zastosowania pięciu regulatorów, które zebrano w zbiorze alternatywnych regulatorów ciągłych. W zależności od rodzaju operacji wykonywanej przez statek dokonuje się wyboru odpowiednich regulatorów. Do sterowania statkiem wzdłuż zadanej trasy przejścia w różnych trybach pracy zastosowano metodę nadzorującego sterowania przełączającego. Trajektoria zadana ruchu statku składa się z odcinków prostych łączących kolejne punkty trasy przejścia oraz z prędkości zadanych i trybów pracy układu hybrydowego na tych odcinkach. Opracowany układ sterowania testowany był na statku treningowym „Blue Lady”, wykorzystywanym do szkolenia kapitanów w Ośrodku Manewrowania Statkami, znajdującym się na jeziorze Sيلم w Iławie/Kamionce. Przeprowadzone badania pokazały dobrą jakość zaprojektowanego regulatora hybrydowego.

Słowa kluczowe: sterowanie hybrydowe, sterowanie ruchem statku.

Abstract: The paper presents a hybrid control system for the movement of a ship in various operating modes. The developed system integrates a number of operational modes, such as: precise maneuvering the ship at low speeds, steering the ship at different speeds on the course or along the trajectory, and stopping the ship on the route. The implementation of these modes requires the use of five controls, which have been collected in the set of alternative continuous controllers. The choice of the appropriate control is made depending on the type of the operation performed by the ship. The ship motion along a specified route of crossing in different operating modes is controlled using a method of supervisory switching control. The set ship trajectory consists of straight sections connecting consecutive points of the passage route, complemented by speed setpoints and operating modes of the controller on these sections. The developed control system was tested on the training ship Blue Lady, used to train captains in the Ship Handling Research and Training Center located on the lake Sيلم in Iława-Kamionka, Poland. The conducted tests have proved good quality of the designed hybrid control system.

Keywords: hybrid control, ship movement control.

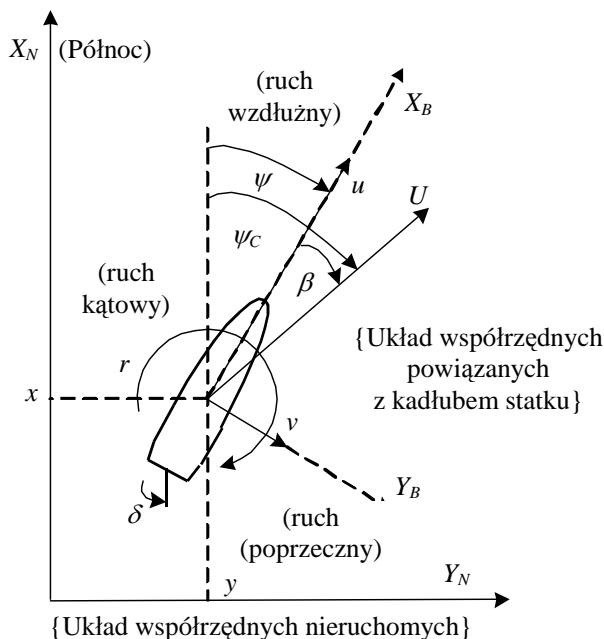
1. WSTĘP

Stale wzrastający ruch na autostradach, w powietrzu i na morzu wymusza potrzebę poszukiwania nowych algorytmów sterowania, zwiększających zarówno bezpieczeństwo, jak i poprawiających przepustowość oraz redukujących opóźnienia. W ruchu nawodnym poprawa bezpieczeństwa jest szczególnie ważna w coraz bardziej zatłoczonych dojeżdżaniach do portów, cieśninach, obszarach, będących przeżęciami na morzu. Docelowym rozwiązaniem wydaje się stworzenie na tych obszarach układów zarządzających ruchem statków. Jednostka regulatora na lądzie planowałaby cały scenariusz ruchu oraz współdziałanie pomiędzy zaawansowanymi autopilotami umieszczonymi na każdym statku. Wydaje się, że taki system byłby możliwy do zrealizowania w związku z rozwojem nowoczesnych technologii, takich jak satelitarne układy nawigacji (układy GPS), cyfrowe mapy morza, coraz szybsze i potężniejsze komputery oraz coraz lepsze urządzenia wykonawcze [Godhavn, Lauvdal i Egeland 1996]. Wykonanie takiego systemu wymaga jednak w pierwszej kolejności opracowania autopilota hybrydowego, który zainstalowany byłby na każdym statku wpływającym na taki obszar. Pokładowy regulator hybrydowy musi mieć możliwość sterowania ruchem statku przy różnych operacjach, od automatycznego utrzymywania pozycji w różnych warunkach pogodowych aż po sterowanie przy dużych prędkościach.

Trasa ruchu statku określana jest zazwyczaj w zależności od punktów drogi [Fossen 2011]. Przy wyznaczaniu punktów drogi pod uwagę bierze się: warunki pogodowe, unikanie przeszkód i rodzaj zadania do wykonania [Lisowski 2013]. Każdy punkt drogi definiowany jest we współrzędnych kartezjańskich. Trajektoria zadana tworzona jest więc przez odcinki łączące kolejne punkty drogi.

2. MODEL MATEMATYCZNY DYNAMIKI STATKU

Ruch statku w płaszczyźnie horyzontalnej opisywany jest w trzech stopniach swobody. Do opisu tego ruchu stosowane są dwa układy współrzędnych (rys. 1). Pierwszy z nich jest układem współrzędnych nieruchomych (X_N, Y_N) powiązanych z mapą akwenu, 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 opisujące ruch statku są zebrane w dwóch wektorach [Fossen 2011]: $\boldsymbol{\eta} = [x, y, \psi]$ oraz $\boldsymbol{v} = [u, v, r]$, gdzie (x, y) są współrzędnymi położenia, ψ jest kursem statku, (u, v) są liniowymi prędkościami ruchu statku oraz r jest prędkością kątową statku.



Rys. 1. Zmienne użyte do opisu ruchu statku w płaszczyźnie horyzontalnej

Fig. 1. Variables used to describe the motion in horizontal plane

2.1. Model matematyczny statku treningowego „Blue Lady”

Do projektowania i testowania układu sterowania hybrydowego wybrano statek treningowy „Blue Lady”, pływający po jeziorze Silm w Ośrodku Manewrowania Statkami w Iławie/Kamionce [The Foundation for Safety of Navigation and Environment Protection]. Model fizyczny o nazwie „Blue Lady” jest wykonaną w skali 1:24 repliką zbiornikowca o wyporności 176 000 DWT, masie $m = 22\,934,4$ kg, długości całkowitej $L_{OA} = 13,78$ m, i szerokości $B = 2,38$ m [Gierusz 2001]. Model ten wyposażono w płetwę sterową, śrubę napędową, dwa tunelowe stery strumieniowe oraz dwa obrotowe stery strumieniowe.

Położenie wszystkich zainstalowanych urządzeń wykonawczych pokazano na rysunku 2.

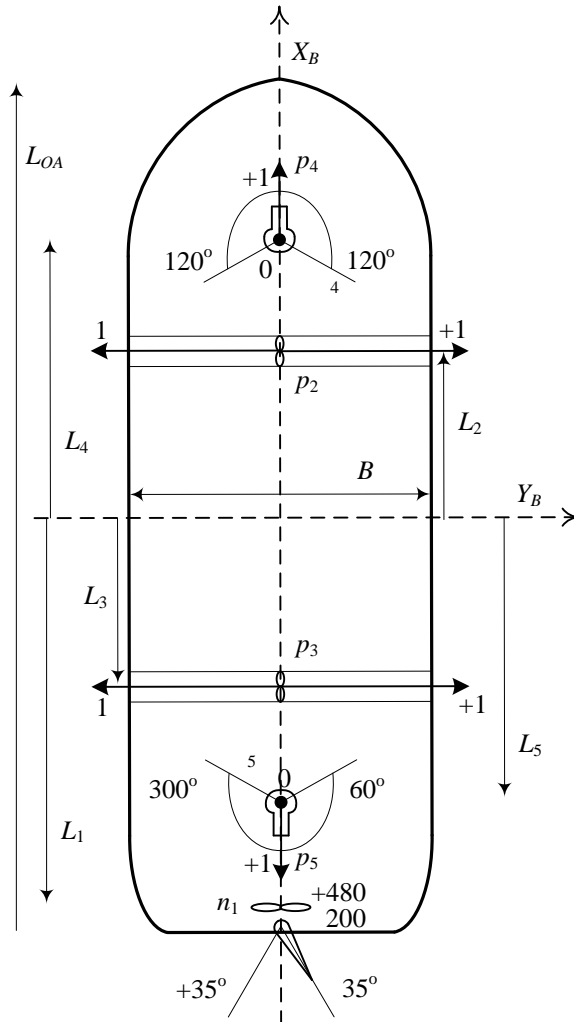
Sterowanie wszystkimi urządzeniami wykonawczymi wymaga użycia ośmiu wartości zadanych. W opracowanym układzie sterowania hybrydowego wykorzystano cztery z nich. Są to: płetwa sterowa (δ), śruba napędu głównego (n_1) i dwa tunelowe stery strumieniowe: dziobowy (p_2) i rufowy (p_3). Złożony model matematyczny dynamiki statku „Blue Lady”, obejmujący dynamikę kadłuba i zainstalowanych urządzeń wykonawczych, odwzorowujący zachowanie się statku trenin-

gowego został opracowany przez Gierusza [Gierusz 2001]. Ogólna postać tego modelu statku jest następująca:

$$M\dot{\mathbf{v}} + C(\mathbf{v})\mathbf{v} + D(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

gdzie:

- M – dodatnio określona macierz bezwładności, obejmująca masy dodane,
- $C(\mathbf{v})$ – macierz sił dośrodkowych Coriolis,
- $D(\mathbf{v})$ – macierz tłumienia,
- $\boldsymbol{\tau}$ – wektor sił działających na statek.



Rys. 2. Położenie urządzeń wykonawczych na statku treningowym „Blue Lady”

Fig. 2. Thrusters location on “Blue Lady”

2.2. Filtr Kalmana

Współrzędne pozycji (x, y) mierzone są przez system satelitarny GPS, podczas gdy kurs statku ψ mierzony jest przez żyroskop. Wektor prędkości \mathbf{v} , wyrażony w układzie współrzędnych ruchomych (X_B, Y_B) , nie jest mierzony i może zostać wyznaczony na podstawie prędkości określanych w nieruchomym układzie współrzędnych (X_N, Y_N) przy wykorzystaniu poniższej zależności

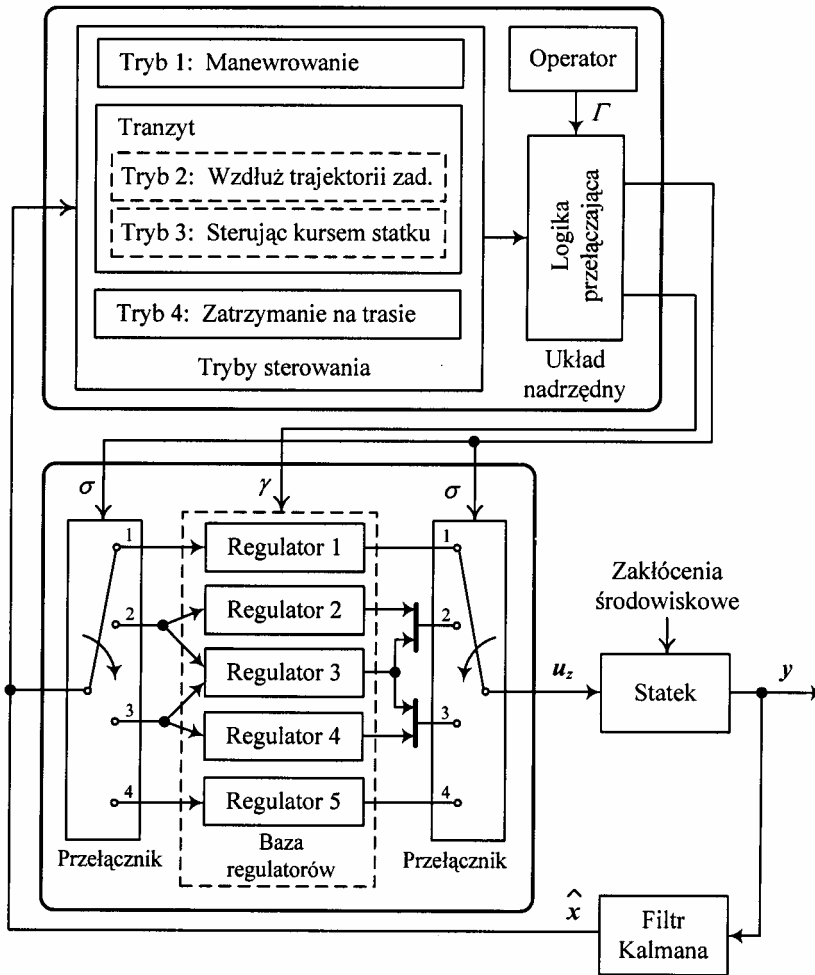
$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_x \\ v_y \\ r \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie $u_x = dx/dt$, $v_y = dy/dt$ – prędkości wyznaczone w nieruchomym układzie współrzędnych.

Szczegóły związane z wyprowadzeniem i implementacją algorytmu opartego na dyskretnym filtrze Kalmana oraz sposób estymacji prędkości ruchu statku można znaleźć w pracy [Tomera 2010].

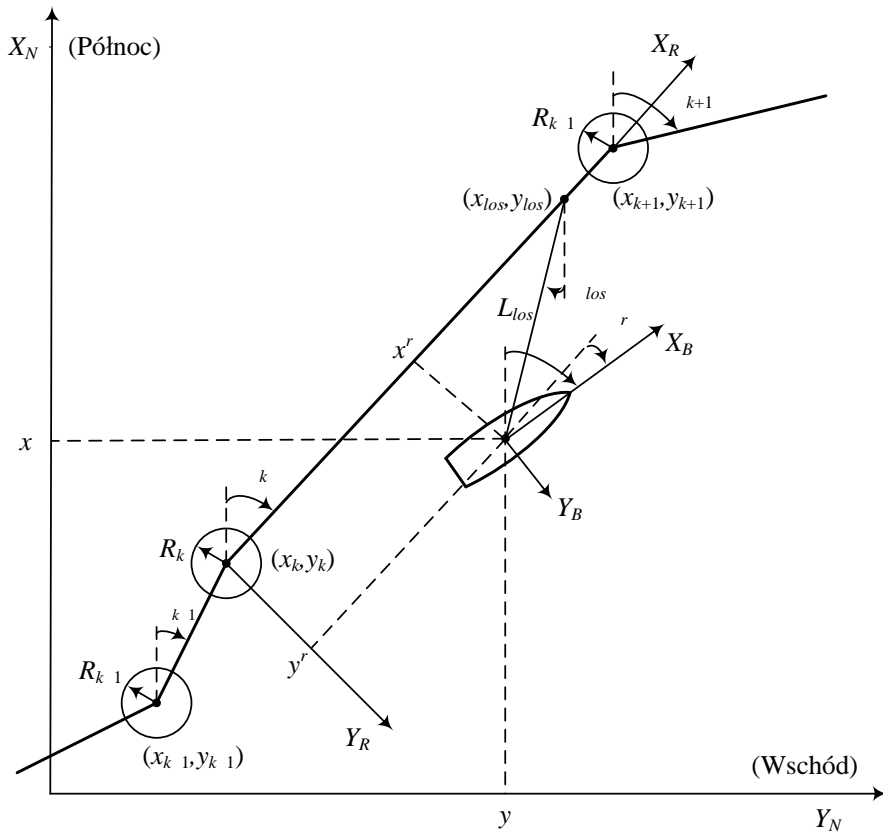
3. NADZORUJĄCE STEROWANIE PRZEŁĄCZAJĄCE

Nadzorujące sterowanie przełączające składa się z trybów pracy i logiki przełączającej, która zapewnia stabilność i jakość pracy w trakcie i po przełączeniach. W układzie nadzorującego sterowania przełączającego wyodrębnia się dwa główne bloki: układ nadrzędny i bazę regulatorów. Zintegrowany schemat blokowy tego układu przedstawiony został na rysunku 3. W układzie nadrzędnym przewidziano sterowanie ruchem statku w typowych operacjach, związanych z ruchem statku przemieszczającego się z jednego portu do drugiego. Do każdego trybu operacyjnego, wykonywanego przez statek, przypisany jest inny układ regulatorów włączanych w bezpośrednim układzie sterowania ruchem statku. Układ nadrzędny pracuje, wykorzystując trajektorię zadaną T , obecnie otrzymywaną od operatora systemu, a w przyszłości przewiduje się, że będzie otrzymywał ją od nadrzędnego systemu planowania trajektorii ruchu statku. Trajektorja ta zawiera współrzędne punktów zwrotu realizowanej trasy przejścia statku i z każdym jej odcinkiem powiązane są tryby pracy. Jeśli zadanym trybem pracy jest ‘Tranzyt’ (Tryb 2 lub Tryb 3), to dodatkowo podawana jest prędkość poruszania się statku na zadanym odcinku trajektorii. Jeśli natomiast na zadanym odcinku trajektorii statek ma się poruszać w trybie manewrowania (Tryb 1), to podawany jest kurs zadany przemieszczającego się statku, niekoniecznie zgodny z kierunkiem poruszania się statku.



Rys. 3. Schemat blokowy zintegrowanego układu sterowania hybrydowego
Fig. 3. Block diagram of integrated hybrid controller

Najprostszą formą układu kierowania statkiem, jest zdefiniowanie trajektorii zadanej w postaci odcinków łączących kolejne punkty drogi (rys. 4). Do opisu trajektorii zadanej i ruchu statku zdefiniowano trzy układy współrzędnych. Pierwszym z nich jest układ współrzędnych nieruchomych (X_N, Y_N) i w tym układzie definiowane są kolejne punkty drogi (x_k, y_k). Dla każdego punktu zwrotu zdefiniowany został wektor $\mathbf{p}_k = [x_k, y_k, \psi_k]^T$, zawierający współrzędne położenia (x_k, y_k) oraz kurs ψ_k , wynikający z odcinka trajektorii, którego końcem jest następny punkt zwrotu (x_{k+1}, y_{k+1}). Wokół każdego punktu drogi definiowany jest okrąg o promieniu R_k . Kiedy statek osiąga ten okrąg, to wówczas trajektoria zadana jest przełączana na kolejny odcinek drogi.



Rys. 4. Trajektoria zadana Γ i zdefiniowane układy współrzędnych

Fig. 4. The reference trajectory Γ and defined coordinate systems

Drugi układ współrzędnych (X_R, Y_R) jest powiązany z aktualnie realizowanym odcinkiem trajektorii zadanej o współrzędnych końców (x_k, y_k) i (x_{k+1}, y_{k+1}) , oś X_R pokrywa się z tym odcinkiem, wzdłuż którego akurat statek płynie. Wektor pozycji statku $\eta^r = [x^r, y^r, \psi^r]^T$ w układzie współrzędnych (X_R, Y_R) może zostać łatwo wyznaczony na podstawie wektora pozycji statku $\eta = [x, y, \psi]^T$ pomierzonego w układzie współrzędnych (X_N, Y_N) , według następującej zależności

$$\eta^r = \mathbf{R}^T(\psi_k) \cdot (\eta - \eta_k) \quad (3)$$

gdzie:

ψ_k – kąt wyznaczony względem osi X_N , dla odcinka trajektorii zadanej zaczepionego pomiędzy punktami zwrotu p_k i p_{k+1} ,

$\mathbf{R}^T(\psi_k)$ – macierz rotacji opisana wzorem (2),

η_k – wektor pozycji statku dla punktu zwrotu p_k .

Trzeci układ współrzędnych (X_B, Y_B) jest powiązany z kadłubem poruszającego się statku. W tym układzie wyrażone są prędkości liniowe (u, v) i kątowa r (rys. 1).

4. SYNTEZA REGULATORÓW PRZEŁĄCZAJĄCYCH

Regulatory składowe pozwalają na zrealizowanie zamierzonych trybów operacyjnych ruchu statku. W układzie sterowania bezpośredniego wszystkie regulatory przełączalne wykorzystują dyskretny filtr Kalmana, który posłużył do wyznaczania niemierzonych prędkości ruchu statku, jak również do filtracji szumów pomiarowych w mierzonych współrzędnych położenia statku (x, y) i kursu statku ψ .

4.1. Wielowymiarowy regulator precyzyjny (Regulator 1)

Manewrowanie ruchem statku w porcie (Tryb 1) wykonywane jest przy małych prędkościach z użyciem wielowymiarowego regulatora precyzyjnego, szczegółowo opisanego w pracy [Tomera 2014]. Dla tego regulatora celem sterowania jest śledzenie pożądanej, gładkiej trajektorii zadanej $(\eta_z^r(t), \dot{\eta}_z^r(t), \ddot{\eta}_z^r(t))$, wyznaczonej w układzie współrzędnych (X_R, Y_R) . Wektor pozycji punktu docelowego, do którego zmierza statek na bieżącym odcinku trajektorii, wyznacza się z następującej zależności:

$$\eta_K^r = \mathbf{R}^T(\psi_p)(\eta_K - \eta_P) \quad (4)$$

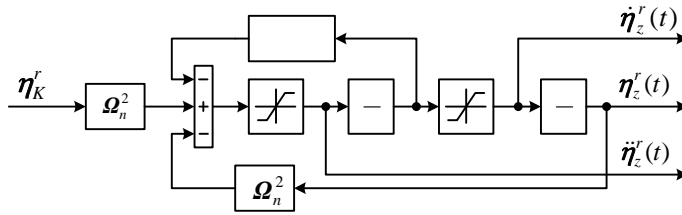
gdzie

$\eta_P = [x_P, y_P, \psi_P]^T$, $\eta_K = [x_K, y_K, \psi_K]^T$ – zadane wektory pozycji statku w punkcie początkowym (P) i końcowym (K), wyrażone w układzie współrzędnych (X_N, Y_N) ,

\mathbf{R} – macierz rotacji,

ψ_p – zadany kurs statku w punkcie początkowym realizowanego odcinka trajektorii.

Zadane współrzędne pozycji $\eta_z^r(t)$, prędkości poruszania się $\dot{\eta}_z^r(t)$ i przyśpieszenia $\ddot{\eta}_z^r(t)$ statku, przemieszczającego się z położenia początkowego (P) do końcowego (K), wyznaczone są w modelu odniesienia pokazanym na rysunku 5. W układzie regulacji wyznaczone są odchyłki od wartości zadanych. Uchyb pozycji η_e^r wyznacza się w układzie współrzędnych (X_R, Y_R) powiązanych z realizowanym odcinkiem trajektorii zadanej, natomiast uchyby prędkości v_e oraz przyśpieszenia \dot{v}_e wyznaczone są w układzie współrzędnych ruchomych (X_B, Y_B) , powiązanych z poruszającym się statkiem.



Rys. 5. Model odniesienia do generowania sygnałów zadanych dla wielowymiarowego regulatora precyzyjnego

Fig. 5. Reference system generating set point signals for multivariable precision controller

$$\eta_e^r = \eta^r - \eta_z^r \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_e = \mathbf{v} - \mathbf{v}_z = \mathbf{v} - \mathbf{R}^T(\psi_e^r) \cdot \dot{\eta}_z^r \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{v}}_e = \dot{\mathbf{v}} - \dot{\mathbf{v}}_z = \dot{\mathbf{v}} - \dot{\psi}_e^r \mathbf{S}^T \mathbf{R}^T(\psi_e^r) \cdot \dot{\eta}_z^r - \mathbf{R}^T(\psi_e^r) \cdot \ddot{\eta}_z^r \quad (7)$$

gdzie $\psi_e^r = \psi^r - \psi_z^r$. Do minimalizacji odchyłek od wartości zadanych zastosowany zostanie układ regulacji o postaci:

$$\ddot{\eta}_e + \mathbf{K}_D \mathbf{v}_e + \mathbf{K}_P \dot{\mathbf{v}}_e + \mathbf{K}_I \xi_e = \mathbf{0} \quad (8)$$

$$\dot{\xi}_e = \eta_e^r \quad (9)$$

Ostateczna postać algorytmu sterowania wielowymiarowego regulatora precyzyjnego jest następująca:

$$\boldsymbol{\tau}_z = \mathbf{M} \mathbf{R}^{-1}(\psi^r) [\dot{\mathbf{v}}_z - \mathbf{K}_P \mathbf{v}_e - \mathbf{K}_I \xi_e - \mathbf{K}_D \mathbf{v}_e + r \mathbf{M} \mathbf{R}(\psi^r) \mathbf{S} \mathbf{v}] + \mathbf{D}_L \mathbf{v} \quad (10)$$

Siły $\boldsymbol{\tau}$ przykładane do kadłuba statku wytwarzane są przez trzy pędniki: śrubę napędu głównego n_1 oraz tunelowe stery strumieniowe: dziobowy p_2 i rufowy p_3 .

4.2. Regulator trajektorii (Regulator 2)

Do sterowania statkiem wzdłuż trajektorii zadanej (Tryb 2) zastosowano regulator stanu wyznaczony na podstawie zlinearyzowanego modelu matematycznego dynamiki statku. Zadaniem regulatora trajektorii jest sterowanie ruchem statku wzdłuż zadanego odcinka trajektorii, o współrzędnych końcach \mathbf{p}_k i \mathbf{p}_{k+1} . Algorytm ten minimalizuje kurs ψ^r i odchyłkę boczną y^r położenia statku od tego odcinka. Kurs zadany wynika z zadanego odcinka trajektorii i będzie zmieniany po osiągnięciu nowego punktu drogi. Osiągnięcie nowego punktu drogi następuje wówczas, gdy statek znajdzie się w okręgu akceptacji o promieniu R_{k+1} wokół tego

punktu (rys. 4). W regulatorze trajektorii poprzez sprzężenie na jego wejście wprowadzona zostanie całka z odchyłki bocznej statku od trajektorii zadanej y^r

$$\dot{y}_I^r = y^r \quad (11)$$

Regulator trajektorii ruchu statku jest regulatorem stanu o postaci

$$\delta_z = -k_1 v - k_2 r - k_3 (\psi - \psi_k) - k_4 y^r - k_5 y_I^r \quad (12)$$

4.3. Regulator prędkości wzdłużnej statku (Regulator 3)

Do sterowania prędkością wzdłużną statku (Tryby 2 i 3) zastosowano regulator PI o postaci:

$$n_{1z} = n(u_z) + K_{Pu} e_u + K_{Iu} \int_0^t e_u(\tau) d\tau \quad (13)$$

gdzie:

- u_z – prędkość zadana,
- e_u – uchyb prędkości ($e_u = u_z - u$) $K_{Pu} > K_{Iu} > 0$.

Charakterystyka $n(u_z)$ przedstawia zależność w stanie ustalonym pomiędzyadaną prędkością wzdłużną u_z i daną prędkością obrotową śruby napędu głównego n_{1z} .

4.4. Regulator kursu statku (Regulator 4)

Do sterowania statkiem na kursie (Tryb 3) zastosowany został liniowy regulator typu PID, opisany wzorem:

$$\delta_z = K_P e_\psi + K_D r_\psi + K_I \int_0^t e_\psi(\tau) d\tau \quad (14)$$

gdzie:

- δ_z – zadane wychylenie płetwy sterowej,
- e_ψ – uchyb kursu ($e_\psi = \psi_z - \psi$),
- ψ – pomierzony kurs statku,
- $r_\psi = \dot{e}_\psi$ – pochodna uchybu kursu,
- ψ_z – kurs zadany wyznaczany według wzoru:

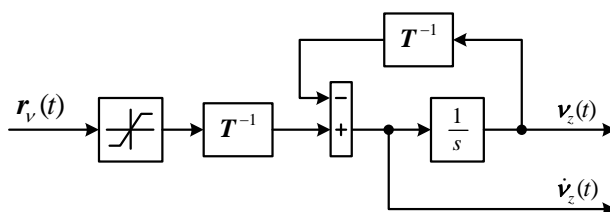
$$\psi_z = \psi_{los} = \arctg \left(\frac{y_{los} - y}{x_{los} - x} \right) \quad (15)$$

4.5. Wielowymiarowy regulator małych prędkości (Regulator 5)

Regulator ten wykorzystywany jest w sterowaniu hybrydowym do zatrzymywania statku na trajektorii zadanej (Tryb 4). Jego zadanie polega na przejściu kontroli nad statkiem przy małych prędkościach, kiedy to nie jest efektywne działanie płetwy sterowej (δ). Szczegóły związane z syntezą tego regulatora przedstawiono w pracy [Tomera 2015]. Zadanie sterowania polega na śledzeniu pożądanej gładkiej trajektorii zadanej ($\mathbf{v}_z(t), \dot{\mathbf{v}}_z(t)$), wyznaczonej przez model odniesienia w układzie pokazanym na rysunku 6. W układzie sterowania wyznaczone są odchyłki od wartości zadanych

$$\mathbf{v}_e = \mathbf{v} - \mathbf{v}_z \quad (16)$$

$$\dot{\mathbf{v}}_e = \dot{\mathbf{v}} - \dot{\mathbf{v}}_z \quad (17)$$



Rys. 6. Model odniesienia do generowania sygnałów zadanych dla wielowymiarowego regulatora prędkości

Fig. 6. Reference system command generator for multivariable speed controller

Do minimalizacji wyznaczanych odchyłek prędkości zastosowano regulator o postaci:

$$\dot{\mathbf{v}}_e + \mathbf{K}_p \mathbf{v}_e + \mathbf{K}_I \boldsymbol{\xi}_e = \mathbf{0} \quad (18)$$

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}_e = \mathbf{v}_e \quad (19)$$

ostateczna postać algorytmu sterowania wielowymiarowego dla małych prędkości

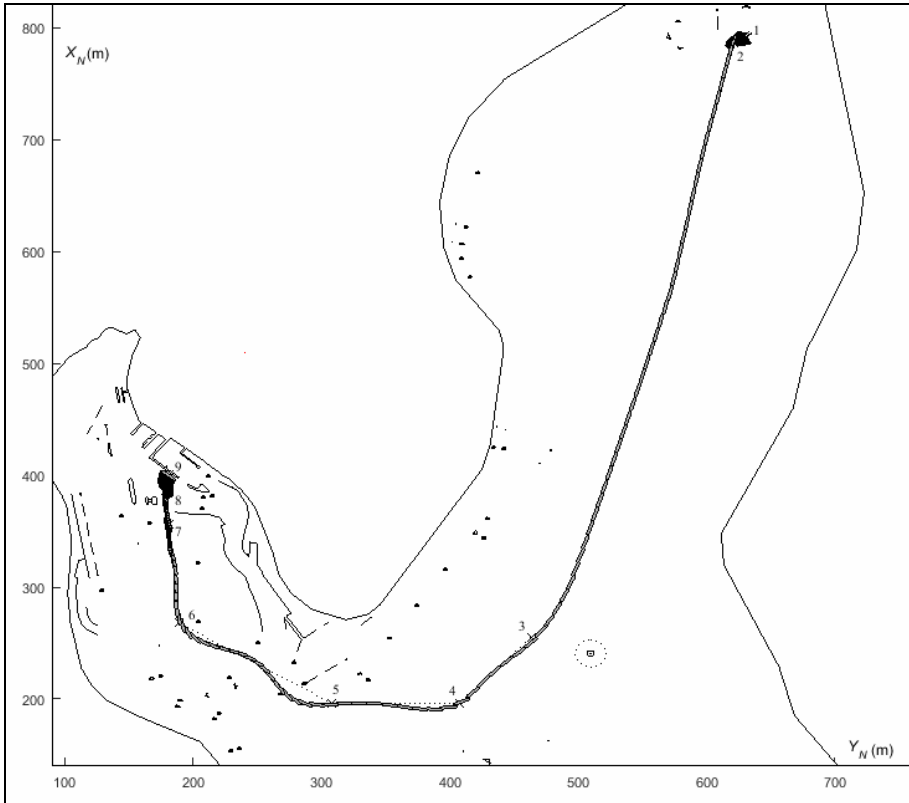
$$\boldsymbol{\tau}_z = \mathbf{M}[\dot{\mathbf{v}}_z - \mathbf{K}_p \mathbf{v}_e - \mathbf{K}_I \boldsymbol{\xi}_e] + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} \quad (20)$$

5. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

W celu sprawdzenia poprawności działania układu, pokazanego na rysunku 3, przeprowadzone zostały zarówno badania symulacyjne, jak i badania eksperymentalne. Cały układ sterowania, pokazany na rysunku 3, został zamodelowany w środowisku obliczeniowym Matlab/Simulink. W układzie tym przeprowadzono badania symulacyjne, polegające na manewrowaniu na różnych trajektoriach zadanych i w różnych kolejnościach przełączania regulatorów składowych.

Po wykonaniu badań symulacyjnych i upewnieniu się, że zaprojektowany układ sterowania hybrydowego działa poprawnie, następnym krokiem było zweryfikowanie tych wyników na obiekcie rzeczywistym.

Przykładowa trajektoria ruchu statku, zrealizowana na obiekcie rzeczywistym pokazana została na rysunku 7.



Rys. 7. Trajektorja ruchu statku zarejestrowana na jeziorze Silm w Iławie/Kamionce

Fig. 7. Ship movement trajectory recorded on the lake Silm in Iława-Kamionka

Jezioro Silm, na którym odbywało się testowanie pracy regulatora hybrydowego na modelu fizycznym statku o nazwie „Blue Lady“, przygotowane jest do szkolenia kapitanów i dlatego też pobudowano na nim różnego rodzaju tory wodne i nabrzeża, szczególnie zaś ich duża liczba znajduje się w zatoce pokazanej w lewym dolnym rogu rysunku 7. Analizowana trajektoria ruchu statku składa się z dziewięciu punktów zwrotu. Początek zarejestrowanej trasy przejścia (trajektorii ruchu statku) znajduje się w prawym górnym rogu, z którego statek wypływa. W celu przebycia trasy, pokazanej na rysunku 7, w regulatorze nadrzędnym zrealizowano sekwencję przełączania trybów pracy, zawartą w tabeli 1.

Tabela 1. Sekwencja trybów pracy regulatora nadrzędnego na trajektorii z rysunku 7
Table 1. Sequence of modes executed by supervisory controller on the trajectory in Figure 7

Lp.	Tryb pracy	Zakres punktów drogi
1	Manewrowanie (nr 1)	1 – 2
2	Sterując kursem statku (nr 4)	2 – 3
3	Wzdłuż trajektorii zadanej (nr 3)	3 – 7
4	Zatrzymanie na trasie (nr 2)	7
5	Manewrowanie (nr 1)	7 – 9

6. PODSUMOWANIE

Należy stwierdzić, że opracowany układ sterowania hybrydowego spełnia swoje zadanie, polegające na przeprowadzeniu statku wzdłuż zadanej trasy przejścia, od punktu początkowego do punktu końcowego, wykonując po drodze różne operacje. W tym celu regulator hybrydowy stosuje kilka przełączalnych regulatorów składowych, wykorzystując informację zapisaną w trajektorii zadanej, obecnie otrzymywanej od operatora i zawierającej współrzędne punktów zwrotu, wzdłużnych prędkości zadanych u_z oraz trybów pracy na odcinkach zawartych pomiędzy kolejnymi punktami zwrotu.

LITERATURA

- Fossen, T.I., 2011, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, John Wiley & Sons, Ltd.
- Gierusz, W., 2001, *Simulation Model of the Shiphandling Training Boat Blue Lady*, Proceedings of the 5th IFAC Conference on Control Application in Marine Systems (CAMS), Glasgow, Scotland.
- Godhavn, J.M., Lauvdal, T., Egeland, O., 1996, *Hybrid Control in Sea Traffic Management Systems*, Alur, R., Henzinger, T., Sontag, D., (eds.) w: *Hybrid Systems III*, Springer, New York, s. 149–160.
- The Foundation for Safety of Navigation and Environment Protection, <http://www.ilawashiphandling.com.pl/>.
- Lisowski, J., 2013, *Sensitivity of Computer Support Game Algorithms of Safe Ship Control*, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, vol. 23, no. 2, s. 439–446.
- Tomera, M., 2010, *Discrete Kalman Filter Design for Multivariable ship motion control: Experimental Results with Training Ship*, Joint Proceedings of Gdynia Maritime Academy and Hochschule Bremerhaven, Bremerhaven, Germany, s. 26–34.
- Tomera, M., 2014, *Dynamic Positioning System for a Ship on Harbour Manoeuvring with Different observers. Experimental results*, Polish Maritime Research, vol. 21, no. 3(83), s. 13–24.
- Tomera, M., 2015, *A Multivariable Low Speed Controller for a Ship Autopilot with Experimental Results*, Proceedings of the 20th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Międzyzdroje, August, s. 17–22.