

Leszek Morawski

Akademia Morska w Gdyni

OPTYMALNY REGULATOR KURSU STATKU – BADANIA Z MODELEM FIZYCZNYM ZBIORNIKOWCA NA JEZIORZE

W artykule opisano optymalny układ sterowania kursem statku. W procesie optymalizacji regulatora zastosowano kryterium minimalnokwadratowe ważonej sumy kąta wychylenia steru i odchyłki kursowej. System sterowania opracowano w środowisku Matlab-Simulink, wykorzystując biblioteki RTW oraz xPC-target. System ten był testowany na fizycznym modelu statku pływającym po jeziorze. Artykuł przedstawia wyniki przeprowadzonych badań.

1. WSTĘP

Większość eksploatowanych autopilotów okrętowych nadal posiada regulatory, których charakterystyki są zbliżone do regulatorów PID. Na ogół w regulatorach kursu stała czasowa całkowania jest parametrem nieprzestrajanym. Przy stabilizacji kursu jej wartość określa się czasem, w którym statek poruszający się z określoną prędkością pokonuje drogę równą 6–8 długości kadłuba [4]. Jest to wartość wielokrotnie większa od stałej czasowej różniczkowania i znacząco większa od wartości stałych czasowych całkowania, jakie wynikają ze znanych zasad doboru nastaw opracowanych dla regulatorów przemysłowych. Działanie całkujące w regulatorze autopilota okrętowego zwiększa astatyzm układu sterowania względem zakłóceń. Mało wpływa na właściwości dynamiczne układu sterowania ponieważ przy małych wartościach uchybu kursu, w stanach ustalonych, sygnał uchybu kursu jest odłączany od członu całkującego, powodując, że wartość sygnału na wyjściu członu całkującego się nie zmienia, natomiast przy bardzo dużych wartościach uchybu (na przykład zmianach kursu) sygnał na wyjściu członu całkującego jest zerowany [4, 7]. Przy stabilizacji kursu statku nastawy regulatora powinny być dostrajane tak, aby minimalizowany był ekonomiczny wskaźnik jakości sterowania określony funkcjonałem w postaci całki z formy kwadratowej uchybu kursu i kąta wychylenia steru [1, 6]. Minimum tego funkcjonału zapewnia regulator typu PD.

2. OPTIMALIZACJA UKŁADU STABILIZACJI KURSU WEDŁUG KRYTERIUM ŚREDNIOKWADRATOWEGO

Przy stabilizacji kursu, małych wychyleniach steru oraz niewielkich odchyleniach kursu od kursu zadanego można przyjąć liniowy opis dynamiki statku Nomoto pierwszego rzędu [2, 7], który w zapisie współrzędnych stanu ma następującą postać:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) &= -\frac{V}{T_{os}L}x_2(t) + \frac{k_{os}V^2}{T_{os}L^2}\delta(t), \end{aligned} \quad (1)$$

przy czym:

x_1, x_2 – składowe wektora stanu oznaczające kurs statku ψ i jego prędkość kątową $r = \dot{\psi}$,

V – prędkość liniowa statku,

L – długość statku,

k_{os}, T_{os} – parametry stałe dynamiki statku.

Dla zadania optymalnej stabilizacji, przy nieskończonej długości horyzontu, sterowanie minimalizujące funkcjonal jakości sterowania:

$$J = \int_0^{t_f} (\Delta\psi(t)^2 + \lambda \cdot \delta(t)^2) dt \quad (2)$$

przyjmuje następującą postać:

$$\delta_z(t) = -S_s(x(t) - x_o(t)) = -s_1(x_1(t) - x_o(t)) - s_2x_2(t) = -k_p(\psi(t) - \psi_o(t)) - k_d\dot{\psi}(t), \quad (3)$$

w której macierz współczynników sprzężeń zwrotnych jest równa:

$$S_s = [s_1, s_2] = \frac{k_{os}V^2}{T_{os}L^2\lambda} \cdot K. \quad (4)$$

Współczynniki macierzy K wyznacza się z algebraicznego równania Riccatiego [3]:

$$-KA - A^TK - KBB^TK + I = 0, \quad (5)$$

w którym A i B są macierzami stanu i sterowania wynikającymi z równań (1).

Rozwiązując algebraiczne równanie Riccatiego (4), otrzymuje się wyrażenia:

$$\begin{aligned} k_{12} = k_{21} &= \frac{T_{os}}{k_{os}} \frac{L^2}{V^2} \sqrt{\lambda}, \\ k_{22} &= \frac{\lambda T_{os}}{k_{os}^2} \frac{L^3}{V^3} \left(-1 + \sqrt{1 + 2 \frac{k_{os}T_{os}}{\sqrt{\lambda}}} \right), \quad k_{11} = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

które po uwzględnieniu wzoru (4) prowadzą do następujących wyrażeń na wartości współczynników sprzężeń zwrotnych:

$$k_p = \frac{k_{12} k_{os} V^2}{\lambda T_{os} L^2} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}, \quad k_d = \frac{k_{22} k_{os} V^2}{\lambda T_{os} L^2} = \frac{L}{k_{os} U} \left(\sqrt{1 + \frac{2k_{os} T_{os}}{\sqrt{\lambda}}} - 1 \right). \quad (7)$$

Jak wynika ze wzorów, wielkość współczynnika wzmocnienia proporcjonalnego regulatora nie zależy od parametrów dynamiki statku. Zależności (7) mogą być wykorzystane do przestrajania wielkości wzmocnienia w torze różniczkującym regulatora, w układzie otwartym adaptacji, na podstawie pomiaru prędkości V , a także w zamkniętym układzie adaptacji na podstawie estymowanych wartości parametrów modelu k_{os} , T_{os} . Komentarz odnośnie do wyboru właściwej wartości współczynnika λ kryterium jakości sterowania (2) został zamieszczony w pracy [2].

Optymalizacja w układzie regulacji kursu ($\lambda_3 = 0$) przy kryterium jakości sterowania

$$J = \int_0^{t_k} \left(\Delta \psi(t)^2 + \lambda_1 \hat{\psi}(t)^2 + \lambda_3 y(t)^2 + \lambda_2 \delta(t)^2 \right) dt \quad (8)$$

liniowym modelu statku Nomoto i pominięciu dynamiki maszyny sterowej daje następujące wzory dla współczynników wzmocnień regulatora (7) [2, 6]:

$$k_p = \frac{1}{\sqrt{\lambda_2}}, \quad k_d = \frac{L}{k_{os} U} \left(\sqrt{1 + \frac{2k_{os} T_{os}}{\sqrt{\lambda_2}} + k_{os}^2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} - 1 \right). \quad (9)$$

Można zauważyć, że wzory (7) i (9) są takie same, jeśli przyjmie się wartość współczynnika wagi λ_1 w kryterium (8) równą zero.

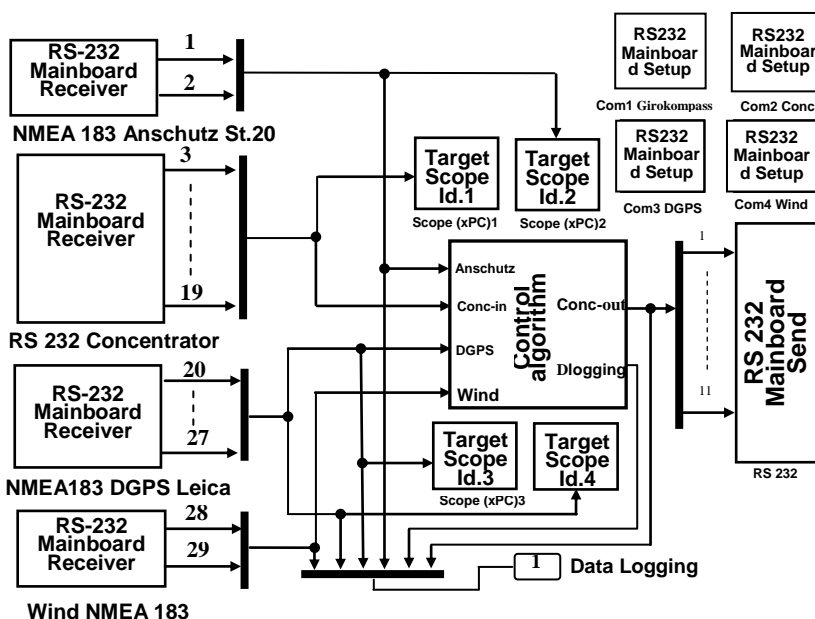
Częstotliwość drgań własnych ω_n oraz współczynnik tłumienia ξ układu zamkniętego regulacji przy wyznaczonych parametrach regulatorów (7) i (9) są określone wzorami:

$$\omega_n = k_p \left(\frac{V}{L} \right)^2 \frac{k_{os}}{T_{os}}, \quad \xi = \frac{k_d \frac{V}{L} k_{os} + 1}{2\sqrt{k_p k_{os} T_{os}}}. \quad (10)$$

Z wyprowadzonych zależności wynika, że dla typowych parametrów dynamiki statku oraz współczynników λ kryteriów (2) i (8) układ regulacji kursu charakteryzuje się dobrymi właściwościami dynamicznymi. Współczynnik tłumienia ξ nie wykracza poza przedział (0,6–1,5), natomiast częstotliwość odcięcia układu dla określonej prędkości statku jest odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka czwartego stopnia bezwymiarowego współczynnika wagi przy kącie wychylenia steru w kryteriach (2) i (8).

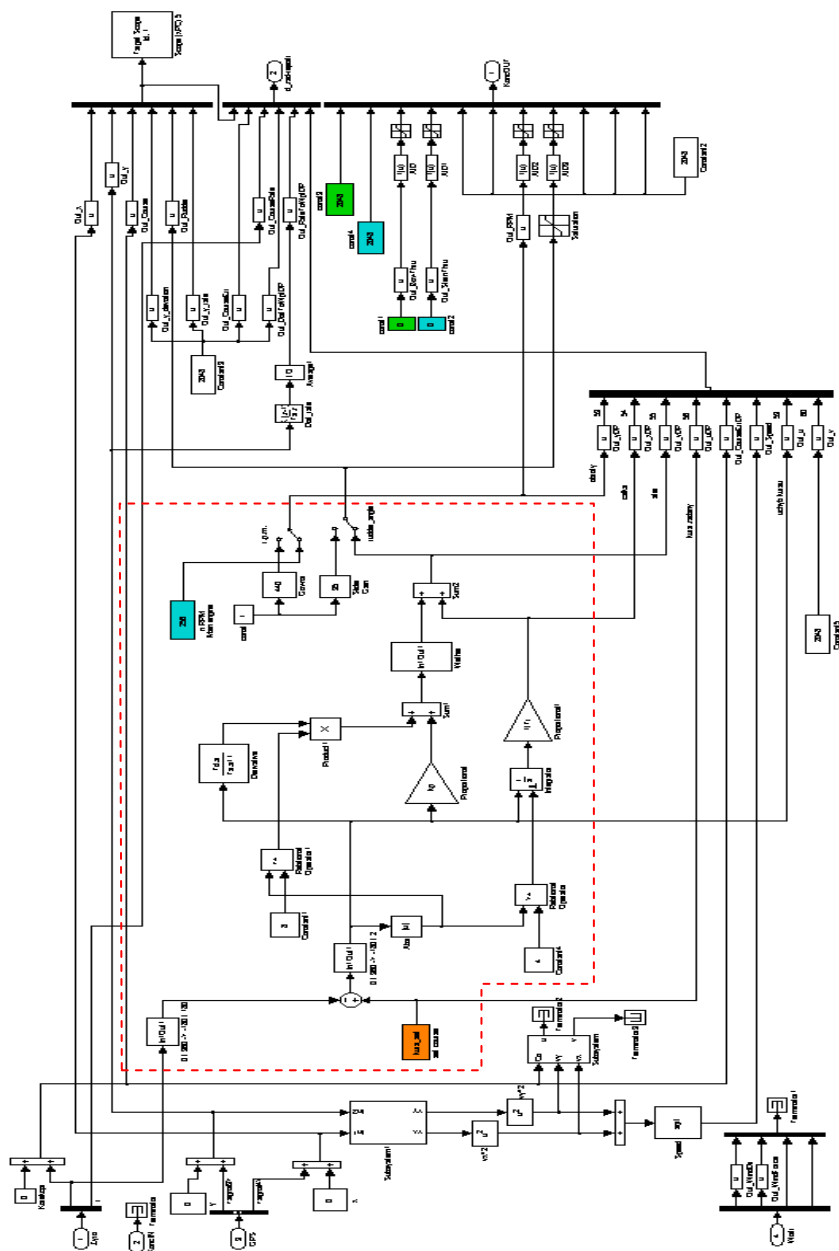
3. IMPLEMENTACJA MINIMALNOWARIANCYJNEGO REGULATORA KURSU – WYNIKI BADAŃ Z MODELEM ZBIORNIKOWCA NA J. SILM

Wyżej przedstawiony algorytm sterowania był testowany w warunkach rzeczywistych na jeziorze z wykorzystaniem modelu zbiornikowca „Blue Lady”, oprogramowania Matlab-Simulink i przybornika Real Time Workshop [8].



Rys. 1. Szkieletowy schemat aplikacyjny sterowania ruchem modelu zbiornikowca „Blue Lady”

Rysunek 2 przedstawia schemat aplikacyjny regulatora kursu, który został wpisany do głównego bloku sterowania w schemacie szkieletowym systemu sterowania pokazanym na rysunku 1. Na schemacie linią przerywaną zaznaczono zasadnicze bloki regulatora kursu. Pozostałe bloki na schemacie zostały wykorzystane do rejestracji wybranych parametrów ruchu modelu. W części liniowej regulatora sygnał pochodnej kursu modelu jest generowany przez rzeczywisty człon różniczkujący. Astatyzm układu sterowania względem zakłóceń uzyskano poprzez wprowadzenie członu całkującego. Właściwości regulatora poprawiono wprowadzając strefowe załączanie i wyłączanie członu całkującego oraz różniczkującego.



Rys. 2. Schemat aplikacyjny (Simulink) regulatora optymalnego z modyfikacjami załączania i odłączania działania różniczkującego i całkującego regulatora

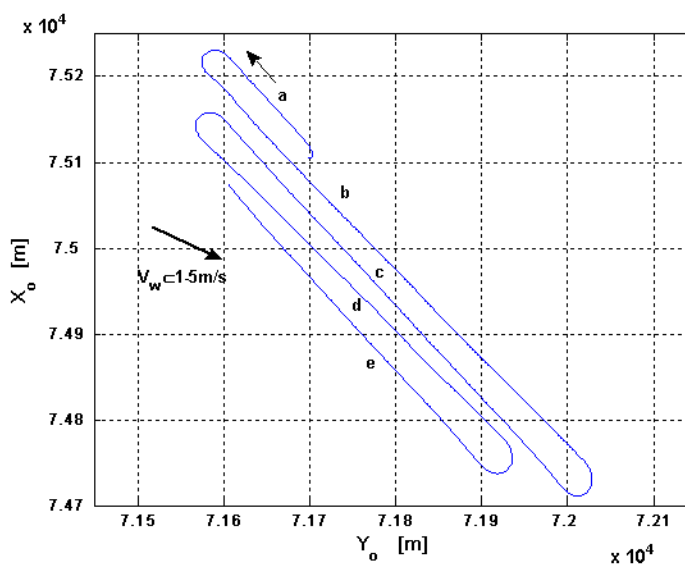
Skrócenie czasu regulacji kursu, przy dużych jego zmianach, uzyskano poprzez zerowanie i wyłączenie całkowania oraz wyłączenie różniczkowania, gdy uchyb kursu przekraczał odpowiednio wielkości progowe ψ_{cgr} i ψ_{dgr} . Ze względu na

niepowtarzalność poziomu zakłóceń nie przeprowadzono badań ilościowych jakości sterowania.

Badano wpływ zmian prędkości modelu na jakość regulacji, przy nastawach regulatora odpowiadającym wartościom współczynnika wzmocnienia modelu k_{os} przy prędkości CN i stałej czasowej T_{os} odpowiadającej prędkości modelu PN przy pełnym stanie załadunku [8]. Optymalne nastawy regulatora określono według zasady jego zwiększonej krzepkości ze względu na zakłócenia zewnętrzne, omówionej przez autora w następnym artykule niniejszych Zeszytów, zatytułowanym *Minimalnowariancyjny odporny regulator kursu PD autopilota okrętowego*.

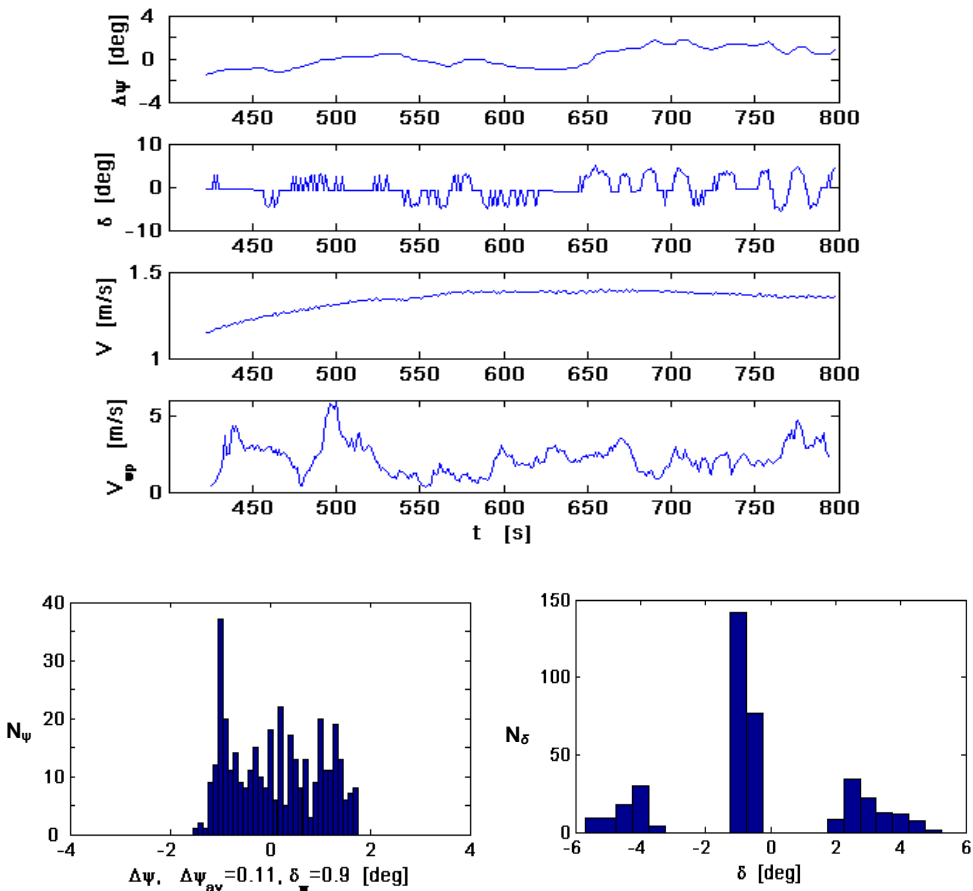


Rys. 3. Badania minimalnowariancyjnego regulatora kursu w warunkach zimowych



Rys. 4. Trajektorie modelu zbiornikowca „Blue Lady” zarejestrowane przy badaniach minimalnowariancyjnego regulatora kursu

Na rysunkach 4 do 8 przedstawiono przykłady zarejestrowanych wyników sterowania z modelem zbiornikowca „Blue Lady” (rys. 3). Badania przeprowadzono w warunkach zimowych, przy dużym zakresie zmienności prędkości wiatru od 1 do 5 m/s (dla skali modelu od około 5–25 m/s) i stosunkowo bardzo małej wysokości fali.



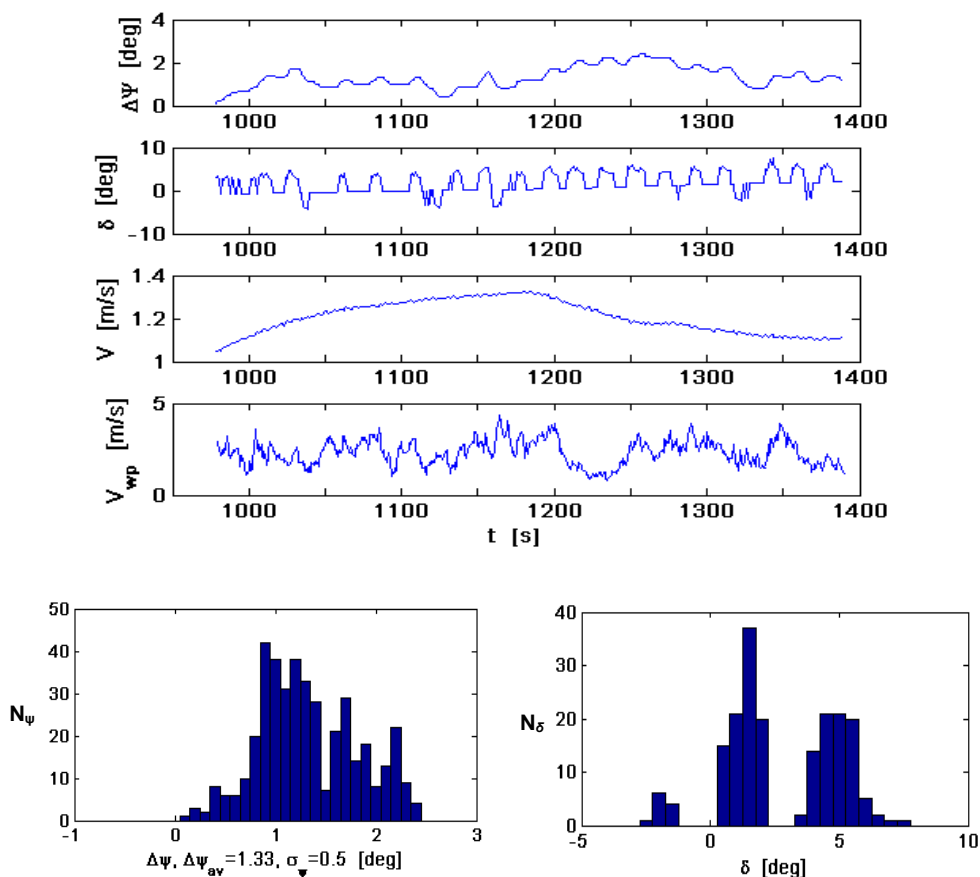
Rys. 5. Przebiegi kursu $\Delta\psi$, kąta wychylenia steru δ , prędkości liniowej V , prędkości wiatru pozornego V_{wp} modelu „Blue Lady” podczas stabilizacji kursu na odcinku trajektorii „b”, w układzie sterowania z regulatorem optymalnym kursu; histogramy uchybu kursu oraz kąta wychylenia steru

Długość prostoliniowych odcinków trajektorii (rys. 4), na których był stabilizowany kurs, nie przekraczała 650 m. Zmiany prędkości modelu były zmieniane w granicach PN-CN (0,98–1,36 m/s), przy stałych i niezmiennych nastawach regulatora. Ograniczenia akwenu i stałe czasowe obiektu sterowania nie pozwalały na uzyskanie stanów ustalonych w układzie sterowania. Model był zazwyczaj rozpędzany lub jego prędkość spadała, nie osiągając wartości ustalonych, ponieważ należało wykonać bezpieczny manewr zwrotu ze względu na

ograniczenia akwenu. Na rysunkach 5–7 pokazano przykładowe wyniki badań stabilizacji kursu na odcinkach prostoliniowych trajektorii, odpowiednio „b”, „c” i „d” z rysunku 4. Natomiast na rysunku 8 przedstawiono przebiegi podczas wykonywania manewru zwrotu z odcinka trajektorii „d” na „e”. Ponieważ był to manewr zmiany kursu o 180 stopni, wartość zadaną kursu zmieniano w dwóch krokach, wymuszając pożądaną bezpieczny kierunek zwrotu. Na rysunkach zaprezentowano histogramy uchybu kursu oraz kąta wychylenia steru odpowiadające przedstawionym przebiegom czasowym.

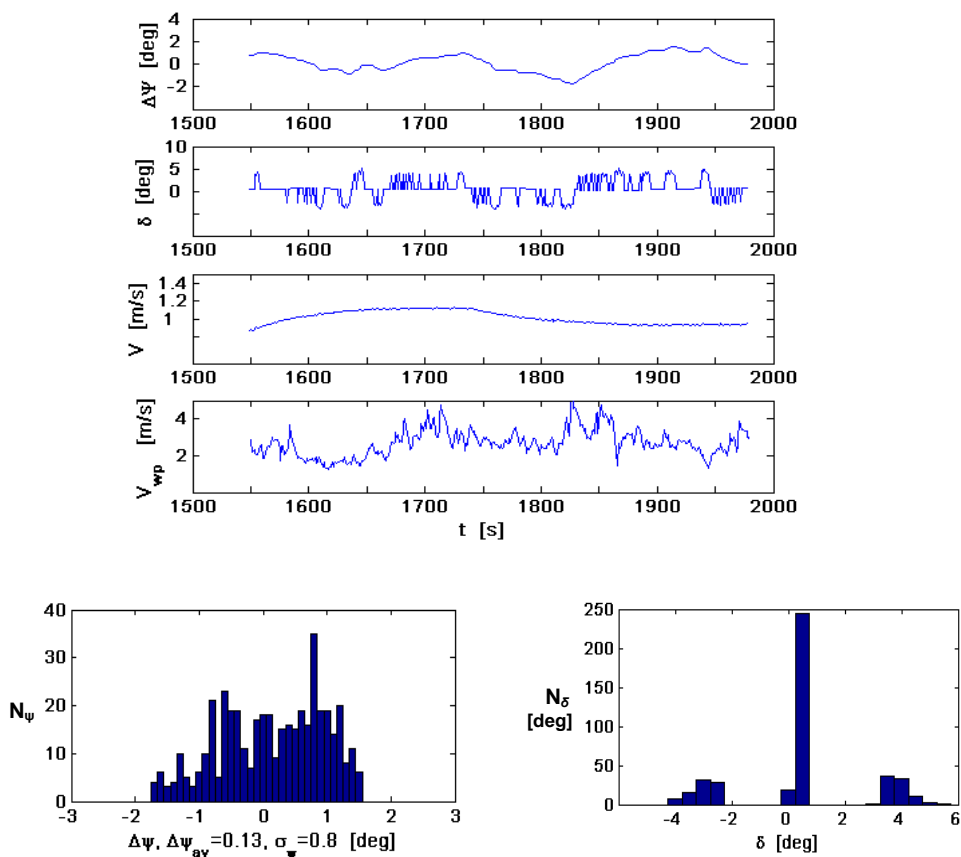
Oznaczenia na rysunkach:

- V – prędkość modelu,
- V_{wp} – rzeczywista prędkość wiatru (dla skali modelu około 5 razy większa),
- N_ψ, N_δ – liczba zarejestrowanych wartości odpowiednio uchybu kursu oraz kąta wychylenia steru zawartych w przedziałach wartości określonych przez szerokość słupków histogramów.



Rys. 6. Przebiegi kursu $\Delta\psi$, kąta wychylenia steru δ , prędkości liniowej V , prędkości wiatru pozornego V_{wp} modelu „Blue Lady” podczas stabilizacji kursu na odcinku trajektorii „c”, w układzie sterowania z regulatorem optymalnym kursu; histogramy uchybu kursu oraz kąta wychylenia steru

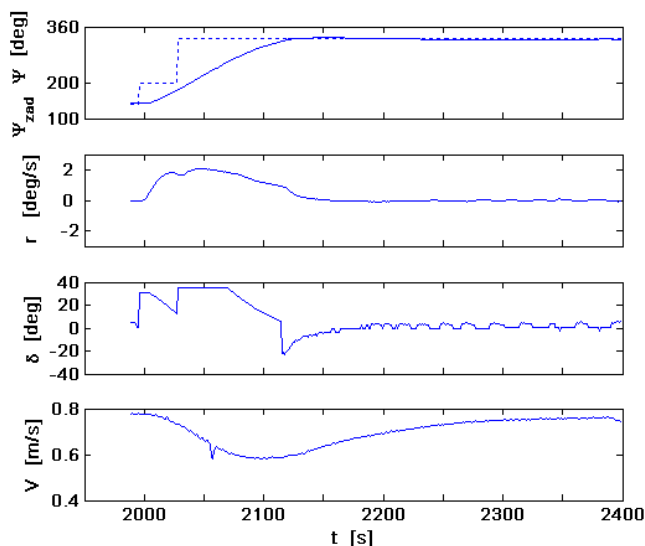
Spośród zarejestrowanych przebiegów zwraca uwagę przebieg kąta wychylenia steru, charakterystyczny dla statków niestatecznych na kursie. Jest on również określony przez zastosowaną strefę nieczułości w torze wzmocnienia proporcjonalnego oraz różniczkowania regulatora. Charakterystyki aerodynamiczne części nawodnej kadłuba oraz nadbudówki kabiny modelu powodują, że model zbiornikowca jest nawietrzny i ma tendencję do ustawiania się w kierunku prędkości wiatru. Jest to powodem istnienia większej wartości uchybu średniego kursu na odcinku trajektorii „c”, który nie został skompensowany przez działanie całkujące regulatora z powodu zbyt krótkiego odcinka tej trajektorii.



Rys. 7. Przebiegi kursu $\Delta\psi$, kąta wychylenia steru δ , prędkości liniowej V , prędkości wiatru pozornego V_{wp} modelu „Blue Lady” podczas stabilizacji kursu na odcinku trajektorii „d”, w układzie sterowania z regulatorem optymalnym kursu; histogramy uchybu kursu oraz kąta wychylenia steru

Badany układ sterowania optymalnym kursem modelu zbiornikowca z nastawami regulatora dostosowanymi według przedstawionych wyżej zasad jego mniejszej wrażliwości charakteryzuje się dobrymi właściwościami regulacyjnymi,

zarówno podczas stabilizacji kursu, jak i jego zmian. Duża wartość stałej czasowej różniczkowania zapewnia właściwości aperiodyczne układu sterowania, a wyłączenie różniczkowania podczas dużych zmian kursu zapewnia krótkie czasy regulacji. Wprowadzona modyfikacja w postaci strefy nieczułości regulatora w torze wzmocnienia proporcjonalnego oraz różniczkowania spowodowała, że przebiegi kąta wychylenia steru przypominają działanie regulatora minimalnego wydatku ze stałymi, w przybliżeniu, amplitudami wychylenia steru na obydwie burty. Wielkość strefy nieczułości, odpowiadająca nastawie „weather” lub „yawing” w autopilotach ma oczywisty wpływ na dokładność sterowania. Uzyskane wyniki sterowania podczas weryfikacji algorytmu sterowania na jeziorze są w pełni akceptowalne dla praktyki nawigacyjnej.



Rys. 8. Przebiegi kursu $\Delta\psi$, prędkości kątowej r , kąta wychylenia steru δ , prędkości liniowej V modelu „Blue Lady” podczas zmiany kursu z odcinka „d” na „e” trajektorii, w układzie sterowania z regulatorem optymalnym kursu, z nastawami regulatora zwiększającymi krzepkość układu regulacji

LITERATURA

1. Amerongen van J., *Adaptive steering of ships*, Ph.D. thesis, Delft University 1982.
2. Amerongen van J, Nauta Lemke van H.R., *Criteria for optimum steering of ships*, Symposium on Ship Steering Automatic Control, Genova, Italy, 25–27 June 1980.
3. Athans M., Falb P., *Sterowanie optymalne*, WNT, Warszawa 1969.
4. Brook K., *The design of a new automatic pilot for commercial ship*, Proc. of 4-th International Ship Operation Automation Symposium, Oslo 1973.

5. Lisowski J., *Statek jako obiekt sterowania automatycznego*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1981.
6. Morawski L., *Metody syntezy układów sterowania ruchem statku*, Prace Naukowe WSM, Gdynia 1994.
7. Morawski L., *Stabilization of a trajectory In system with a primary controller*, Joint Proceedings, Hochschule Bremerhaven, WSM, Gdynia 1987.
8. Morawski L. i inni, *Identyfikacja modeli dynamiki statku, algorytmy sterowania ruchem statku*, Raport z realizacji projektu badawczego KBN 8T11A01515, Wyższa Szkoła Morska, Gdynia 2000.

THE OPTIMAL CONTROLLER OF THE SHIP HEADING-EXPERIMENTS WITH PHYSICAL MODEL OF THE TANKER ON THE LAKE

Summary

In the paper the optimal control system of the ship heading is presented. The optimization of the controller was performed based on the criterion wherein the losses function is weighed sum of squares of the rudder angle and course deviation. The control system was worked out in Matlab-Simulink with RTW, xPC-target toolboxes and tested on a scaled physical model of a tanker in the real lake environment. The paper discuss the results of control system tests.