

УДК 629.5.051.5 + 681.513.6

В.М. Теут

Національний технічний університет України “КПІ”, Київ, Україна

**КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ АДАПТИВНИХ АВТОСТЕРНОВИХ**

**Background.** The paper is devoted to critical analysis of literature that covers the major aspects of adaptive ship motion control systems.

**Objective.** The objective of a study is identifying the promising areas of research in the field of adaptive ship motion control.

**Methods.** The analysis of existing approaches to ship model parameters identification (including identification during zig-zag motion, during circulation and identification using Kalman filtering) is done; advantages and disadvantages of those methods are determined. The methods mentioned can be used as a basis for creating adaptive gyropilots. A critical review of approaches to ship control by means of classical and modern methods of automatic control, including the parametric adjustment of classic PID regulators, switching of regulators, use of nonlinear regulators – linear-quadratic (LQ), sliding mode regulators, and artificial intelligence – neural networks, fuzzy logic and hybrid approaches, is done. Separately, in the survey analysis of papers of Ukrainian authors, which are devoted to the development of adaptive gyropilots and adaptive ship motion control, is presented.

**Results.** As a result of literature survey, prospective areas of studies in the field of adaptive ship control are determined.

**Conclusions.** Most promising research areas are:

- 1) development of novel approaches to the identification of the vessel model parameters and disturbances acting on it;
- 2) application of artificial intelligence, including fuzzy logic and neural networks, to adaptive ship control methods;
- 3) development of adaptive nonlinear systems for ship motion control.

**Keywords:** adaptive ship motion control; adaptive gyropilot; ship model parameters identification.

**Вступ**

Сучасний стан мореплавства характеризується зростанням інтенсивності руху на морських шляхах та підвищенням швидкості суден до 25–50 вузлів. Відповідно, зросли вимоги до якості керування рухом судна, зокрема до оперативного керування при проходженні заданим курсом [1].

Питанню створення систем керування судном і, зокрема, автостернових присвячено багато робіт. Серед авторів, які досліджували цю проблему, – Г.В. Соболев, В.Г. Пешехонов, Д.М. Лернер і Ю.О. Лукомський, О.В. Васильєв, С.П. Дмитрієв та О.Є. Пелєвін, А.А. Кошовий, Ю.Г. Антомонов, А.М. Басін, Л.Л. Вагущенко, А.М. Стафеев і Н.Н. Цимбал, К. Номото, Н. Норбінн, М. Бех і Л. Вагнер Сміт, Т.І. Фоссен, І.Р. МакКаллам та ін. Як у роботах класиків, так і в сучасних дослідженнях показано, що для успішного синтезу системи керування слід насамперед визначити математичну модель судна як об'єкта керування (далі по тексті – математична модель судна), враховуючи вплив на нього вітро-хвильових збурень, зокрема хитами.

Питання створення математичної моделі судна для використання в системах керування є достатньо дослідженим, зокрема в роботах

Г.В. Соболева, А.М. Басіна, Л.Л. Вагущенко, А.М. Стафеева і Н.Н. Цимбала, О.П. Тумашика, К. Номото, Н. Норбінна та ін. Вплив збурень, зокрема хитами, на судно досліджено в роботах І.К. Бородая і Ю.О. Нецветаєва, Є.А. Гладких, О.М. Шмирьова, В.А. Мореншильдта та С.Г. Ільїної, А.В. Герасимова, Н.В. Єфремової, А.Г. Сердюченка, В.А. Абрамовського та ін. Слід зазначити, однак, що хоча форма моделі розроблена досить докладно, але її параметри часто складно розрахувати, оскільки гідродинамічні сили та ефекти є істотно нелінійними і, більше того, сильно залежать як від параметрів самого судна (наприклад, його геометрії), так і від умов руху.

Тому при розробці систем керування постає проблема визначення та опису моделі руху морського судна, що враховує зовнішні умови руху, а також ідентифікації параметрів моделі з точністю, достатньою для використання при синтезі регулятора автостернового.

**Постановка задачі**

Метою дослідження є огляд та аналіз літератури, що охоплює головні аспекти створення адаптивних систем керування судном, а також визначення перспективності напрямів досліджень.

### Науково-методологічні підходи до ідентифікації параметрів моделі судна

Для ідентифікації параметрів моделі судна існують різноманітні підходи. Наприклад, у [2] запропоновано розрахунок параметрів моделі за діаграмою керованості і результатами виконання зигзагу. О.Є. Пелевін у [3] для моделі Номото другого порядку отримав співвідношення між параметрами моделі при застосуванні активного керування. Визначення параметрів моделі судна автор [3] пропонує виконувати числовими методами через мінімізацію запропонованого ним критерію. Роботи інших авторів також орієнтовані в основному на використання зигзагу, і запропоновані методи або дають низьку точність визначення параметрів, або достатньо складні для застосування в умовах рейсу і більше підходять для застосування в умовах ходових випробувань.

Наприклад, А.Б. Філіпс, С.Р. Тарнок і М. Фарлонг [4] пропонують метод оцінювання маневрових коефіцієнтів судна на основі рівнянь Нав'є–Стокса і специфічної моделі гребного гвинта, однак унаслідок складності процедури обчислень цей метод придатний до застосування лише на етапі проектування судна і навряд чи може бути реалізований у морі в умовах обмежених часу та обчислювальних потужностей.

Х.К. Юн і К.П. Пі [5] пропонують підхід, який на основі даних ходових випробувань за рахунок використання розширеного фільтра Калмана і модифікованого згладжувача Брайсона–Фрезера дає змогу оцінити змінні руху, швидкість і напрямок течії, а потім методами регресійного аналізу визначити коефіцієнти моделі судна.

М. Касадо і Р. Ферейро в [6] пропонують науково-методологічний підхід (НМП) до визначення параметрів моделі Номото з нелінійним членом (модель Вагнера–Сміта) за результатами циркуляції, що встановилась. Процедура заснована на зворотно-ступеневому алгоритмі ідентифікації моделі та методі підстроювання параметрів моделі і також є достатньо складною для використання в умовах рейсу.

Ідентифікацію моделі Номото в частотній області на основі аналізу реакції судна на переміщення стерна таким чином, що кут відхилення стерна змінюється за законом синусоїди з лінійною розгорткою частоти (чірп), запропоновано в [7]. Принциповим недоліком тако-

го підходу є неможливість його практичної реалізації внаслідок низки особливостей стернових машин (інерційність, а також часто неможливість керування кутом відхилення стерна в динаміці – можна задати лише бажаний кут відхилення).

Г. Елкаїм застосував до ідентифікації моделі руху катамарана Atlantis метод ідентифікації динамічної моделі в просторі станів за допомогою калманівського спостерігача (Observer Kalman Identification method) [8]. Цей метод спирається лише на вхідні і вихідні дані та дає змогу отримати псевдокалманівський оцінювач, що ідентифікує рівняння стану. На основі ідентифікованих даних було створено лінійно-квадратичний гауссовий регулятор, який продемонстрував добру точність витримування шляху (відхилення не більше 1 м). Недоліком цього підходу є висока обчислювальна потужність, необхідна для ідентифікації моделі, а також відносно високий порядок моделі (четвертий і вище), що створює певні труднощі при практичній реалізації.

Метод ідентифікації моделі судна за допомогою застосування багатоальтернативної фільтрації (банку фільтрів Калмана) запропоновано С. Дмитрієвим та О. Пелевіним у [9]. Основною проблемою цього методу є розробка методів формування достатнього набору моделей для задоволення певних вимог до якості адаптивного керування та високі обчислювальні затрати.

НМП до ідентифікації параметрів моделі Номото другого порядку за допомогою методу швидкісного градієнта, розвинутого в роботах А.Л. Фрадкова, запропоновано А.К. Шейхотом у [10]. Суть запропонованої процедури ідентифікації полягає у мінімізації цільової функції, що описує різницю між станом моделі Номото та самого судна при відомих вхідній дії (кут повороту стерна) та параметрах його руху (кутова швидкість та кутове прискорення). Недоліком цього методу є те, що хоча і можлива ідентифікація під час руху без активного керування, але при значному рівні збурень алгоритм може стати непрацездатним.

Автором дійсного дослідження у співпраці з С.В. Івановим та П.Б. Олійником було вдосконалено підхід до ідентифікації за допомогою спектрального аналізу [11], що дає змогу визначити параметри моделі судна в умовах рейсу з прийнятною для синтезу регулятора автостернового точністю.

### Науково-методологічні підходи до побудови автостернових

Сучасні системи керування судном за курсом в основному базуються на використанні пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора, іноді з можливістю його налаштування під конкретні умови руху (див., наприклад, [12]). Перспективні ж методи керування (за даними, наприклад, огляду [1]) передбачають створення адаптивних автостернових, а також систем керування на основі нечіткої логіки.

Дослідження зі створення адаптивних автостернових як таких почалися ще в 70–80-ті роки минулого сторіччя. Основою більшості таких систем було використання калманівської фільтрації або налаштування ПІД-регулятора за допомогою використання моделі судна.

Одним із варіантів застосування для керування судном ПІД-регулятора з параметричним налаштуванням є запропонований у [12] Є.М. Посельоновим НМП. В основу підходу він поклав ідею перенастроювання ПІД-регулятора без використання математичної моделі судна на основі даних про поточні значення показників якості автоматичного керування судном. Як показники якості керування Є.М. Посельонов використав суму зважених максимального значення відхилення судна від заданого курсу та максимального значення кута перекладки стерна, а також суму зважених максимального значення кутової швидкості ризику, величини, оберненої до періоду ризику, і максимального значення кута перекладки стерна. Запропонований алгоритм налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора, за даними автора [12], можна використати для створення адаптивного автостернового.

Як недолік цієї роботи слід відзначити те, що з наведеної у ній інформації не зрозуміло, якими є характеристики створеної системи керування судном, зокрема запаси стійкості, вид і час перехідного процесу, а також статична та динамічна похибка автостернового. До того ж автором [12] не досліджено, чи не призведе таке перенастроювання регулятора до погіршення якості керування, зокрема до зменшення керуваності судна. Отже, запропонований Є.М. Посельоновим метод потребує додаткових досліджень.

Використати замість налаштування ПІД-регулятора кілька ПІД-регуляторів, які є оптимальними для певних робочих

точок і перемикаються залежно від умов руху судна (рис. 1), запропонували Х. Саарі та М. Джемей у [13]. Недоліком такого підходу є те, що чим більша кількість таких робочих точок, тим складнішою стає система керування судном.

Для налаштування ПІД-регулятора запропоновано також використовувати алгоритми штучного інтелекту, наприклад алгоритм “колонії мурашок” та генетичні алгоритми [14]. Проблемою при використанні такого підходу є достатньо великі затрати на перебір варіантів та імітацію еволюції або “колонії мурашок”.

Слід також відзначити, що сучасний стан розвитку науки та нові технології в галузі навігації зумовили перехід до нових методів створення адаптивних автостернових.

Одним із найпростіших, з точки зору наукового забезпечення, методів створення нових автостернових є використання супутникових навігаційних систем (СНС) [15]. Запропонований авторами [15] метод полягає фактично в заміні даних про курс від гірокомпаса обчисленим за допомогою СНС реальним курсом судна, що дає змогу підвищити точність визначення курсу, уникнувши підвищення вартості навігаційного комплексу за рахунок встановлення більш точного гірокомпаса.

Методи синтезу робастного закону керування для систем керування судном на траєкторії описано в [9]. Запропоновані С. Дмитрієвим і О. Пелєвіним методи синтезу засновані на побудові гарантуючого фільтра (т. зв. “мінімаксного фільтра”) для стохастичних систем із заданим квадратичним критерієм якості. За результатами моделювання, наведеного в [9], можна стверджувати, що створений регулятор є робастним до неточного знання параметрів моделі судна, однак збільшує кількість перекладань стерна.

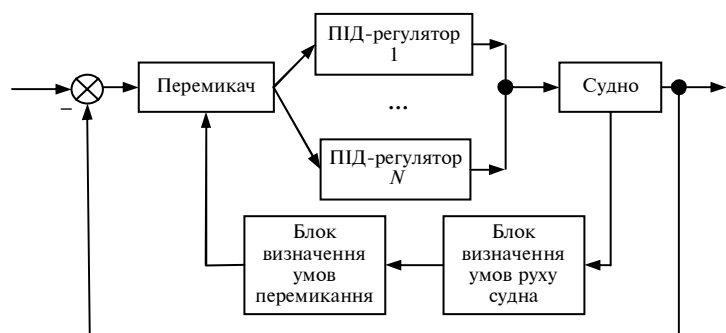


Рис. 1. Схема побудови автостернового з перемиканням ПІД-регуляторів

Багато публікацій присвячено застосуванню нейромереж при керуванні рухом судна. Наприклад, автори [16] пропонують застосувати для керування судном нейромережу замість звичайного регулятора автостернового. Згідно з їхніми даними, натренована нейромережа показала добрі результати при слідуванні заданим маршрутом під час випробувань у морі.

За даними, опублікованими в [17], застосування нейрорегулятора дало змогу створити автостерновий, що ефективно керує судном з невідомою динамікою. Особливістю підходу, описаного в [17], є алгоритм навчання нейромережі, заснований на теоремі Ляпунова.

Перспективним також вважається використання для керування судном нечіткої логіки [18, 19], зокрема і адаптивного керування із застосуванням нечіткої логіки [20, 21].

З. Шен, Ч. Гуо і Н. Чжанг у [18] запропонували контролер на базі нечіткої логіки, який, за даними проведеного моделювання, дає змогу витримувати курс судна в умовах хвилювання і вітру.

Г. Лі, С. Сарендран і С.-Х. Кім у [19] розробили контролер на базі нечіткої логіки, призначений для автоматизації входу великотоннажного судна в бухту. В перспективі розроблений контролер планують поєднати з ПІД-регулятором для використання в певних умовах руху того регулятора, який у них є більш ефективним.

В. Найєм, Р. Саттон і Т. Ксу в [20] пропонують регулятор на нечіткій логіці в поєднанні з фільтром Калмана, що на основі даних датчиків (лаг, ехолот, компас, GPS) дає можливість оцінити параметри моделі судна і, відповідно, реагувати на зміни в умовах руху.

Г. Рігатос і С. Цафестос у [21] пропонують адаптивний нечіткий  $H_\infty$  контролер для керування судном за курсом, який, за їхніми даними, дає змогу зменшити вплив помилок моделювання і зовнішніх збурень на курс судна до величини, нижчої наперед заданого рівня.

Крім згаданих вище розробок на основі нейромереж і нечіткої логіки, існують також розробки нелінійних систем керування судном.

Т. Цімен і С.П. Бенкс у [22] пропонують метод розробки слідкуючих пристроїв керування для широкого класу нелінійних систем. Основною ідеєю методу є послідовна апроксимація нелінійної задачі керування послідовністю лінійно-квадратичних задач, які сходяться до нелінійної задачі. Метод застосовано авторами для створення автостернового для танкера. Ос-

новною задачею апроксимації вибрано мінімізацію відхилення судна від заданого курсу і мінімізацію відхилення стерна в процесі керування.

У роботі [23] проведено аналіз нелінійної моделі судна в поєднанні з нелінійним регулятором "ковзного режиму" (sliding mode regulator), який забезпечує робастність керування. За даними авторів дослідження, модель є достатньо точною і придатна для аналізу маневрування судна на морі. Основною проблемою методу синтезу є те, що штрафну функцію підібрано методом спроб і помилок; для практичного застосування рекомендовано визначити штрафну функцію за допомогою генетичних алгоритмів. Аналогічний підхід застосовано також у [24].

У [25] наведено порівняння ПІД-регулятора і регуляторів, заснованих на теоремах Ляпунова та Гурвіца, при лінеаризації нелінійної системи керування судном та компенсації збурень. За даними авторів цієї роботи, при застосуванні попередньої фільтрації даних всі три методи дають порівнянні результати точності утримання судна на курсі, однак якість роботи системи керування сильно залежить від якості попередньої фільтрації вхідних даних.

Автори [26] пропонують для побудови регулятора автостернового такий підхід: спершу нелінійну модель судна апроксимують послідовністю лінійних рівнянь зі змінними коефіцієнтами, розв'язок яких сходиться до реакції системи на вхідну дію. Потім для кожної зі згенерованих лінійних систем створюється регулятор, і регулятор, створений для останньої системи, застосовується до нелінійної задачі. Очевидним недоліком такого підходу є його обчислювальна складність; крім того, для досягнення прийнятної точності керування судном потрібно до 50 ітерацій, унаслідок чого практичне застосування підходу залишається під питанням.

У [27] запропоновано застосувати для керування судном лінійно-квадратичний (LQ) регулятор у поєднанні із заснованим на рівнянні Ріккати компенсатором за умови накладання на вхідну дію обмежень за насиченням. Запропонована методика, за даними авторів [27], дає змогу зберегти стійкість системи при неточних параметрах моделі судна і при дії зовнішніх збурень.

З. Лі, Дж. Сан і С. Ох у [28] пропонують нелінійний обернено-ступеневий регулятор, заснований на домінуванні оберненого зв'язку замість його лінеаризації, при використанні

додаткових параметрів у функції Ляпунова. В результаті створений регулятор є майже лінійним. У публікації наведено результати моделювання і випробувань на моделі судна в басейні. Слід зазначити, що запропонований метод синтезу регулятора забезпечує високу робастність регулятора до незмодельованої динаміки судна і шумів у вимірюваних сигналах.

### Дослідження вітчизняних авторів

Крім описаних вище підходів на базі методів штучного інтелекту, існує низка оригінальних досліджень вітчизняних авторів.

Метод синтезу оптимальних за швидкістю систем керування (в т.ч. і рухом судна) запропоновано в класичних роботах Ю.Г. Антонова і розвинено в роботі А.В. Василенка, Д.П. Кучерова та Б.П. Іванова [29]. Суть цього методу полягає у числовому розрахунку моментів часу для перемикання приводу стерна з метою виходу судна на новий курс за найменший можливий час, причому запропонований ним метод може налаштовуватись на параметри моделі судна і збурення, що діє на нього. Недоліком методу є те, що релейна система керування при приведенні судна на заданий курс у реальних умовах руху може вийти на “ковзний режим”, тобто стерно при виході судна на заданий курс буде часто перекидатись з борту на борт, що збільшує витрату палива і зменшує ресурс рульових машин.

Алгоритм роботи автостернового з адаптивним регулятором на основі “прямої” адаптації (при використанні релейних сигналів) запропонував у [30] В.П. Гарам. Цей алгоритм не вимагає великих обчислювальних ресурсів і легко реалізується в бортовій системі керування судном. Проте він, як зазначає сам автор, передбачає попередній вибір оптимальних значень коефіцієнтів ПІД-регулятора через статистичне моделювання із занесенням їх до бази даних. Крім того, для забезпечення високої точності керування алгоритм вимагає ідентифікації параметрів моделі судна на етапі ходових випробувань і вибору параметрів для поточних умов.

В.Є. Львов і А.С. Мальцев у [31] запропонували метод підвищення надійності роботи системи керування курсом судна, швидкості та економічності її роботи, особливо в штормових умовах. Суть запропонованого методу полягає у введенні в склад системи нового елемента, компенсатора, який за рахунок встановлення

нового функціонального зв'язку між збуренням та приводом стерна дає змогу адаптувати автостерновий із ПІД-законом керування до умов руху. Більше того, застосування цього пристрою дає можливість у перспективі створити систему керування рухом за заданою траєкторією.

Недоліком роботи [31] є те, що запропонована в ній ідея має лише загальні риси і авторами не було проведено хоча б імітаційного моделювання роботи системи керування.

Аналітичне дослідження параметрів руху судна на прямому курсі із застосуванням детерміністського методу і нової імпульсної технології керування стерном запропонували В.П. Коновалов і В.А. Савченко в [32]. Для дослідження керування судном було використано спосіб, який полягає у виключенні знакозмінного відхилення судна від заданого курсу імпульсною перекладкою стерна в момент приходу судна на заданий курс у бік борту з більшим ступенем опору судна відходу з курсу. За даними авторів [32], натурні випробування способу керування підтверджують високу точність утримання судна на курсі в умовах сили вітру 3 бали і 1 балу хвилювання моря за Бофортом.

НМП до комбінованого (за збуренням та задавальною дією) керування розроблено В.А. Голіковим та В.Є. Львовим [33]. Суть запропонованого підходу полягає у зміні структури автостернового через включення додаткового контуру керування за збуренням. За даними проведеного авторами імітаційного моделювання, найбільш перспективним принципом автоматичного керування судном за курсом слід вважати комбінований із ПІД-законом керування за відхиленням П-закон керування за збуренням. Основною проблемою такого підходу, як і при створенні адаптивного автостернового, є точна ідентифікація параметрів об'єкта керування (судна) та збурення.

Питання використання методів штучного інтелекту, зокрема нейромереж, для керування судном докладно дослідив С.А. Подпорін особисто та у співавторстві в роботах [34–37].

У роботах [34–36] спільно з В.І. Богдановим С.А. Подпорін дослідив кілька варіантів використання штучного інтелекту. В статті [34] проведено аналіз налаштування параметрів судового ПІД-регулятора за допомогою генетичного алгоритму, критерієм відбору якого може слугувати, наприклад, кількість перекладань стерна, витрата палива або точність утримання судна на курсі. Явний недолік такого підходу

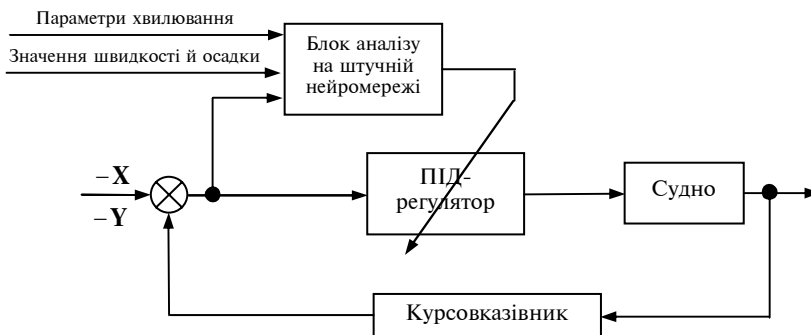


Рис. 2. Система керування курсом судна з підстроюванням параметрів регулятора від штучної нейронної мережі

полягає в тому, що перенастроювання параметрів регулятора за допомогою генетичного алгоритму потребує достатньої обчислювальної потужності та часу.

Використання двох інших методів з області штучного інтелекту показано в [35, 36]. Використання нечіткої логіки для підвищення якості керування судном на курсі досліджено в роботі [34], а адаптивний автостерновий з підстроюванням параметрів від нейронмережі (рис. 2) – у [36]. Висновком з цих публікацій було те, що ця область є перспективною, але потребує проведення додаткових досліджень.

Підсумок проведених досліджень наведено в авторефераті дисертації [37]. У роботі [37] С.А. Подпорінім застосовано адаптивне керування судном на основі нейронмережевої ідентифікації моделі судна, причому нелінійну динаміку судна враховано за допомогою використання нечіткої логіки на базі нелінійних функцій приналежності. Оптимальні значення параметрів керування курсом визначаються згідно з критерієм, що забезпечує бажану точність утримання судна на курсі за мінімальної кількості переключень стерна за допомогою генетичного алгоритму. Крім того, за рахунок використання в контурі керування більш точних моделей судна та керуючого регулятора, отриманих методами нейронної ідентифікації, автором [37] було вдосконалено метод адаптивного керування курсом судна.

Перспективи використання нейронечітких та гібридних технологій у системах керування

рухом морських суден обговорено С.А. Подпорінім та О.М. Олейниковим у виступі на XIV Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика” [38]. Як висновки з доповіді було особливо підкреслено, що підходи до керування рухом судна на основі нейронечітких та гібридних технологій є обґрунтованими й актуальними, однак ця галузь потребує проведення додаткових досліджень. Більше того, нейронмережеві технології не є панацеєю, і слід шукати нові, більш досконалі способи керування складними системами, якими є, зокрема, і судна.

## Висновки

З проведеного аналізу літературних джерел видно, що на сьогодні задачу пошуку оптимального підходу адаптивного керування судном не розв'язано. На це вказує як велика різноманітність підходів до керування, так і те, що практично всі опубліковані варіанти розв'язання задачі мають певні вади і недоліки. Таким чином, існуючі способи керування курсом судна не є досконалими. Це зумовлює необхідність подальшого вдосконалення способів керування судном на курсі з метою більш повного урахування його динаміки і зовнішніх впливів без втручання судноводія.

Як видно з аналізу літератури, перспективними з точки зору досліджень є такі напрями:

- 1) нові підходи до ідентифікації параметрів моделі руху судна та збурень, що діють на нього;
- 2) застосування до адаптивного керування судном методів штучного інтелекту, зокрема нечіткої логіки та нейронмереж;
- 3) побудова адаптивних нелінійних систем керування рухом судна.

Подальші дослідження бажано спрямувати саме у вказаних напрямках.

## Список літератури

1. Roberts G.N. Trends in marine control systems // Ann. Rev. Control. – 2008. – 32. – P. 263–269.
2. Юдин Ю.И., Гололобов А.Н., Степанов А.Г. Метод расчета параметров математической модели судна // Вестник МГТУ. – 2009. – 12, № 1. – С. 5–9.

3. *Пелевин А.Е.* Идентификация параметров модели морского подвижного объекта при периодическом движении с активным управлением // Гироскопия и навигация. – 2008. – № 4 (63). – С. 29–44.
4. *Phillips A.B., Turnock S.R., Furlong M.* Evaluation of manoeuvring coefficients of a self-propelled ship using a blade element momentum propeller model coupled to a Reynolds averaged Navier Stokes flow solver // Ocean Eng. – 2009. – **36**. – P. 1217–1225.
5. *Yoon H.K., Rhee K.P.* Identification of hydrodynamic coefficients in ship maneuvering equations of motion by Estimation-Before-Modeling technique // Ocean Eng. – 2003. – **30**. – P. 2379–2404.
6. *Casados M.H., Ferreira R.* Identification of the nonlinear ship model parameters based on the turning test trial and the back-stepping procedure // Ocean Eng. – 2005. – **32**. – P. 1350–1369.
7. *Banazadeh A., Ghorbani M.T.* Frequency domain identification of the Nomoto model to facilitate Kalman filter estimation and PID heading control of a patrol vessel // Ocean Eng. – 2013. – **72**. – P. 344–355.
8. *Elkaim G.H.* System identification-based control of an unmanned autonomous wind-propelled catamaran // Control Eng. Practice. – 2009. – **17**. – P. 158–169.
9. *Дмитриев С.П., Пелевин А.Е.* Задачи навигации и управления при стабилизации судна на траектории – СПб: ГНЦ РФ-ЦНИИ “Электроприбор”, 2004. – 160 с.
10. *Шейхот А.К.* Совершенствование систем управления морскими подвижными объектами на основе идентификации и адаптации: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Владивосток, 2008. – 24 с.
11. *Ivanov S.V., Teut V.M., Olynyk P.B.* Identification of ship model and disturbance parameters using spectral analysis // J. Chinese Inertial Technol. – 2013. – № 3. – P. 341–346.
12. *Поселенов Е.А.* Обоснование и разработка адаптивного алгоритма управления движением речного водоизмещающего судна на мелководье: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Нижний Новгород, 2010. – 24 с.
13. *Saari H., Djemai M.* Ship motion control using multi-controller structure // Ocean Eng. – 2012. – **55**. – P. 184–190.
14. *Tomera M.* Ant colony optimization algorithm applied to ship steering control // Procedia Computer Sci. – 2014. – **35**. – P. 83–92.
15. *Design and experiment of a small boat track-keeping autopilot / S.D. Lee, C.H. Yu, K.Y. Hsiu et al.* // Ocean Eng. – 2010. – **37**. – P. 208–217.
16. *Minimum time ship maneuvering method using neural network and nonlinear model predictive compensator / N. Mizuno, M. Kuroda, O. Tadatsugi, K. Ohtsu* // Control Eng. Practice. – 2007. – **15**. – P. 757–765.
17. *An efficient neural network approach to tracking control of an autonomous surface vehicle with unknown dynamics / C.-Z. Pan, X.-Z. Lai, S.X. Yang, M. Wu* // Expert Syst. Applicat. – 2013. – **40**. – P. 1629–1635.
18. *Shen Z., Guo C., Zhang N.* General fuzzified CMAC based reinforcement learning control for ship steering using recursive least-squares algorithm // Neurocomputing. – 2010. – **73**. – P. 700–706.
19. *Lee G., Surendran S., Kim S.-H.* Algorithms to control the moving ship during harbour entry // Appl. Math. Modelling. – 2009. – **33**. – P. 2474–2490.
20. *Naeem W., Sutton R., Xu T.* An integrated multi-sensor data fusion algorithm and autopilot implementation in an uninhabited surface craft // Ocean Eng. – 2012. – **39**. – P. 43–52.
21. *Rigatos G., Tzafestas S.* Adaptive fuzzy control for the ship steering problem // Mechatronics. – 2006. – **16**. – P. 479–489.
22. *Cimen T., Banks S.P.* Nonlinear optimal tracking control with application to super-tankers for autopilot design // Automatica. – 2004. – **40**. – P. 1845–1863.
23. *Fang M.-C., Luo J.-H.* The nonlinear hydrodynamic model for simulating a ship steering in waves with autopilot system // Ocean Eng. – 2005. – **32**. – P. 1486–1502.
24. *Perera L.P., Guedes S.C.* Pre-filtered sliding mode control for nonlinear ship steering associated with disturbances // Ocean Eng. – 2012. – **51**. – P. 49–62.
25. *Perera L.P., Guedes S.C.* Lyapunov and Hurwitz based controls for input–output linearisation applied to nonlinear vessel steering // Ocean Eng. – 2013. – **66**. – P. 58–69.
26. *Herrero E.R., Tomás-Rodríguez M., Velasco F.J.* Iterative lead compensation control of nonlinear marine vessels manoeuvring models // Appl. Ocean Res. – 2014. – **48**. – P. 266–276.
27. *Kahveci N.E., Ioannou P.A.* Adaptive steering control for uncertain ship dynamics and stability analysis // Automatica. – 2013. – **49**. – P. 685–697.
28. *Li Z., Sun J., Oh S.* Design, analysis and experimental validation of a robust nonlinear path following controller for marine surface vessels // Automatica. – 2009. – **45**. – P. 1649–1658.
29. *Василенко А.В., Кучеров Д.П., Иванов Б.П.* О двух подходах к задаче синтеза системы управления курсом корабля: оптимальность по времени и пропорционально-дифференциальный регулятор // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2009. – Вип. 3 (11). – С. 80–85.

30. *Гарам В.П.* Алгоритми релейного управління для автостернового морського судна // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2009. – Вип. 4 (12). – С. 7–10.
31. *Львов В.Е., Мальцев А.С.* Метод улучшения компенсационных свойств системы управления курсом судна // Судовождение: Сб. науч. тр. – Одесса: ИздатИнформ, 2008. – Вып. 15. – С. 99–104.
32. *Коновалов В.П., Савченко В.А.* Математическая модель управления судном // Судовождение: Сб. науч. тр. – Одесса: ИздатИнформ, 2008. – Вып. 15. – С. 84–90.
33. *Голиков В.А., Львов В.Е.* Сравнительное имитационное моделирование движения судов по предписанному курсу с различными принципами управления // Судовождение: Сб. науч. тр. – Одесса: ИздатИнформ, 2010. – Вып. 18. – С. 68–77.
34. *Богданов В.И., Подпорин С.А.* Оптимизация параметров судового ПИД-регулятора с помощью генетического алгоритма // Оптимизация производственных процессов: Сб. науч. тр. – Севастополь: Севастополь. нац. техн. ун-тет, 2004. – Вып. 7. – С. 184–189.
35. *Богданов В.И., Подпорин С.А.* Использование нечеткой логики для повышения качества управления судном на курсе // Сб. науч. тр. СВМИ им. П.С. Нахимова. – Севастополь, 2005. – Вып. 2 (8). – С. 89–97.
36. *Богданов В.И., Подпорин С.А.* Адаптивный авторулевой с подстройкой параметров от нейронной сети // Судовождение: Сб. науч. тр. – Одесса: ИздатИнформ, 2007. – Вып. 13. – С. 13–21.
37. *Подпорин С.А.* Розвиток методів інтелектуального управління рухом судна на курсі: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одеса: Одес. нац. мор. акад., 2009. – 20 с.
38. *Подпорин С.А., Олейников А.М.* Перспективы использования нейро-нечетких и гибридных технологий в системах управления движением морских судов [Электронный ресурс] // Труды XIV Междунар. научно-техн. конф. “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”, 17–22 сентября 2007 г., Севастополь. – Режим доступа: [http://paep2007.abacus.ua/default.aspx?id=paep\\_show\\_doc&doc=9733](http://paep2007.abacus.ua/default.aspx?id=paep_show_doc&doc=9733).

## References

1. G.N. Roberts, “Trends in marine control systems”, *Ann. Rev. Control*, vol. 32, pp. 263–269, 2008.
2. Yu.I. Yudin *et al.*, “Method of ship model parameters estimation”, *Vestnik MGTU*, vol. 12, no.1, pp. 5–9, 2009 (in Russian).
3. A.E. Pelevin, “Identification of maritime mobile object model parameters during periodic movement with active control”, *Giroskopija i Navigatsija*, no. 4 (63), pp. 29–44, 2008 (in Russian).
4. A.B. Phillips *et al.*, “Evaluation of manoeuvring coefficients of a self-propelled ship using a blade element momentum propeller model coupled to a Reynolds averaged Navier Stokes flow solver”, *Ocean Eng.*, vol. 36, pp. 1217–1225, 2009.
5. H.K. Yoon and K.P. Rhee, “Identification of hydrodynamic coefficients in ship maneuvering equations of motion by Estimation-Before-Modeling technique”, *Ocean Eng.*, vol. 30, pp. 2379–2404, 2003.
6. M.H. Casados and R. Ferreiro, “Identification of the nonlinear ship model parameters based on the turning test trial and the backstepping procedure”, *Ocean Eng.*, vol. 32, pp. 1350–1369, 2005.
7. A. Banazadeh and M.T. Ghorbani, “Frequency domain identification of the Nomoto model to facilitate Kalman filter estimation and PID heading control of a patrol vessel”, *Ocean Eng.*, vol. 72, pp. 344–355, 2013.
8. G.H. Elkaim, “System identification-based control of an unmanned autonomous wind-propelled catamaran”, *Control Eng. Practice*, vol. 17, pp. 158–169, 2009.
9. S.P. Dmitriev and A.E. Pelevin, *Navigation and Control Problems during Ship Stabilization on its Trajectory*. St. Petersburg, Russia: GNZ RF-CNII “Electropribor”, 2004, 160 p. (in Russian).
10. A.K. Sheykhot, “Improvement of control systems of marine mobile objects on the basis of identification and adaptation”, Ph.D. theses, Admiral G.I. Nevelskoy Maritime State University, Vladivostok, Russian Federation, 2008 (in Russian).
11. S.V. Ivanov *et al.*, “Identification of ship model and disturbance parameters using spectral analysis”, *J. Chinese Inertial Technol.*, is. 3, pp. 341–346, 2013.
12. E.A. Poselionov, “Study and development of adaptive algorithm for control of river displacement-type ship on shallow water”, Ph.D. theses, Volga State Maritime Academy, Nizhny Novgorod, Russian Federation, 2010 (in Russian).
13. H. Saari and M. Djemai, “Ship motion control using multi-controller structure”, *Ocean Eng.*, vol. 55, pp. 184–190, 2012.
14. M. Tomera, “Ant colony optimization algorithm applied to ship steering control”, *Procedia Computer Sci.*, vol. 35, pp. 83–92, 2014.
15. S.D. Lee *et al.*, “Design and experiment of a small boat track-keeping autopilot”, *Ocean Eng.*, vol. 37, pp. 208–217, 2010.
16. N. Mizuno *et al.*, “Minimum time ship maneuvering method using neural network and nonlinear model predictive compensator”, *Control Eng. Practice*, vol. 15, pp. 757–765, 2007.



17. C.-Z. Pan *et al.*, “An efficient neural network approach to tracking control of an autonomous surface vehicle with unknown dynamics”, *Expert Syst. Applicat.*, vol. 40, pp. 1629–1635, 2013.
18. Z. Shen *et al.*, “General fuzzified CMAC based reinforcement learning control for ship steering using recursive least-squares algorithm”, *Neurocomputing*, vol. 73, pp. 700–706, 2010.
19. G. Lee *et al.*, “Algorithms to control the moving ship during harbour entry”, *Appl. Math. Modelling*, vol. 33, pp. 2474–2490, 2009.
20. W. Naeem *et al.*, “An integrated multi-sensor data fusion algorithm and autopilot implementation in an uninhabited surface craft”, *Ocean Eng.*, vol. 39, pp. 43–52, 2012.
21. G. Rigatos and S. Tzafestas, “Adaptive fuzzy control for the ship steering problem”, *Mechatronics*, vol. 16, pp. 479–489, 2006.
22. T. Cimen and S.P. Banks, “Nonlinear optimal tracking control with application to super-tankers for autopilot design”, *Automatica*, vol. 40, pp. 1845–1863, 2004.
23. M.-C. Fang and J.-H. Luo, “The nonlinear hydrodynamic model for simulating a ship steering in waves with autopilot system”, *Ocean Eng.*, vol. 32, pp. 1486–1502, 2005.
24. L.P. Perera and S.C. Guedes, “Pre-filtered sliding mode control for nonlinear ship steering associated with disturbances”, *Ocean Eng.*, vol. 51, pp. 49–62, 2012.
25. L.P. Perera and S.C. Guedes, “Lyapunov and Hurwitz based controls for input–output linearization applied to nonlinear vessel steering”, *Ocean Eng.*, vol. 66, pp. 58–69, 2013.
26. E.R. Herrero *et al.*, “Iterative lead compensation control of nonlinear marine vessels manoeuvring models”, *Appl. Ocean Res.*, vol. 48, pp. 266–276, 2014.
27. N.E. Kahveci and P.A. Ioannou, “Adaptive steering control for uncertain ship dynamics and stability analysis”, *Automatica*, vol. 49, pp. 685–697, 2013.
28. Zhen Li *et al.*, “Design, analysis and experimental validation of a robust nonlinear path following controller for marine surface vessels”, *Automatica*, vol. 45, pp. 1649–1658, 2009.
29. A.V. Vasilenko *et al.*, “About two approaches to the problem of ship course control system synthesis: time optimal system vs PID regulator”, *Systemy Upravlinnya, Navigacii ta Zvyazku*, is. 3 (11), pp. 80–85, 2009 (in Russian).
30. V.P. Garam “Relay control algorithms for marine ship gyropilot”, *Systemy Upravlinnya, Navigacii ta Zvyazku*, is. 4 (12), pp. 7–10, 2009 (in Ukrainian)
31. V.E. Lvov and A.S. Maltsev, “Method of improvement of compensation capabilities of ship course control system”, *Sudovozhdeniye*, is. 15, pp. 99–104, 2008 (in Russian).
32. V.P. Konovalov and V.A. Savchenk, “Mathematical model of ship control”, *Sudovozhdeniye*, is. 15, pp. 84–90, 2008 (in Russian)
33. V.A. Golikov and V.E. Lvov, “Comparative simulation modeling of ships motion on predetermined course with different control principles”, *Sudovozhdeniye*, is. 18, pp. 68–77, 2010 (in Russian).
34. V.I. Bogdanov and S.A. Podporin, “Optimization of ship’s PID controller with the use of a genetic algorithm”, *Optimizatsiya Proizvodstvennyh Processov*, is. 7, pp. 184–89, 2004 (in Russian).
35. V.I. Bogdanov and S.A. Podporin, “Use of a fuzzy logic in order to increase ship course control quality”, *Sbornik Nauchnykh Trudov SVMI im. P.S. Nakhimova*, is. 2 (8), pp. 89–97, 2005 (in Russian).
36. V.I. Bogdanov and S.A. Podporin, “Adaptive gyropilot with parameter adjustment based on neural network”, *Sudovozhdeniye*, is. 13, pp. 13–21, 2007 (in Russian).
37. S.A. Podporin, “Development of methods for intellectual ship course control”, Ph.D. theses, Odesa National Maritime Academy, Odesa, 2009 (in Ukrainian).
38. S.A. Podporin and A.M. Oleynikov. (2007). *Perspeftives of use of neuro-fuzzy and hybrid technologies in maritime control systems* [Online]. Available: [http://paep2007.abacus.ua/default.aspx?id=paep\\_show\\_doc&doc=9733](http://paep2007.abacus.ua/default.aspx?id=paep_show_doc&doc=9733) (in Russian).

В.М. Теут

#### КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ АДАПТИВНИХ АВТОСТЕРНОВИХ

**Проблематика.** Роботу присвячено критичному аналізу літератури, що охоплює головні аспекти створення адаптивних систем керування рухом судна.

**Мета дослідження.** Метою роботи є визначення перспективних напрямів досліджень у галузі створення адаптивних систем керування рухом судна.

**Методика реалізації.** Проведено аналіз існуючих підходів до ідентифікації параметрів моделі судна (зокрема, ідентифікації на зіг’ягу, на циркуляції та за допомогою калманівської фільтрації), визначено переваги і недоліки цих методів, що можуть бути покладені в основу створення адаптивних автостернових. Наведено критичний аналіз підходів до керування судном за допомогою класичних та новітніх методів автоматичного керування об’єктами, зокрема параметричного настроювання класичних ПІД-регуляторів, перемикання регуляторів, застосування нелінійних регуляторів – лінійно-квадратичних (LQ), “ковзного режиму” (sliding mode), а також штучного інтелекту – нейромереж, нечіткої логіки та гібридних підходів. Окремо в огляді наведено аналіз розробок вітчизняних авторів, присвячених розробці адаптивних автостернових та адаптивному керуванню рухом судна.

**Результати дослідження.** В результаті аналізу літературних джерел визначено перспективні напрями досліджень у галузі створення адаптивних систем керування рухом судна.

**Висновки.** Перспективними напрямками досліджень є:

- 1) розробка нових підходів до ідентифікації параметрів моделі руху судна та збурень, що діють на нього;
- 2) застосування методів штучного інтелекту, зокрема нечіткої логіки та нейромереж, до адаптивного керування судном;
- 3) побудова адаптивних нелінійних систем керування рухом судна.

**Ключові слова:** адаптивне керування рухом судна; адаптивний автостерновий; ідентифікація параметрів моделі судна.

В.М. Теут

#### КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ АДАПТИВНЫХ АВТОРУЛЕВЫХ

**Проблематика.** Работа посвящена критическому анализу литературы, охватывающей основные аспекты создания адаптивных систем управления движением судна.

**Цель исследования.** Цель работы – определение перспективных направлений исследований в области создания адаптивных систем управления движением судна.

**Методика реализации.** Проведен анализ существующих подходов к идентификации параметров модели судна (в частности, идентификации на зигзаге, на циркуляции и с помощью калмановской фильтрации), определены преимущества и недостатки этих методов, которые могут быть положены в основу создания адаптивных авторулевых. Приведен критический анализ подходов к управлению судном с помощью классических и новых методов автоматического управления объектами, в частности параметрической настройки классических ПИД-регуляторов, переключения регуляторов, применения нелинейных регуляторов – линейно-квадратичных (LQ), “скользящего режима” (sliding mode), а также искусственного интеллекта – нейросетей, нечеткой логики и гибридных подходов. Отдельно в обзоре приведен анализ разработок отечественных авторов, посвященных разработке адаптивных авторулевых и адаптивному управлению движением судна.

**Результаты исследования.** В результате анализа литературных источников определены перспективные направления исследований в области создания адаптивных систем управления движением судна.

**Выводы.** Перспективными направлениями исследований являются:

- 1) разработка новых подходов к идентификации параметров модели движения судна и действующих на него возмущений;
- 2) применение методов искусственного интеллекта, в частности нечеткой логики и нейронных сетей, к адаптивному управлению судном;
- 3) построение адаптивных нелинейных систем управления движением судна.

**Ключевые слова:** адаптивное управление движением судна; адаптивный авторулевой; идентификация параметров модели судна.

Рекомендована Радою  
НДІ телекомунікацій  
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
18 травня 2015 року