

Zygmunt Kitowski

Akademia Marynarki Wojennej

MODELOWANIE I SYMULACJA SYSTEMU STEROWANIA RUCHEM I POZYCJONOWANIA OKRĘTU

Streszczenie. W pracy przedstawiono model matematyczny okrętu jako obiektu sterowania ruchem po trajektorii i pozycjonowania okrętu, rozszerzony o modele matematyczne stochastycznych wymuszeń zewnętrznych działających na kadłub okrętu, tj.: falowania morskiego, wiatru i prądu. Przedstawiono również realizację techniczną omawianego systemu oraz zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych.

1. Wstęp

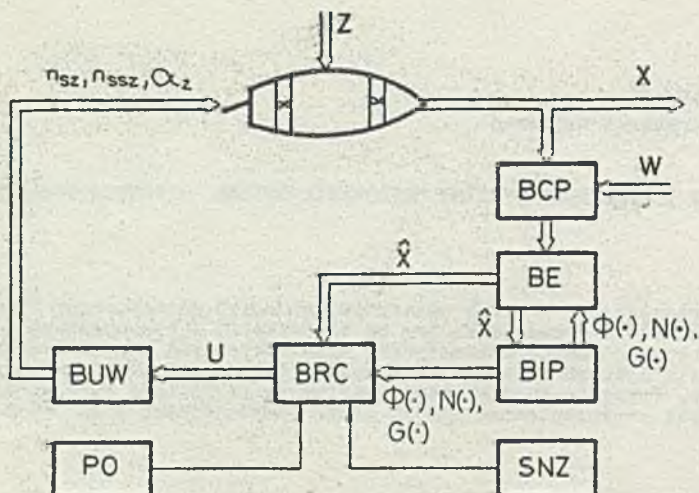
Symulacja systemu sterowania ruchem okrętu po zadanej trajektorii i pozycjonowania okrętu względem zadanego punktu na dnie morza uwzględnia także czynniki, jak:

- silne wymuszenia zewnętrzne działające na kadłub okrętu /falowanie, wiatr, prąd/,
- zmianę właściwości dynamicznych okrętu jako obiektu sterowania wynikającą ze zmiany prędkości, zanurzenia okrętu, głębokości wody pod stępką itp.,
- niepełną bieżącą informację o stanie obiektu, wynikającą z braku odpowiednich czujników pomiarowych, np.: czujnika odchylenia poprzecznego okrętu od trajektorii itp.

Prezentowany w pracy system sterowania procesem prowadzenia okrętu po zadanej trajektorii i pozycjonowania okrętu realizuje następujące funkcje:

- dokonuje filtracji rezultatów pomiaru zmiennych stanu okrętu w czasie jego ruchu,
- dokonuje identyfikacji obiektu sterowania, tj. wyznaczania wartości parametrów charakteryzujących dynamiczne właściwości okrętu,
- realizuje sterowanie adaptacyjne zmierzające do zmiany algorytmu sterowania zgodnie ze zmieniającymi się rzeczywistymi charakterystykami dynamicznymi obiektu i warunkami pływania.

Schemat blokowy systemu przedstawiono na rys.1, a jego model laboratoryjny na rys.2.



Rys. 1. Schemat blokowy systemu sterowania ruchem okrętu po trajektorii i pozycjonowania okrętu.

BCP - blok czujników pomiarowych, BE - blok identyfikacji parametrów dynamicznych, BRC - blok regulatorów cyfrowych, BUW - blok urządzeń wykonawczych, SNZ - system nawigacji zintegrowanej, PO - pulpit operatora, X - wektor stanu procesu, \hat{X} - estymata wektora stanu, U - wektor sygnałów sterujących, Z - wektor zakłóceń, W - wektor szumów pomiarowych, $\Phi(\cdot), G(\cdot), N(\cdot)$ - macierze stanu procesu, sterowań i wymuszeń zewnętrznych, n_{sz}, n_{ssz} - zadane obroty silnika głównego i silników sterów strumieniowych, α_z - zadany kąt wychylenia płetwy sterowej.

Fig. 1. Block diagram of along trajectory ship motion control and positioning system.

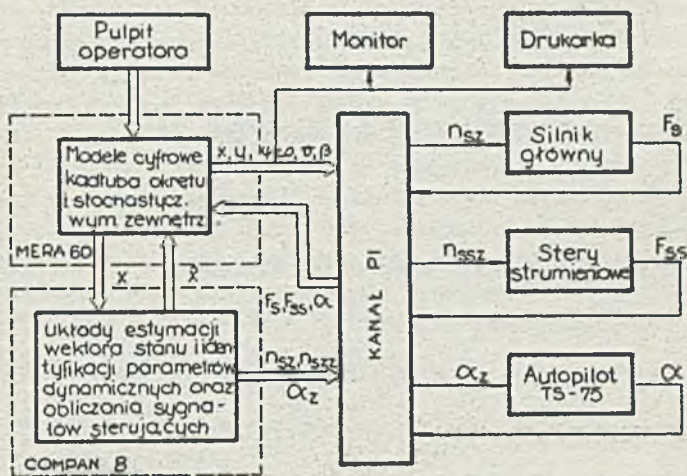
BCP - measuring sensors unit, BE - state vector estimation unit, BIP - dynamic parameter estimation unit, BRC - digital controllers unit, BUW - performance devices unit, SNZ - integrated navigation system, PO - operator desk, X - process state vector, \hat{X} - state vector estimate, U - input signal vector, Z - interference vector, W - measuring noise vector, $\Phi(\cdot), G(\cdot), N(\cdot)$ - matrices process state, input signals and external forces respectively, n_{sz}, n_{ssz} - main engine rotations and jet steer motor rotations respectively, α_z - given steer fin deflection angle.

2. Model matematyczny systemu sterowania ruchem okrętu po trajektorii i pozycjonowania okrętu

Zmienne stanu procesu sterowania ruchem okrętu w rozpatrywanym przypadku określone są przez:

- współrzędne położenia okrętu $p/x, y/$ z systemów wyznaczania pozycji okrętu /pozycja zliczona korygowana okresowo pozycją obserwowaną z systemów nawigacyjnych: LORAN, DECCA, OMEGA, TRANSIT itp./,

- kurs okrętu Ψ z żyrokompasu,
 - prędkość okrętu U i kąt dryfu β z dwuskładnikowego logu hydroakustycznego,
 - prędkość kątowna zwrotu ω z żyroskopowego urządzenia pomiarowego,
- np.: NAVITURN firmy Plath.



Rys.2. Schemat blokowy laboratoryjnego systemu sterowania ruchem po trajektorii i pozycjonowania okrętu.

Fig.2. Block diagram of laboratory ship motion control and positioning system.

Wielkościami sterującymi, wywołującymi zmianę stanu procesu są:

- siła naboru F_s śrub napędowych,
- siła naporów sterów strumieniowych F_{ss} ,
- kąt wychylenia steru płetwowego α .

Wielkościami zakłócającymi są:

- prędkość wiatru U_k ,
- kierunek wiatru δ_W ,
- prędkość prądu morskiego U_p ,
- kierunek prądu morskiego γ_T ,
- kąt nachylenia stycznej do fali α_b ,
- pochodna nachylenia stycznej do fali $\dot{\alpha}_b$.

Przyjmując za:

zmienne stanu	wielkości sterujące	wielkości zakłócające
$x_1 = x$	$u_1 = F_S$	$z_1 = \dot{U}_k$
$x_2 = y$	$u_2 = P_{SS}$	$z_2 = \dot{U}_N$
$x_3 = \dot{U}$	$u_3 = \alpha C$	$z_3 = \dot{U}_p$
$x_4 = \beta$		$z_4 = \dot{\gamma}$
$x_5 = \omega$		$z_5 = \alpha_b$
$x_6 = \psi$		$z_6 = \alpha_b$

Równania stanu procesu przyjmują następującą postać:

$$\dot{x}_1 = x_3 \cos(x_5 - x_4) ,$$

$$\dot{x}_2 = y_7 \sin(x_6 - x_4) ,$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 = & -(z_1 - z_2) x_3 x_5 \sin x_4 \cos x_4 - a_2 x_3^2 \cos x_4 - a_3 u_1 \cos x_4 - \\ & - a_7 x_4^2 \sin x_4 \sin 2x_4 \cos x_4 - a_8 x_3^2 \sin^3 x_4 - a_{11} x_3 x_5 \sin x_4 - a_{13} x_3^2 x_4 \sin x_4 \\ & - a_3 \cos x_4 u_1 + a_9 \sin x_4 u_2 + a_{10} x_3^2 \sin x_4 u_3 - a_4 z_1^2 \cos x_4 \cos(z_2 - x_6) + \\ & + a_5 z_3^2 \cos x_4 \cos(z_4 - x_6 - x_4) - a_{12} z_1^2 \sin x_4 \sin(z_2 - x_6) + a_{15} z_5 \sin x_4 + \\ & + a_{14} z_3^2 \sin x_4 \sin(z_4 - x_6 - x_4) , \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 = & a_1 x_5 \sin^2 x_4 + a_2 x_3 \sin x_4 + a_6 x_5 \cos^2 x_4 - a_7 x_3 \sin 2x_4 \cos^2 x_4 - a_8 x_3 \sin^2 x_4 \cos x_4 - \\ & - a_{11} x_5 \cos x_4 - a_{13} x_3 x_4 \cos x_4 + a_3 x_3^{-1} \sin x_4 u_1 + a_9 x_3^{-1} \cos x_4 u_2 + a_{10} x_3 \cos x_4 u_3 + \\ & + a_4 x_3^{-1} z_1^2 \sin x_4 \cos(z_2 - x_6) - a_5 x_3 z_3^2 \sin x_4 \cos(z_4 - x_6 - x_4) - a_{12} x_3^{-1} z_1^2 \cos x_4 \sin(z_2 - x_6) \\ & + a_{14} x_3^{-1} z_3^2 \cos x_4 \sin(z_4 - x_6 - x_4) + a_{15} x_3^{-1} z_5 \cos x_4 , \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_5 = & -b_1 x_3^2 \sin x_4 \cos x_4 - b_2 x_3^2 x_4 - b_3 x_3 x_5 - b_5 u_2 - b_4 x_3^2 u_3 + \\ & + b_6 z_1^2 \sin(z_2 - z_6) - b_8 z_3^2 \sin(z_4 - x_6 - x_4) - b_7 z_6 , \end{aligned}$$

$$\dot{x}_6 = x_5$$

Na zmienne stanu procesu i wielkości sterujące nałożone są ograniczenia

$$g \quad |x_1, x_2| < 0 \quad - \text{ograniczenia rejonu żeglugi}$$

$$0 < x_3 < U_{\max} \quad , \quad |x_4| < 90^\circ \quad , \quad |x_5| < \omega_{\max} \quad , \quad |x_6| < \Psi_{\text{dop}}$$

$$0 < u_1 < F_S^{\max} \quad , \quad |u_2| < P_{SS}^{\max} \quad , \quad |u_3| < \alpha_{\text{dop}}$$

Współczynniki $a_i/i=1, \dots, 15/$, $b_j/j=1, \dots, 8/$ równań stanu są funkcjami wymowności okrętu V , prędkości okrętu ψ , długości okrętu na wodnicy L , szerokości okrętu na owrężu B , współczynników hydrodynamicznych kadłuba, parametrów konstrukcyjnych urządzeń sterujących, wymuszeń zewnętrznych itp.

Analiza wpływu wymuszeń zewnętrznych działających na okręt przeprowadzona została w oparciu o ich modele stochastyczne. Tak np.: wpływ falowania uwzględniono poprzez realizację filtra formującego na wyjściu szum kolorowy o zadanej gęstości widmowej odpowiadającej zadanym warunkom pływania, będącej funkcją prędkości okrętu ψ , wysokości fali 3% zabezpieczenia ξ_{max} oraz kąta kursowego okrętu względem kierunku rozchodzenia się fali ψ_b . Budowa modelu opisana została w pracy [3]. Wykorzystywany w procesie symulacji model falowania morskiego ma postać n -wymiarowego procesu Markowa $Y/t/$. Wprowadzając oznaczenie $\alpha_b(t) = Y_1(t)$ - gdzie $Y_1(t), \dots, Y_n(t)$ są składowymi procesu, układ stochastycznych równań różniczkowych opisujących falowanie ma postać:

$$\frac{dY_1}{dt} = Y_2 + c_1 w(t),$$

$$\frac{dY_2}{dt} = Y_3 + c_2 w(t),$$

$$\frac{dY_3}{dt} = Y_4 + c_3 w(t),$$

$$\frac{dY_4}{dt} = Y_5 + c_4 w(t),$$

$$\frac{dY_5}{dt} = Y_6 + c_5 w(t),$$

$$\frac{dY_6}{dt} = -q_0 Y_1 - q_1 Y_2 - q_2 Y_3 - q_3 Y_4 - q_4 Y_5 - q_5 Y_6 + c_6 w(t)$$

gdzie współczynniki $c_i = f(\psi, \psi_b, \xi_{max})$ ($i=1, \dots, 6$) i $q_i = f(\psi, \psi_b, \xi_{max})$ ($i=0, \dots, 5$), a $w(t)$ są niezależnymi funkcjami przypadkowymi, mającymi właściwości szumu białego w wąskim sensie.

Analiza pracy systemu sterowania ruchem i pozycjonowania okrętu została oparta na dyskretnej postaci nieliniowego równania wektorowo-macierzowego

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t) \cdot U(t) + C(X, Z, t),$$

w którym macierze $A(t)$, $B(t)$ i wektor $C(X, Z, t)$ wyznaczone są w oparciu o równania stanu i równania opisujące stochastyczne wymuszenia zewnętrzne

Równanie dyskretne ma postać

$$X(k+1)T = \Phi(\bar{v}, H, T_z, T)X(kT) + G(\bar{v}, H, T_z, T)U(kT) + N(\bar{v}, H, T_z, T)C(kT)$$

gdzie:

H - głębokość wody pod stępką,

T_z - zanurzenie okrętu,

T - okres dyskretności,

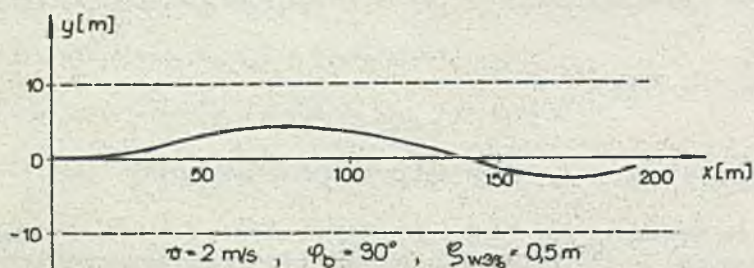
$$\Phi(\bar{v}, H, T_z, T) = I + A(\bar{v}, H, T_z)T + A^2(\bar{v}, H, T_z)\frac{T^2}{2!} + A^3(\bar{v}, H, T_z)\frac{T^3}{3!} + \dots$$

$$G(\bar{v}, H, T_z, T) = I \cdot B(\bar{v}, H, T_z)T + A(\bar{v}, H, T_z)B(\bar{v}, H, T_z)\frac{T^2}{2!} + A^2(\bar{v}, H, T_z)B(\bar{v}, H, T_z)\frac{T^3}{3!} + \dots$$

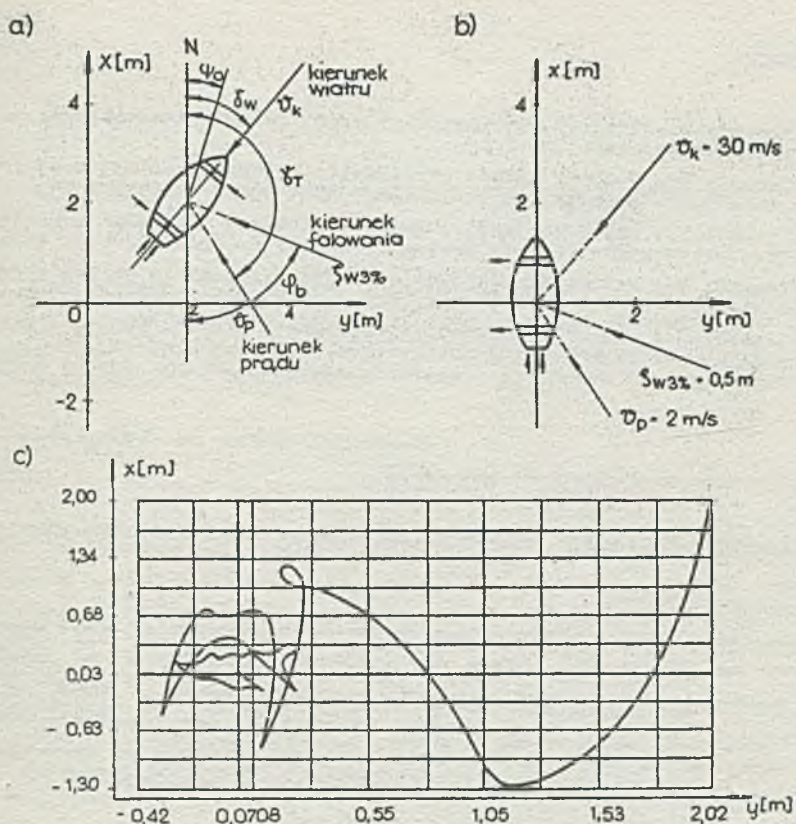
$$N(\bar{v}, H, T_z, T) = I \cdot T + A(\bar{v}, H, T_z)\frac{T^2}{2!} + A^2(\bar{v}, H, T_z)\frac{T^3}{3!} + A^3(\bar{v}, H, T_z)\frac{T^4}{4!} + \dots$$

3. Symulacja komputerowa systemu sterowania ruchem i pozycjonowania okrętu

Badania symulacyjne systemu sterowania ruchem po trajektorii i pozycjonowania okrętu zostały przeprowadzone dla okrętów różnego typu, płynących w różnorodnych warunkach hydrometeorologicznych. Przykłady symulacji procesu sterowania ruchem po trajektorii i pozycjonowania okrętu dla jednostki o długości $L = 36\text{m}$ i wyporności $V = 206\text{m}^3$ zostały przedstawione odpowiednio na rys.3 i rys.4.



Rys.3. Symulacja procesu sterowania ruchem okrętu po trajektorii
Fig.3. Ship motion along trajectory control process simulation.



Rys.4. Symulacja procesu pozycjonowania okrętu:
 a/ stan początkowy, b/ stan końcowy, c/ $x = f(y)$
 Fig.4. Ship positioning process simulation:
 a/ initial state, b/ end state, c/ $x = f(y)$

Programy algorytmów sterowania ruchem i pozycjonowania okrętu, modele okrętu i stochastycznych wymuszeń zewnętrznych oraz wyniki badań symulacyjnych opublikowane zostały w pracach [2] i [4].

LITERATURA

- [1] Kitowski Z.: Liniowy stochastyczny model falowania morskiego. Postępy Cybernetyki No 1 1985.
- [2] Kitowski Z.: Synteza układu utrzymania okrętu na zadanej trajektorii z dużą dokładnością. Zeszyty Naukowe WSMW No87A, Gdynia 1985.
- [3] Kitowski Z.: Przedstawienie procesów falowania morskiego w postaci wielowymiarowych procesów Markowa. Postępy Cybernetyki No2, 1986.
- [4] Kitowski Z.: Metoda projektowania systemu sterowania ruchem okrętu po zadanej trajektorii. Zeszyty Naukowe AMW No97A, Gdynia 1988.
- [5] Kitowski Z.: Układ dynamicznej stabilizacji pozycji oparty o wielokanałowy regulator stanu. Materiały II Krajowej Konferencji "Automatyzacja nawigacji i systemów sterowania". AMW, Gdynia 1989.

Recenzent: Prof.dr inż. H.Kowalowski

Wpłynęło do Redakcji do 1990-04-30.

MODELLING AND SIMULATION OF SHIP MOTION CONTROL AND POSITIONING SYSTEM

Summary

In this paper a mathematical model of a ship as a trajectory motion control and positioning object is presented. This model is complemented with mathematical models of stochastic external forces to which the hull is subjected, such as: sea waves, wind and sea currents. Technical implementation of the presented system and the results of investigation by means of simulation and laboratory examinations are also shown.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИСЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И УДЕРЖАНИЕМ
КОРАБЛЯ В ЗАДАНОЙ ТОЧКЕ

Резюме

В работе представлено математическую модель корабля как объекта управления по траектории и удержания в заданной точке относительно дна моря. Модель корабля дополнена математическими моделями внешних стохастических возмущений действующих на корпус корабля т.е. морского волнения, ветра и течений. Представлено также структуру системы и результаты лабораторных испытаний.