

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»
Навчально – науковий інститут автоматики та електромеханіки
Кафедра «Електрообладнання і автоматики суден»

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему

**Дослідження процесів в інтелектуальній системі управління стабілізацією
курсу судна**

Виконав: здобувач другого (магістерського) рівня
вищої освіти, групи 3601

Спеціальність: 271 – Морські та внутрішній водний транспорт
(шифр і назва спеціальності)

Спеціалізація: «Експлуатація суднового електрообладнання
і засобів автоматики»

ЧЕКЕРСЬКИЙ АРТЕМ СЕРГІЙОВИЧ

(підпис, прізвище та ініціали)

допущений до захисту 10.12.2025
(дата малого захисту)

Завідуючий кафедрою Ірина ГВОЗДЕВА
(підпис, прізвище та ініціали)

Керівник Владислав МИХАЙЛЕНКО
(підпис, прізвище та ініціали)

Нормоконтролер В. Михасенко
(підпис, прізвище та ініціали)

Рецензент В. Захарченко
(підпис, прізвище та ініціали)

Одеса - 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»
Науково-навчальний інститут автоматики та електромеханіки
Кафедра Електрообладнання і автоматики суден
Освітньо - кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність 271 – Морський та внутрішній водний транспорт
Спеціалізація 271.03 Експлуатація суднового електрообладнання і засобів
автоматики

Затверджую
 Зав. кафедрою  І. Івоздева
 „10” _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ КУРСАНТА

Чекерського Артема Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Дослідження процесів в інтелектуальній системі управління стабілізації курсу судна**

Керівник роботи Михайленко В.С., д.т.н., професор
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
 затверджені наказом по академії від „_____” _____ 2025 року № _____

2. Строк подання курсантом закінченої роботи _____

3. Вихідні дані до роботи: контейнеровоз Maersk Labrea ; суднова система моніторингу Aconis; гірокомпас, датчик куту повороту руля; рульова машина; нечіткий регулятор стабілізації курсу.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці) аналіз умов експлуатації суднови авторулевих, розробка математичної моделі системи управління курсом; розробка нечіткої САУ курсу судна; імітаційне моделювання та дослідження ефективності інтелектуальної системи стабілізації.

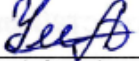
5. Перелік графічного матеріалу (з точними вказівками обов'язкових креслень). Презентація зі слайдами які відображають актуальність роботи, мету, гепотизу, наукову новизну, висновки та етапи розробки системи управління.

6. Консультанти по роботі, з вказівками розділів роботи, що до них відносяться

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис і дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА	Михайленко В.С., проф. каф ЕОіАС	5.05.25	15.08.25
РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ СТАБІЛІЗАЦІЇ КУРСУ	Михайленко В.С., проф. каф ЕОіАС	6.08.2025	16.11 2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СУДНА	5.05-5.06. 2025	
2	ОГРУНТУВАННЯ ТЕМИ	5.06 – 10.07	
3	РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСА УПРАВЛІННЯ КУРСОМ	10.07 -3.11.	
4	МОДЕЛЮВАННЯ САУ	3.10 – 10.12.2025	

Курсант-дипломник  Артем ЧЕКЕРСЬКИЙ
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи  Владислав МИХАЙЛЕНКО
 (підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра: 74 с., 3 табл.,
20 джерел,

Тема: «Дослідження процесів в інтелектуальній системі управління
стабілізації курсу судна »

Гіпотеза дослідження: впровадження нових моделей та методів інтелектуального управління курсом судна на основі апарату теорії нечіткої логіки може дозволити підвищити точність стабілізації курсу, адаптивність системи до змін зовнішніх умов (вітру, течій, хвилювання), а також знизити навантаження на оператора.

Метою роботи є розробка нечіткої системи стабілізацією курсу судна при впливі на об'єкт зовнішніх збурень.

Завдання дослідження:

- Провести огляд наукових публікацій з тематики дослідження;
- провести аналіз зовнішніх та внутрішніх факторів, що впливають на роботу авторульового судна;
- розробити нечітку базу знань, що складається з міркувань експерта – судноводія з ручного управління курсом судна;
- провести моделювання запропонованої САУ стабілізацією курсу та оцінити ефективність її ефективності при впливі зовнішніх збурень.

Об'єкт дослідження: система автоматичного управління процесом стабілізації курсу судна

Предмет дослідження: математичні моделі та нечіткі алгоритми системи управління авторульового судна.

Методи дослідження: математичне моделювання; терії нечіткої логіки; комп'ютерного експерименту, ідентифікації.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- вперше розраховані коефіцієнти аналітичної моделі вантажного судна як об'єкта керування курсом, запропоновані проф. Нумото. Модель першого порядку (Nomoto I) описує реакції судна з високим ступенем точності і може бути використана при синтезі системи авторульового управління з ПІД та нечіткими регуляторами;

- вперше отримані математичні моделі простору станів першого та другого порядку. В основі моделей лежить набір змінних станів, які описують внутрішній стан системи стабілізації курсу вантажного судна та її поведінку в часі. Також SSM моделі вантажного судна може включати зовнішні входи та обурення, що підвищує їхню достовірність для різних умов експлуатації систем управління курсом судна.

- удосконалена нечітка система управління стабілізацією курсів судна. Інтелектуальна система діє на основі алгоритму І. Мамдані та дозволяє враховувати досвід та знання експерта судноводія при прийнятті оперативних рішень в умовах сильного хвилювання на морі.

Практична цінність. Отримані результати можуть застосовуватися в адаптивних авторульових пристроях на морських та річкових судах.

У ході виконання роботи вперше отримано:

- програмний продукт – експертна система оцінки курсу судна залежно від зовнішніх умов.

Апробація результатів. Результати роботи було розглянуто на науково-технічній конференції молодих вчених «ІННОВАЦІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ В МОРСЬКОМУ ТА ВНУТРІШНЬОМУ ВОДНОМУ ТРАНСПОРТУ» НУ «ОМА» – 2025 р.

КУРС СУДНА, СТАБІЛІЗАЦІЯ, АВТОРУЛЬОВИЙ, НЕЧІТКИЙ РЕГУЛЯТОР, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

ABSTRACT

Master's thesis contains: 72 p., 3 table, 20 sources

Topic: “ **Research of processes in the intelligent ship course stabilization control system** ”

Research hypothesis: the introduction of new models and methods of intelligent ship course control based on the fuzzy logic theory can increase the accuracy of course stabilization, the system's adaptability to changes in external conditions (wind, currents, waves), and also reduce the load on the executive mechanisms.

The purpose of the work is to develop a fuzzy system for stabilizing the ship's course when exposed to external disturbances.

Research objectives:

- To review scientific publications on the topic of the study;
- To analyze external and internal factors affecting the operation of an auto-steering ship;
- To develop a fuzzy knowledge base consisting of the considerations of an expert - a ship's navigator on manual control of the ship's course;
- To simulate the proposed ACS for course stabilization and assess the effectiveness of its effectiveness when exposed to external disturbances.

Research object: system for automatic control of the ship's course stabilization process

Subject of research: mathematical models and fuzzy algorithms for the control system of an auto-steering ship.

Research methods: mathematical modeling; fuzzy logic theories; computer experiment, identification

The scientific novelty of the results obtained is as follows:

- for the first time, the coefficients of the analytical model of a cargo ship as an object of course control, proposed by Prof. Nomoto, were calculated. The first-order model (Nomoto I) describes the ship's reactions with a high degree of accuracy and

can be used in the synthesis of an autosteering control system with PID and fuzzy controllers;

- for the first time, mathematical models of the first and second-order state spaces were obtained. The models are based on a set of state variables that describe the internal state of the cargo ship's course stabilization system and its behavior in time. Also, the SSM of the cargo ship model can include external inputs and disturbances, which increases their reliability for various operating conditions of the ship's course control systems.

- an improved fuzzy ship course stabilization control system. The intelligent system operates on the basis of the algorithm of I. Mamdani and allows taking into account the experience and knowledge of the expert navigator when making operational decisions in conditions of strong waves at sea.

Practical value. The results obtained can be used in adaptive autosteering devices on sea and river vessels.

During the work, the following was first obtained:

- *software product* - an expert system for assessing the course of a vessel depending on external conditions. Testing of the results.

The results of the work were considered at the international scientific and technical conference «INNOVATIONS AND TECHNOLOGIES IN MARITIME AND INLAND WATERWAY TRANSPORT » of the National University "OMA" - 2025.

COURSE, STABILIZATION, AUTOSTEERING, FUZZY CONTROLLER, MATHEMATICAL MODEL

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	12
ВСТУП.....	13
1. ОГЛЯД НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ	14
1.1 Аналіз перспективних досліджень у галузі суднових авторульових	14
1.2 Режими управління та вимоги до авторулевих	17
1.3 Функції на пульті адаптивного авторульового керування контейнеровоза Maersk Labrea	22
2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛИ ОБ'ЄКТУ УПРАВЛІННЯ.....	30
2.1 Моделювання традиційних систем управління стабілізацією курсу судна.....	35
2.2 Математичні моделі судна як об'єкта керування курсом	36
3. РОЗРОБКА НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ КУРСУ СУДНА	43
3.1 Синтез структури нечіткого регулятора стабілізації курсу судна.....	43
3.2 Розробка нечіткої системи стабілізації курсу судна за впливу зовнішніх збурень	46
4. МОДЕЛЮВАННЯ НЕЧІТКОЇ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ КУРСУ СУДНА	61
4.1 Аналіз структури САУ стабілізації курсу судна.....	61
4.2 Імітаційне моделювання нечіткої та типової САУ стабілізації курсу судна	63
ВИСНОВКИ.....	70
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	71
Додатки.....	74

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АР – авторулевої

БЗ – база знань

ММ – математична модель

НЕС – нечітка експертна система

НЛК – нечіткий логічний контролер

САУ – система автоматичного управління

САУК – система автоматичного управління курсом

ВСУП

Інтелектуальні системи управління здатні аналізувати параметри руху судна в реальному часі, оцінювати відхилення від заданого курсу, прогнозувати зміни стану та приймати оптимальні рішення для зменшення похибок керування. Такі системи інтегрують у собі алгоритми самоадаптації та оптимізації, що дозволяє підвищити ефективність стабілізації та зменшити споживання енергії.

Метою дослідження є аналіз, моделювання та вдосконалення процесів у інтелектуальній системі управління стабілізацією курсу судна з урахуванням зовнішніх збурень і нелінійних характеристик об'єкта керування. Отримані результати можуть бути використані при розробці сучасних навігаційних комплексів і систем автоматичного керування для морських і річкових суден, що сприятиме підвищенню безпеки та економічності мореплавства [1].

1. ОГЛЯД НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Аналіз перспективних досліджень у галузі суднових авторульових

Усі судна морського транспортного флоту нині обладнуються системами автоматичного управління (САУ) курсом судна. Основним елементом САУ є прилад керування - авторулевий. При правильному налаштуванні авторулевої забезпечує зниження втрат ходового часу до 3% за рахунок більш точного утримання судна на заданому курсі та зменшення дії гальмівного корпусу і керма.

Кути перекладки керма при автоматичному керуванні на 20-30% менше, ніж при ручному. У 80-х роках 20 століття з'явився новий тип авторульового - адаптивний, що має автоматичне налаштування параметрів алгоритму управління при зміні зовнішніх умов плавання або швидкості судна. Це забезпечує оптимальний режим роботи системи без участі людини. Адаптивні авторулеві використовуються головним чином на великотоннажних суднах для поліпшення їхньої керованості [5].

Відповідно до міжнародних вимог система автоматичного управління курсом повинна забезпечувати [1]:

- перехід з ручного управління на автоматичне і навпаки, за допомогою не більше двох органів управління за час не більше 3 секунд при будь-якому положенні пера руля;
- перехід з автоматичного на ручне управління за будь-яких несправностей у системі автоматичного управління;
- фільтрацію сигналів керування для зменшення кількості кладок керма від нищпорення при хвилюванні;
- при переході з ручного керування на автоматичне авторулеве має автоматично вивести судно на заданий курс.

При стабілізації курсу морських середньотоннажних та великотоннажних суден діапазон зміни зовнішніх впливів та динаміки судна зазвичай потребують зміни алгоритму управління. У цьому режимі АР використовується параметрична адаптація. Такі АР відносяться до адаптивних САУ.

Огляд наукових публікацій:

Розвиток автономного судноплавства та використання інтелектуальних систем керування підвищує вимоги до точності та адаптивності авторулевих систем. Традиційні методи керування (PID, робастні алгоритми) часто не забезпечують необхідної стабільності у складних умовах — при зміні швидкості, курсу, хвильових та вітрових впливах. Тому сучасні дослідження зосереджені на створенні адаптивних та інтелектуальних систем стабілізації курсу, що здатні навчатися і змінювати параметри в реальному часі.

1. Класичні адаптивні PID-регулятори

Багато сучасних робіт присвячено вдосконаленню PID-регуляторів з адаптивним налаштуванням коефіцієнтів (Pham D.A. et al., 2023; Chen C., 2023). Такі системи враховують зміни динаміки судна та вплив зовнішніх збурень, що підвищує точність утримання курсу. Однак при значних нелінійностях ефективність PID-регуляторів знижується [3].

Підручник В. Л. Вагущенко, М. М. Цимбала — «Системи автоматичного управління рухом судна». Підручник з теорії й практики судових систем автоматичного управління детально описани: моделі судна, регулятори, алгоритми синтезу, питання моделювання і налаштування САУ курсу судна [4].

Дисертація В. А. Шевченка (Національний університет «Одеська морська академія») — тема «Удосконалення управління судових авторулевих систем» У публікаціях Шевченка А.А. зустрічаються роботи та конференційні матеріали, присвячені питанням управління курсом з комбінованими/перемикаємими регуляторами. Розглянуто практичні шляхи

підвищення якості управління технічними системами при експлуатації судна - методи підвищення швидкодії вимірювань, алгоритми регулюван [5].

2. Робастні та нелінійні методи адаптації

Дослідження Huang C. (2024) і Bertilsson T. (2022) показують ефективність адаптивних методів із зворотною лінеаризацією та алгоритмами оцінювання параметрів у реальному часі. Такі моделі дозволяють компенсувати невизначеність у гідродинамічних коефіцієнтах судна [7].

- Методи адаптивного динамічного програмування (ADP)

Методи ADP і навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning) використовуються для оптимізації витрат енергії при стабілізації курсу. Згідно з Abudu R. (2024), системи на основі ADP показують покращення паливної ефективності на 10–15% порівняно з класичними контролерами [8].

3.Інтелектуальні системи

- Нечіткі системи та нейро-нечіткі контролери

Застосування нечіткої логіки (Fuzzy Logic) у судових авторулевих системах досліджували Velagic J. (2003) та Sutton R. (1996). Такі системи ефективні при наявності невизначеності у зовнішніх впливах. Їх розвитком стали нейро-нечіткі системи (ANFIS), які автоматично налаштовують правила нечіткої логіки за допомогою нейронних мереж (Pham D.A. et al., 2023) [9].

- Застосування глибокого навчання

Сучасні дослідження інтегрують технології Deep Learning для прогнозування збурень та оптимізації траєкторії руху. Abudu R. (2024) описує системи, які об'єднують дані з декількох сенсорів (сенсорна фузія) та використовують глибокі нейронні мережі для формування керуючих дій. Проте такі системи мають проблеми сертифікації та пояснюваності рішень [10].

4.Практичні результати та експерименти

Вчени Chen C. (2023) та Bertilsson T. (2022) повідомляють про експерименти на модельних судах, де адаптивні та нейро-нечіткі системи показали зменшення коливань курсу на 20–30% порівняно з класичними рішеннями. Крім того, дослідження 2024 року (Huang C.) підтвердили, що

такі системи забезпечують більш плавне маневрування при хвильовому впливі [11].

Перспективи розвитку нечіткої логіки

Нечітка логіка одна із найперспективніших напрямів сучасної теорії управління. У порівнянні з традиційними САУ головні переваги систем, що базуються на нечіткій логіці, полягають у можливості:

- більш повного обліку неточностей і невизначеностей, властивих реальній системі, шляхом підбору відповідних лінгвістичних змінних та використання правил логічного висновку, що враховують досвід вирішення завдання управління людиною та знання експертів про об'єкт управління, виражені природною мовою;
- підвищення швидкодії процесів управління;
- вирішення завдань управління, що важко формалізуються методами традиційної математики;
- адаптацію системи при використанні в ній класичного ПД-алгоритму;
- підвищення ефективності фільтрації випадкових збурень під час обробки інформації (за певних умов схема з нечіткою логікою є універсальним апроксиматором, здатним у компактній формі представити будь-яку безперервну функцію);
- Зниження ймовірності помилкових рішень.

В даний час вже застосовуються на судах цивільного флоту високоефективні управляючі курсом системи, що серійно випускаються, засновані на нечіткій логіці. З них можна назвати авторулеві Navipilot AD II фірми Sperry Marine, NAVpilot 500 фірми Furuno [6].

1.2 Режими управління та вимоги до авторулевих

Стандарти АР визначено ІМО та національними класифікаційними товариствами. Загальні вимоги до АР та інших бортових електронних навігаційних засобів містяться в Резолюції ІМВ А.694(17) «Рекомендації щодо

загальних вимог до суднового радіобладнання, що є частиною GMDSS, та електронних навігаційних засобів», 1991. Вони стосуються оформлення пультів цих органів, розмірів до пультів цих засобів; працездатності за різних погодних умов і зміни параметрів електроживлення, до шумності, до випромінювання тощо. Цілком ці вимоги стосуються і авторулевим. Спеціальні вимоги до керуючого курсом систем звичайних та швидкісних суден встановлені відповідно до Резолюцій ІМО [7]. Експлуатаційні вимоги до АР висвітлені нижче.

Функціональність. Система, що керує курсом, спільно з джерелом інформації про курс, з урахуванням обмежень, що визначаються маневреними можливостями судна, повинна забезпечувати утримання судна на встановленому курсі при мінімальному навантаженні на кермовий привід. Вона може працювати у складі системи водіння по маршруту, використовуючи задається їй курс або поправку до курсу по відрізу маршруту.

В АР мають бути два види управління курсом: автоматичне та ручне. Авторульові повинні нормально працювати в діапазоні широт від 700N до 700S, при швидкостях повороту до 200/с, при швидкостях ходу від мінімальної маневреної до максимальної (для звичайних суден максимальна швидкість дорівнює 30 вузлів, для швидкісних – 70). Потрібно, щоб у з'єднанні з необхідними датчиками інформації в діапазоні перерахованих вище умов АР забезпечував стабілізацію курсу з точністю 20. АР повинен бути здатним виконувати зміни курсу судна в межах його поворотності шляхом встановлення радіусу або кутової швидкості повороту. Потрібно щоб вихід судна на намічений курс виконувався без істотного зарискування.

У режимі "Автомат" слід мати можливість виконання екстреного повороту судна на будь-який кут, аж до повної циркуляції. Після скасування команди екстреного повороту АР повинен забезпечувати повернення на колишній курс та подальше керування в режимі «Автомат». АР повинен бути здатним вручну або автоматично адаптуватися до різних характеристик керованості

судна на різних швидкостях, а також до зміни стану погоди та завантаження, та забезпечувати надійну роботу в часто зустрічаються та нормальних умовах експлуатації. В АР необхідно мати засоби, що запобігають зайвим включенням рульового приводу при нормальному нищпоренні на хвилюванні. У режимі "Автомат" має бути можливість обмеження кута перекладки керма. При цьому слід мати засоби, що вказують на встановлення та досягнення заданих обмежень. При керуванні курсом в інших режимах ця вимога також повинна виконуватись. Потрібно, щоб адаптивний авторулевий залишався працездатним при виході з блоку адаптації.

АР повинен сполучатися з відповідним курсовказівником, а також з датчиком швидкості судна, коли поворот задається радіусом, або коли параметри управління автоматично адаптуються зі швидкістю.

Перемикання режимів

Потрібно, щоб перехід з ручного на автоматичне керування і навпаки здійснювався за будь-якого положення керма за допомогою однієї ручної операції протягом 3 с. Для перемикання режимів слід мати один орган управління, який повинен розташовуватись так, щоб бути легко доступним для вахтового помічника. Органи керування АР необхідно розташовувати близько один до одного і пристрій відображення параметрів керування. З автоматичного режиму на ручний АР повинен перемикатися в будь-яких умовах, включаючи схему автоматичного керування.

У разі встановлення режиму «Автомат» АР повинен виводити судно на заданий курс. Не слід мати можливість іншої зміни заданого курсу, ніж судовим персоналом. За винятком задатчика курсу, жодні інші органи управління не повинні впливати на курс судна. Потрібно забезпечувати індикацію режиму керування, що задіяний в даний момент.

Сигналізація. Слід мати аварійну звукову з регулюванням та візуальну сигналізацію, яка повинна включатися при виході системи з ладу, або зниження напруги бортової мережі до рівня, що може позначитися на

безпечній роботі АР. Така сама сигналізація має спрацьовувати, коли дійсне відхилення від курсу перевищить допустиме.

Інтерфейс. Цифрове сполучення АР з датчиками інформації має задовольняти протокол ІЕС 61162, 1994 р., встановленому Міжнародною електротехнічною комісією.

Інструкції. Керуючу курсом систему слід постачати кваліфікованим описом її похибок, що є наслідком високої швидкості, прискорень, змін курсу, стану моря та помилок підключених до АР датчиків інформації.

Автоматичний режим у стандартних АР один. Він називається "Автомат" (англійською "Auto" або "Auto-fixed"). У ньому, якщо не проводиться ручне налаштування, коефіцієнти закону регулювання залишаються незмінними.

У *адаптивних АР* може бути кілька автоматичних режимів керування курсом: один без адаптації «Auto-fixed» і два або три адаптивні, що відрізняються критерієм оптимальності. Це може бути критерій безпеки, спрямований на забезпечення максимальної точності регулювання, та економічний – що передбачає мінімальну витрату ресурсів. Перший із цих режимів часто називають «Стиснуті води» (Confined waters), другий - "Відкрите море" (Open sea).

Деякі АР мають третій режим для підстроювання управління до умов шторму - «Штормові умови» (Rough sea). У режимі «Auto-fixed» АР регулює курс, використовуючи алгоритм із незмінною структурою та коефіцієнтами, деякі з яких можна підлаштувати вручну. У режимах адаптації при зміні зовнішніх та внутрішніх умов роботи АР самостійно змінює характер управління для забезпечення найкращої якості роботи за вибраним критерієм. У самонавчання АР додатково є адаптивний режим управління з навчанням.

Сучасні АР мають *режим тренажера*, в якому демонструється робота органів управління АР, режими та правила експлуатації, а також надається можливість тренування керування судном в умовах плавання, що імітуються. В АР частково чи повному обсязі реалізуються функції забезпечення цілісності:

самотестування, виявлення несправностей, сигналізація, діагностика роботи та неполадок, відновлення цілісності.

АР попереджають про перевищення заданої межі відхилення від курсу. У ряді випадків така сигналізація активується лише тоді, коли відхилення залишається неприпустимим протягом заданого часу (зазвичай можна встановити від 0 до 300 с).

Авторульові сигналізують про випадки припинення електроживлення схеми АР та рульового приводу. З використанням інформації двох компасів попереджають, коли різниця показань курсу перевищує допустиму. Якщо від зовнішніх датчиків перестає надходити інформація, то АР видає відповідні повідомлення, наприклад, Gyrocompass failure, Log failure та інші. Деякі АР при виході з ладу гірокомпас автоматично забезпечують підключення резервного курсовказівника. Окремі керуючі курсом системи контролюють рульову машину та сигналізують про неполадки у її роботі. Ряд АР попереджають судноводія, коли швидкість ходу виявляється нижче заданої межі (недостатня для впевненого управління судном кермом) і коли судно виходить на мілководді (вимірювана ехолотом глибина стає меншою за задану). Деякі АР мають так званий "watch alarm" для періодичних попереджень вахтового помічника про необхідність проконтролювати курс, коли АР працює в режимі "Автомат" [9].

Адаптивні АР виконують функції налаштування на оптимальний за вибраним критерієм режим роботи. Авторульові можуть мати і додаткові функції, такі, як корекція похибок флюкстейта компаса, коли він використовується як датчик курсу, реєстрації маневрів курсом та інші [7-10].

1.3. Функції на пульті адаптивного авторульового керування контейнеровоза Maersk Labrea

У роботі розглядається системи керування контейнеровоза Maersk Labrea місткістю 4988 контейнерів. Даний контейнеровоз відноситься до спеціалізованих суховантажних суден, з необмеженим районом плавання, та використовується для перевезення стандартних контейнерів (TEU) вантажем 20 та 45 тонн. Як головний двигун використовується двигун внутрішнього згоряння. Судно має один гребний вал та гвинт фіксованого кроку.

Загальна характеристика судна

Довжина	299 м;
Ширина	45,2 м;
Вантажопід'ємність	55487 т;
Кількість контейнерів	4988 шт.;
Швидкість	22.3 вуз.;
Осадка: 15 м;	
Кількість трюмів: 6.	
Район плавання:	необмежений;
Тип головного двигуна:	двохтактний дизель, реверсивний.

Схеми робочого місця судноводія з основним обладнанням для керування судном показано на рис.1.1 – 1.3.

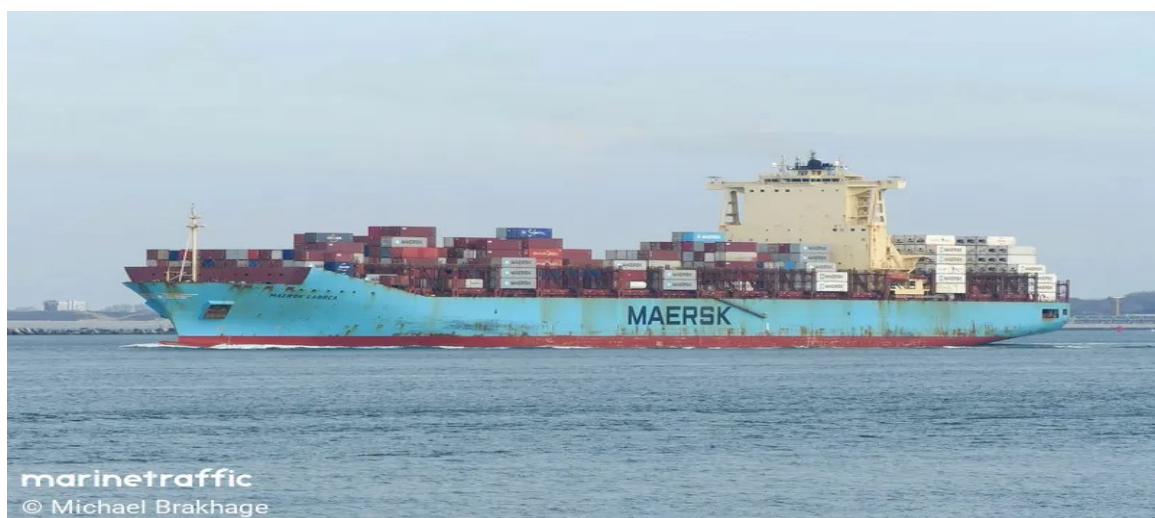


Рисунок 1.1 - Фотографія судна



Maersk Labrea

Deck Operating Manual

Illustration 1.1b Cargo Bay/Row Plan Arrangement

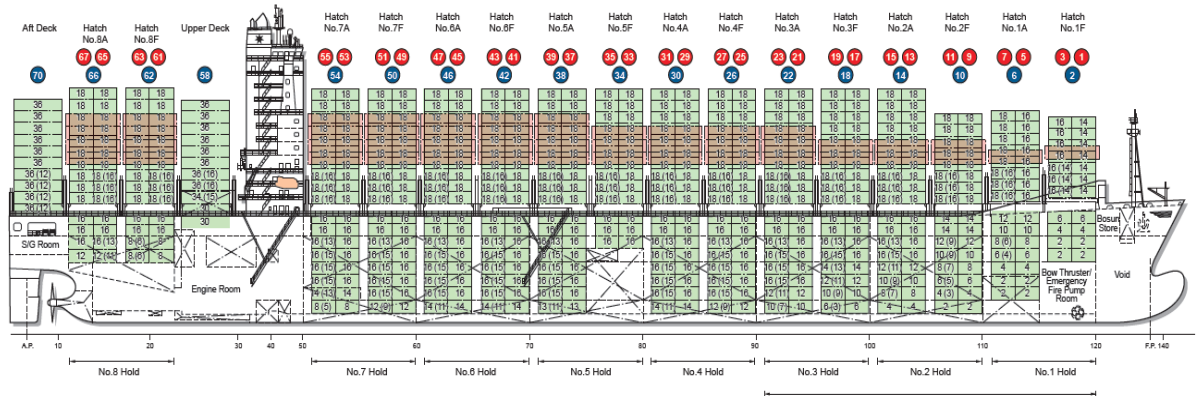


Рисунок 1.2. - Схема контейнеровоза Maersk Labrea



Maersk Labrea

Deck Operating Manual

Illustration 7.1b Bridge Main Consoles

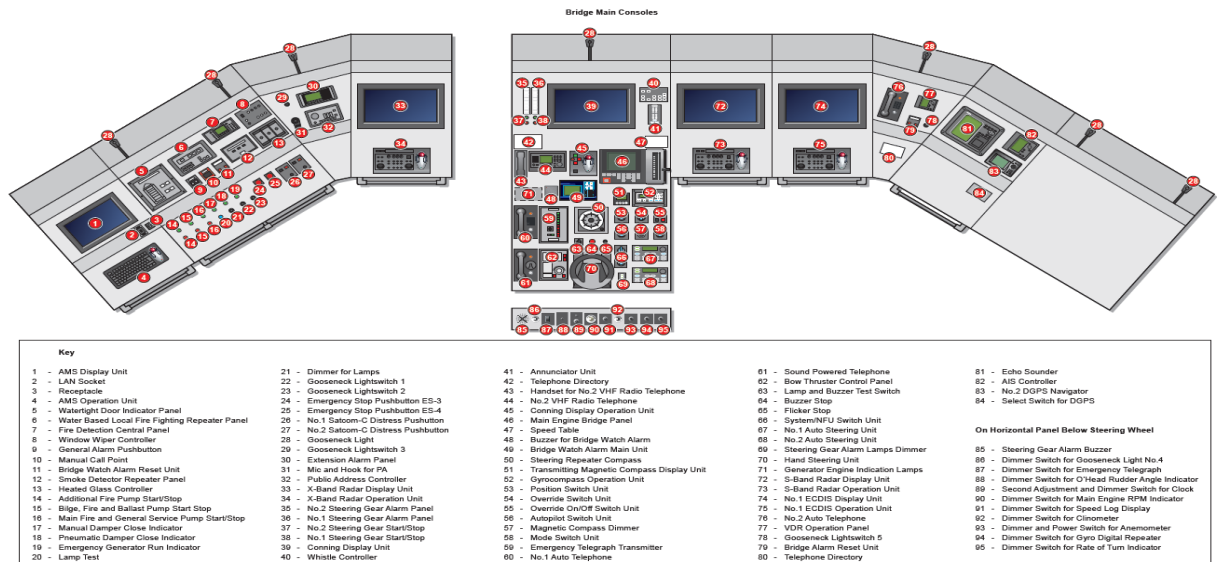


Рисунок 1.3 - Схема панелей управління на мостіку

На мостіку (рис.1.3) використовується адаптивний автопілот Yokogawa PM208 серії PT500A – це цифровий автоматичний рульовий блок, який має

функції автопілота, ручного та невідстежувального керування. Дві панелі керування розташовані на консолі маневрування. Блок автоматичного рульового керування складається з процесора для керування розрахунками, введення/виведення сигналів/даних та інтерфейсу людини-машини (НМІ), який підтримує функції налаштування та відображення. Входи автоматичного та ручного рульового керування підключені до блоків керування рульовим керуванням 1 та 2 через термінальний блок автопілота всередині консолі.

Термінальний блок автопілота має входи від ручного рульового керування, перемикача вибору автопілота, перемикача режимів автопілота, блоку сповіщення (сигнали керування), гірокомпаса та двох панелей адаптивного рульового керування автопілотом.

Релейний блок керування, підключений до термінального блоку всередині консолі, дозволяє оператору вибрати керування курсом автопілота, якщо це необхідно. Цей блок також має входи від комбінованого перемикача положення SYS/NFU та перемикача вибору FU/NFU на центральній консолі.

Вхідні дані для керування автоматичним рульовим керуванням:

- ECDIS (керування траєкторією)
- Журнал швидкості (200 пікселів/морських миль)
- Гірокомпас та/або магнітний компас

Вихідні дані для:

- Системи сигналізації містка
- Відеореєстратора (VDR)
- Системи керування рульовим керуванням 1 та 2

Блок автоматичного керування (адаптивний) PB 343

Два адаптивні блоки автоматичного керування розташовані на консолі маневрування містка і їх можна вибрати за допомогою перемикача. PB343 має 3 режими роботи: Економний, Точний 1 та Точний 2. Коли вибрано адаптивне керування, функція обмеження змінного керма напрямку активується через реле в адаптивному блоці автоматичного кермового керування. Мінімальна

швидкість встановлюється оператором. Якщо мінімальна швидкість, встановлена оператором, дорівнює або перевищується, або наказано рух назад, максимальний доступний кут керма напрямку змінюється. Максимальний кут керма напрямку становить $\pm 35^\circ$. Сигнали команди керма напрямку реєструються відеореєстратором (VDR).

Відображення даних

Параметри автоматичного керування можна вводити на панелі автопілота шляхом вибору потрібних даних за допомогою клавіш. Відображення різних встановлених даних та коефіцієнтів тривоги, розрахунки параметрів корпусу, та відображення результатів разом з іншими операціями полегшуються завдяки роботам 16-клавішних перемикачів та диска налаштування курсу. Кут повороту керма та швидкість повороту можуть відображатися у вигляді стовпчастої діаграми на екрані дисплея. Перемикачі дозволяють вибирати джерело курсу (гіроскоп або магнітний) для цілей автопілота.

Сигнали курсу подаються на автопілот з ECDIS через перемикач режимів керування у положенні NAVI (керування траєкторією). Коли автопілот підключено до сигналу магнітного компаса як допоміжного компаса, сигнал тривоги відхилення від курсу може бути виявлений магнітним компасом під час автоматичного керування. Магнітний компас виявляє, чи несправний гірокомпас, чи судно не рухається встановленим курсом, і лунає сигнал тривоги, щоб попередити оператора.

Зміна курсу під час автоматичного керування

Курс можна змінити під час автоматичного керування, натиснувши диск налаштування курсу або клавішу налаштування курсу. Після цього відбудеться автоматична зміна курсу відповідно до нового встановленого курсу.

Блок перемикача автопілота

Перемикач на консолі маневрування дозволяє вибрати автопілот 1 або 2.

Illustration 7.3.3a Gyrocompass Operation Unit

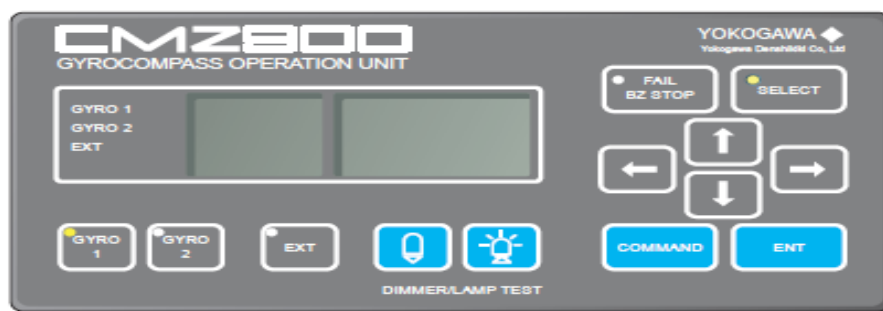


Рисунок 1.5. - Панель гірокомпасу

Основні характеристики та параметри авторульового [9]:

На панелі керування (рис. 1.3) розташовані три секції: режими керування, елементи повороту, ручні установки. Перемикачі режимів та функцій керування складаються із залежних кнопок з підсвічуванням, що підтверджують їхню активацію.

На секції режимів керування можна встановити режим керування курсом і режим керування маршрутом. Режимів управління курсом чотири (рис.1.6):

- ручний (Stand by);
- автоматичний без адаптації (Auto fixed);
- адаптивний для відкритого моря (Open sea);
- Адаптивний для стиснених вод (Confined waters).

Autopilot Panel



Рисунок 1.6 - Схема пульта адаптивного авторулевого Yokogawa PM208 серії PT500A

На секції ручних установок розташовуються органи завдання величин, використовуваних під час роботи АР. Вручну вводяться: швидкість (Speed, kt), глибина (Dpt, m), обмеження максимальної перекладки керма (Rud.limit), ступінь завантаження (Load, %), магнітне відмінювання (Mag.Var), допустиме відхилення від курсу (Off Course Alarm – Off C Alm) та від траєкторії (Tr.). Перелік цих величин відображається праворуч унизу дисплея кермового. Вибір значення параметра проводиться кнопками «Up», «Dn». Значення встановлюється за допомогою кнопок із горизонтальними стрілками. Якщо значення параметра надходить від датчика автоматично, на екрані воно відзначається буквою А.

На цій же секції розташований перемикач датчиків курсу, за інформацією яких може керуватися. Назва підключеного курсоуказателя відображається біля дійсного курсу HDG на екрані дисплея.

Екстрена зміна курсу в автоматичних режимах виконується за допомогою кнопок «ліво» та «право» функції «Dodge».

На дисплеї керма відображаються:

- дійсний курс (HDG),
- Заданий курс (HTS),
- Дійсна перекладка керма (Rudder angle),
- Задана перекладка керма (Rudder order),
- значення параметра функції повороту (Rate або Radius),
- Попередньо заданий курс проходження (Preset HTS),
- Відстань до точки повороту (Dist.to WP) та бічне відхилення від лінії маршруту (XTE) у режимі «NAV»,
- Значення параметрів, що використовуються під час роботи АР (список внизу праворуч),
- стан підключених до АР датчиків інформації (список внизу зліва).

До авторульового можуть підключатися: гірокомпас (Gyro), магнітний компас (Mg.C) (рис.1.7), приймач GPS/DGPS (GPS), навігаційно-

інформаційна система (ECDIS), ехолот (Sounder), лаг (Speed), датчик керма (Rudder), датчик напрямку швидкості.

Авторулевий працює за типовим ПІД – законом управління та у разі неефективного управління судноводій змінює настроювальні параметри ПІД – регулятора згідно з інструкцією або переходить на ручне управління. У зв'язку з можливістю впливу людського фактора на оператора пропонується удосконалення системи управління з введенням нечіткого регулятора [7].

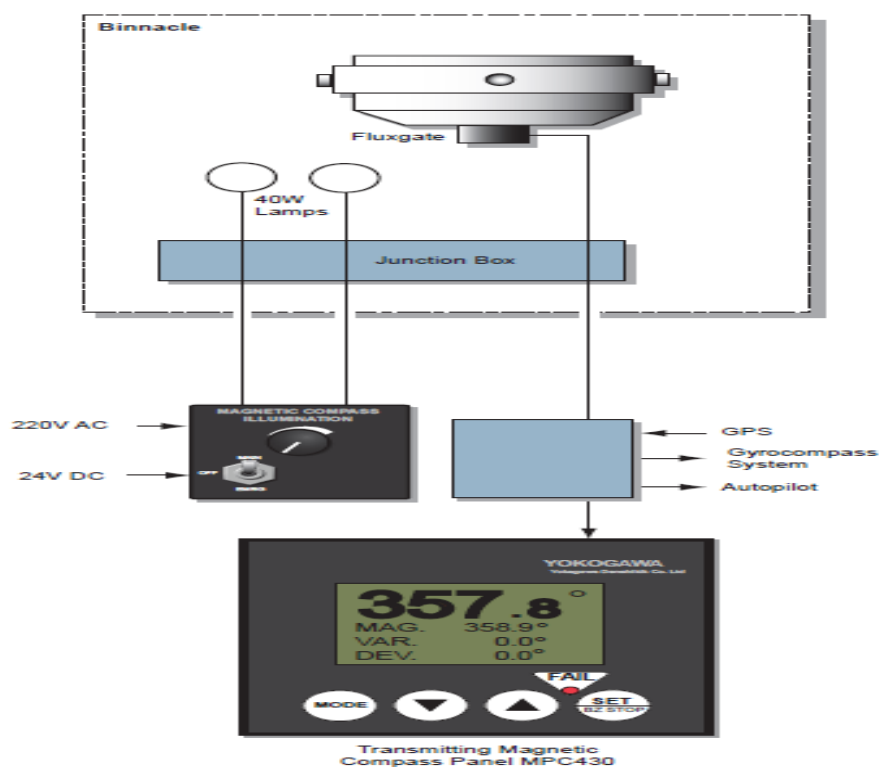


Рисунок 1.7 - Схема роботи магнітного компаса

Висновки по розділу

Сучасний розвиток технологій штучного інтелекту відкриває нові можливості для удосконалення систем автоматичного управління курсом судна. Традиційні авторулеві системи, що базуються на лінійних моделях і ПІД-регуляторах, мають обмеження у випадках, коли судно діє в умовах змінного навантаження, хвилювання, течій та вітру. У таких умовах

ефективним рішенням стає використання нейронних мереж, здатних до навчання, адаптації й самоорганізації.

Основні переваги та недоліки інтелектуальних технології для авторулевих систем на основі аналізу наукових публікацій:

1. Адаптивність — нейромережевий регулятор може автоматично змінювати свої параметри залежно від стану судна та зовнішніх умов, без ручного налаштування.

2. Нелінійне моделювання — на відміну від класичних методів, нейронна мережа може точно описати нелінійну динаміку судна, включаючи запізнювання, інерційність і вплив збурень.

3. Стійкість і робастність — нейромережеві авторулеві системи показують підвищену точність утримання курсу навіть у складних погодних умовах.

4. Можливість навчання на даних — мережа може навчатися як на історичних даних руху суден, так і в реальному часі під час експлуатації.

Основні проблеми:

- Складність валідації та сертифікації інтелектуальних систем.
- Високі вимоги до обчислювальних ресурсів.
- Необхідність забезпечення кібербезпеки в автономних суднах.

Подальші дослідження зосереджуються на створенні гібридних систем (поєднання класичних адаптивних регуляторів із штучним інтелектом), зниженні енергоспоживання та підвищенні надійності при автономному плаванні. Важливо також розробити міжнародні стандарти сертифікації інтелектуальних авторулевих.

2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТУ УПРАВЛІННЯ

2.1. Моделювання традиційних систем управління стабілізацією курсу судна

У завданнях судноводіння термін «судно» означає керований об'єкт, що включає корпус судна та засоби управління (силові засоби – СЗ). Судно має кілька СЗ. Вони перетворюють що надходять на їх вхід команди управління впливу на корпус, що забезпечують виконання цих команд. Елемент засобу управління, який безпосередньо створює керуючу силу, називається силовим органом. Значення параметра U роботи цього органу, що визначає величину на корпус, задає КС (людина або програма). СЗ по суті стежить за системою, що забезпечує рівність U значенням U_z , що задається. Враховуючи сказане, СЗ рухом судна можна подати схемою (рис. 2.1), де U та U_z – вектор параметрів роботи силових органів та значення, що задається; X – вектор параметрів руху судна.

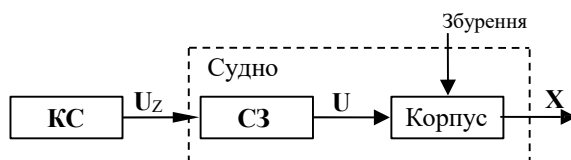


Рисунок 2.1. - Структурна схема системи управління рухом судна [7]

У сукупності АР, кермовий привід (РП) та судно утворюють систему автоматичного управління рухом судна за курсом (САУК), яка називається також системою «АР-судно». Її узагальнена схема показано на рис. 2.2. У цій системі АР виробляє сигнал U для переключок керма, необхідних при вирішенні поставленого завдання. РП посилює цей сигнал і перекладає кермо на величину U . Під дією бічної сили керма судно необхідним чином змінює курс. Основні завдання АР - стабілізація курсу та виконання поворотів. Для якісного їх вирішення значення U часто повинні вироблятися АР практично безперервно. Зазвичай АР формують сигнали управління за інформацією про

поточне значення курсу, швидкість його зміни та положення керма. Ці дані АР отримує компаса, показчика швидкості повороту, рульового датчика. Для поліпшення якості своєї роботи та адаптації до умов сучасні АР додатково використовують інформацію лага.

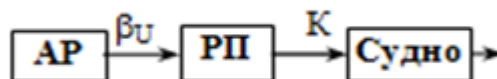


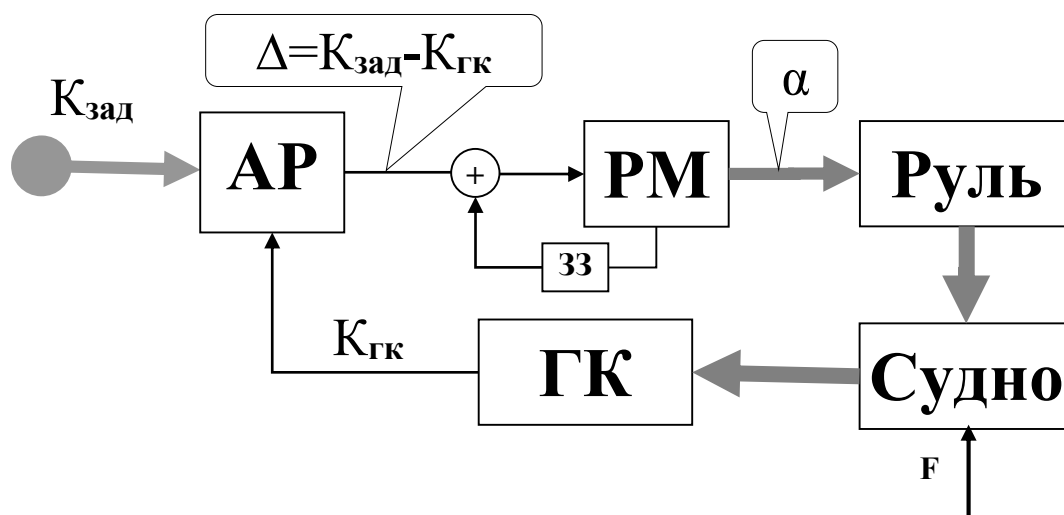
Рисунок 2.2 - Структурна схема авторулевого – судно

Основне завдання АР у режимі «Автомат» – стабілізація курсу судна.

Стабілізація курсу полягає у підтримці поточних значень кутової швидкості та курсу рівними цим значенням шляхом компенсації кермом відхилень від них, спричинених випадковими впливами (рис. 2.3). САУК при вирішенні цього завдання має [5]:

- вимірювати та підтримувати з необхідною точністю задане значення курсу на маневрених швидкостях;
- Виробляти мінімально можливу кількість включень РМ;
- забезпечувати мінімальне відхилення керма за амплітудою;
- Працювати стійко без автоколивань.

При стабілізації курсу використовується принцип управління з відхилення, який полягає у формуванні величини перекладки керма для утримання судна на курсі залежно від помилок управління ε та ψ . Вимірювачем курсу у системі є гірокомпас (ГК). Резервним датчиком курсу для середніх та великих суден (і основним для АР малих суден) може бути магнітний компас з дистанційною передачею показань та флюксгейт компас (Fluxgate compass), на показання якого не впливають прискорення на качці та при маневрах. Датчиком швидкості повороту (ДСП) зазвичай служить електронне або електромеханічне пристрій, що диференціює курс, або гіротахометр.



де $K_{\text{зад}}$ - курс, заданий судноводієм;
 $K_{\text{ГК}}$ - курс гірокомпасний (курс судна);
 α – кут перекладки пера керма;
 ЗЗ - зворотний зв'язок, пропорційна куту перекладки керма;
 АР – авторульовий;
 РМ - рульова машина (кермовий привід);
 F – зовнішні сили, що діють на судно.

Рисунок 2.3 - Структурна схема системи автоматичного керування курсом судна

Точність вимірювання кута та швидкості нищпорення повинна бути досить високою. Особливе значення точність вимірювання швидкості нищпорення має для нестійких на курсі судів, де від неї суттєво залежить похибка стабілізації курсу. Тому на великотоннажних малостійких і нестійких на курсі суднах для вимірювання швидкості нищпорення застосовують високочутливі гіротахметри. У САУК може застосовуватися комбінований датчик курсу і швидкості повороту, наприклад, волоконно-оптичний компас.

У більшості АР для стабілізації курсу, що знаходяться в експлуатації, застосовується ПД-регулятор (рис.2.3), що формує сигнал перекладки керма β_U за пропорційно-інтегрально-диференціальним законом:

$$\beta_U = k_P (k_\Delta \psi + k_D \dot{\epsilon} + k_I \int \psi \cdot dt); \quad (2.1)$$

где k_Δ , k_D , k_I – відповідно коефіцієнти пропорційного,

диференціального та інтегрального управління; k_P – масштабний коефіцієнт, званий "Руль". Зазначимо, що $\varepsilon = \dot{\psi}$.

В АР коефіцієнти k_Λ , k_I при експлуатації незмінні.

Перший коефіцієнт встановлений рівним одиниці, а другий вибирається при заводських випробуваннях з діапазону 0,01-0,04 і надалі не змінюється. Коефіцієнт «Руль» (Rudder) служить налаштування АР і вибирається у діапазоні 0,5-5,0. Для налаштування АР використовується зміни коефіцієнта k_D . Ця настройка називається "Контрруль" (Counter rudder). Гнучкий зворотний зв'язок запобігає виникненню коливань у РП при відпрацюванні переключки керма. На вхід ПД-регулятора (див. рис. 2.4) надходять значення ψ , ε .

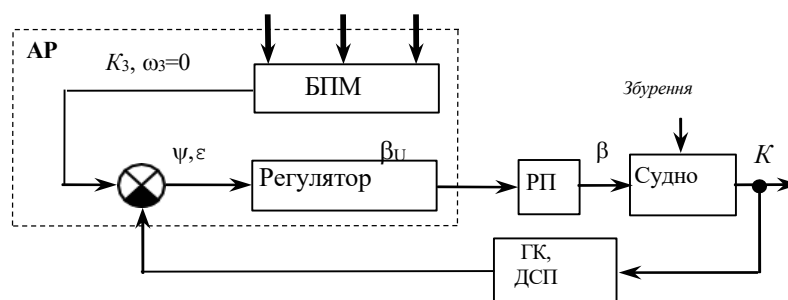


Рисунок 2.4. - Структурна схема управління з БМП

Залежно від них регулятор формує сигнал β_U , визначальний переключання керма. Він надходить у РП, посилюється і подається на серводвигун, керуючий насосами кермової машини. РМ повертає кермо. Сигнал про дійсну переключку керма β з рулевого датчика подається на компенсацію β_U . Коли β порівнюється з β_U , переключка керма припиняється. Таким чином, виходить, що:

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = k_1\psi + k_2\varepsilon + k_3 \int \psi \cdot dt \quad (2.2)$$

де $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – складові кладки керма; $k_1 = k_\Lambda k_P$, $k_2 = k_D k_P$

$k_3 = k_I k_P$ – коефіцієнти.

Охарактеризуємо призначення компонентів алгоритму (2.2), що використовується для стабілізації курсу судна.

Пропорційна куту нищпорення складова : $\beta_1 = k_1 \psi$ в

ПІД-алгоритме є основною. У разі відхилення судна від курсу вона викликає кладку керма, що повертає судно на курс. Значення k_1 залежить від коефіцієнта "Rudder". Збільшення k_1 зменшує час повернення судна до курсу при відхиленнях від нього, але збільшує коливність системи «АР-судно».

Диференційна складова $\beta_2 = k_2 \dot{\psi} = k_2 \epsilon$ служит для відомості до нуля похибки кутової швидкості ϵ .

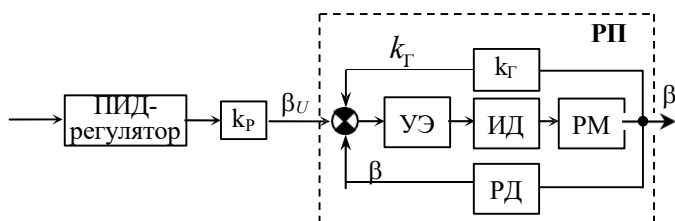


Рисунок 2.5. - ПІД-регулятор авторулевого з РП

Таким чином, ПІД-регулятори (пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори) успішно використовуються в системах авторулів для стабілізації курсу судна. Вони автоматично коригують положення рульового органу, зменшуючи відхилення від заданого курсу. Пропорційна складова регулює величину корекції залежно від поточного відхилення, інтегральна — усуває постійні помилки, а диференціальна — компенсує швидкі зміни та коливання, забезпечуючи плавну та точну стабілізацію курсу судна. Використання ПІД-регулятора дозволяє досягти високої точності і мінімальних коливань при автоматичному управлінні напрямком руху судна.

2.2. Математичні моделі судна як об'єкта керування курсом

Однією з найпоширеніших моделей опису руху судна на курсі є нелінійна модель Номото другого порядку [11]:

$$T_1 T_2 \ddot{\omega}_y + (T_1 + T_2) \dot{\omega}_y + \omega_y + H(\omega) = k_c (\beta + T_0 \dot{\beta}), \quad (2.3)$$

где $H(\omega) = c_2 \omega |\omega| + c_3 \omega^3$.

Компонентами $c_3 \omega^3$ та $T_0 \dot{\beta}$ як правило, нехтують розглядають модель у вигляді:

$$T_1 T_2 \ddot{\omega}_y + (T_1 + T_2) \dot{\omega}_y + \omega_y + c_2 \omega |\omega| = k_c \beta. \quad (2.4)$$

Нелінійна математична модель створює певні труднощі під час аналізу та синтезу систем автоматичного управління. Тому в більшості ситуацій при аналізі систем стабілізації курсу у нелінійним членом $H(\omega)$ в уравнении (2.3) нехтують. В результаті опис руху судна по кутовій швидкості стає лінійним.:

$$T_1 T_2 \ddot{\omega}_y + (T_1 + T_2) \dot{\omega}_y + \omega_y = k_c (\beta + T_0 \dot{\beta}). \quad (2.5)$$

Або у вигляді передавальної функції можна записати:

$$W(s) = \frac{\omega_y(s)}{s \cdot \delta(s)} = \frac{\varphi(s)}{\delta(s)} = \frac{k_c (T_0 s + 1)}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad (2.6)$$

где $\varphi(s)$ - курс судна, $\delta(s)$ - кут відхилення пера керма, T_0, T_1, T_2, k_c - динамічні параметри. Ця модель може бути спрощена та наведена до моделі Номото першого порядку:

$$W(s) = \frac{\varphi(s)}{\delta(s)} = \frac{k_c}{s(Ts + 1)}, \quad (2.7)$$

де $T \approx T_1 + T_2 - T_0$.

Модель кермової машини

На більшості суден перо керма має обмеження на максимальний кут повороту – 350 у кожену сторону. Облік цього чинника вводить нелінійність типу насичення в схему кермової машини. Крім того, швидкість повороту пера

керма обмежується до 50/сек в кожную сторону. Також система управління становищем керма, зазвичай, є стежить, тобто. в ній є зворотний негативний зв'язок. З урахуванням наведених обмежень модель рульової машини має вигляд, наведений на рис. 2.3.

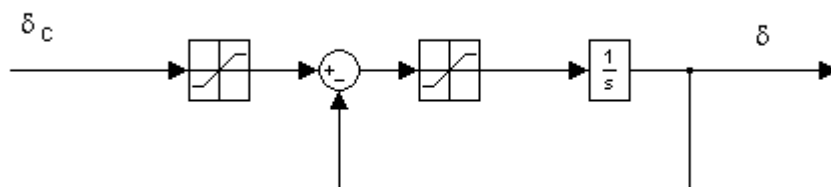


Рисунок 2.6. Модель кермової машини [12]

Математична модель рульової машини може бути представлена у вигляді наступного співвідношення:

$$\dot{\delta} = \text{Fun}(f(\delta_c) - \delta), \quad (2.8)$$

де δ_c - сигнал регулятора, $f(\cdot)$ - функція обмежувача пера руля (зона лінійності з обмеженням), $\text{Fun}(\cdot)$ - функція обмежувача швидкості повороту пера керма (залежно від типу кермової машини: або зона лінійності з обмеженням, як у першому випадку, або релейна характеристика із зоною нечутливості, як у другому випадку).

Модель зовнішнього середовища (збурення)

На судно тією чи іншою мірою діє вітрово-хвильове збурення, спричинене погодними умовами та хвилюванням моря. Моделі такого збурення можуть бути представлені у вигляді суми гармонійних складових (сильне та накладене на нього слабе морське хвилювання) та постійної складової (знос через вітер).

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega_1 \cdot t) + A_2 \sin(\omega_2 \cdot t), \quad (2.9)$$

де A_0 - постійна складова, A_1 , ω_1 - амплітуда та частота сильного морського волнення, A_2 , ω_2 - амплітуда та частота слабого хвилювання.

Нижче наведено класичні лінійні моделі судна та розрахунок значень параметрів для опису переходу від керуючого впливу (кут руля δ) к кінематичним змінним: кутова швидкість кільової осі (yaw rate) $r(t)$ и курсової

кут $\psi(t)$. Дано диференціальні рівняння в часовій області та відповідні передавальні функції першого та другого порядку із запізненням τ . Усі параметри підписані та наведені з конкретними чисельними значеннями для прикладу (типове вантажне судно середньої водотоннажності).

1. Модель першого порядку (Nomoto 1-го порядку) [12]:

Тимчасова форма (диференціальне рівняння) для кутової швидкості $r(t)$:

$$T \cdot dr/dt + r(t) = K \cdot \delta(t - \tau)$$

Передавальні функції (в операторі Лапласа, нульові початкові умови):

$$W(s) = r(s)/\delta(s) = K / (T s + 1) \cdot e^{-\tau s}$$

$$W(s) = \psi(s)/\delta(s) = K / (s (T s + 1)) \cdot e^{-\tau s} \quad (\text{тому що } \psi(s)=r(s)/s)$$

Позначення та одиниці:

$\delta(t)$ — кут руля (градуси), $r(t)=d\psi/dt$ — углова швидкість (градуси/с), $\psi(t)$ — курс (градуси). K — усиление (град/с на град), T — постійна часу (с), τ — затримка (с). Чисельні значення (приклад для середнього вантажного судна) згідно з дослідженнями [12]:

$$K = 0.08 \text{ (}^\circ/\text{s)} / \text{(}^\circ \text{ rudder)}, T = 80 \text{ s}, \tau = 5 \text{ s}.$$

Підставлені рівняння з чисельними коефіцієнтами:

$$80 \cdot dr/dt + r(t) = 0.08 \cdot \delta(t - 5)$$

$$W_{r(s)-\delta(s)} = 0.08 / (80 s + 1) \cdot e^{-5 s}$$

$$W_{\psi(s)-\delta(s)} = 0.08 / (s (80 s + 1)) \cdot e^{-5 s}$$

2. Модель второго порядку (Nomoto 2-го порядку)

Класична форма диференціального рівняння (включаючи два пасивні постійні часи):

$$T1 \cdot T2 \cdot d^2r/dt^2 + (T1 + T2) \cdot dr/dt + r(t) = K \cdot \delta(t - \tau)$$

Передавальні функції:

$$r(s)/\delta(s) = K / (T1 \cdot T2 s^2 + (T1 + T2) s + 1) \cdot e^{-\tau s}$$

$$\psi(s)/\delta(s) = K / (s (T_1 \cdot T_2 s^2 + (T_1 + T_2) s + 1)) \cdot e^{-\tau s}$$

Чисельні значення (приклад для того ж судна при більш точному описі динаміки):

$$K = 0.10 (^{\circ}/s) / (^{\circ} \text{ rudder}), T_1 = 10 \text{ s}, T_2 = 50 \text{ s}, \tau = 6 \text{ s}.$$

Підставлені рівняння з чисельними коефіцієнтами:

$$10 \cdot 50 \cdot d^2 r / dt^2 + (10 + 50) \cdot dr / dt + r(t) = 0.10 \cdot (t - 6)$$

$$500 d^2 r / dt^2 + 60 \cdot dr / dt + r(t) = 0.10 \cdot \delta(t - 6)$$

$$r(s)/\delta(s) = 0.10 / (500 s^2 + 60 s + 1) \cdot e^{-6 s}$$

$$\psi(s)/\delta(s) = 0.10 / (s (500 s^2 + 60 s + 1)) \cdot e^{-6 s}$$

Прив'язка до стану (State-space) - для моделі 1-го порядку (приклад):

Модель простору станів першого порядку - це математична модель, що описує динаміку системи за допомогою диференціальних (для безперервних систем) або різницевих (для дискретних систем) рівнянь першого порядку. В основі лежить набір змінних стану, які описують внутрішній стан системи та її поведінку у часі. Така модель універсальна і може бути застосована для систем з кількома входами та виходами. Математично модель простору станів зазвичай представлена набором диференціальних чи різницевих рівнянь першого порядку. Безперервне уявлення у часі задається рівняннями:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t),$$

де $x(m)$ вектор стану системи, $u(m)$ — входній вектор, $y(m)$ — вихідний вектор, а A , B , C та D є матриці, що визначають динаміку системи.

Параметри моделі:

A - Матриця системи.

B - Матриця входу.

C - Матриця виходу

D - Матриця обурень

Програма для розрахунку значень матриці моделі простору станів виконана в редакторі MatLab представлена нижче (розрахунок для моделей першого та другого порядків).

```
>> % Коефіцієнти чисельника
b = [0 0.08 0];
% Коефіцієнти знаменника
a = [0 80 1];

% Перетворення на простір станів
[A, B, C, D] = tf2ss (b, a);

% Висновок результатів
disp('Матриця A:');
disp(A);
disp('Матриця B:');
disp(B);
disp('Матриця C:');
disp(C);
disp('Матриця D:');
disp(D);
Матриця A:
    -0.0125

Матриця B:
         1

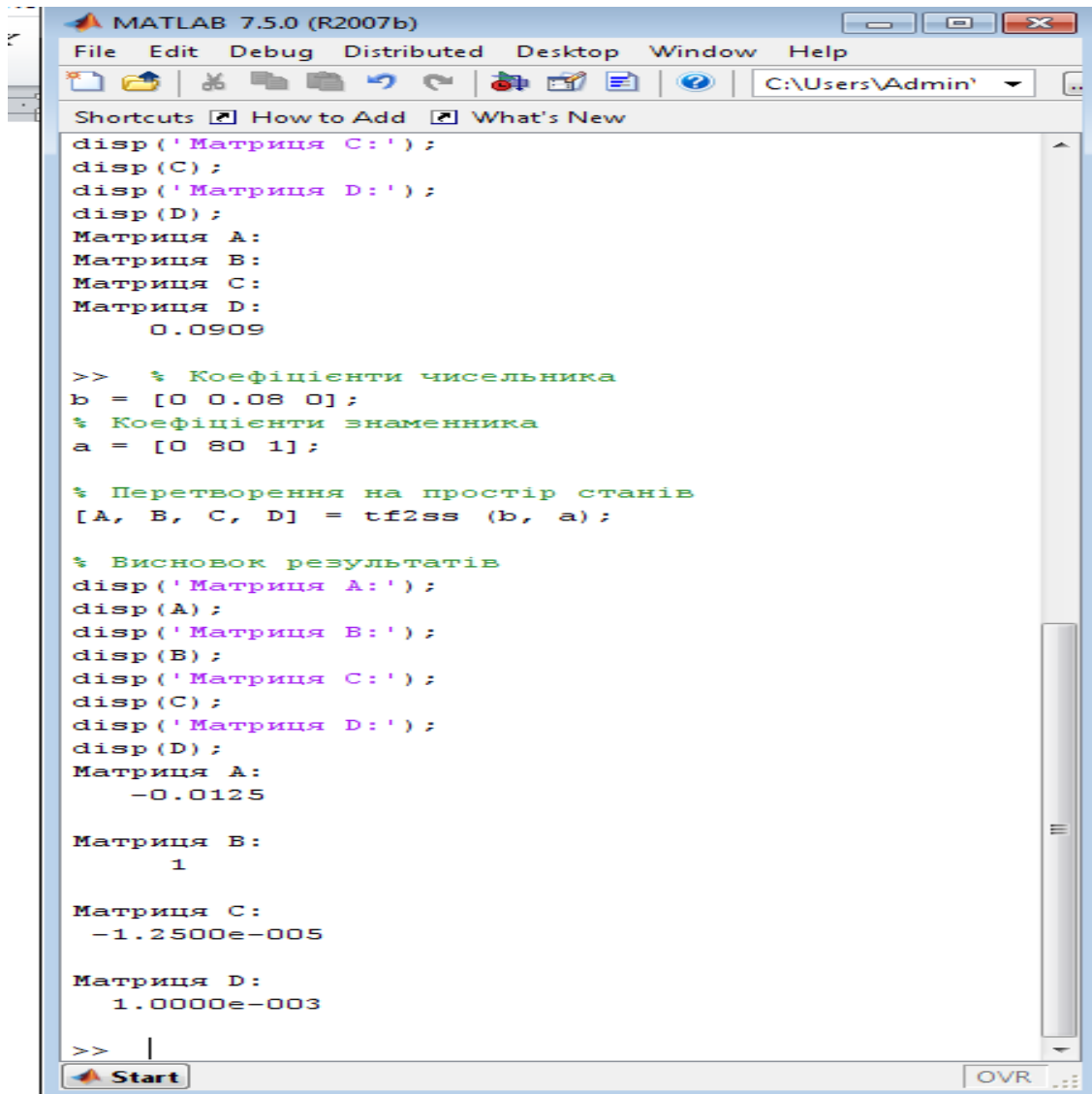
Матриця C:
   -1.2500e-005

Матриця D:
    1.0000e-003
```

Скриншот коду програми та результату показаний на рис. 2.7.

Однією з основних переваг моделей простору станів є їхня здатність обробляти багатопараметричні системи та фіксувати взаємодії між різними змінними станами. Вони надають уніфіковану структуру для моделювання як динаміки, так і виходів системи, що робить їх універсальними для різних

програм. Крім того, SSM можуть включати зовнішні входи та обурення, що підвищує їх застосовність у реальних сценаріях.



```

MATLAB 7.5.0 (R2007b)
File Edit Debug Distributed Desktop Window Help
Shortcuts How to Add What's New

disp('Матриця C:');
disp(C);
disp('Матриця D:');
disp(D);
Матриця A:
Матриця B:
Матриця C:
Матриця D:
    0.0909

>> % Коефіцієнти чисельника
b = [0 0.08 0];
% Коефіцієнти знаменника
a = [0 80 1];

% Перетворення на простір станів
[A, B, C, D] = tf2ss(b, a);

% Висновок результатів
disp('Матриця A:');
disp(A);
disp('Матриця B:');
disp(B);
disp('Матриця C:');
disp(C);
disp('Матриця D:');
disp(D);
Матриця A:
   -0.0125
Матриця B:
         1
Матриця C:
   -1.2500e-005
Матриця D:
    1.0000e-003

>>

```

Рисунок 2.7 - Скриншот програми

Для моделі другого порядку программа розрахунку представлена нижче.

$$W(s) = \{0.10\} \{500s^2 + 60s + 1\}$$

MATLAB код з коментарями

matlab

% Вихідні дані

num = [0.10]; % чисельник передавальної функції

```

den = [500 60 1]; % знаменник передавальної функції
% --- Перетворення у простір станів ---
[A, B, C, D] = tf2ss(num, den)
% --- Виведення отриманих матриць ---
disp('Матриця A = '), disp(A)
disp('Матриця B = '), disp(B)
disp('Матриця C = '), disp(C)
disp('Матриця D = '), disp(D)
% --- Створення об'єктів системи ---
sys_tf = tf(num, den); % передавальна функція
sys_ss = ss(sys_tf); % модель у просторі станів
% --- Побудова перехідної характеристики (ступінчаста реакція)
figure;
step(sys_ss);
grid on;
title ('Перехідна характеристика системи');
xlabel ('Час, c');
ylabel ('Вихід системи');
```


``` Очікуваний результат у MATLAB


```

Після виконання отримано такі матриці та криву розгона (рис.2.9):

$$A = \begin{bmatrix} -0.12 & -0.002 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [0.0002 \quad 0.0001], \quad D = 0$$

Рисунок 2.8 - Розрахунки програми значень параметрів моделі другого порядку

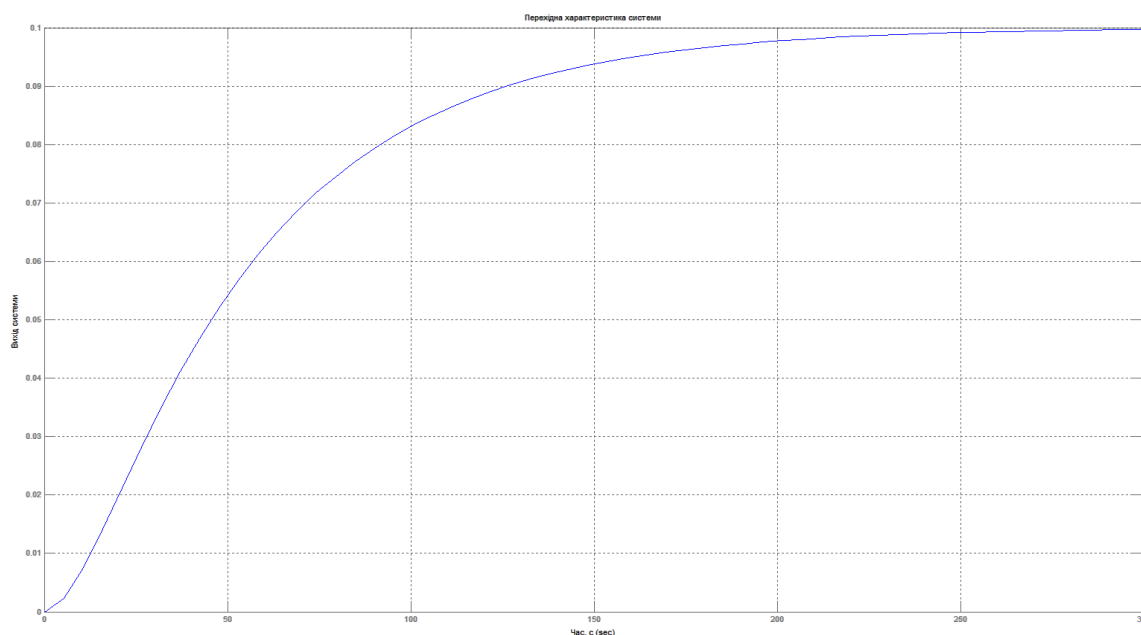


Рисунок 2.9 - Крива розгону моделі

Висновки по розділу

Модель першого порядку (Nomoto I) добре описує "повільні" судові реакції і часто використовується при синтезі автоматики кермового управління (PID, LQR з апроксимацією запізнення). Вона придатна, коли морська щогла/надбудови створюють відносно повільний відгук і коли нелінійності невеликі в робочому режимі.

Модель другого порядку (Nomoto II) дає більш точне апроксимування резонансних та інерційних ефектів судна і зазвичай використовується для оцінки стійкості компенсаторів курсу, особливо при проектуванні систем швидкої динаміки.

Значення K , T , T_1 , T_2 та τ залежать від форми корпусу, швидкісного режиму та завантаження судна. Наведені чисельні приклади – орієнтири; для конкретного борту потрібна ідентифікація за експериментальними даними (маневр «rudder step», «zig-zag» и пр.).

3. РОЗРОБКА НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ КУРСУ СУДНА

3.1. Синтез структури нечіткого регулятора стабілізації курсу судна

Сучасне суднобудування стрімко розвивається у напрямі автоматизації та інтелектуалізації процесів управління. Однією з ключових завдань під час руху судна є стабілізація його курсу — забезпечення стійкого руху заданої траєкторії при вплив зовнішніх збурень, як-от вітер, хвилі і течії. Традиційні системи управління, засновані на класичних ПД-регуляторах, поступово поступаються місцем інтелектуальним системам, здатним адаптуватися до умов, що змінюються, і навчатися в процесі експлуатації [11].

Інтелектуальне управління стабілізацією курсу базується на застосуванні алгоритмів штучного інтелекту, нейронних мереж та методів машинного навчання. Ці технології дозволяють судовій системі аналізувати великі обсяги даних з датчиків (гірокомпас, GPS, акселерометри, гіроскопи, датчики швидкості та положення керма) і виробляти оптимальні керуючі впливи на рульові приводи або пристрої, що підрулюють. На відміну від класичних систем, інтелектуальні алгоритми здатні враховувати нелінійність морського середовища, запізнення сигналів та невизначеність параметрів.

Одним із ефективних підходів є використання адаптивних нейромережових контролерів, які навчаються у реальному часі. Вони можуть коригувати керування при зміні маси, швидкості або розподілу навантаження на борту [12].

Крім того, впровадження нечіткої логіки (fuzzy logic) дозволяє приймати рішення в умовах неповної інформації за рахунок досвіду експерта судноводія. Це особливо важливо за умови навігації у складних погодних умовах. Однією з областей впровадження алгоритмів нечіткої логіки є завдання управління з високим рівнем невизначеності спричиненої тими чи іншими причинами (наприклад, завдання розбіжності суден, управління курсом у шторм і т.п.) де

застосування ПД та ПД - законів управління супроводжується суттєвими похибками.

Судно – нелінійний об'єкт і важко забезпечити високу якість виконання маневрів курсом за допомогою ПД - алгоритмів без адаптивної корекції сигналу управління. Особливо слід відзначити штормові умови. Якість роботи ПД-авторульових у цих умовах незадовільна, а в сильний шторм такі регулятори не справляються із завданням керування курсом. Для безпеки в умовах сильного шторму переходять на ручне управління. Для малих суден (рибальських, яхт і т.д.) цей недолік ПД-управління починає виявлятися вже при помірному хвилюванні. Цим пояснюється те що, що перші регулятори з нечіткою логікою для авторулевих було розроблено саме для невеликих суден [13].

Схема управління курсом судна (К), що реалізується за допомогою нечіткого контролера (НК), та діє за алгоритмом І. Мамдані, запропонована на рис.3.1.

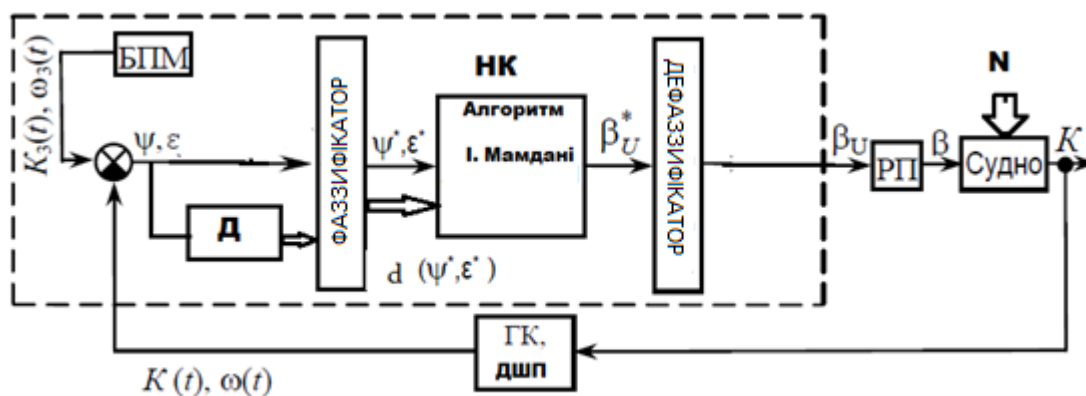


Рисунок 3.1. - Структурна схема нечіткої САУ стабілізації курсу судна
де: БМП – блок програми маневру (задатчик); Д – диференціатор (для визначення швидкості зміни помилок); РП – кермовий привід; ГК – гірокомпас; ДШП – датчик швидкості повороту; β - кут перекладки керма; Ψ - відхилення поточного курсу від заданого; ϵ - відхилення кутової швидкості; N - Зовнішні збурення.

Розглянуті вище етапи нечіткого виведення можуть бути реалізовані неоднозначним чином, оскільки включають окремі параметри, які повинні бути фіксовані або специфіковані. Тим самим вибір конкретних варіантів параметрів кожного з етапів визначає деякий алгоритм, який в повному об'ємі реалізує нечітке виведення в системах правил нечітких продукцій. До теперішнього часу запропоновано декілька алгоритмів нечіткого виведення. Ті з них, які найбільш часто застосовуються в системах нечіткого виведення, розглядаються нижче.

Алгоритм Мамдані (Mamdani)

Алгоритм Мамдані є одним з перших, який знайшов застосування в системах нечіткого виведення. Він був запропонований в 1975 р. англійським математиком Е. Мамдані (Ebrahim Mamdani) як метод для управління паровим двигуном. За своєю суттю цей алгоритм породжує розглянуті вище етапи, оскільки найбільшою мірою відповідає їх параметрам.

Формально *алгоритм Мамдані* може бути визначений таким чином [23].

- Формування бази правил систем нечіткого виведення. Особливості формування бази правил співпадають з розглянутими вище при описі даного етапу.
- Фазифікація входних змінних. Особливості фазифікації співпадають з розглянутими вище при описі даного етапу.
- Агрегація підумов в нечітких правилах продукцій. Для знаходження ступеню істинності умов кожного з правил нечітких продукцій використовуються бінарні нечіткі логічні операції. Ті правила, ступінь істинності умов яких відмінна від нуля, вважаються *активними* і використовуються для подальших розрахунків.
- Активізація підвисновків в нечітких правилах продукцій. Здійснюється по формулі (8.6), при цьому для скорочення часу виведення враховуються тільки активні правила нечітких продукцій.
- Акумуляція висновків нечітких правил продукцій. Здійснюється по формулі для об'єднання нечітких множин, відповідних термам підвисновків,

що відносяться до одних і тих же вихідних лінгвістичних змінних.

- Дефазифікація вихідних змінних. Традиційно використовується метод центру тяжіння або метод центру площі.

Системи нечіткого виведення призначені для перетворення значень вхідних змінних процесу управління у вихідні змінні на основі використання нечітких правил продукцій. Для цього системи нечіткого виведення повинні містити базу правил нечітких продукцій і реалізовувати нечітке виведення висновків на основі посилок або умов, представлених у формі нечітких лінгвістичних висловів.

Таким чином, основними етапами нечіткого виведення є:

1. Формування бази правил систем нечіткого виведення.
2. Фазифікація вхідних змінних.
3. Агрегація підумов в нечітких правилах продукцій.
4. Активізація або композиція підвисновків в нечітких правилах продукцій.
5. Акумуляція висновків нечітких правил продукцій.

3.2. Розробка нечіткої системи стабілізації курсу судна за впливу зовнішніх збурень

При визначенні якостей і властивостей стану об'єктів чи його сукупностей часто користуються словесними значеннями. Наприклад, дистанцію розбіжності судів вважають небезпечною та безпечною; час доби характеризують значення ранок, день, вечір, ніч; у похибках управління виділяють нульову, малу, середню, велику. У нечіткій логіці такі словесні значення називають термами, а назва об'єкта чи параметра, якого вони ставляться, - лінгвістичної змінної. Так у першому наведеному вище прикладі дистанція – це лінгвістична змінна з двома термами: небезпечна та безпечна. Вибір числа термів для тієї чи іншої, що вводиться в задачі управління лінгвістичною змінною, визначається особливостями задачі. Нижче, якщо

лінгвістична змінна – назва числового параметра x , то скорочено вона позначатиметься x^* , кількість її термів - n , а самі терми - x^* , x^* , ..., x^* , ..., x^* . Кожному терму відповідає певна кількість значень речовинного параметра x . Таблиці запропонованих терм – множин сведени в таблиці 3.1 – 3.2.

Таблиця 3.1 – Назви термів помилки управління

Номер терма	Код терма	Назва терма
1	NB	Negative big (Велика зі знаком «-»)
2	NM	Negative medium (Середня зі знаком «-»)
3	NS	Negative small (Мала зі знаком «-»)
4	ZE	Zero (Нульова)
5	PS	Positive small (Мала зі знаком «+»)
6	PM	Positive medium (Середня зі знаком «+»)
7	PB	Positive big (Велика зі знаком «+»)

Таблиця 3.2. –Правила системи логичного висновку

		Помілка e						
Помілка ε		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
	NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
	ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
	PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
	PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Нечітке управління (управління з урахуванням методів теорії нечітких множин) застосовується за умов недостатньої інформації про об'єкт управління, але за наявності досвіду управління ним. Воно особливо корисне в нелінійних системах, де ідентифікація є трудомісткою, а також ситуаціях, коли необхідно враховувати знання експерта. Приклади таких об'єктів включають

математичні моделі яких містять безліч емпіричних коефіцієнтів, що ускладнює їх ідентифікацію. Кваліфіковані оператори ефективно керують такими системами, ґрунтуючись на показаннях приладів та власному досвіді. Нечіткі регулятори (або нечіткі логічні контролери — *Fuzzy Logic Controllers*) особливо ефективні там, де система має нелінійну поведінку, невизначеність або важко піддається точному математичному опису. Це характерно для багатьох суднових об'єктів [16].

Система керування курсом судна (авторулевої)

- Нечіткий регулятор може враховувати зовнішні збурення (вітер, хвилювання, течії) та адаптувати керування.
- Вхідні змінні: відхилення від курсу, кут повороту стерна, швидкість судна.
- Перевага: стійка робота навіть при невизначеності гідрометеоумов.

Нечітка логіка в ПІД-регуляторах використовується, головним чином, двома способами: для розробки самого регулятора та налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора. Обидва підходи можуть застосовуватись одночасно в рамках одного ПІД-контролера (рис.3.2).

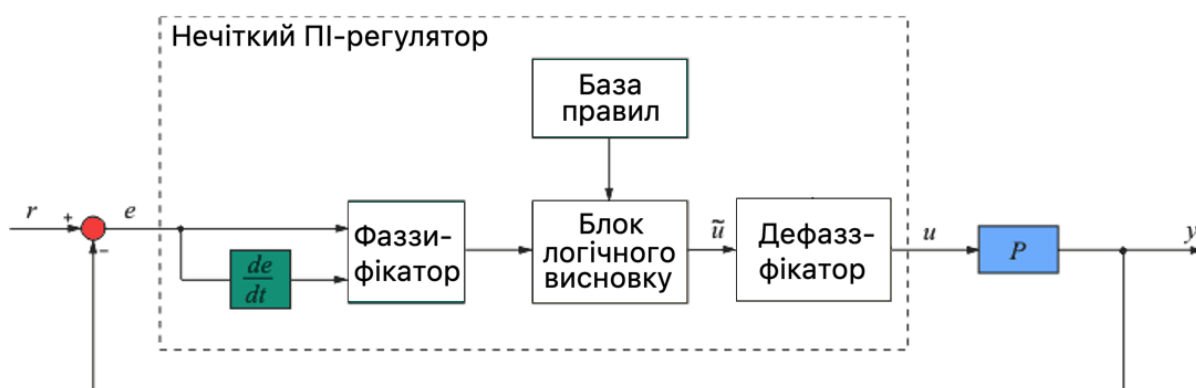


Рисунок 3.2 - Структура нечіткого ПІ-регулятора

На вхід регулятора надходить помилка, і навіть обчислюється її похідна за часом. Обидва значення спочатку піддаються фазифікації (перетворенню на нечіткі змінні). Потім отримані нечіткі змінні використовуються в блоці нечіткого логічного висновку для формування впливу, що управляє, на об'єкт.

Після цього виконується операція дефазифікації (зворотне перетворення нечітких змінних у чіткі), і на виході регулятора виходить вплив, що управляє.

На першому етапі синтезу нечеткого регулятора (НЛК) ми визначали значення входів і виходів системи (на входе сигнали ошибки (Ψ - відхилення поточного курсу від заданого) ; $\dot{\epsilon}$ - відхилення кутової швидкості, а на выходе угол перекладки руля) .

Процес підключення входів та виходів до бази правил у програмі Fuzzy Logic Toolbox показаний на рис. 3.4.\

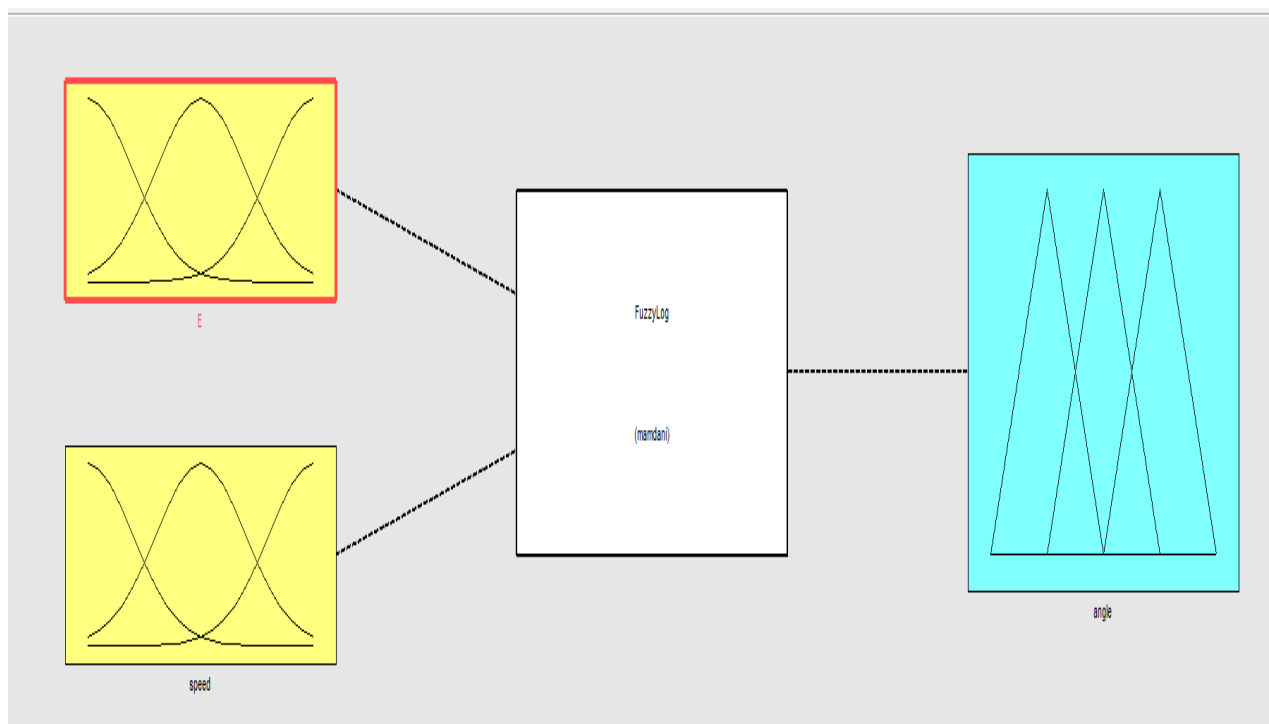


Рисунок 3.4 – Інтерфейс програми з розробки нечіткого регулятора

Далі проводиться етап фазифікації даних (рис. 3.5 – 3.9) У полі Range та Display Range встановимо діапазон зміни та відображення змінних і задаємо функції приналежності типу trimf для кожної змінної.

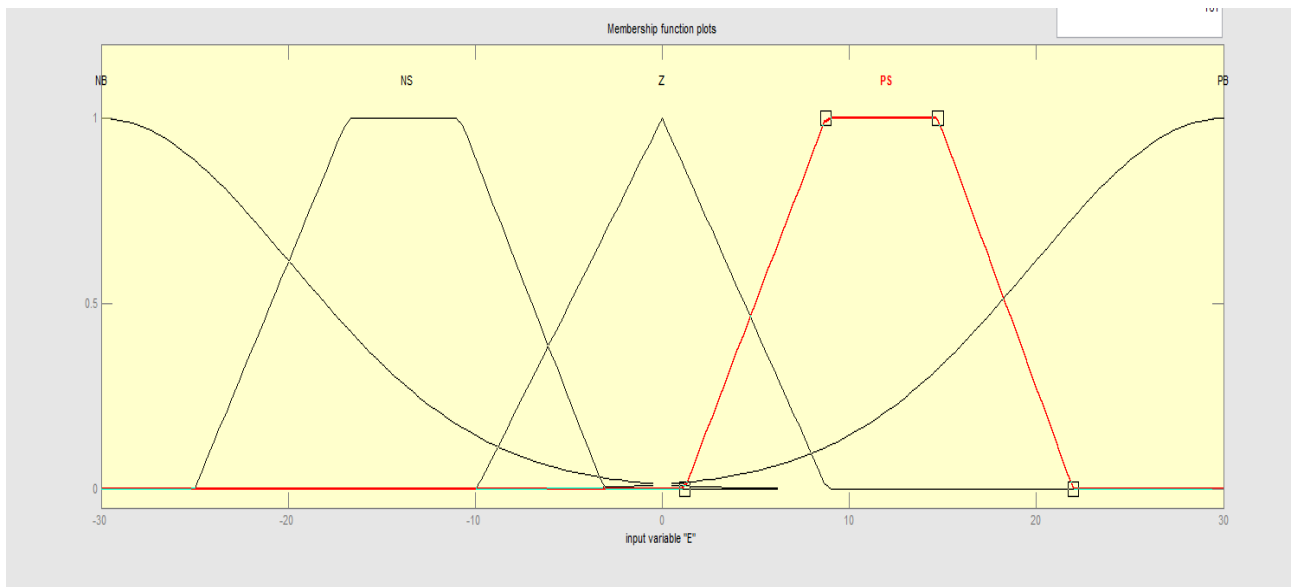


Рисунок 3.5 - Редактор функцій належності відхилення курсу

Наступний етап – це фазифікації другої входної змінної (см. рис. 3.5)

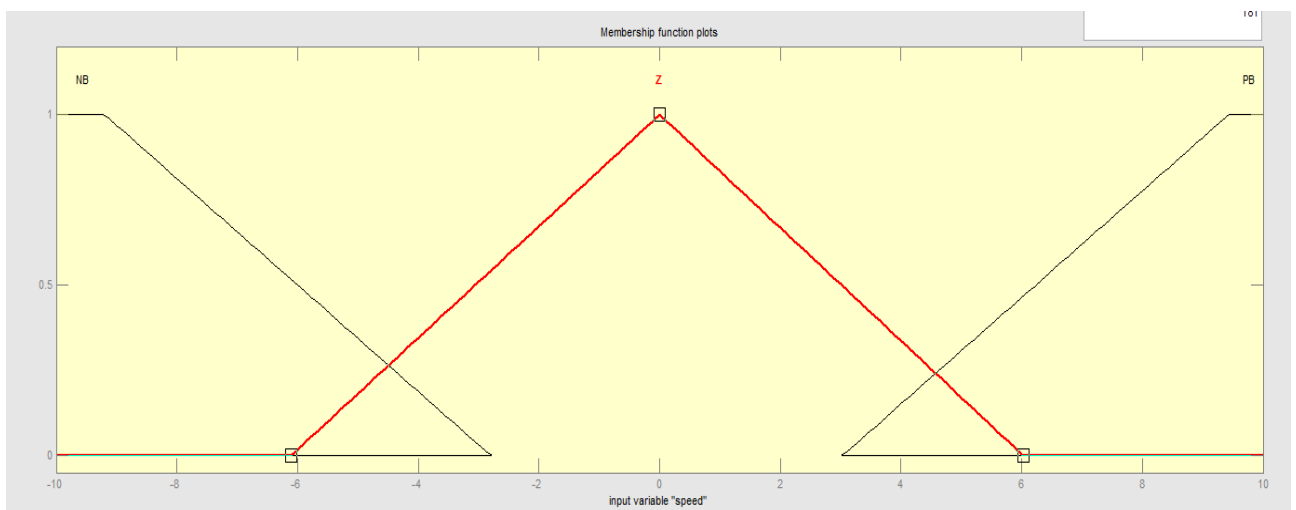


Рисунок 3.6 - Редактор функцій належності відхилення кутової швидкості судна

На рис. 3.5 – 3.6.. №1 - Z – образна (S), №2 – трикутна (M), №3 - S – образна функції належності (L).

Перша із цих функцій у загальному випадку може бути задана аналітично наступним вираженням [8]:

$$\mu_1(x, a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & b \leq x \end{cases}, \quad (3.1)$$

де a, b – числові параметри, що приймають дійсні значення й упорядковані відношенням: $a < b$. Для терм – множина «низька» й універсума $X = [0,5 \ 0,9]$ значення параметрів відповідно рівні $a = 0,5, b = 0,9$.

Аналітичне вираження «трикутної» функції належності записується в наступному виді:

$$\mu_2(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c < x \end{cases}. \quad (3.2)$$

Для трикутної функції належності терм – «середня», значення з універсума, що перебуває в інтервалі від 0,6, до 1,4, для $a = 0,6; b = 1; c = 1,4$.

Третя S – образна функція належності задається наступним вираженням:

$$\mu_3(x, a) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b \leq x \end{cases}. \quad (3.3)$$

Значення параметрів, відповідно, також рівні, $a = 1,1, b = 1,5$.

У випадку, представленою на рис 3.5, використався прямий метод визначення функції належності, коли експерт задає значення $\mu(x)$ для кожної підмножини. Як правило, прямі методи завдання $\mu(x)$ використовуються при вимірі фізичних величин.

Вихідні терми змінної кут перекладки керма показані на рис.3.7

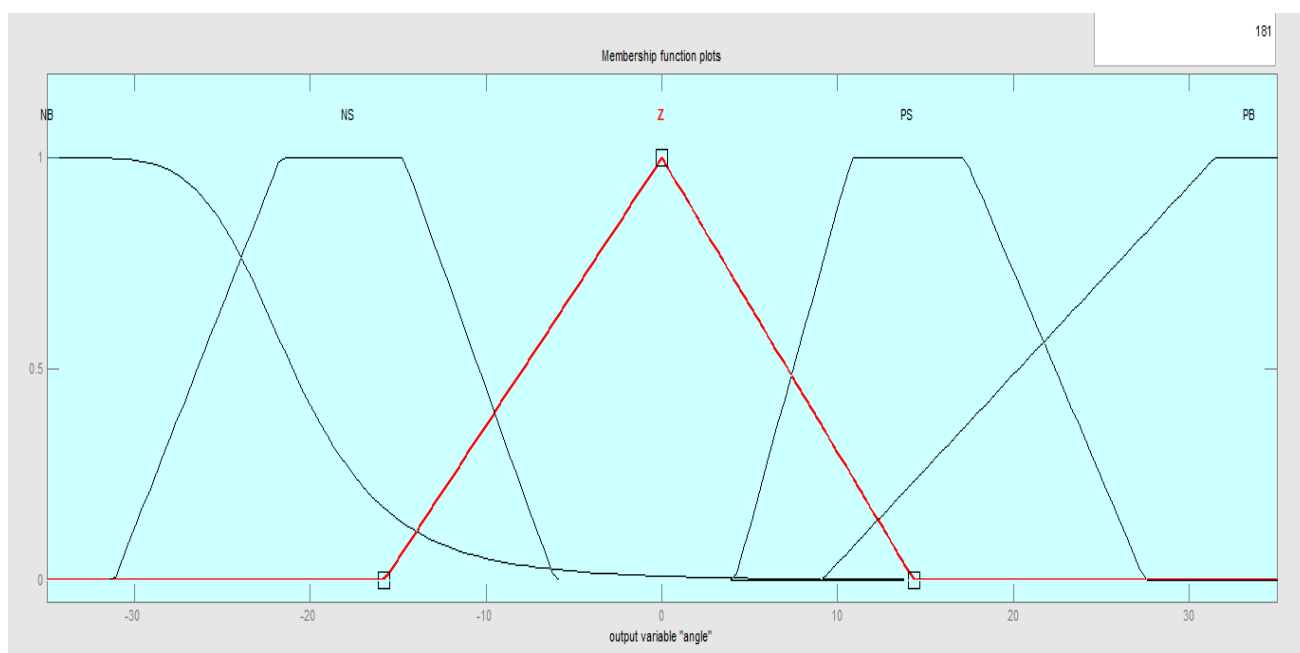


Рисунок 3.7. - Функції належності терм-множин вихідний змінної «кут перекладання керма»

Нечітка експертна система керування перекладкою руля судна (алгоритм Мамдані)

Розроблено приклад нечіткої експертної системи типу Мамдані для керування перекладкою руля судна. Система призначена для стабілізації курсу судна в ручному режимі керування. На вхід системи подаються два параметри: відхилення курсу від заданого ϵ та відхилення кутової швидкості (ψ). На виході формується кут перекладки руля (u).

6. Лінгвістичні змінні

- Вхід 1: Відхилення курсу ϵ (градуси) $\in [-30, 30]$
- Вхід 2: Відхилення кутової швидкості ψ (град/с) $\in [-10, 10]$
- Вихід: Кут перекладки руля u (градуси) $\in [-35, 35]$

7. Терми нечітких змінних

Для всіх змінних використовуються п'ять термів: NB (Negative Big), NS (Negative Small), Z (Zero), PS (Positive Small), PB (Positive Big).

8. Функції належності

Функції належності для вхідних та вихідних змінних визначаються трикутними та трапецеїдальними законами. Параметри вибрано таким чином:

Для e (помилка):

NB: $(-30, -30, -20, -10)$

NS: $(-20, -10, -5)$

Z: $(-8, 0, 8)$

PS: $(5, 10, 20)$

PB: $(10, 15, 30, 30)$

Для ψ (швидкість):

NB: $(-10, -10, -6, -3)$

NS: $(-6, -3, -1)$

Z: $(-2, 0, 2)$

PS: $(1, 3, 6)$

PB: $(3, 6, 10, 10)$

Для u (кут перекладки руля):

NB: $(-35, -35, -25, -15)$

NS: $(-25, -15, -7)$

Z: $(-10, 0, 10)$

PS: $(7, 15, 25)$

PB: $(15, 25, 35, 35)$

4. База правил експертної системи

1. ЯКЩО $e = \text{NB}$ І $\psi = \text{NB}$ ТО $u = \text{PB}$
2. ЯКЩО $e = \text{NB}$ І $\psi = \text{NS}$ ТО $u = \text{PB}$
3. ЯКЩО $e = \text{NB}$ І $\psi = \text{Z}$ ТО $u = \text{PS}$
4. ЯКЩО $e = \text{NB}$ І $\psi = \text{PS}$ ТО $u = \text{Z}$
5. ЯКЩО $e = \text{NB}$ І $\psi = \text{PB}$ ТО $u = \text{NS}$
6. ЯКЩО $e = \text{NS}$ І $\psi = \text{NB}$ ТО $u = \text{PB}$
7. ЯКЩО $e = \text{NS}$ І $\psi = \text{NS}$ ТО $u = \text{PS}$
8. ЯКЩО $e = \text{NS}$ І $\psi = \text{Z}$ ТО $u = \text{PS}$
9. ЯКЩО $e = \text{NS}$ І $\psi = \text{PS}$ ТО $u = \text{Z}$
10. ЯКЩО $e = \text{Z}$ І $\psi = \text{NB}$ ТО $u = \text{PS}$

11. ЯКЩО $e = Z$ І $\dot{\psi} = NS$ ТО $u = PS$
12. ЯКЩО $e = Z$ І $\dot{\psi} = Z$ ТО $u = Z$
13. ЯКЩО $e = Z$ І $\dot{\psi} = PS$ ТО $u = NS$
14. ЯКЩО $e = Z$ І $\dot{\psi} = PB$ ТО $u = NS$
15. ЯКЩО $e = PS$ І $\dot{\psi} = PB$ ТО $u = NB$
16. ЯКЩО $e = PS$ І $\dot{\psi} = PS$ ТО $u = NS$
17. ЯКЩО $e = PS$ І $\dot{\psi} = Z$ ТО $u = NS$
18. ЯКЩО $e = PS$ І $\dot{\psi} = NS$ ТО $u = Z$
19. ЯКЩО $e = PB$ І $\dot{\psi} = PB$ ТО $u = NB$
20. ЯКЩО $e = PB$ І $\dot{\psi} = PS$ ТО $u = NB$
21. ЯКЩО $e = PB$ І $\dot{\psi} = Z$ ТО $u = NS$
22. ЯКЩО $e = PB$ І $\dot{\psi} = NS$ ТО $u = NS$
23. ЯКЩО $e = PB$ І $\dot{\psi} = NB$ ТО $u = Z$

5. Алгоритм Мамдані

1. Фаззифікація – обчислення ступенів належності вхідних параметрів до лінгвістичних термів.
2. Застосування правил – для кожного правила визначається мінімум між ступенями належності.
3. Імплікація – усікання функції належності вихідної змінної на рівні активації.
4. Агрегація – об'єднання всіх вихідних функцій належності методом максимуму.
5. Дефаззифікація – обчислення центру тяжіння агрегованої функції належності (метод центроїда).

6. Приклад числового розрахунку

Приклад: $e = -23^\circ$, $\dot{\psi} = -7^\circ/\text{с}$.

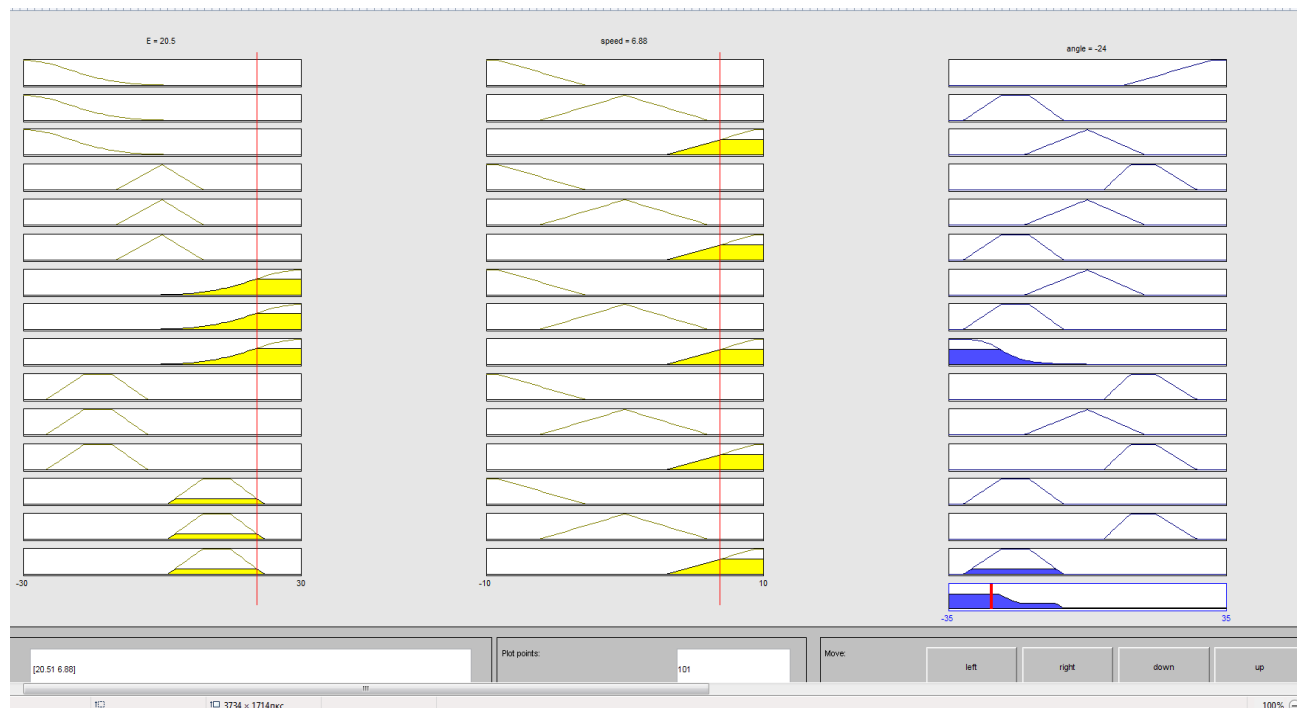
- Визначено належності: $\mu_E(NB)=0.8$, $\mu_E(NS)=0.2$; $\mu_R(NS)=0.67$, $\mu_R(NB)=0.33$.
- Активні правила: $(NB, NS \rightarrow PB)$ з $\alpha=0.67$, $(NB, NB \rightarrow PB)$ з $\alpha=0.33$, $(NS, NS \rightarrow PS)$ з $\alpha=0.2$.
- Після агрегації домінує терм PB на рівні 0.67 .
- Результат дефаззифікації: $u \approx +23^\circ$ — сильна перекладка руля вправо

Далі у програмі проходив процес формування бази знань виходячи з досвіду експертів та рекомендацій наукових публікацій [12-15] див рис.3.8 – рис. 3.11

1. If (E is NB) and (speed is NB) then (angle is PB) (1) 2. If (E is NB) and (speed is Z) then (angle is NS) (1) 3. If (E is NB) and (speed is PB) then (angle is Z) (1) 4. If (E is Z) and (speed is NB) then (angle is PS) (1) 5. If (E is Z) and (speed is Z) then (angle is Z) (1) 6. If (E is Z) and (speed is PB) then (angle is NS) (1) 7. If (E is PB) and (speed is NB) then (angle is Z) (1) 8. If (E is PB) and (speed is Z) then (angle is NS) (1) 9. If (E is PB) and (speed is PB) then (angle is NB) (1) 10. If (E is NS) and (speed is NB) then (angle is PS) (1) 11. If (E is NS) and (speed is Z) then (angle is Z) (1) 12. If (E is NS) and (speed is PB) then (angle is PS) (1) 13. If (E is PS) and (speed is NB) then (angle is NS) (1) 14. If (E is PS) and (speed is Z) then (angle is PS) (1) 15. If (E is PS) and (speed is PB) then (angle is NS) (1)	
If	and

Рисунок 3.8. - Фрагмент бази знань НЛК

Робота бази знань регулятора за зміни значень вхідних параметрів показано на рис. 3.9 – 3.11



Рисуно 3.9. - Логічний висновок БЗ

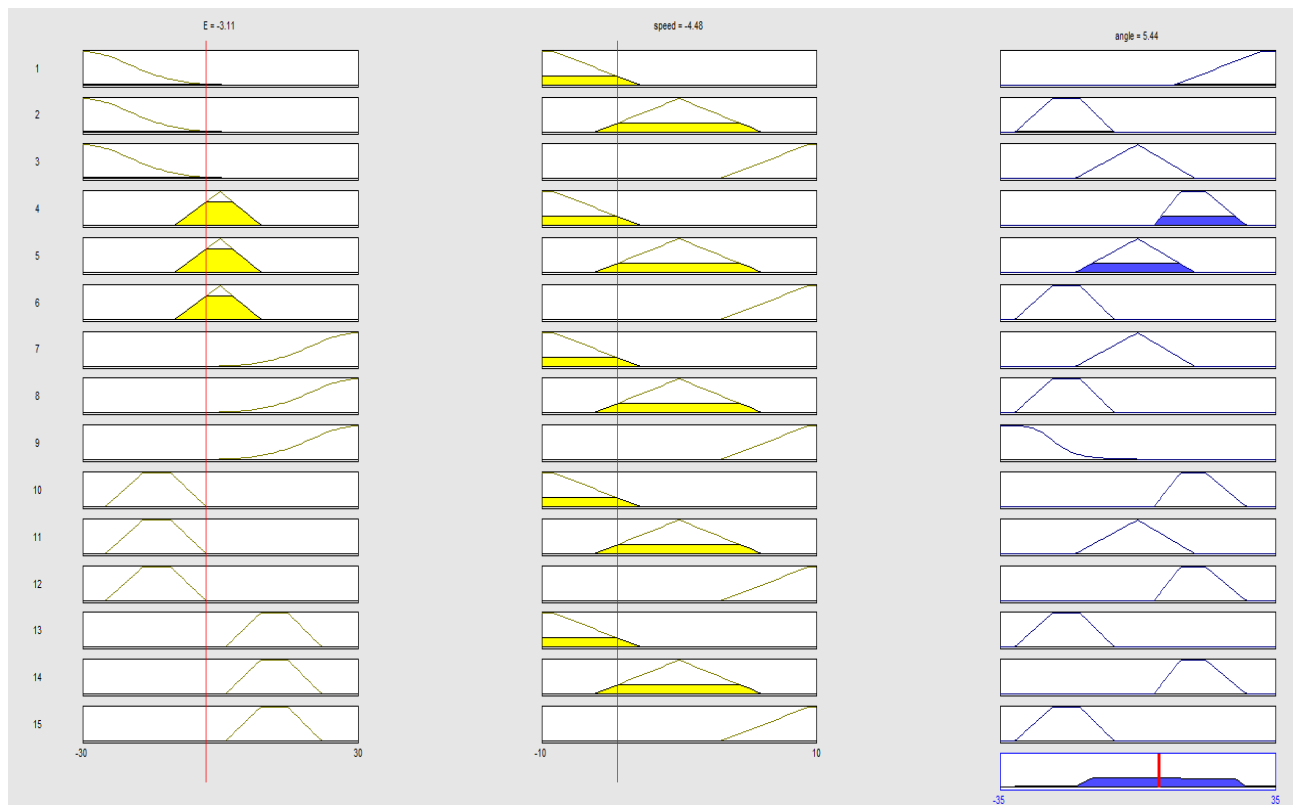


Рисунок 3.10 - Висновок при зміні умов

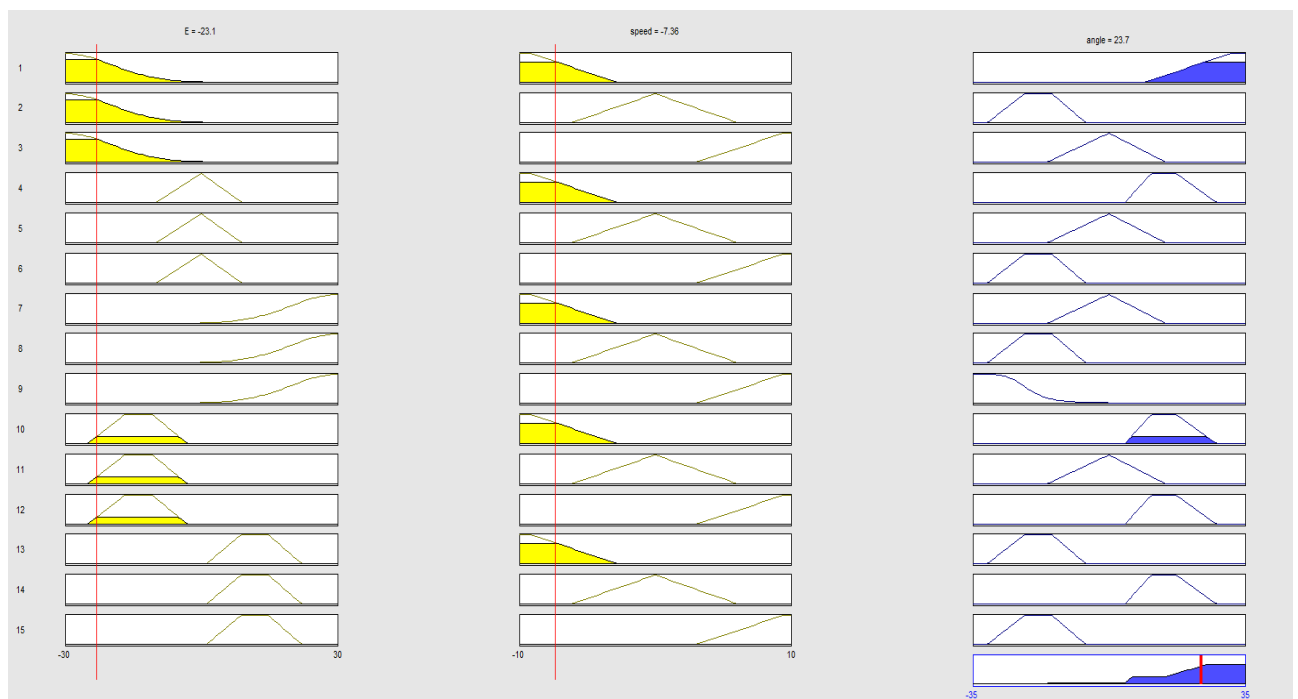


Рисунок 3.11- Перевірка розрахунку роботи системи (див. приклад числового розрахунку)

Таким чином, розроблена нечітка експертна система типу Мамдані забезпечує стабільне керування курсом судна. Вона дозволяє адаптивно формувати кут перекидки руля залежно від поточного відхилення курсу та швидкості повороту, забезпечуючи плавність і точність руху.

Для розробки експертної системи допомоги оператора СПК було використано програмну платформу гугл – колаб.

Google Colab (Google Colaboratory) – це безкоштовний хмарний сервіс для програмування на Python. Програма написана за допомогою інтелектуальних чат-ботів [14].

=== ЕКСПЕРТНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ РУЛЕМ СУДНА ===

Вхід: відхилення курсу (deg), відхилення кутової швидкості (deg/s)

Вихід: кут перекидки руля (rudder_angle, deg)

Автор: ChatGPT (приклад для Google Colab)

Коментарі українською мовою

```
def expert_rudder_control(error_course, error_rate):
```

```
    """
```

```
    Проста експертна система керування рулем судна.
```

```
    Використовує базові правила типу IF–THEN (як у нечітких системах).
```

```
    """
```

```
    === 1. Нормалізація вхідних даних ===
```

```
    Відхилення курсу обмежуємо в діапазоні [-30, +30]
```

```
    if error_course > 30:
```

```
        error_course = 30
```

```
    elif error_course < -30:
```

```
        error_course = -30
```

```
    Відхилення кутової швидкості [-5, +5] град/с
```

```
    if error_rate > 5:
```

```
        error_rate = 5
```

```
    elif error_rate < -5:
```

```
        error_rate = -5
```

```
    === 2. Правила експертної системи ===
```

Умовно задаємо п'ять лінгвістичних рівнів: сильне відхилення вліво/вправо, невелике, нуль.

Приклад: якщо судно сильно відхиляється вправо, а обертання праворуч швидке —

руль треба перекласти вліво, щоб компенсувати.

```
if error_course > 10 and error_rate > 1:
    rudder_angle = -25 # сильно вліво
elif error_course > 10 and error_rate < -1:
    rudder_angle = -15 # помірно вліво
elif error_course < -10 and error_rate < -1:
    rudder_angle = 25 # сильно вправо
elif error_course < -10 and error_rate > 1:
    rudder_angle = 15 # помірно вправо
elif abs(error_course) <= 3 and abs(error_rate) <= 0.5:
    rudder_angle = 0 # тримати руль прямо
else:
    Пропорційне регулювання при середніх відхиленнях
    rudder_angle = -0.8 * error_course - 2.0 * error_rate
```

=== 3. Обмеження фізичного кута руля ===

```
rudder_angle = max(-35, min(35, rudder_angle))
```

=== 4. Виведення результату ===

```
return round(rudder_angle, 2)
```

=== 5. Демонстраційна частина ===

```
def run_demo():
    print("=== Демонстраційний режим експертної системи ===")
    try:
        err_course = float(input("Введіть відхилення поточного курсу (°): "))
        err_rate = float(input("Введіть відхилення кутової швидкості (°/с): "))
        result = expert_rudder_control(err_course, err_rate)
        print(f"\nРекомендований кут перекладки руля: {result}°")
    except:
        print("Помилка введення! Введіть числові значення.")
```


=== Приклад запуску ===

```
run_demo()
```

=== Приклади автоматичних розрахунків ===

```
test_cases = [
    (15, 2),    Судно відхиляється вправо і продовжує крутитись вправо
    (-20, -3),  Судно відхиляється вліво і ще й крутиться вліво
    (5, 0.5),   Невелике відхилення
    (0, 0),     На курсі
    (12, -2)    Праве відхилення, але поворот компенсується
]
print("=== Тестові сценарії ===")
for e_c, e_r in test_cases:
    print(f"Δкурс={e_c:>5}°, Δω={e_r:>5}°/с → руль={expert_rudder_control(e_c,
e_r):>6}°")
```

```

Файл  Изменить  Вид  Вставка  Среда выполнения  Инструменты  Справка
Q Команды  + Код  + Текст  ▶ Выполнить все
[1] 0 сек.
# === 3. Обмеження фізичного кута руля ===
rudder_angle = max(-35, min(35, rudder_angle))

# === 4. Виведення результату ===
return round(rudder_angle, 2)

# === 5. Демонстраційна частина ===
def run_demo():
    print("=== Демонстраційний режим експертної системи ===")
    try:
        err_course = float(input("Введіть відхилення поточного курсу (°): "))
        err_rate = float(input("Введіть відхилення кутової швидкості (°/с): "))
        result = expert_rudder_control(err_course, err_rate)
        print(f"\nРекомендований кут перекладки руля: {result}°")
    except:
        print("Помилка введення! Введіть числові значення.")

# === Приклад запуску ===
# run_demo()

# === Приклади автоматичних розрахунків ===
test_cases = [
    (15, 2),    # Судно відхиляється вправо і продовжує крутитись вправо
    (-20, -3),  # Судно відхиляється вліво і ще й крутиться вліво
    (5, 0.5),   # Невелике відхилення
    (0, 0),     # На курсі
    (12, -2)    # Праве відхилення, але поворот компенсується
]

print("=== Тестові сценарії ===")
for e_c, e_r in test_cases:
    print(f"Δкурс={e_c:>5}°, Δω={e_r:>5}°/с → руль={expert_rudder_control(e_c, e_r):>6}°")

...
=== Тестові сценарії ===
Δкурс= 15°, Δω= 2°/с → руль= -25°
Δкурс= -20°, Δω= -3°/с → руль= 25°
Δкурс= 5°, Δω= 0.5°/с → руль= -5.0°
Δкурс= 0°, Δω= 0°/с → руль= 0°
Δкурс= 12°, Δω= -2°/с → руль= -15°

```

Рис. 3.11. Скриншот коду програми (експертної системи) рекомендацій судноводію при ручному управлінні стабілізації курсу судна

Висновки з розділу

Таким чином, розроблена нечітка експертна система типу Мамдані забезпечує стабільне керування курсом судна. Вона дозволяє адаптивно формувати кут перекидки руля залежно від поточного відхилення курсу та швидкості повороту, забезпечуючи плавність і точність руху.

Застосування інтелектуальних систем стабілізації курсу підвищує безпеку та економічність судноплавства. Знижується витрата палива за рахунок оптимального використання кермового пристрою, зменшується знос механізмів, покращується комфорт екіпажу та пасажирів. У перспективі такі системи стануть невід'ємним елементом автономних та безпілотних суден, забезпечуючи їм стійке та точне проходження маршруту без постійної участі людини.

4. МОДЕЛЮВАННЯ НЕЧІТКОЇ АДАПІВНОЇ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ КУРСУ СУДНА

4.1. Аналіз структури САУ стабілізації курсу судна

Класичним завданням управління рухом судна є його стабілізація на заданому курсі. Утримання судна на заданій траєкторії здійснюється шляхом вироблення тим чи іншим способом поправок до заданого курсу, який належить рівним курсовому куту ділянки траєкторії, та стабілізації на цьому відкоригованому курсі. При цьому необхідно досить точне знання про його модель і для синтезу якісної системи керування потрібно розв'язати задачу параметричної ідентифікації [7]. Похибки апіорних уявлень про модель руху судна можуть суттєво вплинути на поведінку судна у процесі управління. Точності такого управління може бути недостатньо в умовах високої інтенсивності руху, де може призвести до небезпечних зближень судів [8; 9]. Навіть якщо модель руху судна добре ідентифікована при випробуваннях, її характеристики можуть значно змінюватися в процесі експлуатації (зміна геометрії корпусу, утворення наростів на корпусі, зміна водотоннажності тощо).

Перспективним шляхом підвищення якості управління є включення до системи управління пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД, proportional-integral-derivative, PID) регулятора, що реалізує управління з відхилення курсу, інтеграла від цього відхилення та похідної від нього [4; 5]. Уточнюючи (ідентифікуючи) модель руху об'єкта та налаштовуючи параметри регулятора в рамках єдиного процесу в режимі реального часу матимемо замкнуту систему керування судном, яка адекватно реагує на зміни параметрів моделі його руху.

У розділі розглядається завдання управління курсом руху судна без урахування зовнішніх перешкод. Керуюча дія здійснюється за допомогою

кермового пера. Критерієм якості, відповідно до усталеної традиції [3], є мінімізація часу виконання повороту судна та кількості переключень керма.

Залишаючись у рамках традицій, як модель руху судна використовуватимемо модель Номото другого порядку [10], що має вигляд:

$$T_1 T_2 \dot{\omega} + (T_1 + T_2) \dot{\omega} + \omega = K (\delta + T_0 \dot{\delta}), \quad (4.1)$$

де коефіцієнти T_0 , T_1 , T_2 , K – константи;

ω – кутова швидкість судна (швидкість ристання); δ – кут повороту пера руля.

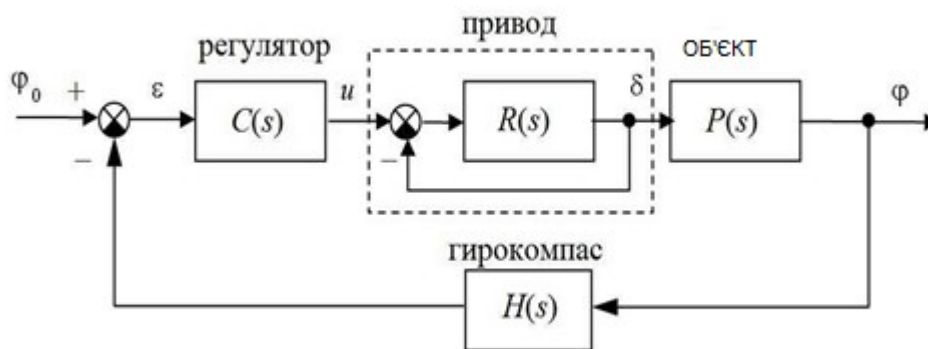


Рисунок 4.1. - Схема САУ управління курсом судна

Приймемо для подальшого моделювання, що система керування судном складається з регулятора, приводу та гірокомпаса і має структуру, показану на рис. 4.1.

На вхід системи керування курсом судна (рис. 4.1) подається бажаний курс – ϕ_0 . Різниця фактичного курсу ϕ и баженого ϕ_0 є відхилення ϵ . Регулятору необхідно виробити керуючий вплив u мінімізувати це відхилення. На основі керуючого впливу u , привід здійснює зміну положення пера керма δ , цим змінюючи курс судна.

Для вимірювання кута нищпорення використовується гірокомпас, математична модель якого записується у вигляді аперіодичного ланки першого

порядку. Таким чином, представлення схеми САУ можна буде промодельовати в наступному підрозділі.

4.2. Імітаційне моделювання нечіткої та типової САУ стабілізації курсу судна

В процесі моделювання, у програмному забезпеченні «**MatLab**», у командній строці прописуємо - Simulink та натискаємо Enter, і після цього у відкритимому вікні обираємо - create model, після цього переходимо у - library browser, та обираємо необхідні нам елементи, а саме:

- Завдання 1 (in): Задана чи вхідна величина.
- Суматор: Блок підсумовування, де обчислюється помилка, як різниця між вхідним сигналом та виходом системи.
- PID Controller 1: Пропорційно-інтегрально-диференціальний (PID) контролер, який керує сигналом регулювання.
- Gain: Підсилювальний блок.
- Object 1: Об'єкт управління з функцією передавання
- Delay: Блок затримки.
- Out 1: Вихідний сигнал системи.
- Scope: віртуальний монітор, для перегляду отриманих результатів

Змінюємо налаштування суматора, замінивши останній «+» на «-» та натискаємо apply і ok. (рис.4.2)

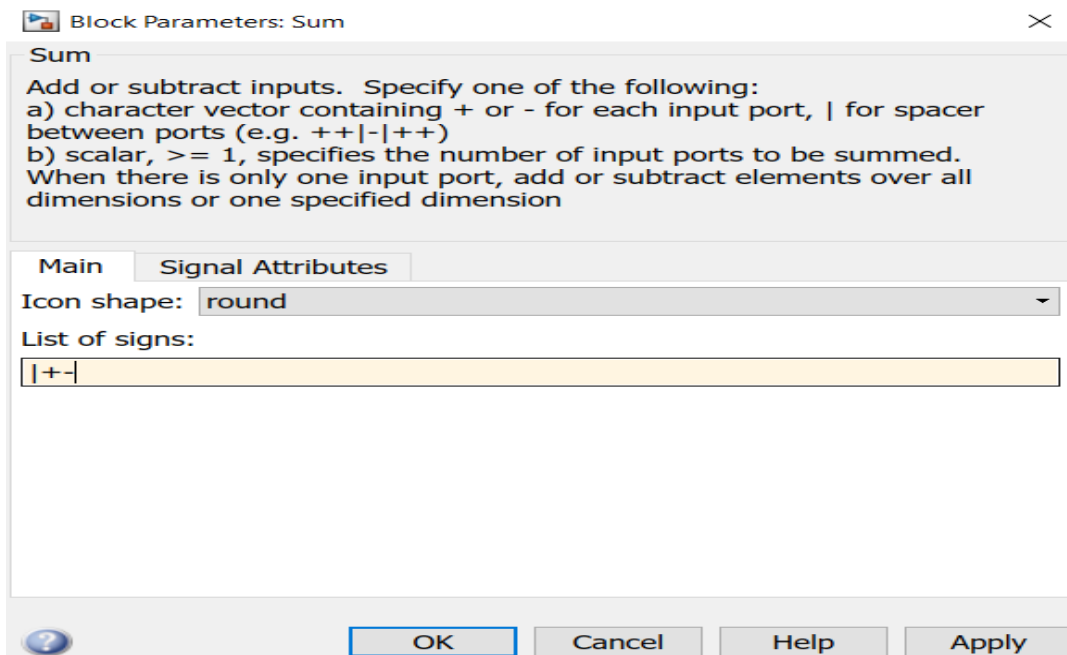


Рисунок 4.2. - Переналаштування суматора

Також, необхідно переналаштувати ПІД - контролер, він буде виконувати функцію адаптивного регулятора, у графі Controller змінюємо на PID Tuner App, натискаємо apply і ok (рис. 4.3).

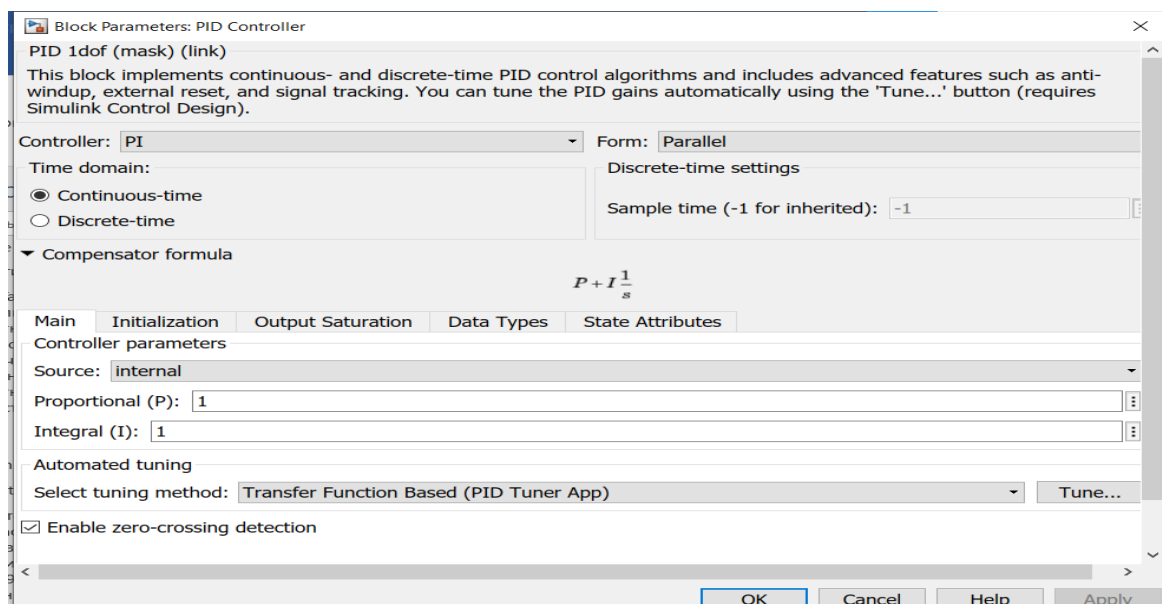


Рисунок 4. 3. - Переналаштування ПІД – контролера (адаптація)

У результаті синтеза нечіткого контролера отримуємо наступну модель САУ (рис.4.4.):

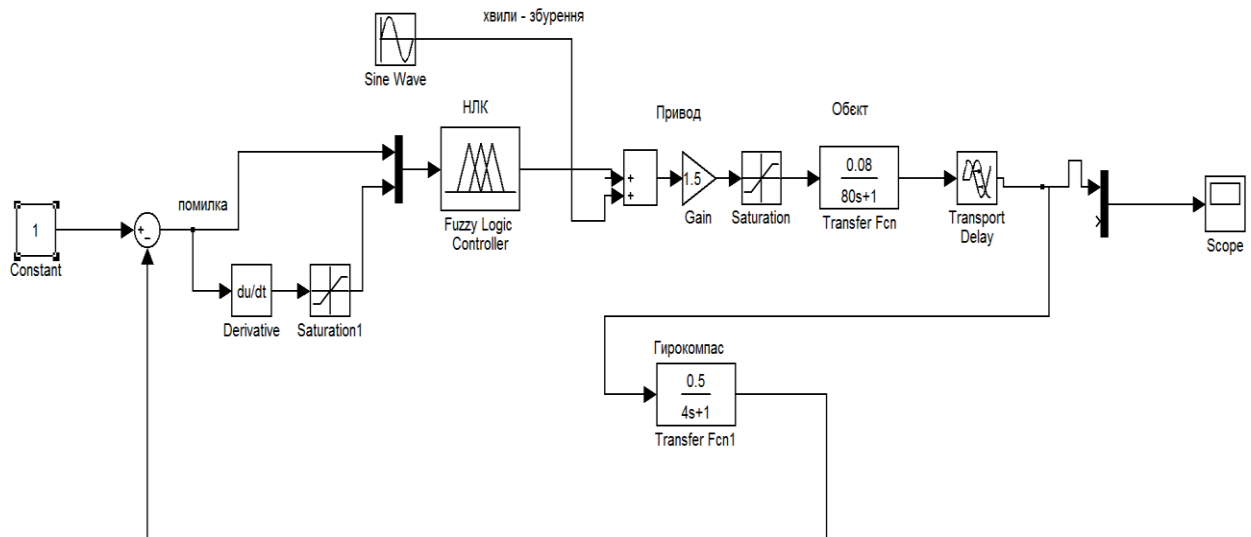


Рисунок 4.4. - Схема моделі САУ з нечітким - регулятором

Відповідно до попередньої практичної роботи, та даних отриманих у результаті її виконання розрахунку математичної моделі, змінюємо параметри налаштування об'єкта (рис. 4.5).

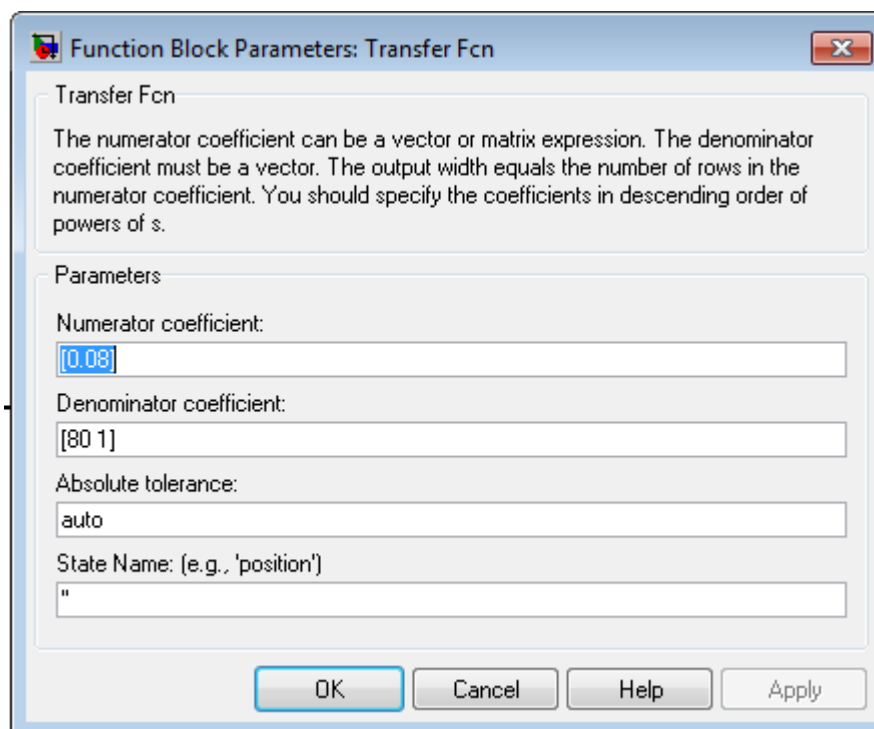


Рисунок 4.5. - Параметри налаштування об'єкта управління моделі

Для наочності переглянемо, які будуть отримані результати, якщо встановити час затримки (рис.4.6)

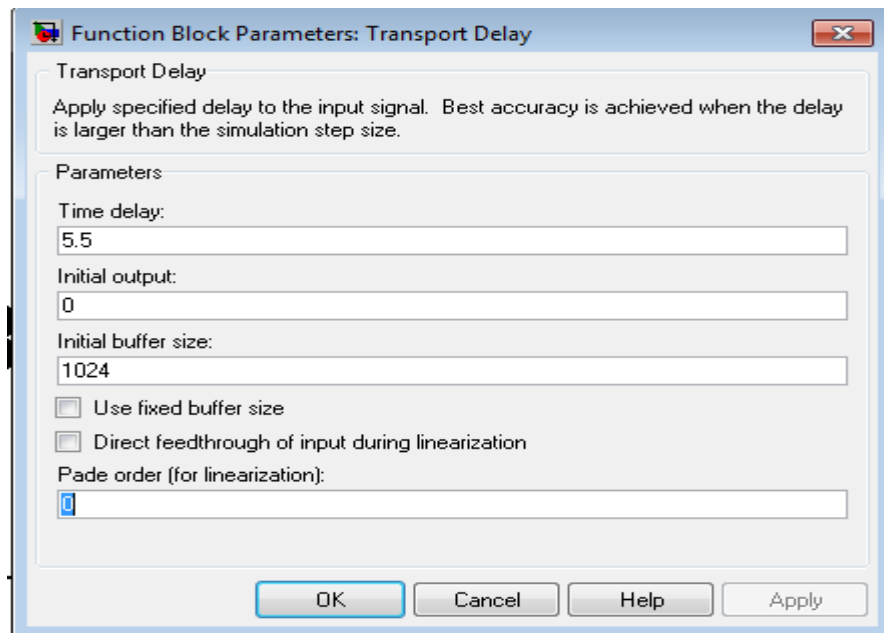


Рисунок 4.6. - Параметри налаштування елемента затримки моделі САУ

φ

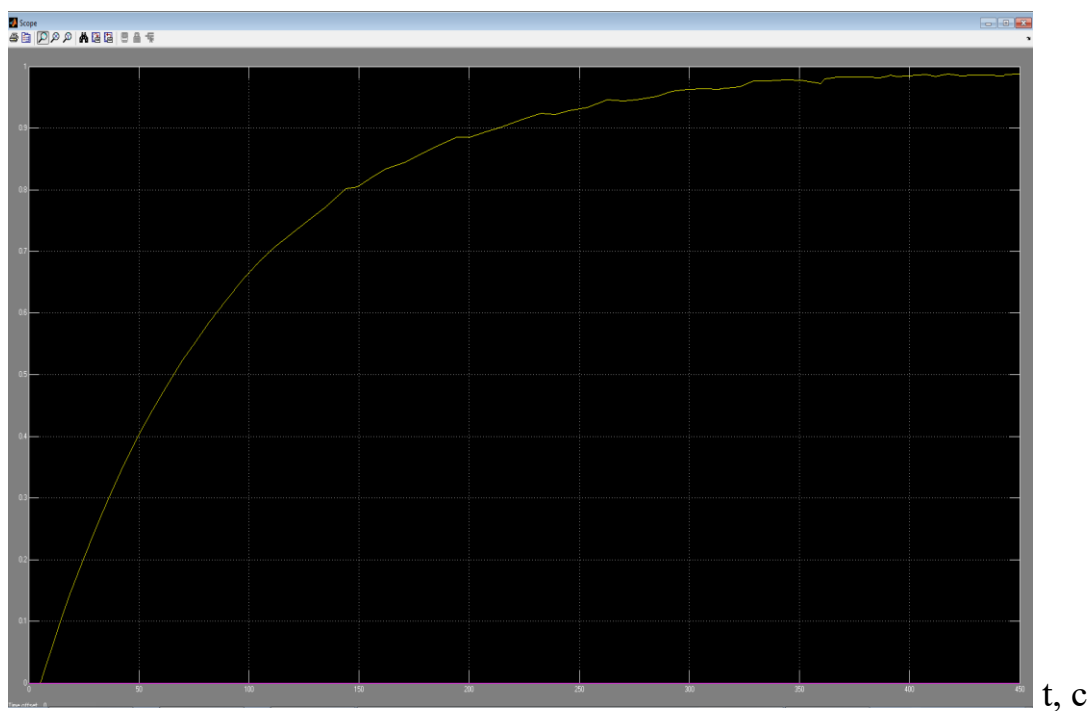


Рисунок 4.7. - Перехідний процес САУ підтримки заданого курсу

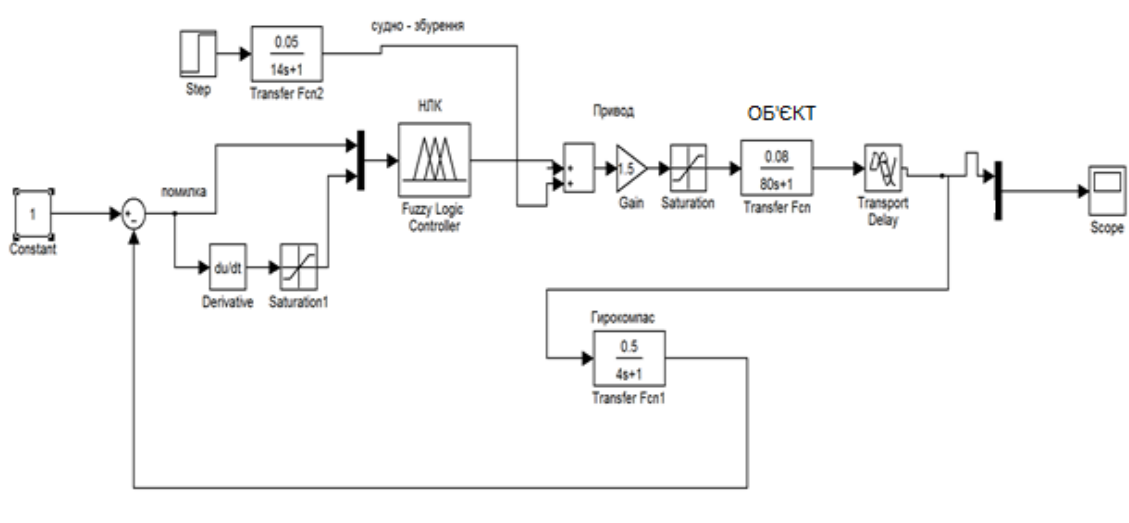


Рисунок 4.8. - Комп'ютерна модель САУ із зовнішнім обуренням у вигляді зустрічного судна (передавальна функція інерційної ланки)

φ

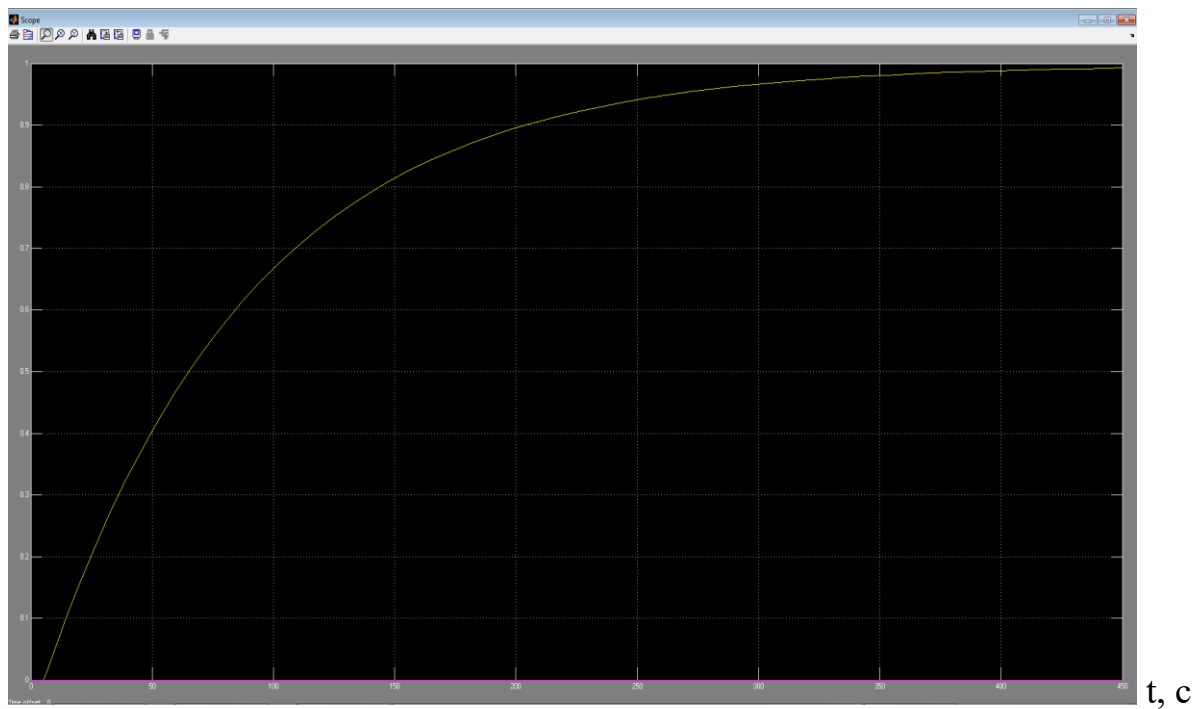


Рисунок 4.9. - Перехідний процес нечіткої САУ курсу судна

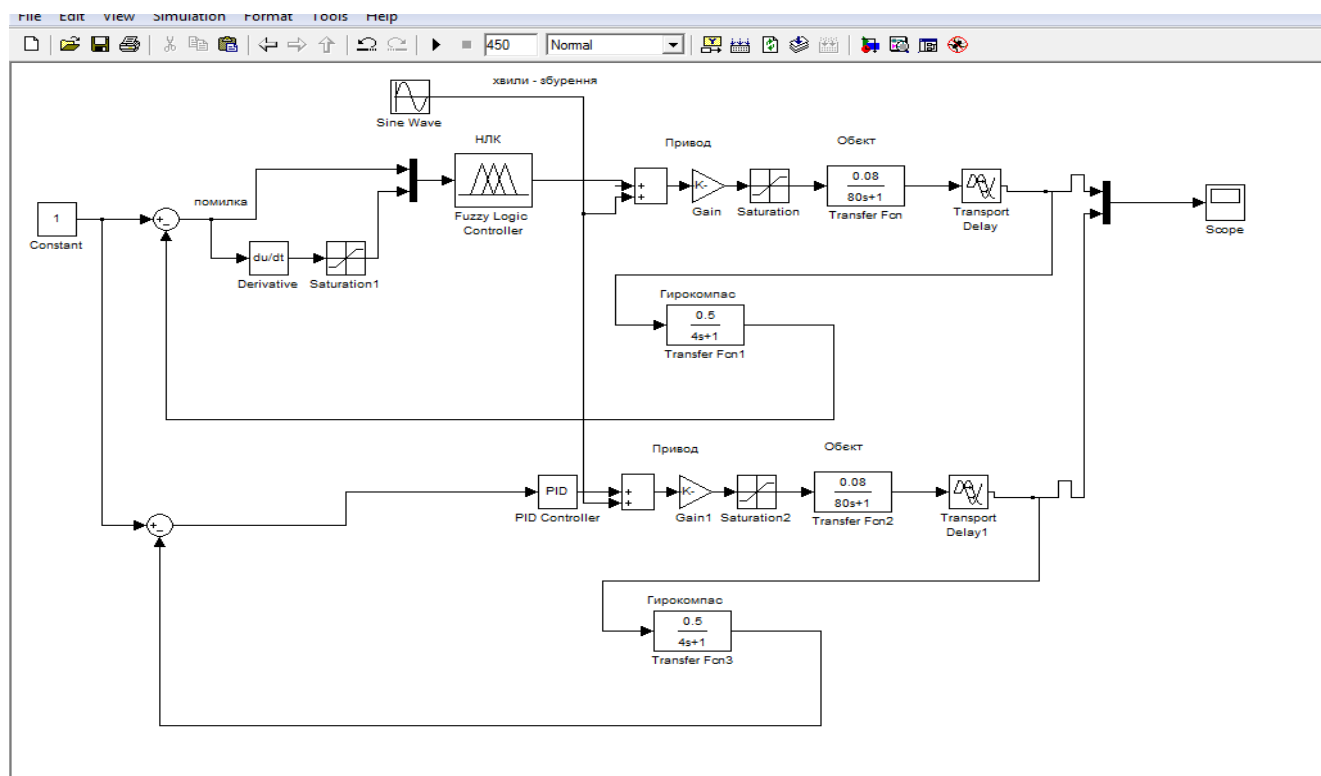


Рисунок 4.10. - Комп'ютерна модель нечіткої САУ та САУ з ПІД – регулятором із зовнішнім збуренням – хвиля

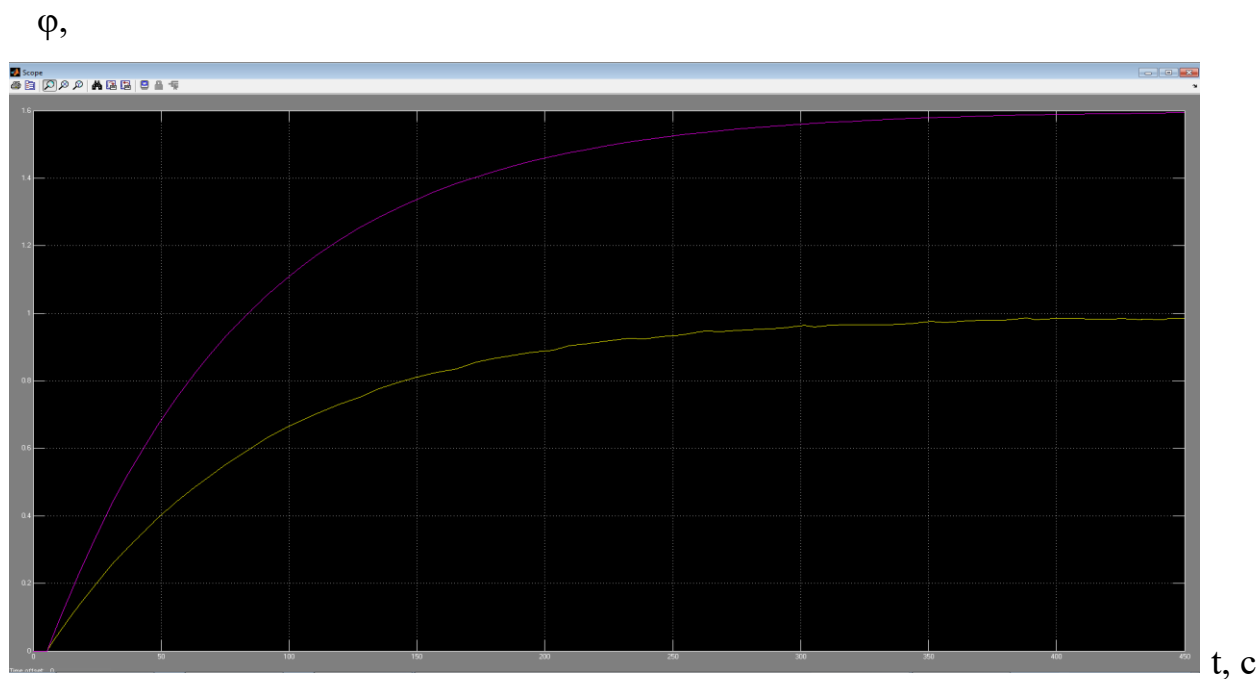


Рисунок 4.11- Перехідний процес двох САУ з НК (нижня) та ПІД – регулятором

На основі аналізу перехідних процесів (рис. 4.11) можна заключити, що порівняльний аналіз ефективності нечіткого контролера та ПД – регулятора показав, що НК точно підтримує завдання, а ПД - регулятор вимагає ручної корекції параметрів т.к. у курсі відхилення від заданого зростає.

Висновки з розділу

Порівняльний аналіз показав, що нечіткий (fuzzy) регулятор забезпечує більш ефективну стабілізацію курсу судна порівняно з класичним ПД-регулятором, особливо за умов дії зовнішніх збурень, таких як хвилювання чи зміна вітру. Завдяки адаптивності та можливості враховувати невизначеність у вхідних сигналах, нечіткий регулятор забезпечує плавніше керування, зменшує перерегулювання та підвищує точність утримання курсу.

Крім того, нечіткий регулятор має здатність навчатися та адаптуватися до змін динаміки судна без необхідності точного математичного моделювання об'єкта керування, що є важливою перевагою в реальних морських умовах, де параметри руху постійно змінюються. ПД-регулятор, хоча й простий у реалізації, має обмежену гнучкість і потребує перенастроювання при зміні режимів руху або появі нестандартних збурень, що знижує ефективність керування.

Таким чином, використання нечітких систем керування є більш доцільним для інтелектуальних авторулевих суден, оскільки вони забезпечують стабільність, точність і надійність утримання курсу, реалізуючи логіку прийняття рішень, подібну до дій досвідченого штурмана.

ВИСНОВКИ

Використання нечітких регуляторів у системах авторулевого керування суднами є високоефективним підходом до стабілізації курсу в умовах дії зовнішніх збурень і невизначеностей морського середовища. Завдяки можливості моделювати нечіткі логічні зв'язки та приймати рішення на основі лінгвістичних правил, такі регулятори забезпечують адаптивне, гнучке та стійке керування без необхідності точного математичного опису об'єкта.

Нечіткі системи дозволяють зменшити помилки відхилення курсу, підвищити плавність реакції та стабільність руху судна, імітуючи логіку мислення досвідченого оператора. Це робить їх особливо ефективними для інтелектуальних авторулевих комплексів нового покоління, спрямованих на підвищення безпеки, точності та енергоефективності суднового керування.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- вперше розраховані коефіцієнти аналітичної моделі вантажного судна як об'єкта керування курсом, запропоновані проф. Нумото. Модель першого порядку (Nomoto I) описує реакції судна з високим ступенем точності і може бути використана при синтезі системи авторулевого управління з ПІД та нечіткими регуляторами;

- вперше отримані математичні моделі простору станів першого та другого порядку. Також SSM моделі вантажного судна може включати зовнішні входи та збурення, що підвищує їхню достовірність для різних умов експлуатації систем управління курсом судна.

- удосконалила нечітка система управління стабілізацією курсів судна. Інтелектуальна система діє на основі алгоритму І. Мамдані та дозволяє враховувати досвід та знання експерта судноводія при прийнятті оперативних рішень в умовах сильного хвилювання на морі.

Отримані результати можуть застосовуватися в адаптивних авторулевих пристроях на морських та річкових суднах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Pham D.A. et al. Designing a Ship Autopilot System for Operation in a Disturbed Environment Using the Adaptive Neural Fuzzy Inference System. *Journal of Marine Science*, 2023.
2. Zheng M. et al. A Comprehensive Review of Ship Automatic Rudder. *MDPI Journal of Marine Science*, 2025.
3. Abudu R. et al. Autonomous Ships: A Thematic Review. *MDPI*, 2024.
4. Bertilsson T. Adaptive Ship Stabilization. Chalmers University, 2022.
5. Sutton R. Neuro-Fuzzy Techniques Applied to a Ship Autopilot Design. *Journal of Navigation*, 1996.
6. Velagic J. Adaptive Fuzzy Ship Autopilot for Track-Keeping. *Journal of Navigation*, 2003.
7. Chen C. Experimental Study of Adaptive Course Controllers. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023.
8. Huang C. Manual Steering and Robust Adaptive Constrained Control of Ships. *Ocean Engineering*, 2024.
9. Вагущенко Л.Л., Цимбал М.М. Системи автоматичного керування рухом судна. Одеса, Фенкіс, 2007 – 323 с.
10. Шевченко В.А. Підвищення адаптивності суднової рулевої установки : автореф. дис. кандидата тех. наук : 05.05.03/ Національний університет «ОМА». – Одеса, 2013 – 26 с.
11. https://www.researchgate.net/publication/352967706_Vessel_heading_control_systems_with_switchable_regulators?utm_source=chatgpt.com "Vessel heading control systems with switchable regulators"
12. Contreras Montes, J. A., Durán Martínez, F. J., & Castro Celis, A. (2022). Generating fuzzy autopilot for ship maneuvering. *Ship Science & Technology (Cartagena)*

<https://doi.org/10.25043/19098642.55>
([shipjournal.co])

13. Melnyk, O., Onishchenko, O., Onyshchenko, S., Shumylo, O., Volyansky, S., Bondar, A., Cheredarchuk, N. (2023). Application of fuzzy controllers in automatic ship motion control systems. **International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)**, 13(4), 3948–3957. 14. Yaseen Adnan, A., Kamal Iwan, M., & Abdul Hannan, M. (2021). Intelligent control for ship manoeuvring. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, 67, 19. <https://doi.org/10.37934/aram.67.1.19> ([akademiabaru.com])

15. Dang, X.-K., & Le Anh-Hoang. (2023). Joint fuzzy controller and fuzzy disturbance compensator in ship autopilot system: investigate stability in environmental conditions. *Journal of Current Science and Technology (JCST)*. (Доступно онлайн) ([ph04.tci-thaijo.org])

16. Liu, H., Zeng, Z., Yang, X., Zou, Y., & Liu, X. (2025). A control strategy for shipboard stabilization platforms based on a fuzzy adaptive proportional–integral–derivative (PID) control architecture. **Mechanical Sciences**, 16, 325–342. <https://doi.org/10.5194/ms-16-325-2025> ([ms.copernicus.org])

17. Hwang, C.-N. (2002). The Integrated Design of Fuzzy Collision-Avoidance and H ∞ -Autopilots on Ships. *The Journal of Navigation*, 55(3). <https://doi.org/10.1017/S037346330001362X> ([Cambridge University Press & Assessment])

18. Małeck, J. (2013). Fuzzy Track-Keeping Steering Design for a Precise Control of the Ship. *Applied Mechanics and Materials*, 196, 140–147. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.196.140> ([scientific.net])

19. Hu, G. S. (2012). Adaptive Control Based on Neural Network for Ship Steering Autopilot. *Advanced Materials Research*, 503-504, 1239–1242. [<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.503->

504.1239](<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.503-504.1239>)
([scientific.net])

20 . Application of fuzzy-neural network in ship course control: e.g., “Application of Fuzzy Neural Network in Ship Course Control.” *Applied Mechanics and Materials*, 135-136, 309–315. [<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.135-10>. Brčko, T., & Luin, B. (2023).

ДОДАТКИ

Додаток А



Рисунок А – Панелі управління судном