

Д.А. НАГОВСЬКИЙ, Г.Г. ДОЩЕНКО  
Херсонська державна морська академія

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СПОСТЕРІГАЧА ДЛЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ УТРИМАННЯМ ПОЛОЖЕННЯ СУДНА

*У статті розглядається синтез моделі спостерігача для системи керування положенням судна на основі використання комплексної моделі, що складається з двох складових: моделі системи керування позиціонування та моделі, що дозволяє реагувати цій системі на зовнішні подразники у вигляді певних погодних умов.*

*Моделі оцінки кількісних та якісних показників сучасних систем управління судном засновані на застосуванні узагальненої математичної моделі, яка може набувати різних форм залежно від впливу численних факторів на їх структуру та параметри.*

*Сучасні системи управління судном та судновими енергетичними установками є автоматизованими технічними комплексами високої складності, що призначені для ефективного виконання операцій, які визначаються призначенням та специфікою роботи судна в конкретних умовах.*

*Високоточні системи позиціонування створені на основі замкнутих систем управління з використанням PID та PID<sup>2</sup> регуляторів у системах підтримки тяги та положення судна.*

*Математична модель судна є складною системою нелінійних диференціальних рівнянь, інтегрування яких можливе лише чисельними методами з спрямованістю на результати, придатні для вирішення практичних завдань.*

*У цій статті авторами вирішується актуальне завдання використання спостерігача за зовнішніми факторами при позиціонуванні судна, завданням якого є подання коригувального сигналу до основної системи управління з урахуванням впливу на положення судна погодних умов. Одним із способів рішення запропоновано використовувати модель, що дозволяє використовувати поточні фактори збурення, що діють на судно, та генерувати коригування для системи позиціонування з урахуванням прогнозу щодо зміни значень цих факторів. У роботі представлені результати у вигляді графіків зміни відхилення позиції судна, що базуються на отриманій моделі спостерігача, синтез якої так само описаний у статті. Також у статті показані порівняльні результати з використанням спостерігача і без його використання.*

*Ключові слова:* судно, модель, керування, система управління, позиціонування, спостерігач, контролер.

D.A. NAHOVSKYI, H.G. DOSHCENKO  
Kherson State Maritime Academy

## MATHEMATICAL MODEL OF THE OBSERVER FOR THE VESSEL POSITION MAINTENANCE CONTROL SYSTEM

*The article considers the synthesis of the observer model for the ship position control system based on the use of a comprehensive model consisting of two components: the positioning control system model and the model that allows this system to respond to external stimuli in the form of certain weather conditions.*

*Models for estimating the quantitative and qualitative indicators of modern ship management systems are based on the use of a generalized mathematical model, which can take different forms depending on the influence of numerous factors on their structure and parameters.*

*Modern control systems for ships and ship power plants are automated technical complexes of high complexity, designed to effectively perform operations that are determined by the purpose and specifics of the ship in specific conditions.*

*High-precision positioning systems are based on closed control systems using PID and PID<sup>2</sup> controllers in traction and position support systems.*

*The mathematical model of the ship is a complex system of nonlinear differential equations, the integration of which is possible only by numerical methods with a focus on results suitable for solving practical problems.*

*In this article the author solves the urgent problem of using an observer of external factors in the positioning of the vessel, whose task is to provide a corrective signal to the main control system, taking into account the impact on weather conditions. One solution is to use a model that allows the use of current disturbance factors acting on the ship and to generate adjustments for the positioning system based on the forecast of changes these factor's values. The paper presents the results in the form of graphs of changes in the deviation of the position of the vessel, based on the obtained model of the observer; the synthesis of which is also described in the article. The article also shows comparative results with the use of the observer and without its use.*

*Keywords:* ship, model, control, control system, positioning, observer, controller.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Фільтрація та оцінка стану є важливими функціями для всіх видів систем керування. Вимірний сигнал дуже часто містить шум, який може негативно вплинути на продуктивність контролера, якщо не врахувати цього в системах динамічного позиціонування або при швартуванні [1 - 3]. Основними призначеннями оцінювачів стану (спостерігачів) у системах управління утриманням положення судна є:

– Відновлення невимірних даних. Для багатьох способів використання важливі стани процесів не вимірюються. Типовими причинами цього є відсутність зручних датчиків, або підвищена вартість їх застосування. У таких випадках можна застосувати складні методи фільтрації на основі моделі – оцінку стану. Основне призначення оцінювача стану полягає в тому, щоб відновити невимірні сигнали та виконати фільтрацію до того, як сигнали будуть використані в системі керування зі зворотним зв'язком.

– Розахунок на вихід системи керування з ладу. Будь-який вид обладнання виходить з ладу відповідно до певної частоти відмов. Досвід промислових застосувань показав, що одна з найчастіших поломок системи управління спричинена несправністю датчиків. У критичних для безпеки застосування на морі раптове відключення системи керування може призвести до небезпечних ситуацій, якщо не відбудеться адекватна заміна сигналу. Застосовуючи фільтри на основі моделі, сигнал може, принаймні на деякий період часу, замінити вимірюваний сигнал шляхом прогнозування моделі.

– Фільтрація хвиль. Рух морських суден можна розділити на низькочастотну (НЧ) складову та складову частоти хвиль (ХЧ). Для більшості застосувань позиціонування рух ХЧ не підлягає контролю. Причиною цього може бути те, що рух ХЧ не має значення для конкретної операції, або що судно не має достатньої потужності та потужності тяги, щоб взагалі здійснити помітну компенсацію. Останнє є найпоширенішою причиною. Тому доцільно використовувати фільтрацію для компенсації впливу ХЧ.

### Викладення основного матеріалу дослідження

З вищесказаного випливає, що доцільно розділити моделі морських суден на модель низькочастотну (НЧ) та модель хвильового впливу (ХЧ). Нелінійні рівняння НЧ руху обумовлені середнім значенням 2-го порядку і повільно змінними хвильовими, поточними та вітровими навантаженнями, а також силами двигуна. Рух судна ХЧ зумовлений хвильовими навантаженнями 1-го порядку [3]. Для проектування спостерігача та контролера на основі моделі достатньо вивести спрощену математичну модель, модель керуючого заводу, яка, тим не менш, досить детальна, щоб описати основні фізичні характеристики динамічної системи.

Низькочастотна модель описана в [3] та має вигляд:

$$M\dot{v} + C_{RB}(v)v + C_A(v_r)v_r + D(k, v_r) + G(\eta) = \tau_{env} + \tau_m + \tau_i + \tau_{thr}, \quad (1)$$

де  $M\dot{v}$  – узагальнені сили інерції;  $C_{RB}(v)v$  – узагальнені сили Коріоліса і доцентрові сили;  $D(k, v_r)$  – узагальнені сили загасання та поточні сили;  $G(\eta)$  – узагальнені відновлювальні сили;  $\tau_{env}$  – навантаження навколишнього середовища, які повільно змінюються, за винятком поточних навантажень, що діють на судно;  $\tau_m$  – навантаження при швартуванні;  $\tau_i$  – навантаження від рівня льоду;  $\tau_{thr}$  – узагальнені сили, створені пропульсивною системою.

Спростимо (1) і отримаємо нелінійну модель установки керування НЧ при помпажах, хитаннях і ризканнях щодо нульової швидкості судна:

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

$$M\dot{v} + D(v) + R^T(\psi)G(\eta) = \tau + R^T(\psi)b, \quad (3)$$

де  $v = [u, v, r]^T$ ,  $\eta = [x, y, \psi]^T$ ,  $b \in R^3$  – вектор зміщення, та  $\tau = [\tau_x, \tau_y, \tau_\psi]^T$  – керуючий вхідний вектор. При цьому модель системи управління є нелінійною через матрицю обертання:

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Для низько швидкісних варіантів матриці визначаються відповідно:

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{U}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{V}} & mx_G - Y_r \\ 0 & mx_G - N_{\dot{V}} & I_z - N_r \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & -N_r \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} -X_x & 0 & 0 \\ 0 & -Y_y & 0 \\ 0 & 0 & -N_{\psi} \end{bmatrix}.$$

Для моделі хвильового впливу використовуються синтетичні процеси, керовані білим шумом, що складаються з незв'язаних гармонійних коливань із загасанням. Модель запишеться у формі простору-стану:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_{\omega} &= \xi_{\omega} A_{\omega} + E_{\omega} w_{\omega}, \\ \eta_{\omega} &= C_{\omega} \xi_{\omega}, \end{aligned}$$

де  $\eta_{\omega} \in R^3$  – вектор вимірювання положення та орієнтації,  $w_{\omega} \in R^3$  – вектор білого шуму Гауса з нульовим середнім значенням,  $\xi_{\omega} \in R^6$ . Тобто, для відображення збурення хвиль достатньо лінійної моделі другого прядку. Тоді, системна матриця  $A_{\omega} \in R^{6 \times 6}$ , матриця збурень  $E_{\omega} \in R^{6 \times 3}$  і матриця вимірювань  $C_{\omega} \in R^{3 \times 6}$  запишуться:

$$A_{\omega} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ -\Omega^2 & -2\Lambda\Omega \end{bmatrix}, \tag{4}$$

$$C_{\omega} = [0_{3 \times 3} \quad I_{3 \times 3}], \quad E_{\omega} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ K_{\omega} \end{bmatrix}, \tag{5}$$

де  $\Omega = \text{diag}\{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$ ,  $\Lambda = \text{diag}\{\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3\}$ ,  $K_{\omega} = \text{diag}\{K_{\omega_1}, K_{\omega_2}, K_{\omega_3}\}$ . Ця модель відповідає:

$$\frac{\eta_{\omega_i}(s)}{\omega_{\omega_i}}(s) = \frac{K_{\omega_i} s}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2}. \tag{6}$$

З практичної точки зору, параметри ХЧ моделі є відносно повільно змінними величинами залежно від переважаючого стану моря. Як правило, періоди хвиль  $T_i$ , що відповідає частоті хвиль  $\omega_i = 2\pi / T_i$ , знаходяться в діапазоні від 5 до 20 секунд, а відносний коефіцієнт затухання  $\zeta_i$  – в діапазоні від 0,05 до 0,1. Тому, з деякою мірою, можна використовувати адаптивні схеми спостерігачів для різних морських умов, але при невеликих довжинах хвилі.

Для реалізації прогнозування, або упередження, можна використати модель першого порядку Маркова [4]:

$$\dot{b} = -T_b^{-1} b + E_b w_b,$$

де  $b \in R^3$ ,  $w_b$  – вектор білого шуму Гауса з нульовим середнім значенням,  $T_b \in R^{3 \times 3}$  – діагональна матриця постійних часу зміщення,  $E_b \in R^{3 \times 3}$  – діагональна матриця масштабування. Така модель зміщення враховує повільно змінювані сили та моменти через хвильове навантаження 2-го порядку, океанські течії та вітер. Крім того, модель зміщення також може бути представлена як випадкове блукання, тобто процес Вінера:

$$\dot{b} = E_b w_b.$$

Рівняння, яке відповідає за вимірювання необхідної тяги має вигляд:

$$y = \eta + \eta_{\omega} + v,$$

де  $v \in R^3$  – вектор білого шуму Гауса з нульовим середнім значенням.

В результаті, кінцева модель управління з урахуванням спостерігача, запишеться:

$$\dot{\xi}_{\omega} = \xi_{\omega} A_{\omega} + E_{\omega} w_{\omega},$$

$$\dot{\eta} = R(\psi)v,$$

$$\dot{b} = E_b w_b$$

(7)

$$M\dot{v} = -D(v) - R^T(\psi)G(\eta) + \tau + R^T(\psi)b,$$

$$y = \eta + C_{\omega}\xi + v$$

Для апробації моделі використовувався нелінійний PID-регулятор. Експериментальна установка наведена на рис. 1.

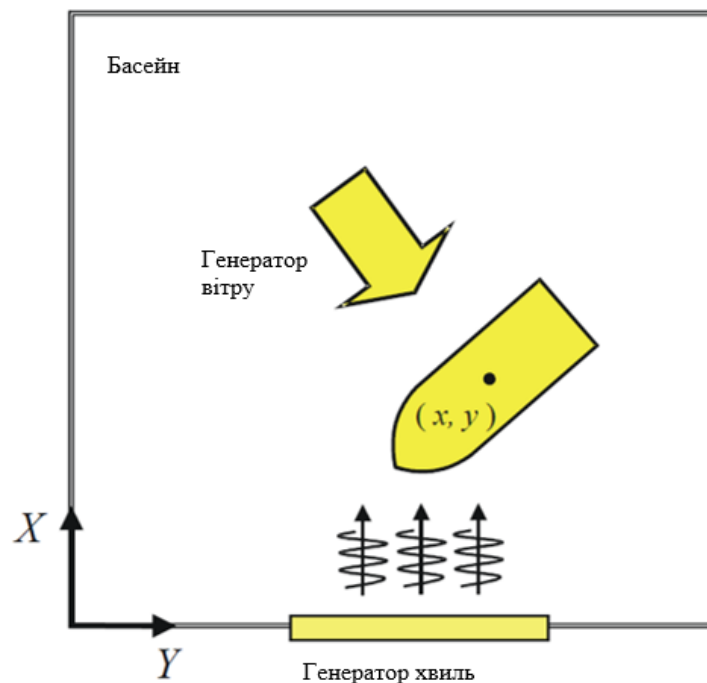


Рис. 1. Експериментальна установка: маса макету – 15 кг;  
Довжина макету – 1,2 м; період хвиль -7с.

Експеримент виконувався в три фази:

– Етап 1: без хвиль. Спочатку судно зберігає потрібне положення і курс без впливу навколишнього середовища на судно. Орієнтовний курс становить -140 градусів. При зборі даних включається генератор вітру. Спостерігач не працює.

– Етап 2: поява хвиль. Через 1650 секунд запускається генератор хвиль. На цій фазі ми можемо побачити роботу спостерігача з урахуванням компенсації вітру та без урахувань ХЧ.

– Етап 3: вітер, хвилі, спостерігач працює повністю після 2760 секунд.

На рис. 2 зображено виміряні відхилення положення та курсу, нанесені разом із відповідними прогнозами НЧ-частини моделі спостерігача.

Ефект використання НЧ+ХЧ моделі добре видно на рис. 3, відхилення значно зменшуються під час етапу 3.

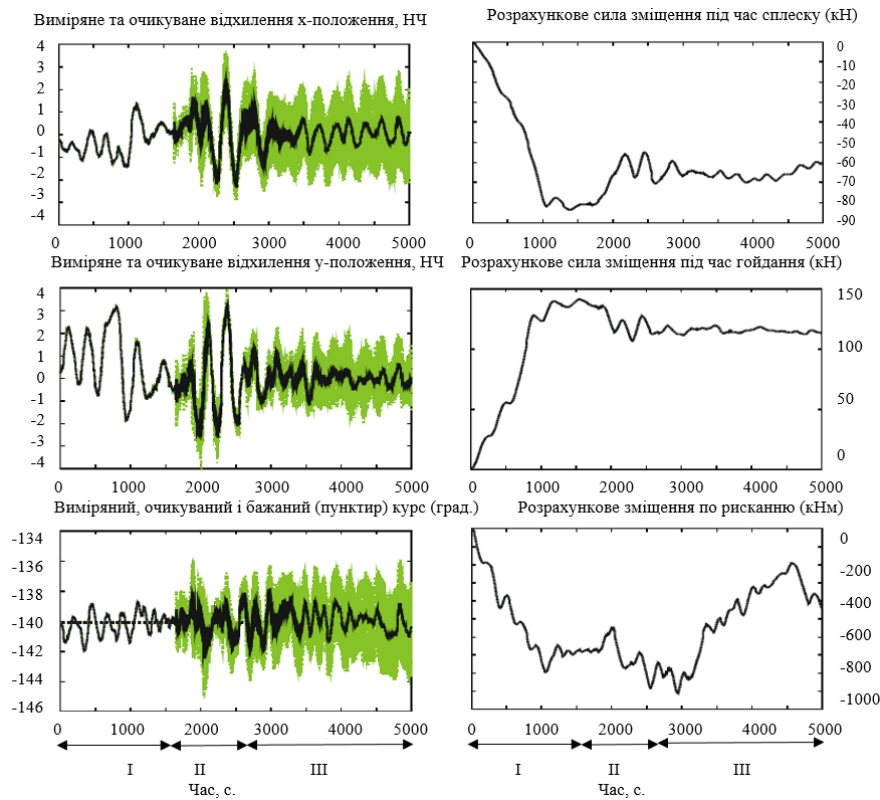


Рис. 2. Відхилення положення та курсу: вимірні, очікувані та бажані

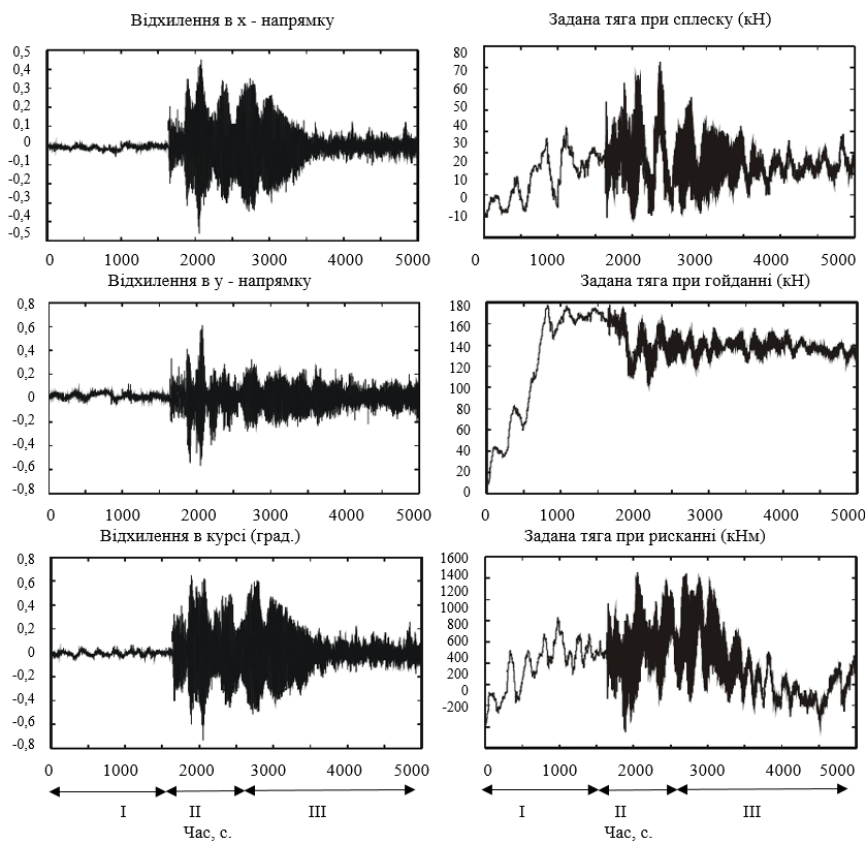


Рис. 3. Результати при використанні спостерігача з НЧ та ХЧ складовими

До того ж, збільшення частоти вимірювань показує прогресивне прогнозування НЧ при активізації ХЧ частини моделі спостерігача. Отже видно, що використання спостерігача в моделі впливу хвиль на судно значно підвищує результати статичної моделі керування при різних станах морської поверхні.

### Висновки

У результаті всебічного аналізу проблематики безпеки мореплавання при різних станах морської поверхні, можна зробити висновок, що використання спостерігача в моделі впливу хвиль на судно значно підвищує результати статичної моделі керування. Ефект сукупного використання при русі морських суден низькочастотної (НЧ) складової та складової частоти хвиль (ХЧ) в моделі добре видно, що відхилення значно зменшуються під час управління динамічним позиціонуванням рухомого об'єкту водного транспорту в гетерогенно збуреному локально обмеженому просторі акваторії техноприродного комплексу.

### Перелік використаних джерел

1. Fossen T. I. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Chichester, England: JohnWiley & Sons Ltd., 1994. 494p.
2. Fossen T. I. *Marine Control Systems, Guidance, Navigation, and Control of Ships*. Trondheim, Norway: *Marine Cybernetics*, 2002. 570p.
3. Strand J. P. *Nonlinear Position Control Systems Design for Marine Vessels*. Doctoral Dissertation, Trondheim, Norway: *Norwegian University of Science and Technology, Department of Engineering Cybernetics*, 1999. 193p.
4. Доценко Г.Г., Наговський Д.А. Автоматизована система управління змащуванням головного двигуна судна. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал*. Херсон: Херсонська державна морська академія. 2021. № 1 (24). С. 92-104.

### References

1. Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Chichester, England: JohnWiley & Sons Ltd. 494.
2. Fossen, T. I. (2002). *Marine Control Systems, Guidance, Navigation, and Control of Ships*. – Trondheim, Norway: *Marine Cybernetics*, 570.
3. Strand, J. P. (1999). *Nonlinear Position Control Systems Design for Marine Vessels*. Doctoral Dissertation, Trondheim, Norway: *Norwegian University of Science and Technology, Department of Engineering Cybernetics*. 193.
4. Doshchenko, H.H., & Nahovskyi, D.A. (2021). *Avtomatyzovana systema upravlinnia z mashchuvanniam holovnoho dvyhuna sudna*. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii : naukovyi zhurnal*. 1 (24). 92-104.

Наговський Дмитро Анатолійович – к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії. E-mail: [dymon.ksu@gmail.com](mailto:dymon.ksu@gmail.com), ORCID: 0000-0001-6920-0324.

Доценко Галина Геннадіївна – к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії. E-mail: [hersongala@gmail.com](mailto:hersongala@gmail.com), ORCID: 0000-0002-1004-4934.