УДК 681.5:629.12

ТИМЧЕНКО В.Л., *Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова*

Тимченко Віктор Леонідович – к.т.н., доцент кафедри комп'ютеризованих систем керування, національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. Коло наукових інтересів – Оптимальне управління багатовимірними динамічними системами; системи керування морськими рухомими об'єктами.

МОДЕЛЮВАННЯ ГАРАНТОБЕЗПЕЧНИХ ТРАЄКТОРІЙ РУХУ СУДНА В МОРСЬКИХ СУДНОПЛАВНИХ КАНАЛАХ

У статті розглядаються питання проектування автоматизованих людино-машинних систем керування судном в судноплавних каналах для забезпечення гарантобезпечних траєкторій руху. Запропонована імітаційна математична модель судна, системи керування та зовнішніх збурень та представлені результати моделювання.

In this paper present the principles of design of automatic human-machine control system for guarantee safety ship's trajectories in shipping navigation channels. Propose imitation mathematical model of ship, control system and external forces and showing results of modeling process.

Підвищення безпеки мореплавання є нагальною суспільною та економічною проблемою та потребує створення надійних та ефективних судових систем керування, особливо при проходженні судном достатньо вузьких та зі складною траєкторією морських каналів та проток. Так, наприклад, Дніпро-Бугзький морський судноплавний канал при ширині біля 100 метрів та довжині понад 40 морських миль має тринадцять „колін" складної конфігурації зі значними кутами поворотів. Задача керування судном при русі в каналі значно ускладнюється впливом людського фактору на процес прийняття рішень в екстремальних ситуаціях, які виникають при русі судна в складних метеорологічних умовах, та необхідністю виконання траєкторії руху з великим ступенем гарантованості безпеки. Сучасна світова практика мореплавання та наукові розробки в цій галузі підтверджують актуальність проблеми розробки високоефективних систем керування судном в каналах та протоках [2, 3].

Одним із перспективних шляхів підвищення ефективності автоматизованих систем керування рухом судна є створення людино-машинних систем підтримки прийняття рішень з метою розрахунку та забезпеченні безпечної траєкторії руху в умовах впливу на судно значних випадкових зовнішніх збурень [4,6].

Система підтримки прийняття рішень виконує наступні функції:

- оцінку безпечного стану судна;
- розрахунок безпечної траєкторії руху за допомогою імітаційної моделі, яка відображує динаміку судна та зовнішніх збурень;
- синтез оптимальних параметрів системи керування;
- керування рухом судна в реальному часі по безпечній траєкторії з можливістю корегування параметрів системи керування.

Важливою складовою системи підтримки прийняття рішень є імітаційна динамічна модель, за допомогою якої до підходу судна з боку моря до каналу визначається безпечна траєкторія руху з урахуванням прогнозу зовнішніх збурень та експертного висновку щодо інтегрованої категорії безпеки руху [6]. Імітаційна модель дозволяє провести оптимізацію параметрів системи керування судном та через людину-оператора передати інформацію для налагодження коефіцієнтів двоканального ПІД-регулятора безпосередньо на судно. У процесі руху судна каналом при зміні умов функціонування імітаційна динамічна модель використовується для корегування безпечної траєкторії руху та параметрів системи керування.

Імітаційна динамічна модель руху судна в горизонтальній площині відображається системою диференційних рівнянь, що приведені до безрозмірної форми з урахуванням допустимих спрощень [1,7]:

$$\frac{d\beta}{dt} + q_{11}\beta + r_{11}\bar{\omega} + s_{11}\alpha + h_1\beta|\beta| = b_1 f_\beta;$$

$$\frac{d\bar{\omega}}{dt} + q_{21}\beta + r_{21}\bar{\omega} + s_{21}\alpha = b_2 m_\omega;$$

$$\bar{\omega} = \frac{L}{v}\frac{d\psi}{dt};\ y = -\int_0^T v\beta dt,$$

де β – малий кут дрейфу; v, L – рекомендована поздовжня швидкість та довжина судна; α – керований кут повороту пера керма; y, ψ – поперечний зсув та курс судна; $\bar{\omega}$ – приведена кутова швидкість судна; f_β, m_ω – приведені хвиле-вітрові сили та моменти; q_{11}, q_{21}, r_{11}, r_{21}, s_{11}, s_{21}, h_1, b_1, b_2 – приведені гідродинамічні коефіцієнти судна.

Модель також включає блок формування випадкових хвильових збурень на основі формуючих фільтрів з застосуванням спектральних характеристик морського хвилювання та випадкового процесу у вигляді “білого шуму”.

Спектральна густина морського хвилювання $S(\omega)$ визначиться з формули

$$S(\omega) = \frac{2}{\pi} D_\xi \ln|\cos\delta_{\max}| \frac{\alpha_0(\omega^2 + \alpha_0^2 + \beta_0^2) - \beta \ln|\cos\delta_{\max}|(\omega^2 - \alpha_0^2 - \beta_0^2)}{\omega^4 - 2\omega^2(\alpha_0^2 - \beta_0^2) + (\alpha_0^2 + \beta_0^2)^2}.$$

де δ – кут нахилу схвильованої поверхні, що приймає значення від 0 до $\delta_{\max} = \frac{2\pi r}{\lambda}$;

r – висота хвилі; λ – довжина хвилі; α_0, β_0, D_ξ – відомі параметри спектру морського хвилювання для даної бальності.

Спектральну раціональну густину збурювальної сили, що безпосередньо діє на судно, отримаємо наступним чином

$$S_f(\omega) = f^2(w) S(\omega),$$

де $f(w)$ – амплітудне значення збурення, розраховане на характерній частоті хвилювання w, що визначається частотою максимуму спектру хвилювання або особистою частотою качки судна.

Формуючий фільтр описується системою рівнянь наступного виду:

$$\dot{W}_{11} = W_{12} + c_1 V;$$
$$\dot{W}_{12} = -b_0^2 W_{11} - 2\gamma_0 W_{12} + c_2 V,$$

де W_{11} – проекція збурення з боку нерегулярного морського хвилювання, яка діє на судно; b_0 , γ_0 – параметри, які отримані розкладом спектральної густини збурення $S_f(\omega)$ на відповідні поліноми[8]; c_1, c_2 – кінематичні коефіцієнти, які визначаються параметрами судна та спектральної густини $S_f(\omega)$; V – „білий шум".

Керування рухом судна по координатам поперечного зсуву та куту курсу судна є при русі судна по каналу пріоритетним та здійснюється двоканальним ПІД-регулятором, керуючим поворотом пера керма судна[5]:

$$\alpha = k_{1\psi}\Delta\psi + k_{2\psi}\frac{d\Delta\psi}{dt} + k_{3\psi}\int\Delta\psi dt + k_{1y}\Delta y + k_{2y}\frac{d\Delta y}{dt} + k_{3y}\int\Delta y dt,$$

де $k_{i\psi}$, k_{iy} – настроюванні коефіцієнти ПІД-регулятора; $\Delta\psi$, Δy – відхилення кута курсу та поперечного зсуву від допустимих значень.

Для оцінки керованості отримана квазілінеаризована математична модель судна при здійсненні маневру в каналі в умовах відсутності зовнішніх сил:

$$\frac{d\beta}{dt} + q_1(t)\beta + r_1(t)\bar{\omega} + S_1(t)\alpha = 0;$$
$$\frac{d\bar{\omega}}{dt} + q_2(t)\beta + r_2(t)\bar{\omega} + S_2(t)\alpha = 0,$$

чи в векторно-матричній формі, з урахуванням відповідних позначень:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{U}(t).$$

Для даної нестаціонарної системи визначений критерій керованості буде

$$\text{rank}\,[\,\mathbf{B} \quad \dot{\mathbf{B}} + \mathbf{AB}\,] = 2,$$

чи в скалярному вигляді:

$$S_1(t)[\dot{S}_2(t) - q_2(t)S_1(t) - r_2(t)S_2(t)] \neq S_2(t)[\dot{S}_1(t) - q_1(t)S_1(t) - r_1(t)S_2(t)].$$

Для випадку, коли нелінійну систему можна лінеаризувати з достатньою точністю лінійною моделлю з постійними коефіцієнтами критерій керованості має вигляд:

$$S_1^2 q_2 + S_1 S_2 r_2 \neq S_2 S_1 q_1 + S_2^2 r_1 .$$

Отриманий критерій дозволяє визначити допустиму область зміни параметрів судна, при яких рух судна буде повністю керованим.

На рис. 1-4. зображені результати імітаційного моделювання руху судна по каналу та стабілізації (рис. 5.) при відхиленні від заданої траєкторії на прикладі руху судна дедвейтом 5000 т в акваторії Дніпро-Бугзького морського каналу. Моделювання демонструє ефективність запропонованого підходу к проектуванню автоматизованих систем керування судном, що в цілому дозволяє підвищити з достатньою ступеню гарантованості безпеку мореплавання та ефективність використання судноплавних каналів.

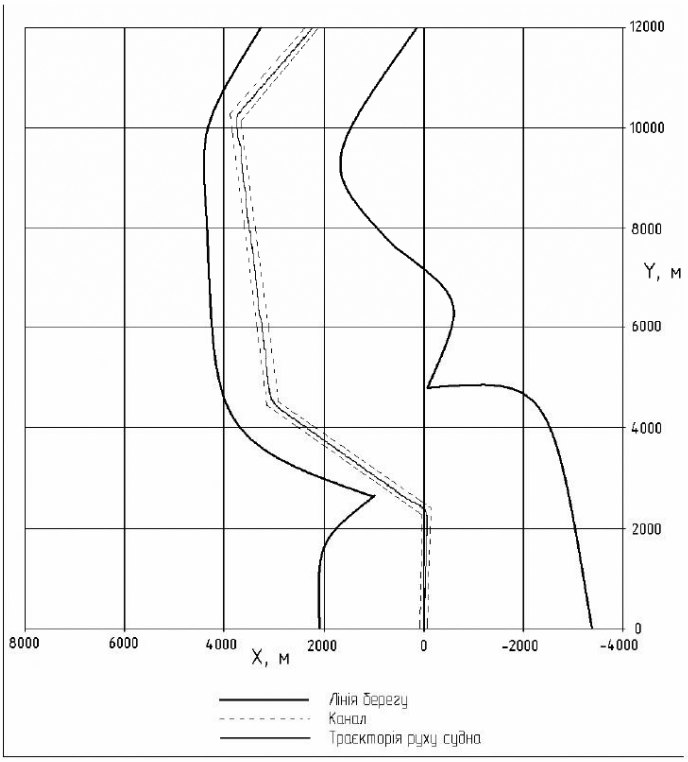

Рис.1. Моделювання руху судна на ділянці Дніпро-Бугзького морського каналу.

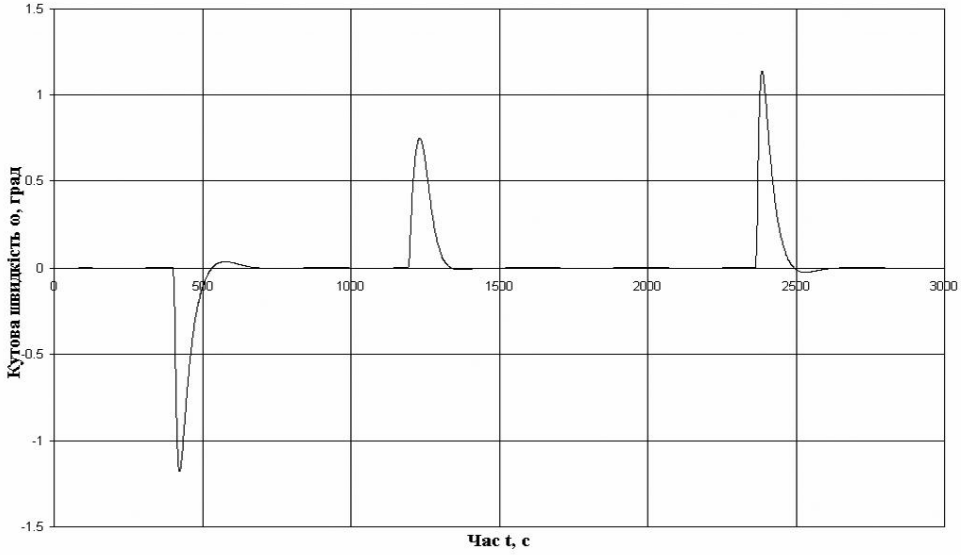

Рис. 2. Зміна кутової швидкості при русі судна по каналу.

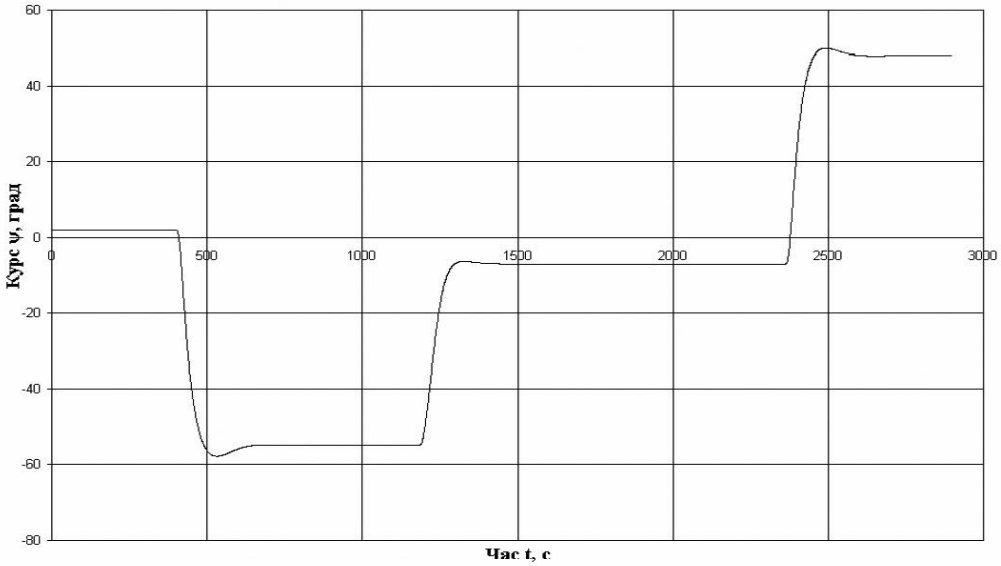

Рис. 3. Зміна кута курсу при русі судна по каналу.

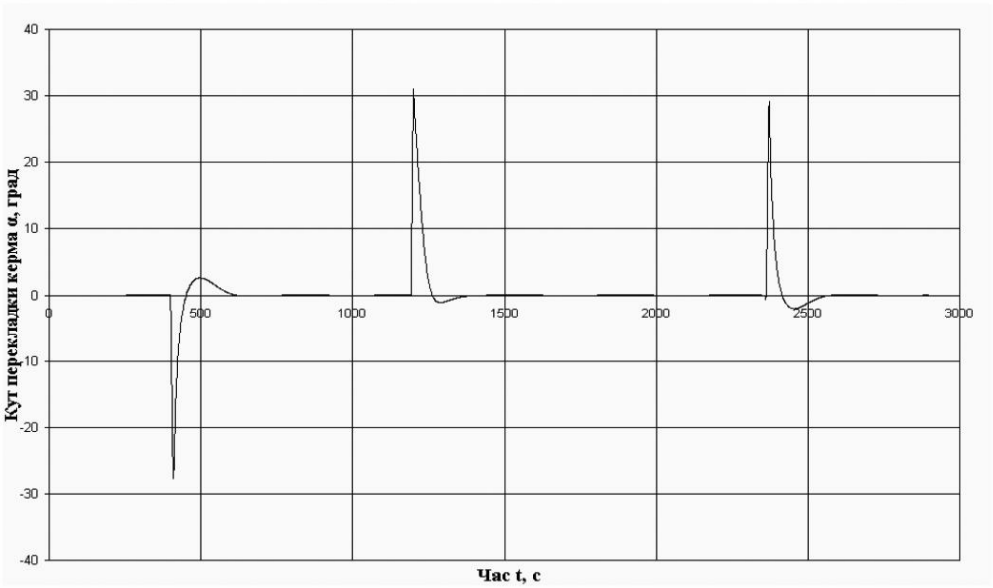

Рис. 4. Зміна кута перекладки керма при русі судна по каналу.

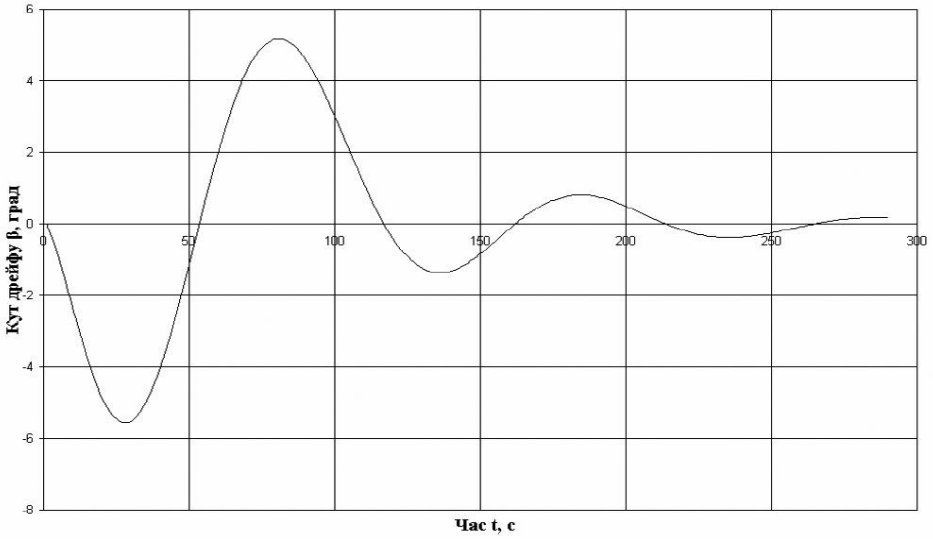

Рис. 5. Стабілізація кута дрейфу судна при здійсненні маневру.

Література

1. Першиц Р.Я. Управляемость и управление судном. – Л.: Судостроение, 1983. – 272 с.
2. Hasegawa K. Some recent developments of next generation's marine traffic systems // IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems. – 2004, Ancona, Italy, P. 13-18.
3. Holzhuter T. A high precision track controller for ships // 11th IFAC World Congress, 1990, Tallinn, Estonia, Vol.8, P.118-124.
4. T.Tran, C. Harris, P. Wilson A vessel management expert system // Journal of Engin. for the Maritime Enviroment – 2002, Vol 216 M2, London, UK, P. 161-179.
5. Кондратенко Ю.П., Тимченко В.Л. Система управления безопасным движением судна в морских судоходных каналах // Материалы Межд. научно-техническая конференция "Гидротехнологии, навигация и управление движением", Киев, 2005. – С. 299-301.
6. Кондратенко Ю.П., Тимченко В.Л.Система поддержки принятия решений при управлении безопасным движением судна в судоходных каналах // Збірник наукових праць "Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів", Миколаїв, 2005, Ч.1. – С. 65-69.
7. Лукомский Ю.А., Чугунов В.С. Системы управления морскими подвижными объектами. – Л.: Судостроение, 1988. – 272 с.
8. Тимченко В.Л. Стохастическая модель поперечно-горизонтальных колебаний двух пришвартованных судов в открытом море // Збірник наукових праць УДМТУ №1(349), Миколаїв, 1998. – С.29-34.