

СТАБІЛІЗАЦІЯ КУРСУ МАЛОРОЗМІРНОГО БЕЗЕКІПАЖНОГО СУДНА З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Ганна Грудініна

кандидатка технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів,

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, просп. Героїв України, 9, Миколаїв, Україна, 54007, hanna.hrudinina@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-8298-9251

Андрій Бурунін

аспірант,

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, просп. Героїв України, 9, Миколаїв, Україна, 54007, splashbox98@gmail.com

ORCID: 0009-0005-1017-9766

За результатами дослідження отримано структуру нейромережного регулятора для стабілізації курсу малорозмірного судна, який забезпечує мінімальну кількість перекладок керма з одночасним збереженням прийнятної помилки стабілізації на курсі в умовах дії на судно вітрохвильових збурень. Штучна нейронна мережа генерує сигнал про необхідний кут перекладки керма за пропорційно-диференціальним законом керування. До складу регулятора входить обчислювач оптимального кута перекладки керма, який визначає напрямок і тривалість сигналу повороту керма. Для формування бази даних, необхідної для налаштування ПД-регулятора, застосовано метод математичного моделювання динаміки малорозмірного катеру в умовах зовнішнього впливу. Для цього розроблено сценарії моделювання динаміки руху судна з різними комбінаціями вітрохвильового впливу, за якими проведено серію комп'ютерних експериментів. За допомогою програмного пакета середовища Matlab отримано структуру нейромережного регулятора стабілізації курсу малорозмірного судна з типом мережі Feed-forward backpropagation з двома прихованими шарами, у якій використано нейрони з функцією активації у вигляді тангенціальної сигмоїди та лінійної функції активації. Аналіз роботи синтезованого регулятора, оптимізованого за кількістю перекладок керма, проведено в системі Simulink Matlab. При цьому якість керування оцінювалася за кількістю перекладок керма за хвилину моделювання, за максимальним відхиленням від курсу, за математичним очікуванням і за дисперсією. Комп'ютерне моделювання показало, що синтезований регулятор є працездатним, ефективно реагує на відхилення судна від заданого курсу з урахуванням заздалегідь заданого коефіцієнта чутливості, який відповідає заданому режиму руху та зовнішнім вітрохвильовим збуренням, що діють на судно. Розроблений регулятор є частиною системи автоматичного керування рухом малорозмірного безекіпажного судна з інтегрованою навігаційною системою, яка надає точну інформацію про поточні значення курсу і швидкості судна, а також має планувальник завдання, що визначає режим руху.

Ключові слова: безекіпажне судно, автоматичне керування, стабілізація курсу судна, штучна нейронна мережа, перекладка керма.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ. Штучні нейронні мережі (ШНМ) активно застосовуються в системах керування суднами, катерами та морській робототехніці, сприяючи підвищенню автоматизації, безпеки й ефективності морських операцій. Актуальність питання застосування ШНМ під час керування морськими рухомими об'єктами широко розкрита авторами роботи [1], у якій проведено критичний аналіз і систематизацію наявних досліджень у галузі застосування штучного інтелекту, включно з глибоким навчанням, для управління морськими судами.

З метою запобігання зіткненням і побудови точної траєкторії руху авторами [2] запропоновано використання штучного інтелекту з контролерами руху для розпізнавання образів.

Достатньо багато уваги приділяється питанню непередбаченого зовнішнього впливу на динаміку судна. Розробляються моделі глибокої нейронної мережі для оцінки стану моря [3, 4]. Основою моделі є щільно пов'язані згорткові нейронні мережі та поєднання глибоких нейронних мереж і інтервальних нечітких логічних моделей

Штучні нейронні мережі активно досліджуються для вдосконалення систем автоматичного

керування судном. Розробляються контролери на основі ШНМ для автоматичного швартування суден, що спрямовані на підвищення безпеки й ефективності маневрів під час заходу в порт і причалювання [5]. Дослідження зосереджені на адаптивних нейромережових контролерах для автоматичного швартування, які здатні підлаштовуватися до змін умов навколишнього середовища та динаміки судна [6].

У роботі [7] пропонується використання нейромережової системи для управління курсом і позиціонуванням суден, що вирішує проблеми нелінійних багатовхідних систем із змінними умовами роботи.

Наявність зовнішніх впливів (вітер, хвилі), а також зниження маневрових характеристик на низьких швидкостях судна ускладнюють процедуру швартування. У дослідженнях [8, 9], запропоновано нову концепцію навчання ШНМ за допомогою методу нелінійного програмування.

У роботі [10] запропоновано метод відстеження траєкторії безпілотного вітрильного судна, заснований на моделі прогнозованого керування (MPC), для спільної роботи безпілотних вітрильних човнів у надводних / підводних сценаріях різнорідної морської робототехніки.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ. За результатами аналізу літератури видно, що питання зовнішнього впливу на керованість судна залишається досить актуальним і на сьогодні. Очевидно, що вагомість цього впливу (вітер, хвилювання, течії) значною мірою залежить від класу судна. Для малорозмірних безекіпажних суден компенсація зовнішніх збурень має особливе значення через їхню підвищену чутливість до таких збурень і підвищені вимоги до надійності функціонування кермового пристрою.

Багато дослідників сходяться на тому, що відхилення судна від заданого курсу внаслідок зовнішнього впливу можна дослідити й закласти в ПП– чи ПІД–регулятор у вигляді прогнозованої моделі. Цей підхід є правильним, оскільки спрощує роботу (структуру) самого регулятора й підвищує його ефективність. Однак робота такого регулятора призводить до швидкого зношування виконавчого механізму кермового пристрою, оскільки останній в умовах дії зовнішніх збурень постійно працює в режимі переключення керма, намагаючись утримати малорозмірне судно на заданому курсі з мінімальною помилкою. Тому завдання функціонування кермового пристрою з мінімальною кількістю переключень керма з одночасним збере-

женням прийнятної помилки стабілізації на курсі потребує вдосконалення системи автоматичного керування малорозмірного судна.

Для вирішення завдання обмеження кількості переключень керма, що виконує регулятор для утримання судна на заданому курсі, пропонується застосування у структурі автокермового пристрою малорозмірного безекіпажного судна штучної нейронної мережі.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ РОБОТИ. Метою роботи є розробка нейромережового регулятора для стабілізації курсу малорозмірного судна, який забезпечує мінімальну кількість переключень керма з одночасним збереженням прийнятної помилки стабілізації на курсі в умовах дії на судно вітрохвильових збурень.

У дослідженні вирішено такі завдання:

- розробка структури регулятора, що містить штучну нейронну мережу й обчислювач оптимального кута переключення керма для визначення кута переключення керма залежно від режиму руху, який задається системою керування вищого порядку;
- формування бази даних для навчання штучної нейронної мережі на основі аналізу даних, отриманих шляхом попереднього математичного моделювання динаміки судна в умовах дії зовнішніх збурень;
- перевірка працездатності роботи регулятора методом комп'ютерного експерименту.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Математична модель об'єкту керування. Об'єктом керування є швидкісний катер водотоннажністю 15 т, що має два двигуни потужністю по 800 кВт, довжиною 15 м і шириною 3,7 м. Для математичного опису стану об'єкта керування використовуються фазові координати. До них належать вектори шляху, лінійні та кутові швидкості – загалом дев'ять скалярних величин. Сталі внутрішні параметри визначають конструктивні особливості судна, змінні – характеризують елементи керування, зокрема положення рулів, а також моменти і сили, що діють на гвинти.

Зовнішні параметри відображають вплив навколишнього середовища, зокрема течії, качки та вітру. Для їх опису використовують фізичні закони, що дають змогу сформулювати систему диференціальних рівнянь, яка пов'язує фазові координати з внутрішніми та зовнішніми факторами впливу.

До цих рівнянь слід додати початкові умови, які визначають стан фазових координат судна в початковий момент часу.

Для складання рівнянь використовується принцип Даламбера, згідно з яким сума всіх сил і моментів, що діють на судно з урахуванням інерції, дорівнює нулю.

Позначимо вектор кількості руху системи корпус – рідина через Q , а момент кількості руху цієї системи – через K , тоді в рухомій системі координат векторне рівняння руху судна має такий вигляд [11]:

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} + \omega \times Q &= N, \\ \frac{dK}{dt} + \omega \times K + v \times Q &= M. \end{aligned} \quad (1)$$

Компоненти векторів Q , K можна виразити через кінетичну енергію E системи корпус – рідина:

$$\begin{aligned} Q_x &= \frac{\partial E}{\partial v_x}, Q_y = \frac{\partial E}{\partial v_y}, Q_z = \frac{\partial E}{\partial v_z}, \\ K_x &= \frac{\partial E}{\partial \omega_x}, K_y = \frac{\partial E}{\partial \omega_y}, K_z = \frac{\partial E}{\partial \omega_z}. \end{aligned} \quad (2)$$

Система диференціальних рівнянь відносно горизонтальних переміщень v_x, v_y і кутової швидкості рихання ω_z , записуються таким чином:

$$\begin{cases} (m + \lambda_{11}) \frac{dv_x}{dt} - (m + \lambda_{22}) v_y \omega_z - \lambda_{26} \omega_z^2 = N_x, \\ (m + \lambda_{22}) \frac{dv_y}{dt} + \lambda_{26} \frac{d\omega_z}{dt} + (m + \lambda_{11}) v_x \omega_z = N_y, \\ (J_z + \lambda_{66}) \frac{d\omega_z}{dt} + \lambda_{26} \frac{dv_y}{dt} + (\lambda_{22} - \lambda_{11}) v_x v_y + \lambda_{26} v_x \omega_z = M_z \end{cases} \quad (3)$$

Систему диференціальних рівнянь (3) називають рівняннями руху судна в горизонтальній площині.

Для завершення побудови математичної моделі руху судна до системи диференціальних рівнянь слід залучити початкові умови, які задають значення векторів лінійної і кутової швидкості в момент початку маневру:

$$v_x(0) = v_{x0}, v_y(0) = v_{y0}, \omega(0) = \omega_0.$$

Для завершення запису математичної моделі до системи (3) слід додати початкові умови з урахуванням всіх припущень:

$$v(0) = \sqrt{v_{x0}^2 + v_{y0}^2}, \beta(0) = \frac{v_{y0}}{\sqrt{v_{x0}^2 + v_{y0}^2}}, \omega(0) = \omega_0. \quad (4)$$

Представлена вище математична модель динаміки руху судна в горизонтальній площині повністю відповідає вимогам до побудови системи автоматичного керування руху судна. Описану модель закладено в основу програмно-апаратного комплексу Cotmaccs AP Lab, який використано в дослідженні.

Регулятор стабілізації курсу. Система автоматичного керування (САК) рухом судна за курсом вирішує такі завдання: стабілізацію – авто-

матичне утримання судна на заданому курсі; маневрування – досить точне виконання отриманих сигналів керування.

Для реалізації завдання автоматичної стабілізації судна на курсі досить успішно використовується пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор:

$$\alpha = k_1 \psi + k_2 \dot{\psi} + k_3 \int_0^t \psi dt,$$

де α – кут перекладки керма; $k_{1,2,3}$ – параметри керування; $\psi, \dot{\psi}$ – відхилення судна від заданого курсу та перша похідна відхилення відповідно.

Принцип такого регулювання полягає в тому, що зі збільшенням кута ψ та швидкості відхилення судна від курсу $\dot{\psi}$ збільшується кут перекладки керма. Далі розглядатимемо русійно-кермовий пристрій «гвинт – кермо».

До регулятора надходить задане значення кута перекладки керма α_z та сигнал від датчика, який виробляє сигнал $\alpha_{дв}$, пропорційний куту відхилення судна від курсу. Після обробки сигналу на двигун, що повертає кермо, подається відповідний сигнал керування у вигляді напруги живлення u . Дійсний кут повороту керма α_d за допомогою датчика зворотного зв'язку D_{33} порівнюється із заданим α_z , що визначає тривалість роботи двигуна повороту керма. Знак кута повороту визначається знаком напруги живлення.

Головним недоліком такого регулювання обмежена кількість перекладок керма, що виконує регулятор, керуючись тільки відхиленням судна від заданого курсу. В умовах дії на судно зовнішніх збурень це призводить до невинуватно великої кількості перекладок керма й інтенсивного зношування виконавчого механізму керма (ВМК), проте помилка $|\psi| > 0$ все одно має місце.

Для підвищення надійності й енергоефективності автокермового пристрою доцільно обмежити кількість перекладок керма з одночасною мінімізацією кількості перекладок залежно від заданого режиму руху судна P_r та зовнішніх вітрохвильових збурень, інформація про які вимірюються системою сенсорів S_{33} . Для цього пропонується структура регулятора, що у своєму складі має ШНМ, яка визначатиме необхідний кут повороту керма за пропорційно-диференціальним законом керування. Знак і тривалість подавання напруги на двигун, який керує кермом, визначається відповідно до значення кута перекладки керма.

Функціональну схему регулятора для стабілізації курсу судна, що використовує штучну нейронну мережу, наведено на рис. 1.

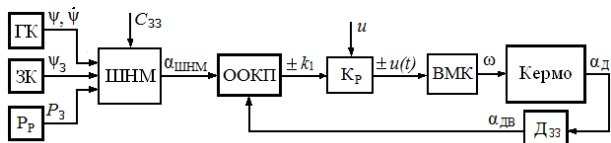


Рис. 1. Функціональна схема регулятора для стабілізації курсу малорозмірного безпечного надводного судна

На рисунку позначено: ВМК – виконавчий механізм керма; ГК – гірокомпас; ЗК – задатчик курсу; К_р – перемикач, що подає живлення на виконавчий механізм керма; ООКП – обчислювач оптимального кута перекладки керма; ψ_3 , P_3 – задані значення курсу судна та режиму його руху відповідно; P_p – задатчик режиму руху; ψ – поточне значення курсу судна; u – напруга живлення виконавчого механізму керма; ω – частота обертання ВМК.

На вхід ШНМ надходять сигнали про поточний курс судна ψ та його кутову швидкість навколо вертикальної осі $\dot{\psi}$, а також сигнали від системи керування вищого рівня про заданий курс судна ψ_3 та про заданий режим його руху P_3 . Крім того, на вхід ШНМ надходить інформація про зовнішні збурення C_{33} , що діють на судно. На виході ШНМ формується сигнал про необхідний кут перекладки керма $\alpha_{\text{ШНМ}}$ за пропорційно-диференціальним законом керування. Обчислювач ООКП визначає напрямок і тривалість сигналу повороту керма. Його вихідний сигнал k_1 є керуючим для перемикача К_р, який подає напругу живлення на ВМК. Знак і тривалість подавання напруги на двигун, який повертає кермо, визначається відповідно до значення кута перекладки керма $\alpha_{\text{ШНМ}}$.

За допомогою програмного пакета NNTool середовища Matlab отримуємо структуру нейронного регулятора стабілізації курсу малорозмірного судна (рис. 2): тип мережі – Feed-forward backpropagation із двома прихованими шарами; перший шар містить 4 нейрони з функцією активації у вигляді тангенціальної сигмоїди; другий шар складається з одного нейрона та лінійної функції активації. Кількість нейронів прихованого шару було визначено експериментально за результатами аналізу якості навчання мережі.

Кількість нейронів прихованого шару було визначено експериментальним шляхом за аналізом якості навчання мережі.

Особливості побудови бази даних для навчання ШНМ. Розглянемо особливості побудови бази даних для навчання ШНМ. Режим руху судна (задатчик P_p) визначається залежно від завдання, яке

виконує судно. Це може бути захід у порт, підхід до причалу, швидке переміщення з однієї точки маршруту до іншої, рух за заданою траєкторією.

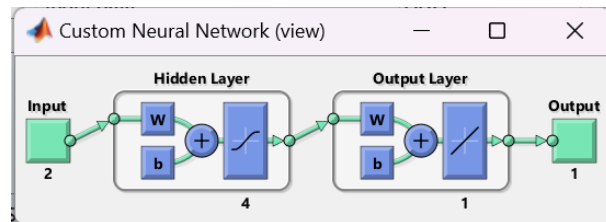


Рис. 2. Структура нейромережі

Також потрібно відзначити, що на точність утримання на курсі значно впливатимуть і зовнішні умови руху судна, які вимірюються системою сенсорів C_{33} . Наприклад, сильна течія або боковий вітер чи хвилювання водної поверхні призводять до значного відхилення від курсу. Тому для формування інформації, яка визначає допустиме значення кутів відхилення від курсу, потрібно враховувати дві складові – завдання руху та зовнішній вплив.

Для визначення оптимальних значень цих кутів застосовано метод математичного моделювання динаміки малорозмірного катеру в умовах зовнішнього впливу [12, 13]. Для цього дослідження розроблено сценарії моделювання динаміки руху судна з різними комбінаціями вітрового впливу, за якими проведено серію комп'ютерних експериментів. Зокрема, було досліджено динаміку руху малорозмірного катера за таких умов експлуатації: швидкість вітру – 10 м/с; напрямок вітру – 90°; висота хвилі – 1 м; напрямок набігання хвилі – 180°.

Як еталонну модель регулятора курсу судна вибрано ПД-регулятор, на базі показників роботи якого сформовано вектори ψ та $d\psi$ для навчання нейронної мережі. Було проведено серію комп'ютерних експериментів, у яких додатково проводилось індивідуальне налаштування параметрів ПД-регулятора для досягнення найкращого результату [14, 15]. Якість керування при цьому оцінювалася за такими критеріями: N_r – кількість перекладок керма за хвилину моделювання; Dev_{max} – максимальне відхилення від курсу (помилка), градуси; Exp_{val} – математичне очікування, градуси; Var – дисперсія, градуси (табл. 1).

Порівняльний аналіз роботи регуляторів стабілізації курсу судна в умовах зовнішнього впливу. Аналіз роботи синтезованого регулятора, оптимізованого за кількістю перекладок керма, проведено в системі Simulink Matlab.

Під час моделювання судно повинно змінити свій курс з 0° на 135° і продовжити рух заданим курсом в умовах зовнішнього збурення.

Умови моделювання: швидкість вітру – 10 м/с; напрямок вітру – 90° ; висота хвилі – 1 м; напрямок набігання хвилі – 180° .

Далі представлено результат моделювання руху судна, керованого по черзі ПД регулятором (рис. 3), нечітким регулятором (рис. 4) та синтезованим регулятором із ШНМ (рис. 5).

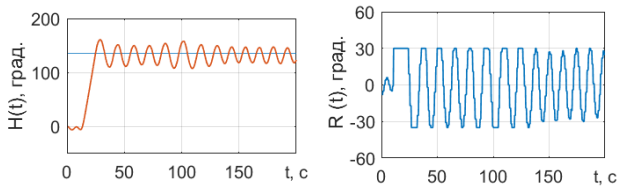


Рис. 3. Курс і перекидка керма судна, керованого ПД-регулятором

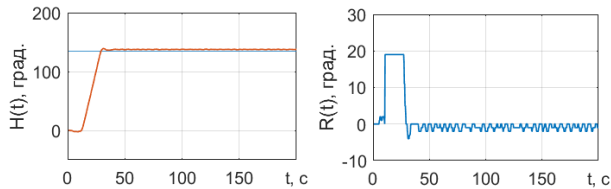


Рис. 4. Курс і перекидка керма судна, керованого нечітким регулятором

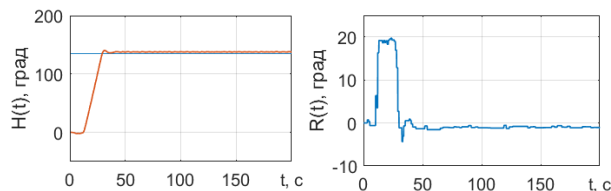


Рис. 5. Курс і перекидка керма судна, керованого регулятором із ШНМ

Порівняльний аналіз якості роботи регуляторів стабілізації курсу в умовах зовнішнього збурення наведено в таблиці 1. Оцінка якості керування проводилася на інтервалі від 60-ї секунди по 120-ту секунду моделювання.

За результатами моделювання можна відзначити, що зовнішнє збурення значно впливає на

якість керування судном. Цей фактор обумовлює потребу в корегуванні налаштувань регулятора залежно від зовнішніх умов плавання.

Саме тому ПД-регулятор має гірші показники якості керування в умовах сильного зовнішнього збурення. Також до недоліку ПД-регулятора можна віднести необмежену кількість перекидок керма, яку він виконує для утримання судна на курсі. Характерною особливістю цього регулятора є той факт, що за меншого зовнішнього збурення кількість перекидок керма майже не зменшується, змінюється лише кут повороту керма.

Кращий результат показав нечіткий регулятор – удвічі менша кількість перекидок керма та вища точність керування (див. табл. 1). Слід відзначити, що цей регулятор налаштований не реагувати на відхилення від курсу менше за 2° . Тому можна сказати, що він має закладену статичну помилку.

Синтезований регулятор із ШНМ має регульоване обмеження на відхилення від заданого курсу залежно від зовнішніх умов і режиму руху. На рис. 5. показано роботу регулятора з обмеженням на відхилення меншим за 2° . Тому на графіку він має схожу форму сигналу керування з нечітким регулятором, однак він має вищу ефективність за кількістю перекидок керма.

ВИСНОВКИ. У роботі розроблено структуру регулятора для стабілізації руху малорозмірного безекіпажного судна на заданому курсі з використанням штучної нейронної мережі, яка визначає необхідний кут повороту керма. Регулятор оптимізовано за кількістю перекидок залежно від вибраного режиму руху судна та дії зовнішніх вітрохвильових збурень. База даних для навчання нейронної мережі сформована з даних, отриманих шляхом математичного моделювання динаміки малорозмірного судна. Як еталонну модель керування було вибрано ПД-регулятор, налаштований для вибраного класу суден. Комп'ютерне моделювання роботи синтезованого регулятора показало його працездатність і принципову можливість функціонувати з урахуванням заданого режиму руху та дії зовнішніх збурень.

Подальші дослідження планується проводити в напрямках синтезу обчислювача оптимального кута перекидки керма та перемикача, який подає живлення на виконавчий механізм керма.

Таблиця 1

Аналіз якості керування

Тип регулятора	Вітер		Хвилювання		N_r (за хвилину моделювання), од.	Exp_{val} , градуси	Var , градуси	Dev_{max} , градуси
	швидкість, м/с	напрямок, град.	висота хвиль, м	напрямок град.				
ПД	10	90	1	180	81	132	5,7	144,8
Fuzzy	10	90	1	180	40	137,5	0,45	137,9
ШНМ	10	90	1	180	32	137,7	0,05	138,1

ЛІТЕРАТУРА

1. Сінюта К. О., Голіков В. В. Глибоке навчання у контексті штучного інтелекту в морській навігації: перспективи розвитку. *Водний транспорт*. 2024. № 1 (39). С. 104–111. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39>. 10 (дата звернення: 10.12.2024).
2. Калініченко І., Богуславський С. Використання штучного інтелекту безпілотних суден для визначення перешкод при плаванні. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2024. Т. 3, № 3. С. 92–103. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240303.09> (дата звернення: 11.12.2024).
3. Hannoshyna I. Розробка моделі глибокої нейронної мережі для оцінки стану моря на основі руху судна. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2023. Т. 3, № 73. С. 25–31. URL: <https://doi.org/10.26906/sunz.2023.3.025> (дата звернення: 10.11.2024).
4. Дакі О. А. та ін. Інформаційна технологія розробки бази знань інтелектуальної системи автоматичного управління рухом судна. *Системи озброєння і військова техніка*. 2021. № 3 (67). С. 52–60. <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.67.07> (дата звернення: 10.12.2024).
5. Qiang L., Bi-Guang H. Artificial Neural Network Controller for Automatic Ship Berthing Using Separate Route. *Journal of Web Engineering*. 2020. <https://doi.org/10.13052/jwe1540-9589.19788> (date of access: 11.12.2024).
6. Nguyen P.-H., Jung Y.-C. Automatic Berthing Control of Ship Using Adaptive Neural Networks. *Journal of Navigation and Port Research*. 2007. Vol. 31, no. 7. P. 563–568. <https://doi.org/10.5394/kinpr.2007.31.7.563> (date of access: 01.10.2024).
7. A neural network based heading and position control system of a ship / S. Unar et al. [arXiv.org. https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.00757](https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.00757) (date of access: 13.11.2024).
8. Ahmed Y.A., Hannan M.A., Siang K.H. Artificial Neural Network controller for automatic ship berthing: challenges and opportunities. *Marine Systems & Ocean Technology*. 2020. Vol. 15, no. 4. P. 217–242. <https://doi.org/10.1007/s40868-020-00089-x> (date of access: 10.10.2024).
9. Ahmed Y.A., Hasegawa K. Artificial neural network based automatic ship berthing combining PD controlled side thrusters – A combined controller for final approaching to berth. *2014 13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*, Singapore, 10–12 December 2014. 2014. <https://doi.org/10.1109/icarcv.2014.7064504> (date of access: 01.10.2024).
10. JIA J. et al. Unmanned sailboat trajectory tracking method based on model predictive control. *Chinese Journal of Ship Research*. 2024. Vol. 1, no. 19. P. 145–157.
11. Кривий О. Ф. Методи математичного моделювання в задачах судноводіння : навчальний посібник. Одеса : ОНМА, 2015. 86 с.
12. Бурунін А., Грудініна Г. Застосування методів математичного моделювання для оптимізації параметрів налаштування автокермового пристрою. *Кораблебудування та морська інфраструктура*. 2024. Т. 2, № 24. С. 48–56.
13. Бурунін, А. П., Грудініна, Г. С. Дослідження ефективності системи керування малорозмірним безекіпажним надводним судном в умовах дії зовнішніх збурень. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2024. № 4 (497).
14. Бурунін А. П., Грудініна Г. С. Оптимізація параметрів налаштування автокермового пристрою безекіпажного катера з застосуванням методів математичного моделювання. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : XV Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали*. Миколаїв : НУК, 2024. С. 968–971. ISBN 978-966-321-473-3.
15. Бурунін А., Грудініна Г. Аналіз роботи нечіткого регулятора у якості авторульового швидкісного катеру. *The 10th International scientific and practical conference “Computer-integrated technologies of automation of technological processes”*. Hamburg, Germany. *International Science Group*. 2024. P. 272–276. ISBN 979-8-89504-798-9. DOI: 10.46299/ISG.2024.2.10.

COURSE STABILIZATION OF A SMALL-SIZED UNMANNED VESSEL USING AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Hanna Hrudinina

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electrical Engineering of Ship and Robotic Complexes

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9 Heroiv Ukrainy ave., Mykolaiv, Ukraine, 54007, hanna.hrudinina@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-8298-9251

Andriy Burunin

Postgraduate Student

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9 Heroiv Ukrainy ave., Mykolaiv, Ukraine, 54007, splashbox98@gmail.com

ORCID: 0009-0005-1017-9766

As a result of the study, the structure of a neural network controller for stabilizing the course of a small-sized vessel was obtained, which provides a minimum number of rudder shifts while maintaining an acceptable course stabilization error under conditions of wind-wave disturbances acting on the vessel. The artificial neural network generates a signal about the

required rudder shift angle according to the proportional-differential control law. The controller includes a calculator for the optimal rudder shift angle, which determines the direction and duration of the rudder turn signal. To form the database necessary for setting up the PD controller, the method of mathematical modeling of the dynamics of a small-sized boat under external influence was applied. For this purpose, scenarios for modeling the dynamics of the vessel's motion with various combinations of wind-wave influences were developed, according to which a series of computer experiments were conducted. Using the Matlab software package, the structure of a neural network controller for stabilizing the course of a small vessel with a "Feed-forward backpropagation" network type with two hidden layers was obtained, in which neurons with an activation function in the form of a tangential sigmoid and a linear activation function were used. The analysis of the operation of the synthesized controller, optimized for the number of rudder shifts, was carried out in the Simulink Matlab system. At the same time, the control quality was evaluated by the number of rudder shifts per minute of simulation, by the maximum deviation from the course, by the mathematical expectation and by the dispersion. Computer modeling showed that the synthesized controller is efficient, effectively responds to the deviation of the vessel from the given course, taking into account the previously specified sensitivity coefficient, which corresponds to the given mode of movement and external wind and wave disturbances acting on the vessel. The developed controller is part of the automatic control system for the movement of a small unmanned vessel with an integrated navigation system that provides accurate information about the current values of the vessel's course and speed, and also has a task planner that determines the movement mode.

Key words: unmanned vessel; automatic control; stabilization of the vessel's course; artificial neural network; rudder shift.

REFERENCES

- Holikov, V.V., & Siniuta, K.O. (2024). Hlyboke navchannia u konteksti shtuchnoho intelektu v morskii navihatsii: perspektyvy rozvytku [Deep learning in the context of artificial intelligence in maritime navigation: development prospects]. *Vodnyi transport*, 104–111 [in Ukrainian].
- Kalinichenko, I., & Bohuslavskiy, Ye. (2024). Vykorystannia shtuchnoho intelektu bezpilotnykh suden dlia vyznachennia pereshkod pry plavanni [Using artificial intelligence in unmanned vessels to detect obstacles during navigation]. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 3 (3), 92–103. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240303.09> [in Ukrainian].
- Hannoshyna, I. (2023). Rozrobka modeli hlybokoi neironnoi merezhi dlia otsinky stanu moria na osnovi rukhu sudna [Development of a deep neural network model for estimating sea state based on vessel motion]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku. Zbirnyk naukovykh prats*, 3 (73), 25–31. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.025> [in Ukrainian].
- Daki, O.A., Olizarenko, S.A., Yakusevych, Yu.H., Dorofieieva, Z.Ya., & Tryshyn, V.V. (2021). Informatsiina tekhnolohiia rozrobky bazy znan intelektualnoi systemy avtomatichnoho upravlinnia rukhom sudna [Information technology for developing a knowledge base for an intelligent automatic vessel movement control system]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, 52–60. <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.67.07> [in Ukrainian].
- Qiang, L., & Bi-Guang, H. (2020). Artificial Neural Network Controller for Automatic Ship Berthing Using Separate Route. *Journal of Web Engineering*, 19 (7–8), 1089–1116. <https://doi.org/10.13052/jwe1540-9589.19788>.
- Jung, Yun-Chul. (2007). Automatic Berthing Control of Ship Using Adaptive Neural Networks. *Journal of Navigation and Port Research*, 31 (7), 563–568. <https://doi.org/10.5394/KINPR.2007.31.7.563>.
- Unar, S., Unar, M.A., Memon, Z.A., & Narejo, S. (2022). A neural network based heading and position control system of a ship. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.00757>.
- Ahmed, Y.A., Hannan, M.A., & Siang, K.H. (2020). Artificial Neural Network controller for automatic ship berthing: Challenges and opportunities. *Marine Systems & Ocean Technology*, 15 (4), 217–242. <https://doi.org/10.1007/s40868-020-00089-x>.
- Ahmed, Y.A., & Hasegawa, K. (2014). Artificial neural network based automatic ship berthing combining PD controlled side thrusters (2014). A combined controller for final approaching to berth. *2014 13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*, 1304–1309. <https://doi.org/10.1109/ICARCV.2014.7064504>.
- Jia, J., Huang, Y., Zhao, W., Sun, Z., & Yan, M. (2024). Unmanned sailboat trajectory tracking method based on model predictive control. *Chinese Journal of Ship Research*, 19 (1), 145–157. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03162>.
- Kryvyi, O.F. (2015). Metody matematychnoho modeliuвання v zadachakh sudnovodinnia: navchalnyi posibnyk. Odesa: ONMA, 86 p. [in Ukrainian].
- Burunin, A.P., & Hrudinina, H.S. (2024). Zastosuvannia metodiv matematychnoho modeliuвання dlia optymizatsii parametriv nalashtuvannia avtorulovoho [Application of mathematical modeling methods for optimization of autosteer adjustment parameters]. *Korablebuduvannia ta morskia infrastruktura*. NUK, 2 (21), 48–56. ISSN 2409-3858 (Print), ISSN 2519-1845 (Online) [in Ukrainian].
- Burunin, A., & Hrudinina, H. (2024). Doslidzhennia efektyvnosti systemy keruvannia malorozmirnym bezekipazhnym nadvodnym sudnom v umovakh dii zovnishnikh zburen [Research on the effectiveness of the control system of a small unmanned surface vessel under the influence of external disturbances]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu koralebuduvannia imeni admiral Makarova*. NUK, 4 (497) [in Ukrainian].
- Burunin, A.P., & Hrudinina H.S. (2024). Optymizatsiia parametriv nalashtuvannia avtorulovoho prystroiu bezekipazhnogo katera z zastosuvanniam metodiv matematychnoho modeliuвання [Optimization of the parameters of the autosteering device of an unmanned boat using mathematical modeling methods]. *Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi: XV Mizhnarodna naukoivo-tekhnichna konferentsiia: materialy*. Mykolaiv. P. 968–971. ISBN 978-966-321-473-3 [in Ukrainian].
- Burunin, A., & Hrudinina, H. (2024). Analiz roboty nechitkoho rehulatora u yakosti avtorulovoho shvydkisnoho katera [Analysis of the operation of a fuzzy controller as an auto-steering speedboat]. *The 10th International scientific and practical conference "Computer-integrated technologies of automation of technological processes"*. International Science Group. P. 272–276. ISBN 979-8-89504-798-9. DOI: 10.46299/ISG.2024.2.10 [in Ukrainian].

Стаття надійшла 10.11.2024