

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА  
АКАДЕМІЯ»

Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки  
Кафедра електрообладнання і автоматики суден

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

на тему:  
ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ  
РЕГУЛЯТОРІВ СУДНОВИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО  
УПРАВЛІННЯ

Виконав: здобувач другого  
(магістерського) рівня вищої освіти  
спеціальності

271 Морський та внутрішній водний  
транспорт

(шифр і назва спеціальності)

Житнюк Микита Сергійович

(підпис, прізвище та ініціали)

допущений до захисту 19.06.2023

(дата малого захисту)

Завідувач кафедри Гвоздева І. М.

(підпис, прізвище та ініціали)

Керівник Гвоздева І. М.

(підпис, прізвище та ініціали)

Нормоконтролер В. В. Вещенко

(підпис, прізвище та ініціали)

Рецензент Григоренко А. В.

(підпис, прізвище та ініціали)

Одеса

2023



**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»**

**Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки**  
Кафедра Електрообладнання і автоматики суден  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)

**Спеціальність 271 Морський та внутрішній водний транспорт**

Затверджую  
Зав. кафедри Гвоздева І.М.  
„19” 06 2023р.

**ЗАВДАННЯ  
ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА**

**ЖИТНЮКА МИКИТИ СЕРГІЙОВИЧА**

Тема роботи \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)  
ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА  
ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РЕГУЛЯТОРІВ СУДНОВИХ СИСТЕМ  
АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

Керівник роботи Гвоздева І.М., д.т.н., професор,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене  
звання)  
затверджені наказом по академії від „14” 06 2023 року № 883

2. Строк подання курсантом закінченої роботи 19.06.2023

3. Вихідні дані до роботи: параметри та схеми автоматизації суднових енергетичних установок, структури та параметри локальних суднових систем автоматичного регулювання, параметри та схеми типових регуляторів параметрів суднових енергетичних установок
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці)
1. Критичний огляд та порівняння типових завдань та типових моделей складових частин суднових систем автоматичного управління.
  2. Аналіз суднових систем автоматичного управління із типовими табличними налаштуваннями регуляторів та із налаштуваннями за типовими методиками.
  3. Оптимізація налаштувань регуляторів суднових систем автоматичного управління засобами інтерактивного середовища MATLAB та засобами складовості методів стохастичної оптимізації МОНТЕ-КАРЛО
  4. Регулятори суднових систем автоматичного управління із нечіткою логікою

5. Перелік графічного матеріалу (з точними вказівками обов'язкових креслень)

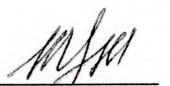
Структурні схеми суднових САУ, схеми моделювання пропонованих регуляторів та суднових САУ, графічні та обчислювальні результати моделювання, вікна інтерактивних засобів налаштування, оптимізації та моделювання регуляторів суднових САУ.



## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| №<br>зп | Назва етапів<br>дипломної роботи                                                                | Строк виконання етапів<br>роботи | Примітк<br>и |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------|
| 1       | Отримання завдання до ДРМ                                                                       | 01.10.21                         | виконано     |
| 2       | Вивчення методів проектування<br>суднових САУ та їх огляд                                       | 01.10.21-30.11. 21               | виконано     |
| 3       | Ознайомлення та огляд сучасних<br>методів синтезу регуляторів<br>суднових САУ                   | 01.10.21-30.11. 21               | виконано     |
| 4       | Аналіз відомих табличних та<br>типових методик налаштування<br>регуляторів суднових САУ         | 01.11.21-08.12.21                | виконано     |
| 5       | Вивчення роботи програмного<br>середовища MATLAB                                                | 01.10.21-08.12.21                | виконано     |
| 6       | Розробка методів оптимізації<br>регуляторів суднових САУ та<br>програмних засобів їх реалізації | 08.12.21-04.04.2022              | виконано     |
| 7       | Розробка комп'ютерних моделей<br>для розрахунку необхідних<br>залежностей                       | 04.04.2022-03.10.22              | виконано     |
| 8       | Проведення комп'ютерних<br>експериментів                                                        | 03.10.22-09.12.2022              | виконано     |
| 9       | Створення пояснювальної записки                                                                 | 10.05.23-16.06.23                | виконано     |

Курсант-дипломник

  
 (підпис)

Шитнюк М.С

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

  
 (підпис)

Гвоздева Т.М.

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пропоноване дослідження роботи на здобуття магістерського ступеню присвячено встановленню властивостей, результатів функціонування, та обмежень застосування. пропонованих відомих та новітніх методик налаштувань регуляторів суднових систем автоматичного управління.

Мета дослідження становить дослідження властивостей та встановлення меж застосування методик налаштування класичних ПД – регуляторів суднових систем автоматичного управління у порівнянні їх досяжних характеристик щодо запасів сталості та похибок регулювання, та встановленні меж застосування регуляторів, що засновані на нечіткій логіці.

СУДНОВА ЕНЕРГЕТИЧНА СИСТЕМА, СИНТЕЗ СИСТЕМ  
АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ, РЕГУЛЯТОРИ, НЕЧІТКА ЛОГІКА

## ABSTRACT

The proposed master's thesis research is devoted to establishing properties, performance results, and application limitations. proposed well-known and latest methods of setting regulators of ship automatic control systems.

The purpose of the study is to investigate the properties and establish the limits of the application of classic PIDs - regulators of ship automatic control systems in comparison of their achievable characteristics in terms of stability reserves and regulation errors, and establish the limits of the application of regulators based on fuzzy logic.

SHIP ENERGY SYSTEM, SNTEZ OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS,  
REGULATORS, Fuzzy LOGIC

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                                                                                              | 8  |
| 1 КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ПОРІВНЯННЯ ТИПОВИХ ЗАВДАНЬ ТА<br>ТИПОВИХ МОДЕЛЕЙ СКЛАДОВИХ ЧАСТИН СУДНОВИХ СИСТЕМ<br>АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ .....                                | 13 |
| 1.1 Типова структура локальної суднової системи автоматичного<br>управління та принципи управління.....                                                                 | 13 |
| 1.2 Завдання синтезу локальних суднових систем автоматичного<br>управління .....                                                                                        | 15 |
| 1.3 Типові математичні моделі елементів суднових систем автоматичного<br>управління.....                                                                                | 16 |
| 1.4 Вимоги до синтезу регуляторів суднових систем автоматичного<br>управління.....                                                                                      | 18 |
| Висновки до розділу 1.....                                                                                                                                              | 20 |
| 2 АНАЛІЗ СУДНОВИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ІЗ<br>ТИПОВИМИ ТАБЛИЧНИМИ НАЛАШТУВАННЯМИ РЕГУЛЯТОРІВ ТА<br>НАЛАШТУВАННЯМИ РЕГУЛЯТОРІВ ЗА ТИПОВИМИ<br>МЕТОДИКАМИ ..... | 21 |
| 2.1 Типові табличні налаштування регуляторів суднових систем<br>автоматичного управління .....                                                                          | 21 |
| 2.2 Результати застосування типових табличних налаштувань регуляторів<br>суднових систем автоматичного управління .....                                                 | 23 |
| 2.3 Методика Зіглера налаштування регуляторів суднових систем<br>автоматичного управління .....                                                                         | 27 |
| 2.4 Результати застосування методики Зіглера для налаштувань<br>регуляторів суднових систем автоматичного управління .....                                              | 28 |
| Висновки до розділу 2.....                                                                                                                                              | 31 |
| 3 ОПТИМІЗАЦІЯ НАЛАШТУВАНЬ РЕГУЛЯТОРІВ СУДНОВИХ<br>СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ЗАСОБАМИ                                                                              |    |

|                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ІНТЕРАКТИВНОГО СЕРЕДОВИЩА MATLAB ТА ЗАСОБАМИ<br>СУКУПНОСТІ МЕТОДІВ СТОХАСТИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ МОНТЕ-<br>КАРЛО .....                                                                                   | 33 |
| 3.1 Методика оптимізації налаштувань регуляторів суднових САУ<br>засобами інтерактивного середовища MATLAB .....                                                                                    | 33 |
| 3.2 Результати застосування методики оптимізації налаштувань<br>регуляторів суднових САУ засобами інтерактивного середовища<br>MATLAB .....                                                         | 34 |
| 3.3 Методика оптимізації налаштувань регуляторів суднових САУ<br>засобами сукупності методів стохастичної оптимізації Монте-Карло .....                                                             | 38 |
| 3.4 Результати застосування методики оптимізації налаштувань<br>регуляторів суднових САУ засобами сукупності методів стохастичної<br>оптимізації Монте-Карло інтерактивного середовища MATLAB ..... | 40 |
| Висновки до розділу 3 .....                                                                                                                                                                         | 44 |
| 4. РЕГУЛЯТОРИ СУДНОВИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО<br>УПРАВЛІННЯ З НЕЧІТКОЮ ЛОГІКОЮ .....                                                                                                                  | 46 |
| 4.1 Особливості застосування регуляторів суднових САУ з нечіткою<br>логікою .....                                                                                                                   | 46 |
| 4.2 Методика побудови регуляторів суднових САУ з нечіткою<br>логікою .....                                                                                                                          | 47 |
| 4.3 Результати застосування методики побудови регуляторів суднових<br>САУ з нечіткою логікою .....                                                                                                  | 48 |
| Висновки до розділу 4 .....                                                                                                                                                                         | 51 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                                                                                                                       | 52 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....                                                                                                                                                                              | 54 |



## ВСТУП

**Актуальність.** Техніко-економічні та експлуатаційні характеристики суднових енергетичних установок (СЕУ) визначаються відповідністю відтворення завданих режимів фактичним, що забезпечується локальними системами автоматичного регулювання та управління. Системи автоматичного управління (САУ) керованої зміни стану СЕУ є необхідною і важливою складовою суднових інтегрованих систем автоматизації, та на тактичному рівні забезпечують вирішення завдань підтримки режимних параметрів та їх зміни за встановленими програмами. Необхідні якісні та кількісні показники САУ забезпечуються відповідними регуляторами, які, в поточний час, є виключно цифровими. Проблемним питанням удосконалення суднових САУ є відшукування налаштувань таких регуляторів щодо реальних умов експлуатації, які можуть забезпечити необхідні запаси сталості САУ, тобто безпечність, а також мінімізувати статичні та динамічні похибки регулювання для забезпечення техніко-економічної ефективності.

Застосування сучасних підходів для проектування суднових САУ, що враховують апріорну невизначеність параметрів об'єктів керування та випадкові збурення і похибки вимірювань, дозволить побудувати методики налаштування класичних регуляторів та запропонувати нові підходи, і, тим самим, підвищити техніко-економічні показники СЕУ.

**Метою** магістерської роботи є дослідження становить дослідження властивостей та встановлення меж застосування методик налаштування класичних ППД – регуляторів суднових систем автоматичного управління у порівнянні їх досяжних характеристик щодо запасів сталості та похибок регулювання, та встановленні меж застосування регуляторів, що засновані на нечіткій логіці.

Для досягнення вказаної мети необхідно вирішити наступні задачі:

1) Провести критичний огляд та порівняння типових завдань та типових моделей складових частин суднових систем автоматичного управління.

2) Провести огляд і аналіз суднових систем автоматичного управління із типовими табличними налаштуваннями регуляторів та із налаштуваннями за типовими методиками.

3) Розробити принципи оптимізації налаштувань регуляторів суднових систем автоматичного управління засобами інтерактивного середовища MATLAB та засобами сукупності методів стохастичної оптимізації МОНТЕ-КАРЛО .

4) Вирішити задачу синтезу регуляторів суднових систем автоматичного управління із нечіткою логікою.

**Об'єктом дослідження** є процеси керованої зміни стану суднових енергетичних об'єктів за допомогою систем автоматичного управління

**Предмет дослідження.** Методи налаштування та математичні моделі регуляторів і суднових систем автоматичного управління процесів керованої зміни стану суднових енергетичних об'єктів.

**Гіпотеза дослідження** полягає в тому, що на основі застосування сучасних методів системного аналізу та інформаційних технологій, зокрема, методів штучного інтелекту, можливо підвищити якісні та кількісні характеристики суднових систем автоматичного управління процесів керованої зміни стану суднових енергетичних об'єктів, що дозволяє, при забезпеченні необхідних запасів сталості, суттєво зменшити статичні та динамічні похибки регулювання.

**Методи дослідження.** При виконанні магістерської роботи використані: методи системного аналізу; методи теорії автоматичного управління та сучасної теорії управління; методи математичного моделювання; методи комп'ютерного моделювання при визначенні ефективності різноманітних методик налаштування регуляторів та їх порівнянні.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1) На основі проведеного огляду і порівняльного аналізу відомих методів налаштування регуляторів суднових систем автоматичного управління встановлені їх ефективність та обмеження щодо застосування.

2) Шляхом проведених комп'ютерного експерименту динамічних режимів суднових систем автоматичного управління з метою відшукування найкращих налаштувань регуляторів встановлена важливість встановлення відповідності математичної моделі керованих процесів реальним умовам експлуатації шляхом проведення попереднього етапу ідентифікації об'єкту.

3) Встановлено шляхом комп'ютерного моделювання, що стандартні типові методики налаштування регуляторів та із налаштуваннями за типовими методиками (Зіглера і супутніми) дозволяють знайти лише перше наближення для подальшого використання методів оптимізації.

4) Встановлено при вирішенні практичного завдання, що в умовах дійсних обмежень та невизначеності вихідних даних, налаштування регуляторів суднових систем автоматичного управління, які задовольняють умовам експлуатації, можуть бути знайдені за допомогою сучасних методів багатовимірної оптимізації, зокрема, методів Монте-Карло, а також на основі застосування регуляторів з нечіткою логікою

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в наступному: на основі застосування методів теорії автоматичного управління, штучного інтелекту, та комп'ютерного моделювання процесів керованої зміни стану суднових енергетичних об'єктів побудовані методики та комп'ютерні моделі, які дозволяють встановити ефективність, межі застосування, якісні та кількісні характеристики суднових систем автоматичного управління регуляторами, що налаштовані за різними методиками, що дозволяє обрати відповідні об'єкту автоматизації програмно-алгоритмічні та технічні засоби .

**Особистий внесок здобувача.** Розроблені комп'ютерні моделі суднових систем автоматичного управління, які засновані на різних методиках налаштування регуляторів, що дозволяє оцінити їх характеристики та обрати доцільне технічне рішення.



**Апробація роботи.** Результати роботи було розглянуто на міжнародній науково-технічній конференції «СУДНОВА ЕЛЕКТРОІНЖЕНЕРІЯ, ЕЛЕКТРОНІКА І АВТОМАТИКА» (СЕЕА-2022); м. Одеса – 2022.

# 1 КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ПОРІВНЯННЯ ТИПОВИХ ЗАВДАНЬ ТА ТИПОВИХ МОДЕЛЕЙ СКЛАДОВИХ ЧАСТИН СУДНОВИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

Питання експлуатації СЕУ та налаштувань локальних САУ розглянуті у низці досліджень та публікацій [1-15]. Найбільш ґрунтовні дослідження щодо налаштувань регуляторів пропонуються у [1,3,4,5,8]. Оптимізації налаштувань регуляторів присвячені роботи [2,3,4,5].

1.1 Типова структура локальної суднової системи автоматичного управління та принципи управління.

Локальні суднові системи автоматичного управління (САУ) виконують на тактичному рівні завдання автоматичного регулювання (підтримки на заданому рівні певного рівня вихідної координати з допустимими статичними та динамічними похибками із заданими запасами сталості), та автоматичного управління (зміни вихідних координат за заздалегідь встановленою програмою з визначеними допустимими відхиленнями). Типова структура суднової САУ представлена на рис. 1.1.

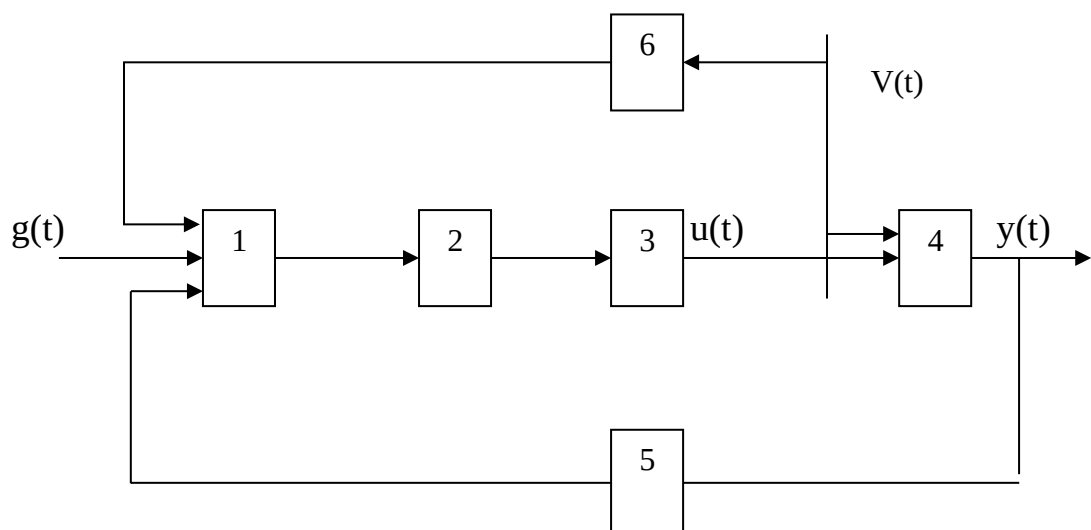


Рисунок 1.1 - Структурна схема локальної суднової САУ

На рис.1.1 позначені:

1 – управляючий пристрій

2 – підсилювально-перетворюючий пристрій (ППП)

3 – виконавчий пристрій (ВП)

4 – об'єкт управління (ОУ)

5, 6 – датчики

$g(t)$  - задаюча дія

$u(t)$  - керована (регульована) змінна

$V(t)$  - обурююча дія

$U(t)$  - сигнал управління

Відповідно встановлюються наступні принципи управління:

1. комбінований: по відхиленню і збуренню;
2. по відхиленню (без блоку 6);
3. по обуренню (без блоку 5).

Всі вказані принципи управління застосовуються в суднових САУ в залежності від призначення. Основним є принцип управління по відхиленню, оскільки неможливо встановити стан об'єкту без виміру зміни вихідної координати. Найбільш складним є комбінований принцип, оскільки потребує вирішення низки завдань виміру збурення, синтезу коригуючої (компенсуючої) дії та складного аналізу сталості і динаміки комбінованої САУ.

Слід вказати, щодо специфіки суднових САУ, що всі блоки системи, за винятком управляючого пристрою, є практично незмінними, оскільки складають комплектну виконавчу частину САУ, яка визначена на етапі проектування за метою досягнення енергетичних та техніко-економічних завдань. Єдиним блоком, який може бути необмежено змінним, є управляючий пристрій, але його устрій та алгоритми роботи повинні забезпечити якісні та кількісні показники суднової САУ.

## 1.2 Завдання синтезу локальних суднових систем автоматичного управління

Для забезпечення визначених показників сталості та якості суднових САУ необхідно вирішити наступні завдання:

1). Побудувати адекватні математичні моделі об'єктів управління суднових САУ та їх складових частин у виді, що відповідає реалізації систем управління, - етап ідентифікації.

Цей етап може виконуватися теоретичним шляхом - на основі аналізу і перетворення рівнянь, що виходять з фізичних законів збереження і рівноваги, або експериментально - на основі аналізу реакцій об'єкту на типові вхідні сигнали і подальшою апроксимацією експериментальних даних.

На цьому етапі виникає проблема адекватності і допустимої складності математичних моделей, оскільки складність моделі повинна допускати можливість її використання для синтезу законів управління.

2). На основі методів теорії автоматичного управління побудувати алгоритми управління (закони регулювання і управління), придатні для реалізації в пристрої, що управляє, оптимальні за заданими критеріями, та допустимі щодо цифрової реалізації.

3). Зв'язати математичні моделі і алгоритми управління у рамках методу (теорії) їх опису, що відповідає реалізації системи управління (враховуючи цифровий регулятор в контурі управління) для дослідження можливостей досягнення встановлених завдань та фундаментальних властивостей (стійкість, керованість, спостережуваність) і моделювання динаміки системи управління за допомогою відповідних засобів моделювання та SCADA - систем.



### 1.3 Типові математичні моделі елементів суднових систем автоматичного управління

Математичні моделі елементів суднових систем автоматичного управління типізуються по ряду ознак за їх передатними функціями у наступному вигляді.

#### 1. Незмінна частина

##### Об'єкт управління:

1) з самовирівнюванням, наприклад:

$$W_{oy}(p) = \frac{K_o}{T_o p + 1},$$

2) без самовирівнювання, наприклад:

$$W_{oy}(p) = \frac{K_0}{p},$$

$$W_{oy}(p) = \frac{K_0}{p(T_0 p + 1)},$$

3) із запізнюванням, наприклад:

$$W_{oy}(p) = \frac{K_0}{p(T_0 p + 1)} e^{-\tau_0 p},$$

4) без запізнювання

5) першого порядку

6) другого порядку, або, наприклад:

$$W_{oy}(p) = \frac{K_0}{p(T_{01} p + 1)(T_{02} p + 1)}$$

$$W_{oy}(p) = \frac{K_0}{T_0^2 p^2 + 2z_0 T_0 p + 1}$$

Можуть використовуватися і інші ознаки класифікації, проте загальним є опис об'єктів відносно простою лінійною моделлю невисокого порядку (зазвичай не вище за другий) з типових ланок.

### **Виконавчий пристрій:**

1) пропорційна ланка

$$W_{uy}(p) = K_{uy},$$

2) інтегруюча ланка

$$W_{uy}(p) = \frac{K_{uy}}{p},$$

3) аперіодична ланка

$$W_{uy}(p) = \frac{K_{uy}}{T_{uy}p + 1},$$

Якщо динамічні властивості ВП є істотним чинником в порівнянні з динамічними властивостями ОУ, можуть використовуватися складніші моделі типу, з тією ж загальною ознакою: лінійна модель з типових ланок.

У окремий клас необхідно виділити ВП релейного типу, що мають нелінійні характеристики, які також класифікуються по ряду типових нелінійностей.

### **Підсилювально-перетворюючий пристрій, Датчики:**

практично в усіх ситуаціях приймаються пропорційними ланками, за винятком високоточних систем стеження, для аналізу яких використовуються моделі типу (1) - (4).

### **2. Управляючий пристрій.**

В якості пристроїв, що реалізують алгоритми управління (закони регулювання), використовується ряд типових регуляторів, що мають передатні функції :

1) пропорційний (П - регулятор)

$$W_{py}(p) = K_p$$

2) пропорційно - інтегральний (ПІ - регулятор)

$$W_{yy}(p) = K_p + \frac{1}{T_p p},$$

3) інтегральний (І - регулятор)

$$W_{yy}(p) = \frac{1}{T_p p}$$

4) пропорційно - диференціальний (ПД - регулятор)

$$W_{yy}(p) = K_p + \tau_p p$$

5) пропорційно - інтегрально - диференціальний (ПІД - регулятор)

$$W_{yy}(p) = K_p + \tau_p p + \frac{1}{T_p p}$$

Таким чином, друге завдання зводиться до знаходження коефіцієнтів (уставок) вибраного типового регулятора, тобто 1-3 параметрів, залежно від заданого типу ОУ, ВП, їх параметрів, з метою забезпечити ряд якісних характеристик перехідних процесів в системі і задану точність підтримки режиму, що встановився.

#### 1.4 Вимоги до синтезу регуляторів суднових систем автоматичного управління

Вимоги до локальних суднових САУ задаються у вигляді сукупності ряду характеристик :

1) запас стійкості

- по амплітуді  $a$  [db],
- по фазі  $\varphi$  [град],

2) характеристики режиму, що встановився

- статична помилка  $\delta$
- швидкісна помилка  $\delta\omega$
- помилка по прискоренню  $\delta a$ ,

де компоненти  $\delta\omega$  і  $\delta a$  виникають при відробітку відповідно лінійно наростаючого і параболічного задаючих дій.

### 3) характеристики динаміки (перехідного режиму)

- час перехідного процесу  $t_{np}$
- перерегулювання  $\sigma \%$
- коливальність  $\eta$ .
- додаткові характеристики, якщо вимагається, а саме, швидкісна похибка, та похибка за прискоренням для систем стеження..

## Висновки до розділу 1

1. В результаті проведеного огляду встановлені типові завдання та математичні моделі елементів суднових систем автоматичного управління.

2. Визначені типові варіанти реалізації та основні вимоги до регуляторів суднових систем автоматичного управління.

3. Встановлено, що за вимог експлуатації, незмінну частину суднових САУ становлять об'єкт регулювання, виконавчі пристрої, пристрої перетворення і підсилення, а також датчики регульованих величин, Єдиним пристроєм, що повинен забезпечити якісні та кількісні показники САУ є управляючий пристрій (регулятор).

4. Завдання синтезу регулятора є найбільш важливим завданням щодо досягнення умов надійної, безпечної, та відповідної завданням умов експлуатації.

## 2 АНАЛІЗ СУДНОВИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ІЗ ТИПОВИМИ ТАБЛИЧНИМИ НАЛАШТУВАННЯМИ РЕГУЛЯТОРІВ ТА НАЛАШТУВАННЯМИ РЕГУЛЯТОРІВ ЗА ТИПОВИМИ МЕТОДИКАМИ

### 2.1 Типові табличні налаштування регуляторів суднових систем автоматичного управління

Локальні суднові системи автоматичного управління потребують налаштувань відповідних регуляторів для досягнення встановленої мети: забезпечення заданих запасів сталості та обмеження на заданому рівні динамічних та статичних похибок. За звичай, першим кроком для встановлення таких налаштувань регуляторів суднових САУ є застосування типових табличних налаштувань.

Типові табличні налаштування регуляторів суднових систем автоматичного управління засновані на багаторічному досвіді вирішення аналогічних завдань в різних галузях застосування систем автоматизації складних технологічних об'єктів.

За умов, що викладені в розділі 1, широкий клас об'єктів автоматизації суднових енергетичних систем, може бути представлено як об'єкти автоматичного управління, що мають деякі загальні ознаки. Такими ознаками є, по-перше, наявність самовирівнювання, а по-друге, обмежена множина параметрів таких об'єктів у вигляді: коефіцієнт передачі, час запізнення, простійна часу інерційних властивостей. Слід зауважити, що типові табличні налаштування регуляторів суднових систем автоматичного управління взагалі не враховують можливі інерційні властивості виконавчого пристрою та датчиків регульованої величини. Тому вважається, при застосуванні пропонованої методики, що вказані елементи САУ є безінерційними.

За виконання вказаних умов щодо властивостей об'єкту та складових суднової САУ, можливо використання типових табличних налаштувань регуляторів. Такі налаштування наведені в Таблиці 2.1.



Таблиця 2.1 – Типові налаштування регуляторів

| Регулятор | Типовий процес регулювання                                              |                                                                             |                                                                        |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
|           | Аперіодичний                                                            | 3 20%<br>перерегулюванням                                                   | $J_{\min}$                                                             |
| I         | $K_I = \frac{1}{4,5K_{oy}\tau}$                                         | $K_I = \frac{1}{1,7K_{oy}\tau}$                                             | $K_I = \frac{1}{1,7K_{oy}\tau}$                                        |
| II        | $K_P = \frac{0,3}{K_{oy}\tau/T}$                                        | $K_P = \frac{0,7}{K_{oy}\tau/T}$                                            | $K_P = \frac{0,9}{K_{oy}\tau/T}$                                       |
| III       | $K_P = \frac{0,6}{K_{oy}\tau/T}$<br>$T_i = 0,6T$                        | $K_P = \frac{0,7}{K_{oy}\tau/T}$<br>$T_i = 0,7T$<br>( $T_i = \tau + 0,3T$ ) | $K_P = \frac{1}{K_{oy}\tau/T}$<br>$T_i = T$                            |
| ПІД       | $K_P = \frac{0,95}{K_{oy}\tau/T}$<br>$T_i = 2,4\tau$<br>$T_d = 0,4\tau$ | $K_P = \frac{1,2}{K_{oy}\tau/T}$<br>$T_i = 2\tau$<br>$T_d = 0,4\tau$        | $K_P = \frac{1,4}{K_{oy}\tau/T}$<br>$T_i = 1,3\tau$<br>$T_d = 0,5\tau$ |

де  $T, \tau, K_{oy}$  - постійна часу, запізнення та коефіцієнт підсилення об'єкта. За ціми формулами налаштовується регулятор із залежними налаштуваннями, передаточна функція якого має наступний вигляд:

$$W_{PID}(p) = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right),$$

Де  $K_P$  – коефіцієнт підсилення регулятора,

$T_i$  – час ізодрому (постійна інтегрування регулятора),

$T_d$  – постійна диференціювання регулятора.

Таблиця 2.2 – Типові налаштування регуляторів

| Регулятор | Типовий процес регулювання                                     |                                                                |                                                                  |
|-----------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|           | Аперіодичний                                                   | З 20%<br>перерегулюванням                                      | $\min \int_0^{\infty} e^2 dt$                                    |
| П         | $K_p = \frac{0,4}{\tau/T}$                                     | $K_p = \frac{0,7}{\tau/T}$                                     |                                                                  |
| ПІ        | $K_p = \frac{0,4}{\tau/T}$<br>$T_i = 6T$                       | $K_p = \frac{0,7}{\tau/T}$<br>$T_i = 3T$                       | $K_p = \frac{1}{\tau/T}$<br>$T_i = 4T$                           |
| ПІД       | $K_p = \frac{0,6}{\tau/T}$<br>$T_i = 5\tau$<br>$T_d = 0,2\tau$ | $K_p = \frac{1,1}{\tau/T}$<br>$T_i = 2\tau$<br>$T_d = 0,4\tau$ | $K_p = \frac{1,4}{\tau/T}$<br>$T_i = 1,6\tau$<br>$T_d = 0,5\tau$ |

Треба зауважити, що застосування типових табличних налаштувань регуляторів суднових систем автоматичного управління засновано на специфічній формі рівнянь ПІД-регулятора, де загальний коефіцієнт підсилення винесено за дужки.

## 2.2 Результати застосування типових табличних налаштувань регуляторів суднових систем автоматичного управління

Результати застосування типових табличних налаштувань регуляторів суднових систем автоматичного управління для тестового об'єкту у вигляді аперіодичної ланки із запізненням наведено на рис. 2.1 – рис. 2.6.

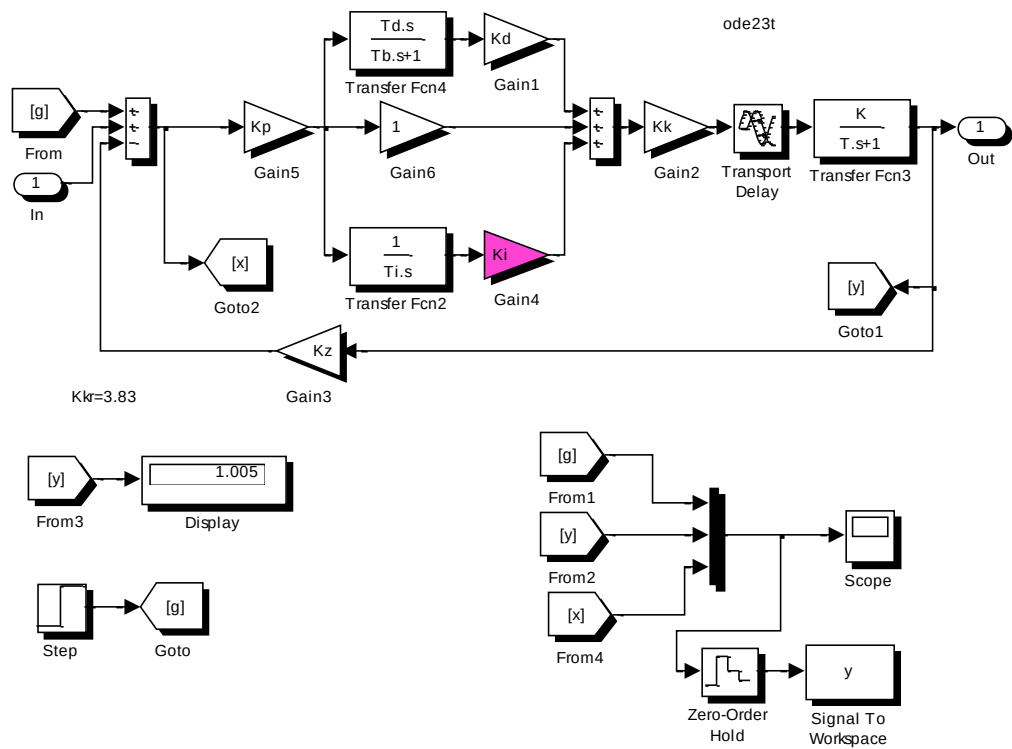


Рисунок 2.1 – Схема моделювання локальної суднової САУ

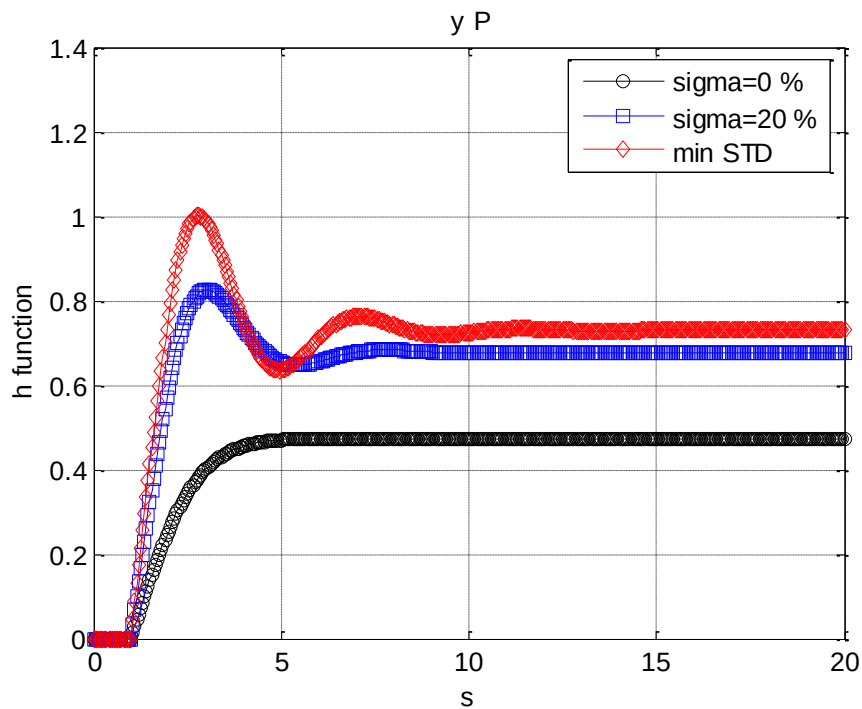


Рисунок 2.2 – Перехідні характеристики локальної суднової САУ з

$\Pi$  – регулятором

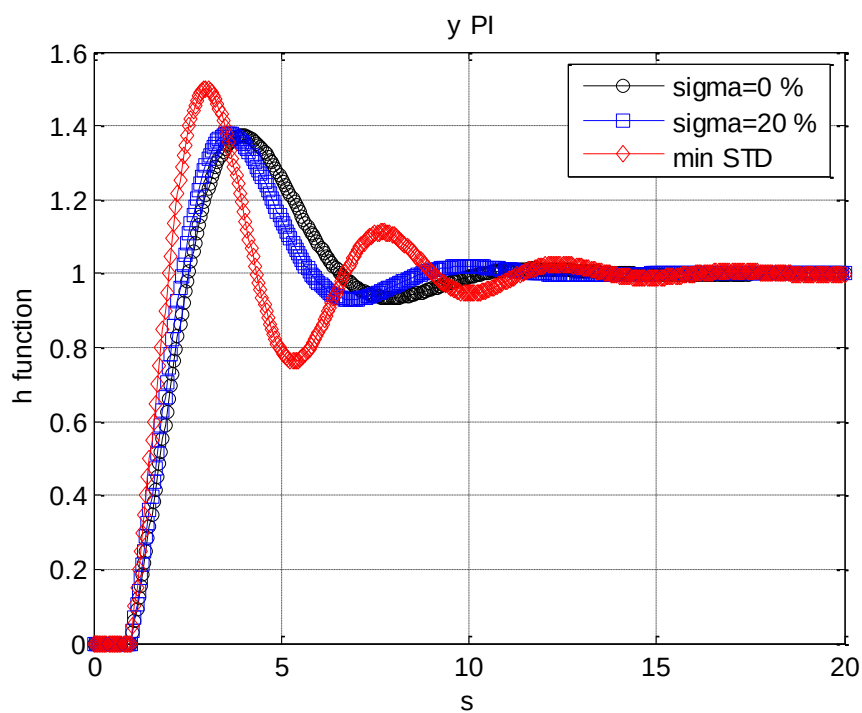


Рисунок 2.3 – Перехідні характеристики локальної суднової САУ з  
ПІ – регулятором

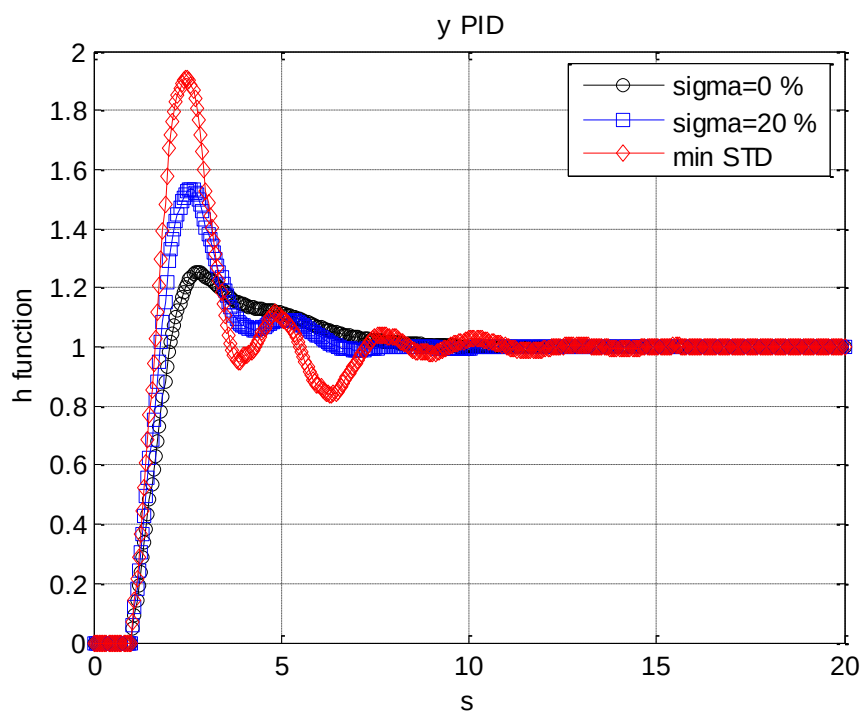


Рисунок 2.4 – Перехідні характеристики локальної суднової САУ з  
ПІД – регулятором

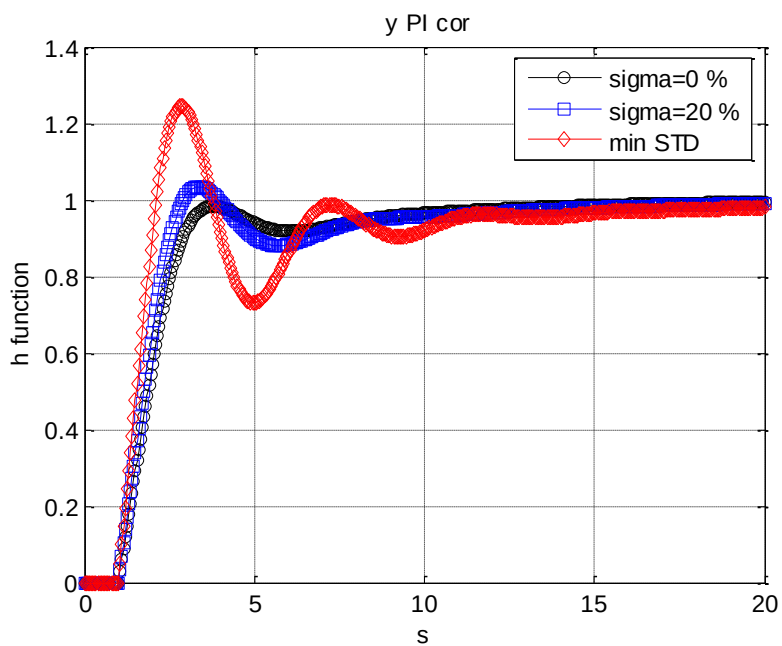


Рисунок 2.5 – Перехідні характеристики локальної суднової САУ з  
ПІ – регулятором з корекцією

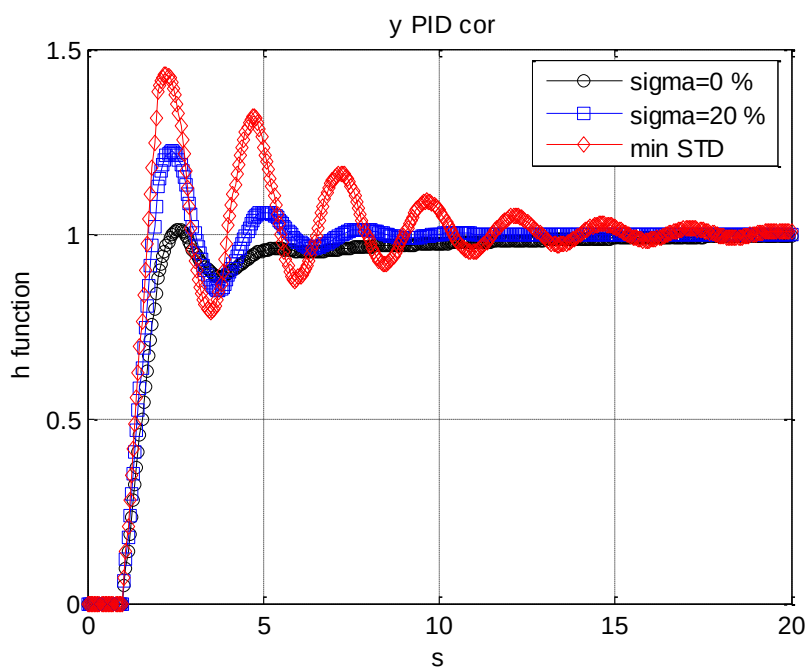


Рисунок 2.6 – Перехідні характеристики локальної суднової САУ з  
ПІД – регулятором з корекцією

### 2.3 Методика Зіглера налаштування регуляторів суднових систем автоматичного управління

Як було зазначено, локальні суднові системи автоматичного управління потребують налаштувань відповідних регуляторів для досягнення встановленої мети: забезпечення завданих запасів сталості та обмеження на завданому рівні динамічних та статичних похибок. За звичай, першим кроком для встановлення таких налаштувань регуляторів суднових САУ є застосування типових табличних налаштувань. Наступним кроком є дослідження можливостей покращення результатів синтезу за допомогою відомих емпіричних методик, зокрема методики Зіглера, Зіглера-Ніколса і супутніх методик.

Методика Зіглера заснована на практичному досвіді проектування локальних САУ.

Послідовність виконання завдань за методикою Зіглера складається в наступному:

- САУ із пропорційним регулятором (фізична, якщо це дозволяють умови застосування, або її математична модель) виводиться на межу сталості шляхом поступового підвищення коефіцієнту передачі регулятора. Такий коефіцієнт, із врахуванням коефіцієнту передачі незмінної частини САУ, є власне критичним коефіцієнтом підсилення.
- Встановлюються параметри відповідного процесу незатухаючих коливань, а саме їх період.
- За критичним коефіцієнтом підсилення та періодом незатухаючих коливань встановлюються відповідно пропонованим емпіричним залежностям налаштування типових регуляторів.

Відповідні пропоновані емпіричні залежності наведені в Таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Типові налаштування методом Зіглера-Нікольса

|           | Розрахунок по Step |          |          | Розрахунок по частотним параметрам |                  |                    |
|-----------|--------------------|----------|----------|------------------------------------|------------------|--------------------|
| Регулятор | $K$                | $T_i$    | $T_d$    | $K$                                | $T_i$            | $T_d$              |
| П         | $1/a$              | -        | -        | $0,5 / K_{180}$                    | -                | -                  |
| ПІ        | $0,9/a$            | $3L/K$   | -        | $0,4 / K_{180}$                    | $0,8T_{180} / K$ | -                  |
| ПІД       | $1,2/a$            | $0,9L/K$ | $0,5L/K$ | $0,6 / K_{180}$                    | $0,5T_{180} / K$ | $0,125T_{180} / K$ |

## 2.4 Результати застосування методики Зіглера для налаштувань регуляторів суднових систем автоматичного управління

Результати застосування методики Зіглера для налаштувань регуляторів суднових систем автоматичного управління для тестового об'єкту у вигляді аперіодичної ланки із запізненням наведено на рисунках 2.7 – 2.10.

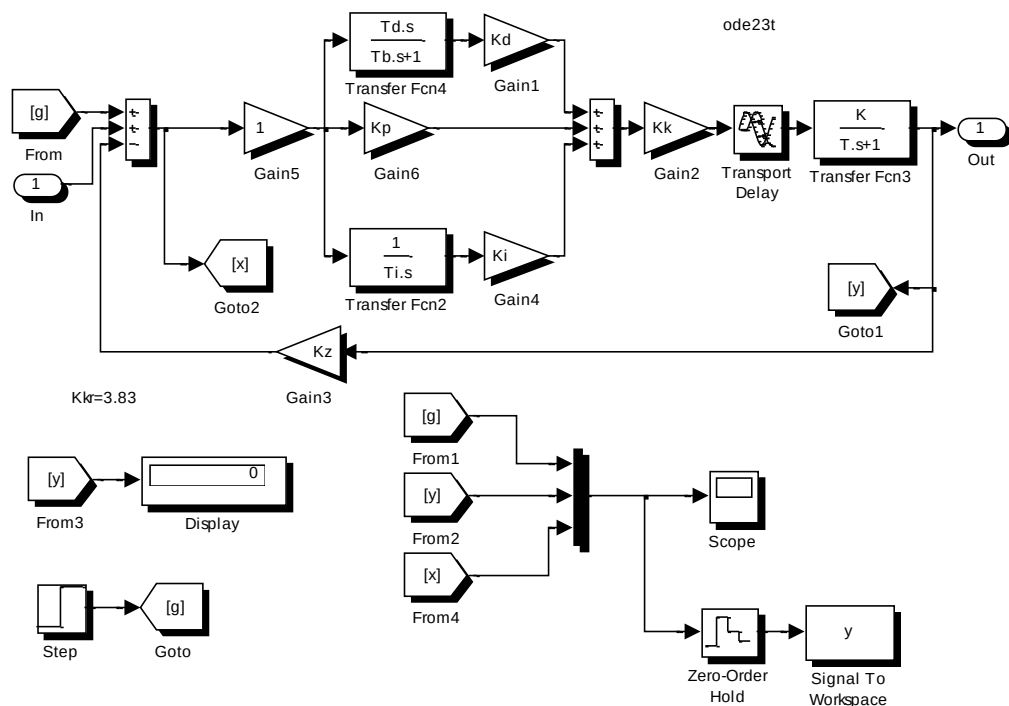


Рисунок 2.7 – Схема моделювання локальної суднової САУ



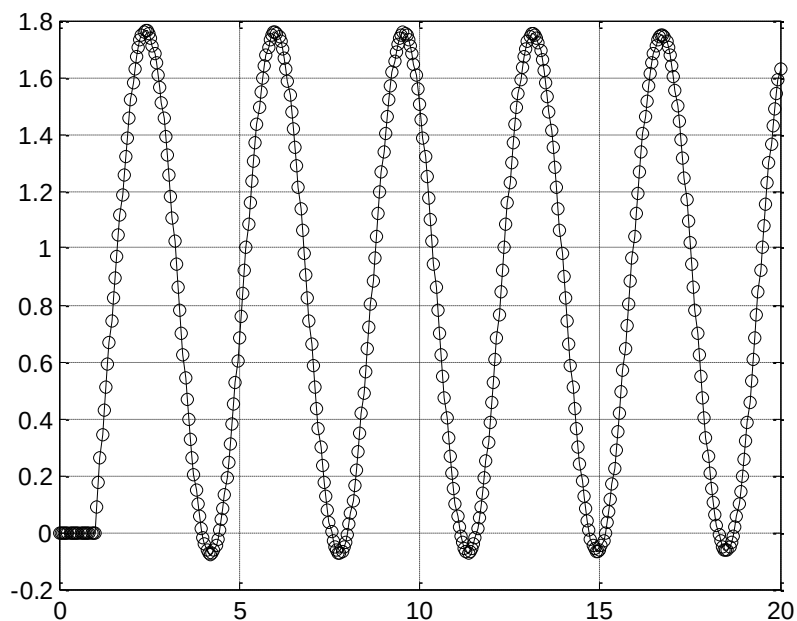


Рисунок 2.8 – Межа сталості локальної суднової САУ з П – регулятором

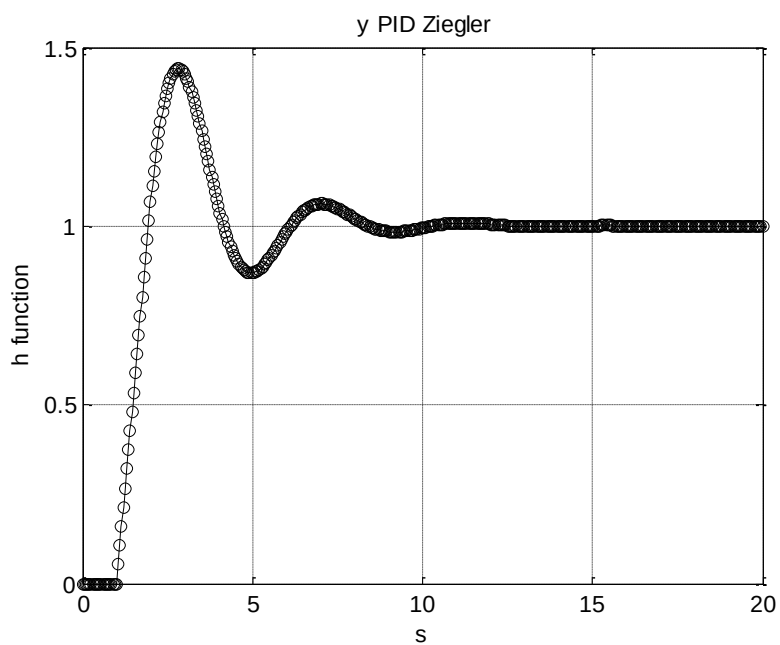


Рисунок 2.9 – Перехідні характеристики локальної суднової САУ з  
ПІД – регулятором

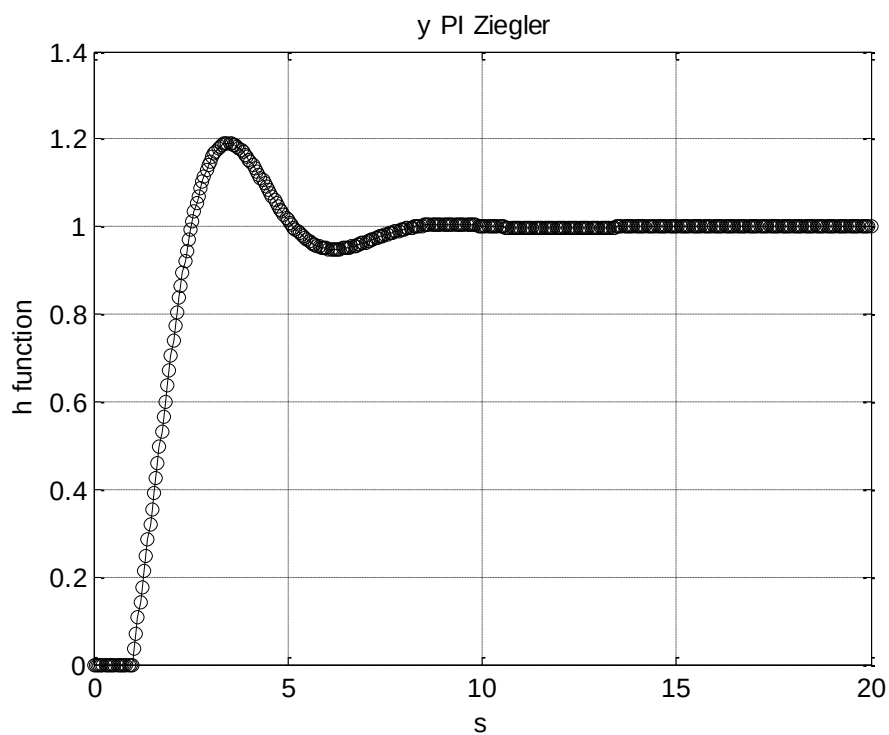


Рисунок 2.10 – Перехідні характеристики локальної суднової САУ з  
ПІ – регулятором

## Висновки до розділу 2

1. Застосування типових табличних налаштувань регуляторів суднових систем автоматичного управління загалом дозволяє знайти для вказаного класу об'єктів певне попереднє рішення завдань синтезу, але не завжди таке рішення відповідає вимогам до динаміки САУ.

2. Типові методики налаштування регуляторів суднових САУ мають значні обмеження, і тому їх застосування потрібно вважати тільки першим кроком для відшукування початкових умов подальшої оптимізації параметрів.

3. Типові методики налаштування регуляторів суднових САУ не дозволяють врахувати інерційні властивості виконавчих механізмів та датчиків стану.

4. Значним недоліком застосування типових табличних налаштувань регуляторів суднових систем автоматичного управління є неможливість врахування проєктованих запасів сталості.

5. Застосування методики Зіглера та супутніх аналогічних емпіричних методик налаштувань регуляторів суднових систем автоматичного управління загалом дозволяє знайти для вказаного класу об'єктів певне покращене попереднє рішення завдань синтезу, у порівнянні з табличними налаштуваннями. але не завжди таке рішення відповідає вимогам до динаміки САУ та запасів сталості.

6. Методики Зіглера та супутні аналогічні емпіричні методики налаштування регуляторів суднових САУ мають значні обмеження, що складаються в неможливості, за правилом, проведення фізичного експерименту щодо виведення конкретної САУ на межу сталості за умов експлуатації. Тому набуває важливого значення етап ідентифікації об'єкту для забезпечення коректності комп'ютерного експерименту. Їх застосування потрібно вважати тільки наступним кроком для відшукування початкових умов подальшої оптимізації параметрів.

7.Значним недоліком застосування методики Зіглера та супутніх аналогічних емпіричних методик налаштувань регуляторів суднових систем автоматичного управління є неможливість врахування проєктованих запасів сталості.

8.Методики Зіглера та супутні аналогічні емпіричні методики налаштування регуляторів суднових САУ мають значні переваги щодо застосування, оскільки дозволяють врахувати інерційні властивості виконавчих механізмів та датчиків стану. Загалом, вигляд незмінної частини САУ не приймається до уваги.

### 3. ОПТИМІЗАЦІЯ НАЛАШТУВАНЬ РЕГУЛЯТОРІВ СУДНОВИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ЗАСОБАМИ ІНТЕРАКТИВНОГО СЕРЕДОВИЩА MATLAB ТА ЗАСОБАМИ СУКУПНОСТІ МЕТОДІВ СТОХАСТИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ МОНТЕ-КАРЛО

#### 3.1 Методика оптимізації налаштувань регуляторів суднових САУ засобами інтерактивного середовища MATLAB

За вимог застосування, локальні суднові системи автоматичного управління потребують налаштувань відповідних регуляторів для досягнення встановленої мети: забезпечення заданих запасів сталості та обмеження на заданому рівні динамічних та статичних похибок. Першим кроком, як це було запропоновано раніше, для встановлення таких налаштувань регуляторів суднових САУ є застосування типових табличних налаштувань. Якщо мета синтезу не досягнуто, наступним кроком є дослідження можливостей покращення результатів синтезу за допомогою відомих емпіричних методик, зокрема методики Зіглера, Зіглера-Ніколса і супутніх методик. За необхідністю, якщо мета синтезу за попередніми кроками не досягнута, потрібно використовувати більш досконалі засоби встановлення параметрів регуляторів суднових САУ. Таким засобом є оптимізація налаштувань регуляторів суднових САУ засобами інтерактивного середовища MATLAB.

Методика оптимізація налаштувань регуляторів суднових САУ засобами інтерактивного середовища MATLAB складається з наступних етапів.

1. Створити модель системи з ПІД - регулятором у класичній формі по контуру регулювання вихідної координати, використовуючи стандартний PID - регулятор інтерактивного середовища MATLAB і додатка Simulink. Установити сигнал завдання на номінальному рівні згідно технічного опису системи.

2. Виконати тестування системи регулювання на основі порівняння перехідних процесів, отриманих за попередньою методикою налаштування у різних формах подання структури регулятора..

3. Виконати синтез системи регулювання на основі засобів Tuned інтерактивного середовища MATLAB і додатка Simulink для ПІД - регулятора за різними критеріями. Одержати перехідні й частотні характеристики системи регулювання.

4. Створити керуючу програму моделювання й дослідження характеристик системи регулювання.

5. Установити запаси стійкості й показники якості регулювання (у вигляді обчислювальних результатів).

6. Встановити відповідність отриманих результатів технічному завданню на проектування суднової САУ.

3.2 Результати застосування методики оптимізації налаштувань регуляторів суднових САУ засобами інтерактивного середовища MATLAB

Результати застосування методика оптимізації налаштувань регуляторів суднових САУ засобами інтерактивного середовища MATLAB для тестового об'єкту у вигляді аперіодичної ланки із запізненням наведено на рис. 3.1 – рис. 3.7.

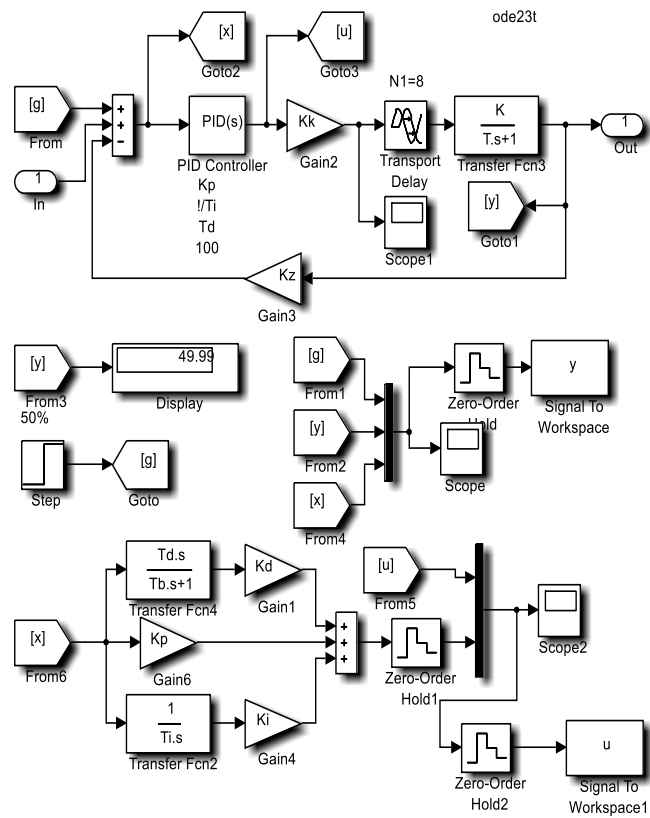


Рисунок 3.1 – Схема моделювання локальної суднової САУ для її тестування.

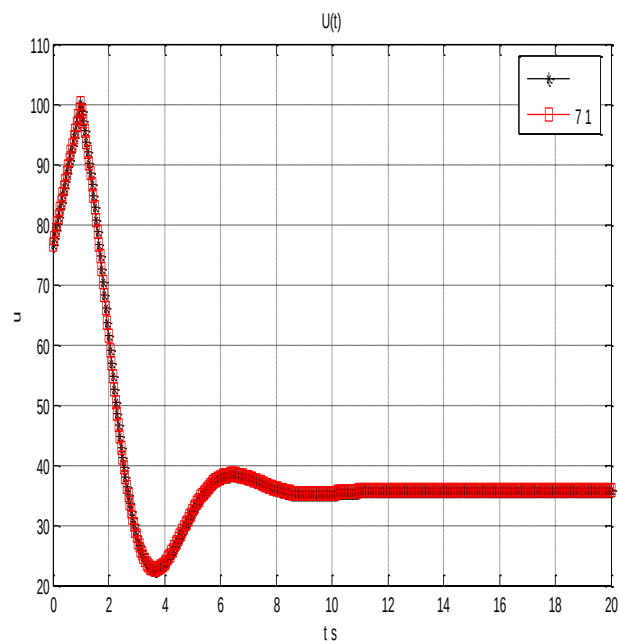


Рисунок 3.2 – Тестування системи регулювання

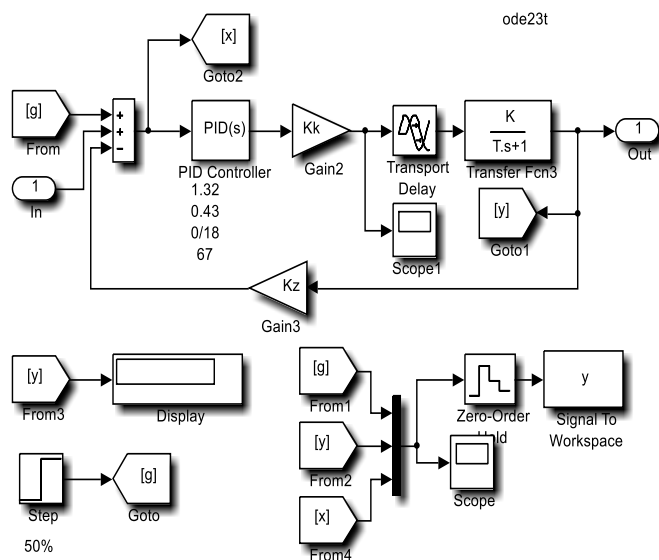


Рисунок 3.3 – Схема моделювання локальної суднової САУ

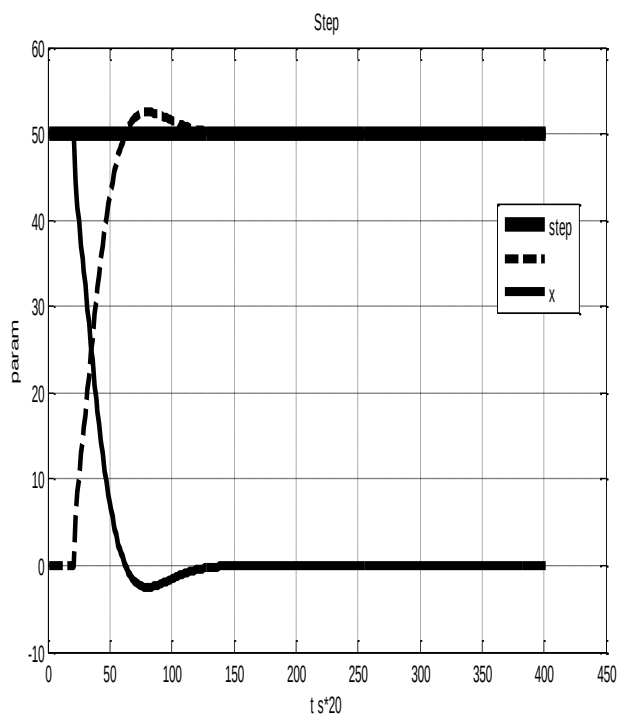


Рисунок 3.4 – Перехідні характеристики оптимізованої локальної суднової САУ з ПІ – регулятором



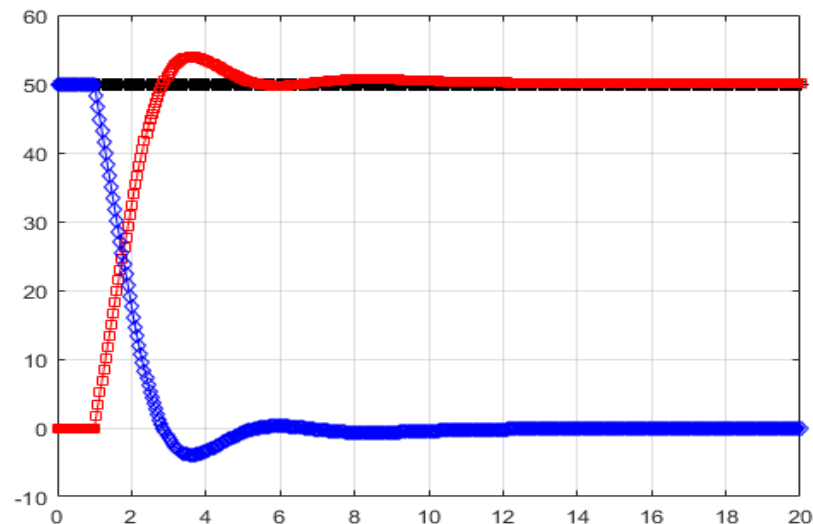


Рисунок 3.5 – Перехідні характеристики оптимізованої локальної суднової САУ з ПІД – регулятором

Встановлені показники САУ є наступними:  $K_p = 1.2372$ ;  $K_d = 0.2927$ ;  $K_i = 0.4391$ ; Статична помилка - 0; Час перехідного процесу - 4.2с.; Перерегулювання - 8%. Коливальність - відсутня; Запаси стійкості оптимальної системи регулювання 7.98 db по амплітуді й 60 градусів по фазі.

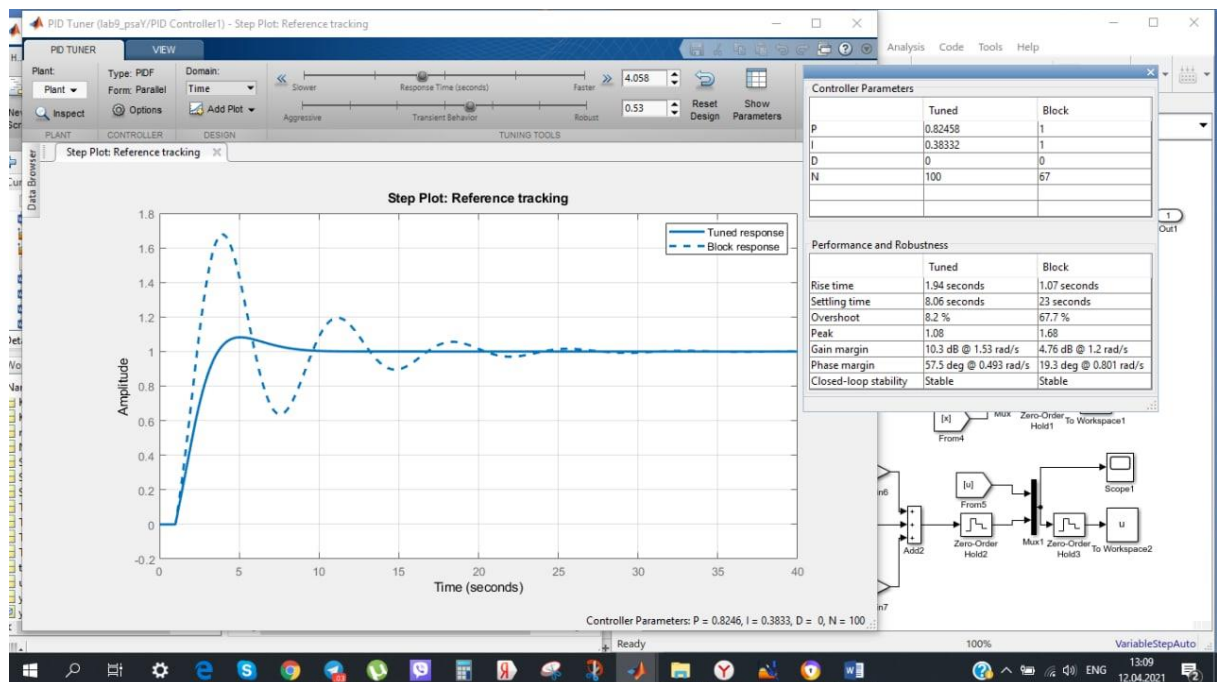


Рисунок 3.6 – Вікно інтерактивного моделювання оптимізованої локальної суднової САУ з ПІД – регулятором

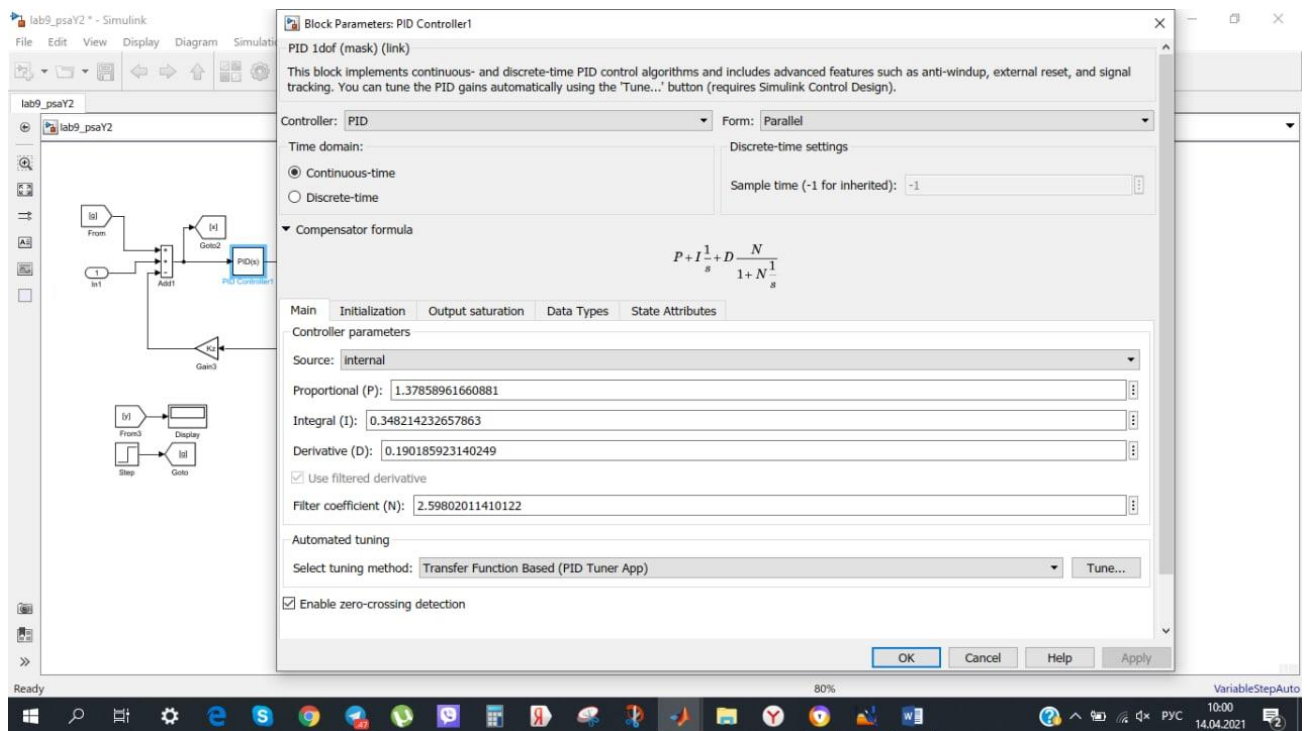


Рисунок 3.7 – Вікно завдання параметрів для інтерактивного моделювання оптимізованої локальної суднової САУ з ПД – регулятором

### 3.3 Методика оптимізації налаштувань регуляторів суднових САУ засобами сукупності методів стохастичної оптимізації Монте-Карло

Методика оптимізації налаштувань регуляторів суднових САУ засобами сукупності методів стохастичної оптимізації Монте-Карло є в поточний час найбільш досконалим засобом вирішення поставлених завдань.

Для досягнення встановлених технічними завданнями на проектування показників, локальні суднові системи автоматичного управління потребують налаштувань відповідних регуляторів для досягнення встановленої мети: забезпечення завданих запасів сталості та обмеження на завданому рівні динамічних та статичних похибок. Першим кроком, як це було запропоновано раніше, для встановлення таких налаштувань регуляторів суднових САУ є застосування типових табличних налаштувань. Якщо мета синтезу не досягнуто, наступним кроком є дослідження можливостей покращення результатів синтезу за допомогою відомих емпіричних методик, зокрема

методики Зіглера, Зіглера-Ніколса і супутніх методик. За необхідністю, якщо мета синтезу за попередніми кроками не досягнута, потрібно використовувати більш досконалі засоби встановлення параметрів регуляторів суднових САУ. Таким засобом є оптимізація налаштувань регуляторів суднових САУ засобами інтерактивного середовища MATLAB. Але пропоновані методики не дозволяють врахувати апріорну невизначеність параметрів об'єкту та незмінної частини, зміна параметрів яких може впливати на динамічні та статичні характеристики проектованої САУ.

Методи стохастичної оптимізації в умовах невизначеності є найбільш потужним в поточний час засобом вирішення практичних завдань, зокрема, щодо оптимізації параметрів регуляторів локальних суднових САУ.

Методика оптимізації налаштувань регуляторів суднових САУ засобами сукупності методів стохастичної оптимізації Монте-Карло складається з наступних етапів.

1). Створити модель системи з ПІД - регулятором у класичній формі по контуру регулювання вихідної координати, використовуючи стандартний PID - регулятор інтерактивного середовища MATLAB і додатка Simulink. Установити сигнал завдання на рівні, відповідному для отримання перехідної характеристики САУ. Параметри регулятора задаються в символічному вигляді як невизначені і підлягають відшукуванню за умови відповідності перехідного процесу завданням обмеженням

2). Підключити до виходу САУ блок **Check Step Response Characteristics** та виконати його налаштування.

3). Встановити обмеження щодо перехідної характеристики проектованої САУ та попередні значення коефіцієнтів регулятора і діапазони можливої зміни параметрів об'єкту регулювання.

4). Виконати оптимізацію систему регулювання відповідно до методики синтезу регуляторів методом Монте-Карло на основі засобів інтерактивного середовища MATLAB і додатка Simulink для ПІД - регулятора за вказаними

обмеженнями. Одержати перехідні й частотні характеристики системи регулювання.

5). Створити керуючу програму моделювання й дослідження характеристик системи регулювання.

6). Установити запаси стійкості й показники якості регулювання (у вигляді обчислювальних результатів).

7). Встановити відповідність отриманих результатів технічному завданню на проектування суднової САУ.

### 3.4 Результати застосування методики оптимізації налаштувань регуляторів суднових САУ засобами сукупності методів стохастичної оптимізації Монте-Карло інтерактивного середовища MATLAB

Результати застосування методики оптимізації налаштувань регуляторів суднових САУ засобами сукупності методів стохастичної оптимізації Монте-Карло інтерактивного середовища MATLAB для тестового об'єкту у вигляді аперіодичної ланки із запізненням наведено на рисунках 3.8 – 3.12.

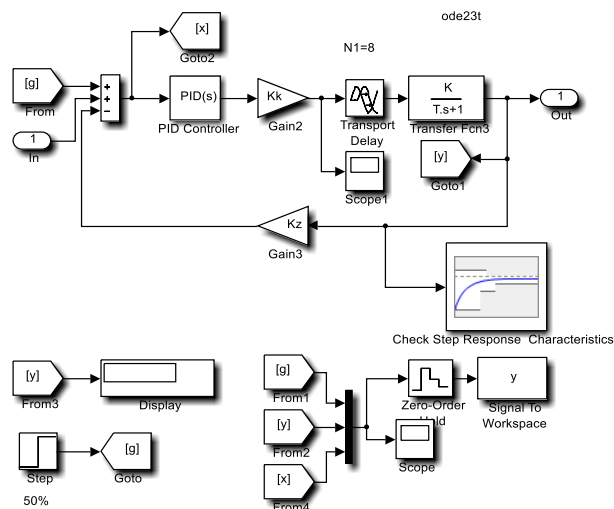


Рисунок 3.8 – Схема моделювання локальної суднової САУ для її оптимізації.

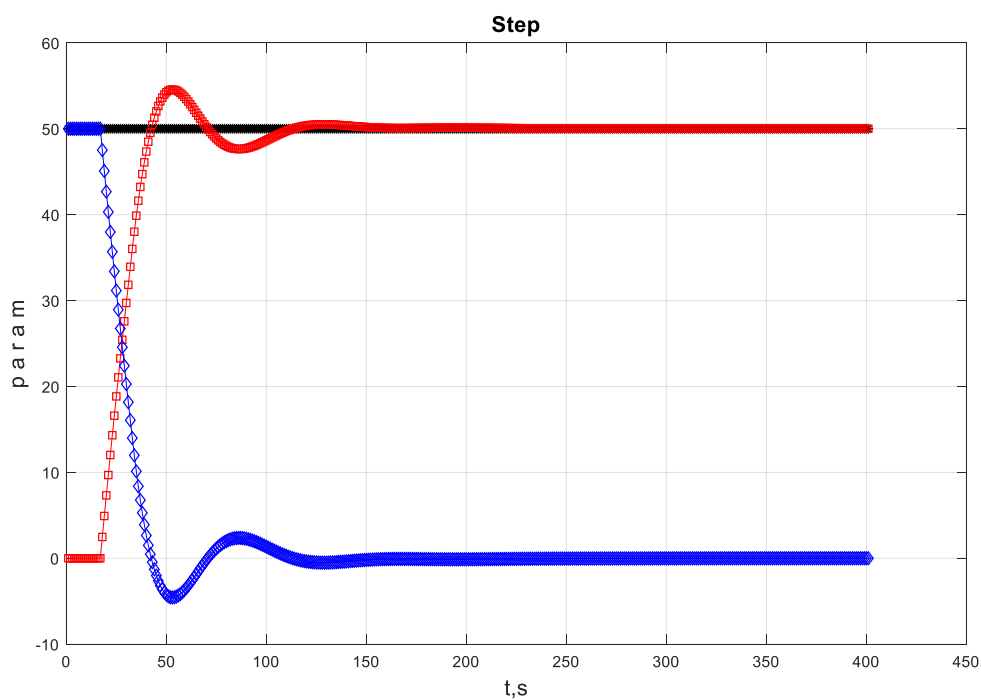


Рисунок 3.9 – Перехідні характеристики оптимізованої локальної суднової САУ з ПД – регулятором

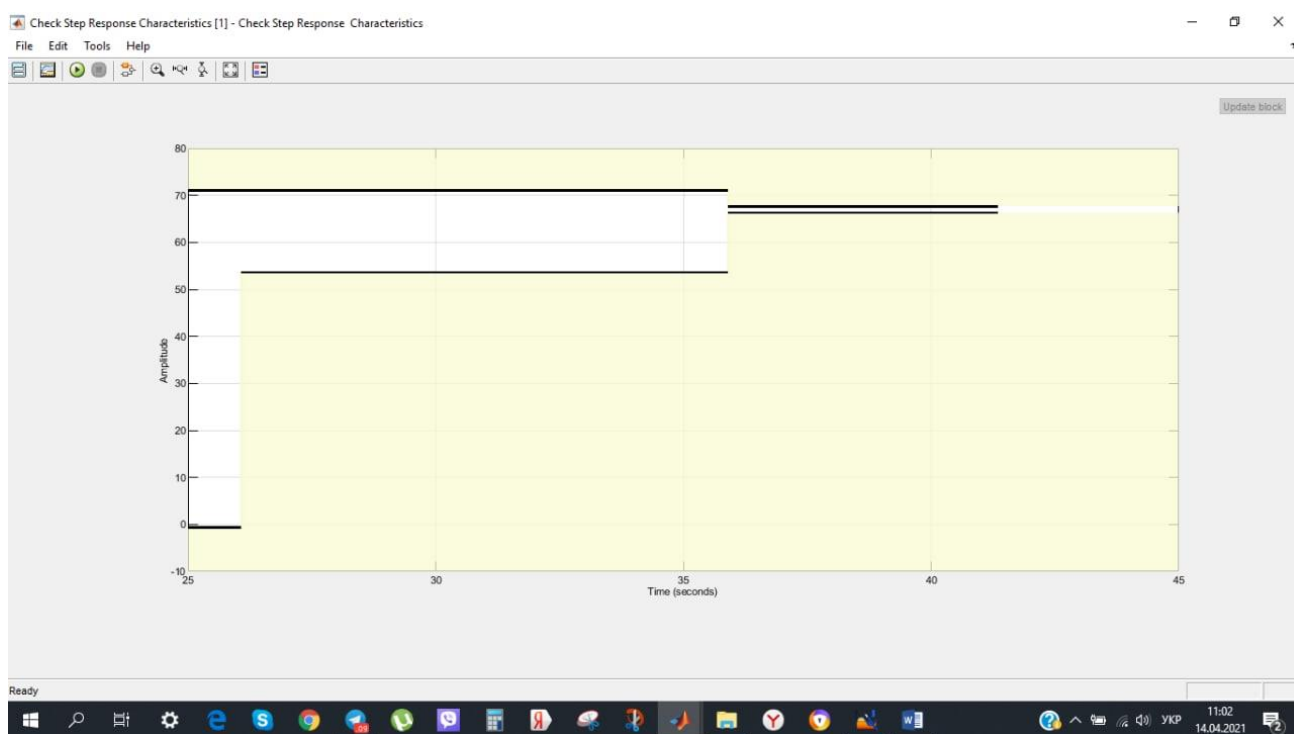


Рисунок 3.10 – Вікно інтерактивного завдання обмежень перехідної характеристики оптимізованої локальної суднової САУ

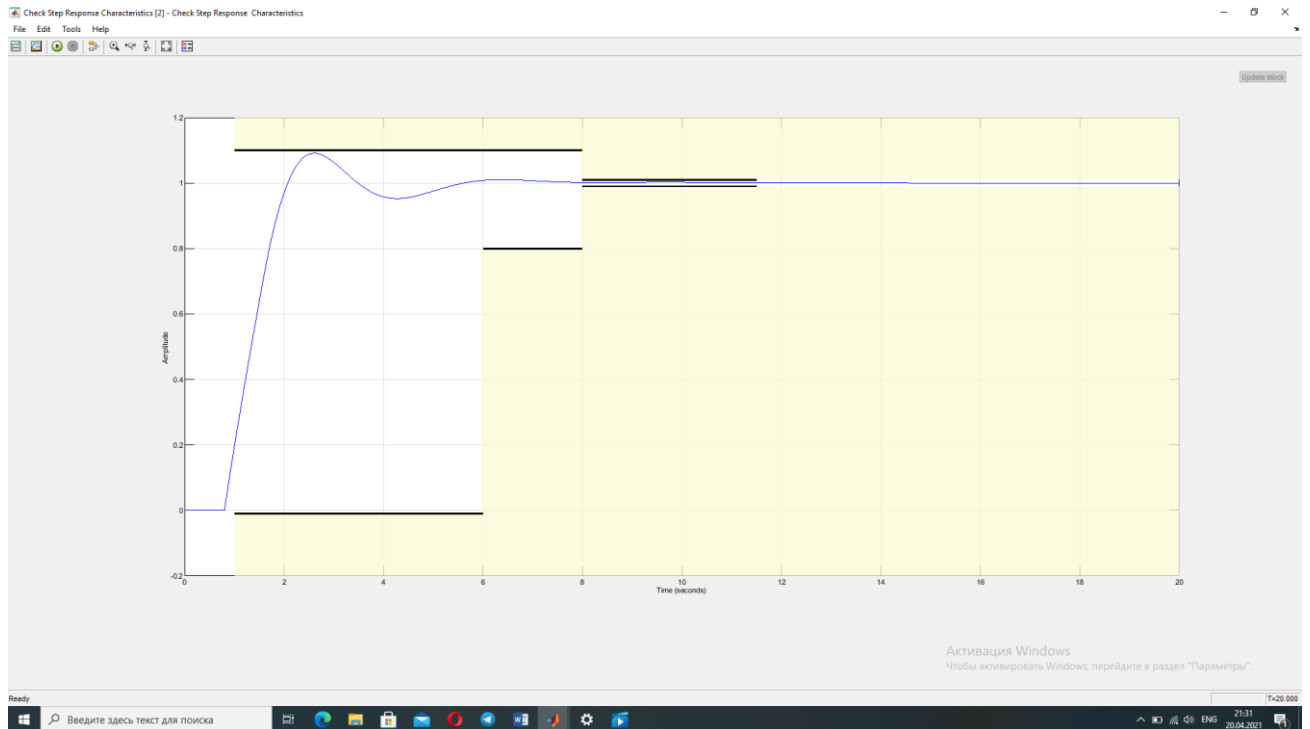


Рисунок 3.11 – Вікно обмежень перехідної характеристики оптимізованої локальної суднової САУ з ПІД – регулятором та результати оптимізації

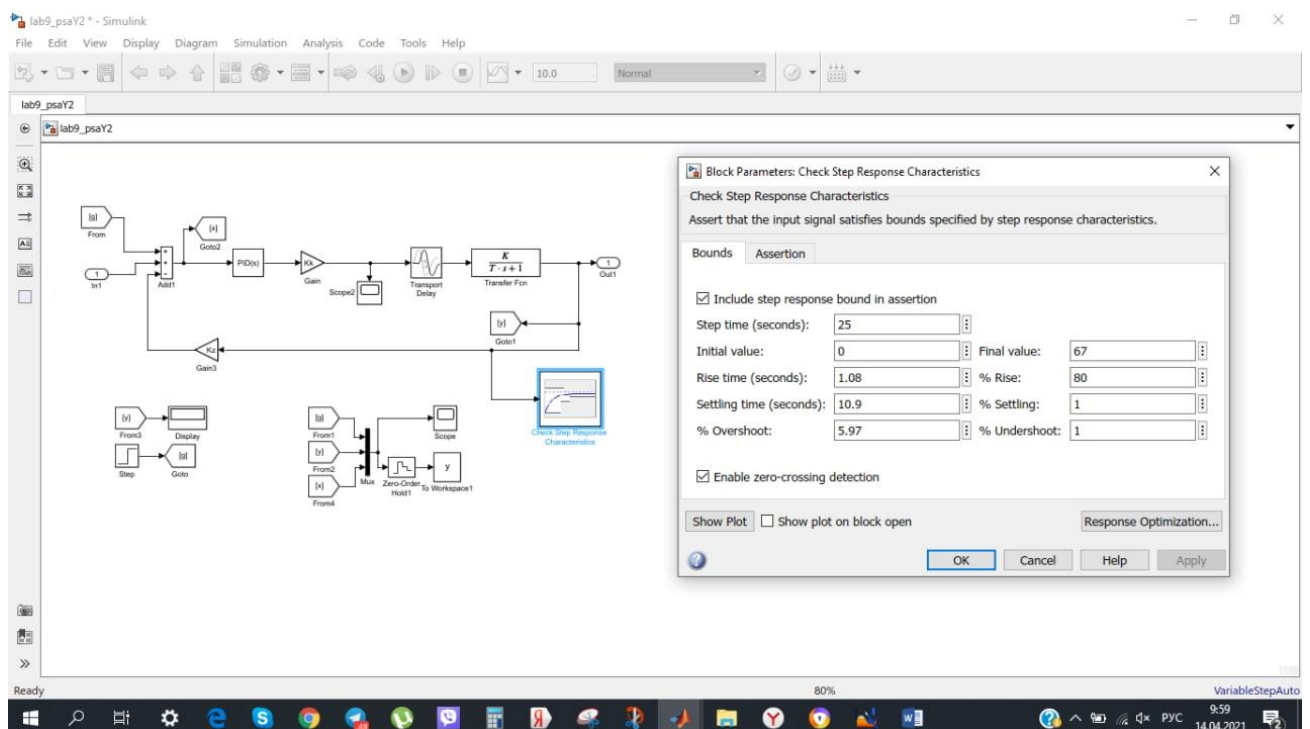


Рисунок 3.12 – Вікно табличного завдання обмежень перехідної характеристики оптимізованої локальної суднової САУ з ПІД – регулятором

Встановлені показники САУ є наступними:  $K_p = 1,60023$ ;  $K_d = 0.35031$ ;  $K_i = 0.4136$ ; Статична помилка - 0; Час перехідного процесу - 5 с.; Перерегулювання – 9 %. Запаси стійкості оптимальної системи регулювання 7.11db по амплітуді й 2.12 rad по фазі.

### Висновки до розділу 3

1.Застосування методики оптимізації налаштувань регуляторів суднових САУ засобами інтерактивного середовища MATLAB, та інших програмних продуктів, для вказаного класу об'єктів є могутнім засобом вирішення завдань синтезу регуляторів, у порівнянні з табличними налаштуваннями, методикою Зіглера, і дозволяє знайти таке рішення, що відповідає вимогам до динаміки САУ та запасів сталості.

2.Значною перевагою методики оптимізації налаштувань регуляторів суднових САУ засобами інтерактивного середовища MATLAB є подання регулятора в цифровій формі, що спрощує подальшу реалізацію у вигляді програм PLC, отримання в обчислювальному вигляді перехідних та частотних характеристик та інших показників сталості і якості САУ, що дозволяє миттєво встановити придатність обраного рішення умовам застосування.

3.Слід вказати, що оптимізація виконується у просторі чотирьох параметрів, де враховано неідеальність каналу диференційної компоненти і її цифрова реалізація, що значно ускладнює реалізацію програм регулювання при програмуванні PLC.

4.Недоліком методики оптимізації налаштувань регуляторів суднових САУ засобами інтерактивного середовища MATLAB є також неврахування можливих обмежень щодо рівня продуктованих виконавчих дій і їх відповідності фізичним обмеженням.

5.Застосування методики оптимізації налаштувань регуляторів суднових САУ засобами сукупності методів стохастичної оптимізації Монте-Карло інтерактивного середовища MATLAB для вказаного класу об'єктів є в поточний час найкращим засобом вирішення завдань синтезу регуляторів, у порівнянні з відомими, і дозволяє знайти таке рішення, що відповідає вимогам до динаміки САУ та запасів сталості в умовах апіорної невизначеності параметрів об'єкту регулювання.



6.Значною перевагою методики оптимізації налаштувань регуляторів суднових САУ засобами сукупності методів стохастичної оптимізації Монте-Карло інтерактивного середовища MATLAB є можливість подання вимог до перехідних процесів і, відповідно, до показників якості, в зручному та наглядному виді за допомогою інтерактивного вікна моделювання та оптимізації.

7.Визначення коефіцієнтів регулятора методом стохастичної оптимізації Монте-Карло виконується у багатовимірному просторі параметрів, де враховано не тільки параметри регулятора, а також можливий діапазон зміни параметрів об'єкту регулювання.

8.Недоліком методики оптимізації налаштувань регуляторів суднових САУ засобами сукупності методів стохастичної оптимізації Монте-Карло є суттєва залежність від вихідних параметрів, що потребує обов'язкового виконання попередніх кроків налаштувань для визначення множини параметрів, де можлива оптимізація.

## 4 РЕГУЛЯТОРИ СУДНОВИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ З НЕЧІТКОЮ ЛОГІКОЮ

### 4.1 Особливості застосування регуляторів суднових САУ з нечіткою логікою

Питання синтезу суднових САУ в реальних умовах експлуатації суднових енергетичних систем мають значні особливості, що суттєво відрізняє їх від класичних питань синтезу. Головну відмінність становить висока міра невизначеності як відносно параметрів об'єктів, випадкових збурень та випадкових похибок вимірювання зміни керованих координат. В таких умовах в поточний час вважається перспективним шлях удосконалення суднових САУ за допомогою методів штучного інтелекту, зокрема методів, що враховують невизначеність та стохастичність умов експлуатації, зокрема методів fuzzy – логіки.

Приклади вирішення завдань за допомогою нечітких систем [16,17,18,19] вказують на значні переваги у порівнянні із типовими рішеннями.

Для суднових САУ застосування вказаних методів штучного інтелекту в реальних умовах експлуатації мають встановлені особливості [20,21].

Регулятори суднових САУ, що засновані на fuzzy – логіці, виконують складне багатовимірне нелінійне логіко-динамічне перетворення похибки регулювання вихідних змінних, та її похідних, у керуючий вплив за допомогою процедур дефазифікації. Встановлення меж застосування таких регуляторів в суднових САУ ще потребує досліджень з огляду на алгоритмічну складність пропонованих нових рішень у компромісі з досяжним техніко-економічним ефектом.

Пропонований підхід дослідження суднових САУ з регуляторами, що засновані на fuzzy – логіці, заснований на моделюванні динамічних процесів із урахуванням невизначеності умов експлуатації.

## 4.2 Методика побудови регуляторів суднових САУ з нечіткою логікою

Методика побудови регуляторів суднових САУ з нечіткою логікою складається в наступному:

- Будується комп'ютерна модель досліджуваної суднової САУ, що включає fuzzy - регулятор та класичний ПД – регулятор для порівняння та верифікації отриманих результатів.

- Виконується комп'ютерний експеримент шляхом отримання динамічних характеристик суднової САУ. Комп'ютерний експеримент проводиться як для суднової САУ із fuzzy - регулятором та класичним ПД – регулятором.

- Уводиться параметр невизначеності у вигляді випадкових похибок вимірювання вихідної регульованої змінної. Виконується комп'ютерний експеримент шляхом отримання динамічних характеристик суднової САУ. Комп'ютерний експеримент проводиться як для суднової САУ із fuzzy - регулятором та класичним ПД – регулятором.

- Виконується порівняння характеристик суднової САУ по критерію середньоквадратичного відхилення від програми регулювання для суднової САУ із класичним ПД – регулятором та fuzzy - регулятором.

- Виконується додаткова перевірка збіжності результатів комп'ютерного експерименту для різних рівнів похибок вимірювання в суднової САУ із класичним ПД – регулятором та fuzzy – регулятором.

- За позитивним результатом перевірки встановлюються межі застосування в судновій САУ fuzzy – регулятора за перевагами щодо точності регулювання.

### 4.3 Результати застосування методики побудови регуляторів суднових САУ з нечіткою логікою

Вирішення питання щодо встановлення переважних меж застосування регуляторів суднових САУ з нечіткою логікою обрано завдання регулювання рівня води в допоміжному судовому котлі. Застосовано відомий приклад sltank програмного продукту Fuzzy Logic Toolbox інтерактивного середовища MATLAB, який суттєво перероблено для врахування динаміки об'єкту регулювання. Відповідні моделі, що дозволяють порівняти ефективність класичного ПІД – регулятора та fuzzy – регулятора, представлено на рис. 4.1 та рис. 4.2. Результати моделювання представлені на рис. 4.3 та рис. 4.4.

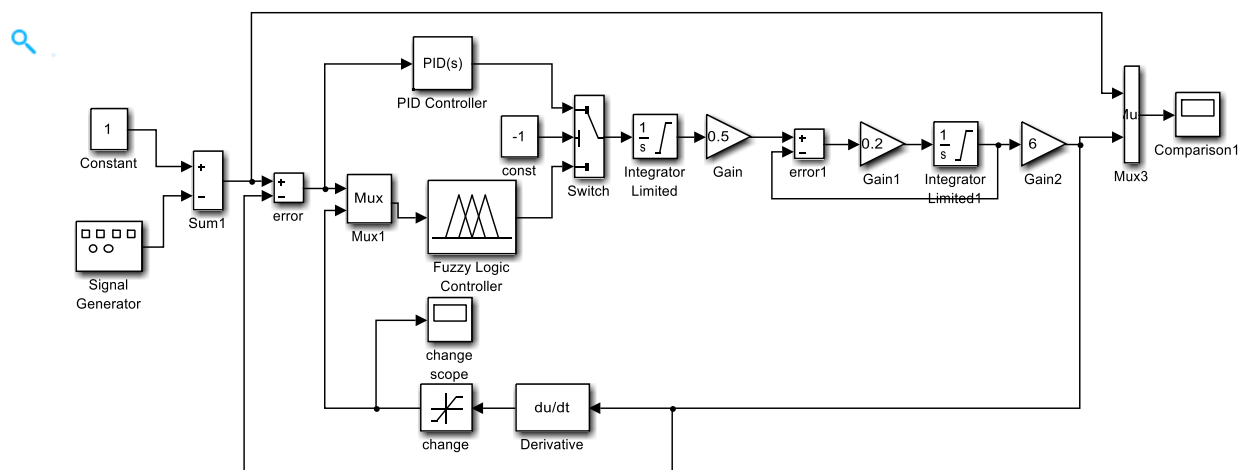


Рисунок 4.1 – Схема моделювання локальної суднової САУ рівнем води в допоміжному судовому котлі.

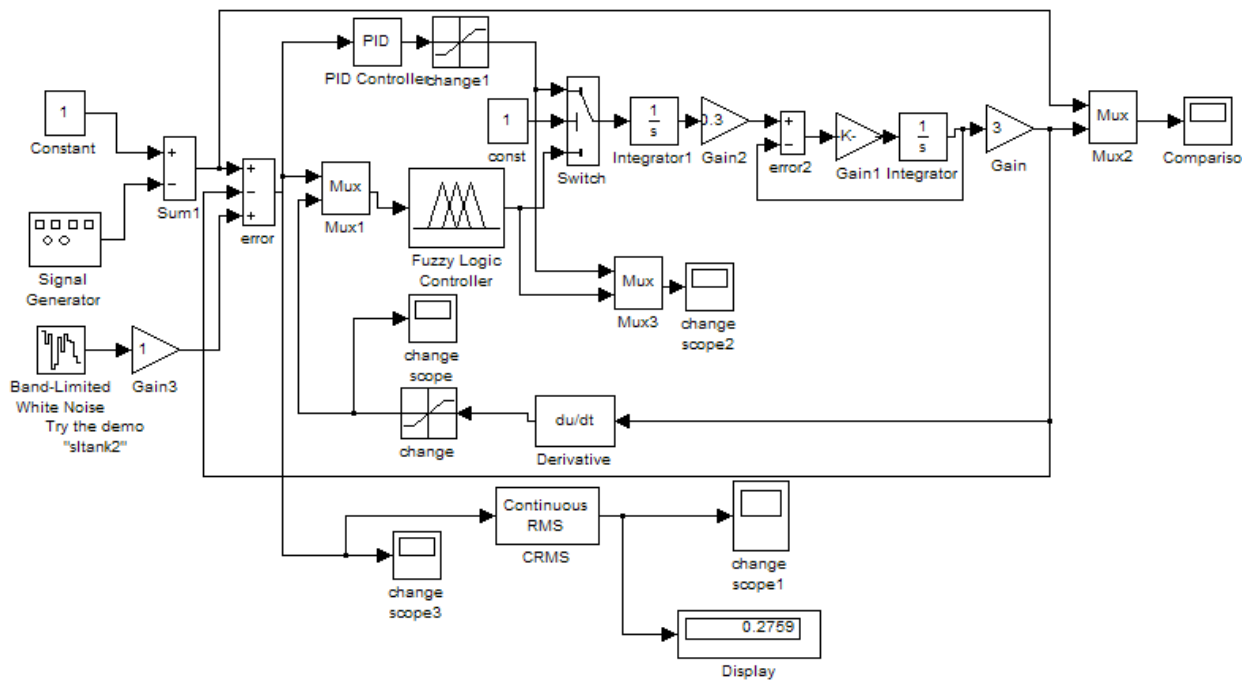


Рисунок 4.2 – Схема моделювання локальної суднової САУ рівнем води в допоміжному судновому котлі з урахуванням випадкових похибок.

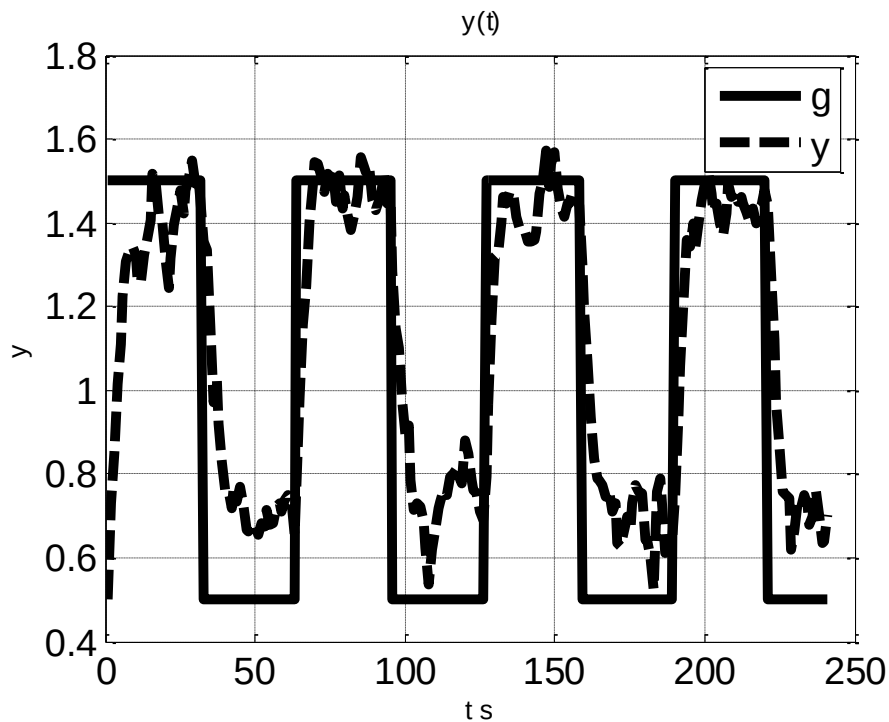


Рисунок 4.3 – Процеси регулювання в судновій САУ рівнем води з ПІД- регулятором

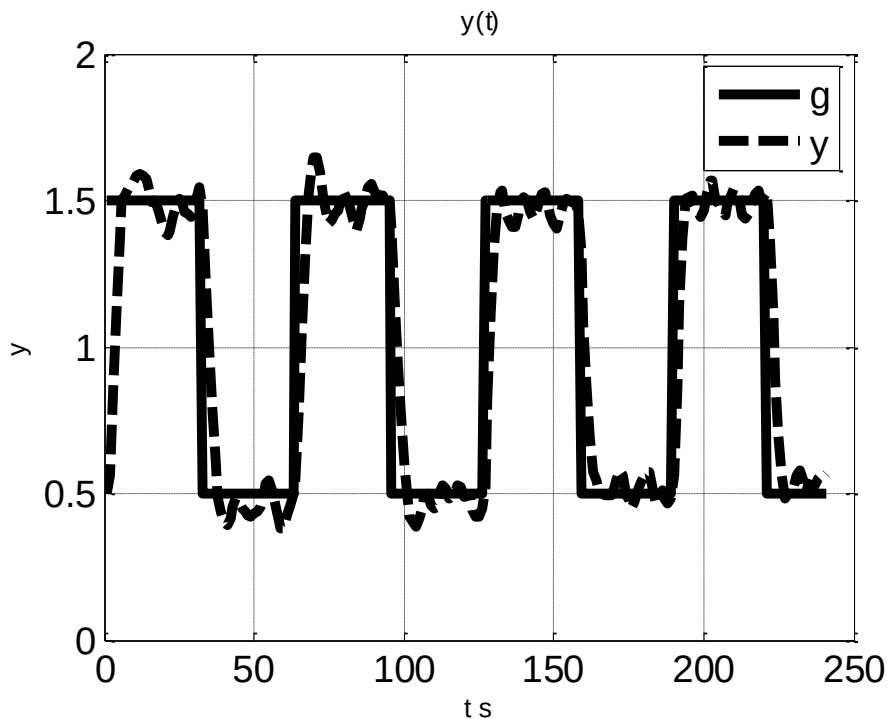


Рисунок 4.4 – Процеси регулювання в судновій САУ рівнем води з fuzzy - регулятором

Встановлено, що в умовах стохастичності процесів регулювання середньоквадратична похибка регулювання за допомогою fuzzy – регулятора може бути зменшена в 2...3 рази, у порівнянні з застосуванням в судновій САУ рівнем води ПД- регулятора, що доводить переваги регуляторів, що засновані на нечіткій логіці, в умовах невизначеності вихідних даних

## Висновки до розділу 4

1. Удосконалення суднових САУ шляхом застосування регуляторів, що засновані на нечіткій логіці, становить шлях покращення їх характеристик в умовах апріорної невизначеності параметрів об'єкту регулювання, випадкових збурень та похибок вимірювання керованих змінних.

2. Запропонована та обґрунтована шляхом комп'ютерного експерименту методика дослідження динамічних властивостей суднових систем автоматичного регулювання, що застосовують регулятори, засновані на нечіткій логіці.

3. Встановлено, що середньоквадратична похибка регулювання за допомогою fuzzy – регулятору може бути зменшена в 2...3 рази, що доводить переваги регуляторів, що засновані на нечіткій логіці, в умовах невизначеності вихідних даних.

4. Недоліком застосування регуляторів, що засновані на нечіткій логіці, є складність завдання початкових даних і їх програмування та необхідність залучення відповідних програмних продуктів високого рівня.

## ВИСНОВКИ

Під час виконання дипломної роботи була досягнута мета дослідження, яка спрямована на дослідження властивостей та встановлення меж застосування методик налаштування класичних ПД – регуляторів суднових систем автоматичного управління у порівнянні їх досяжних характеристик щодо запасів сталості та похибок регулювання, та встановленні меж застосування регуляторів, що засновані на нечіткій логіці..

На основі використання існуючих методів отримані результати, які в сукупності вирішують важливе науково-технічне завдання відшукування налаштувань регуляторів суднових САУ керованої зміни стану суднових енергетичних установок шляхом використання наукових та інженерно-технічних рішень, які полягають у розробці та використанні комп'ютерних моделей САУ із різними налаштуваннями регуляторів, що дає змогу обрати відповідне умовам експлуатації рішення завдання синтезу.

Отримані наукові і практичні результати роботи, які полягають в наступному:

1. На основі огляду літературних джерел проведено критичний огляд та порівняння типових завдань та типових моделей складових частин суднових систем автоматичного управління. Встановлена важливість попереднього етапу ідентифікації об'єкту та складових частин САУ.

2. Виконано огляд і аналіз суднових систем автоматичного управління із типовими табличними налаштуваннями регуляторів та із налаштуваннями за типовими методиками. Встановлені невідповідність отримуваних рішень пропонованим за методиками результатів.

3. Запропоновані принципи оптимізації налаштувань регуляторів суднових систем автоматичного управління засобами інтерактивного середовища MATLAB та засобами сукупності методів стохастичної оптимізації МОНТЕ-КАРЛО. Встановлена висока чутливість таких методик



до попереднього наближення, яке повинне бути знайдене за типовими методиками налаштувань регуляторів.

4. Вирішено задачу синтезу регуляторів суднових систем автоматичного управління із нечіткою логікою.

5. Загальні рекомендації за результатами виконаної дипломної роботи складаються в необхідності детального аналізу досліджуваних даних у вигляді математичних моделей керованих процесів в СЕУ та випадкових збурень, що суттєво впливає на ефективність пропонованих методик.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Пушкар, М.С. Проектування систем автоматизації [Текст]: навч. посібник / М.С. Пушкар, С.М. Проценко – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 268 с.
2. Методи оптимізації систем управління. Застосування пакета OPTIMIZATION TOOLBOX системи MATLAB для безумовної оптимізації: Методичні вказівки з практичних занять / В.В.Логвиненко. - Одеса: ОНМА, 2005. - 27 с.
3. Жукова Н.В. та ін. Сучасна теорія керування динамічних систем // Навч. посібник. . – Донецьк, . – ДонНТУ. 2013 – 292 с.
4. R.C. Dorf, R.H. Bishop., Modern Control Systems // Prentice Hall– 2004. – 832 с.
5. Дубовой В. М. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів і систем керування : навчальний посібник / В. М. Дубовой. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 308 с.
6. Попович М.Г. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник – К.: Либідь, 2005. - 680 с.
5. Боровська Т. М. Основи кібернетики та дослідження операцій : навчальний посібник / Боровська Т. М., Колесник І. С., Северілов В. А. – Вінниця : ВДТУ, 2002. – 242
7. Лозинський А.О., Мороз В.І., Паранчук Я.С. Розв'язання задач електромеханіки в середовищах MathCAD і MATLAB / Навчальний посібник. – Львів: Вид-во ДУ “Львівська політехніка”, 2000. – 166 с
8. Поповіч М.Г. Теорія автоматичного керування. / М.Г. Поповіч, О.В. Ковальчук // Навчальний посібник. – К. – Либідь, 1997. – 544 с:
9. Математичне забезпечення інформаційно-управляючих систем: Підручник для студ. вищ. навч. закладів / Б. В. Шамша, А. В. Гуржій, З. В. Дудар, В. М. Левикін. - Х.: "Компанія СМІТ", 2005. - 448 с.

10. Електронний ресурс: ДСТУ 2389-94 Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення <https://www.twirpx.com/file/2414014/>
11. Електронний ресурс: ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення (2273) [https://dnaop.com/html/2273/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3\\_2860-9410](https://dnaop.com/html/2273/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_2860-9410).
12. Kongsberg Norcontrol marine automation systems. – Norway, 2005. – 140 p.
13. The MotorShip, insight for marine technology professionals [Електронний ресурс]: журнал. – Режим доступу: <http://www.motorship.com/news101/industry-news/simulator-for-dual-fuel-d-e-lng-ships>. – 12.12.2011
14. Wartsila 2 stroke engines Manual “Operator flexView”. – Switzerland, 2008. – P. 152.
15. Wartsila RT-flex82C Operating manual “Marine”. – 2009. – Rev 2.3.1. – P. 42.
16. Апостолук В.О. Інтелектуальні системи керування: конспект лекцій. / В.О. Апостолук, О.С. Апостолук. - К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 88 с.
17. R. Babuska. Fuzzy Modeling for Control / Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.
18. L. A. Zadeh. Fuzzy sets / Information and Control, 8:338-353, 1965.
19. H. Bandemer and S. Gottwald. Fuzzy Sets, Fuzzy Logic Fuzzy Methods with Applications / John Wiley & Sons, Chichester, 1995.
20. A. B. Badiru and J. Y. Cheung. Fuzzy Engineering Expert Systems with Neural Network Applications / John Wiley, New York, NY, 2002.
21. Миргород, В.Ф. Удосконалення характеристик суднових систем автоматичного регулювання за допомогою застосування FUZZY- регуляторів [Текст] / И.М. Гвоздева, В.Ф. Миргород, Д.В. Лутій, О.В. Мурзак // Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 23.11.2021 - 24.11.2021. – Одеса: НУ «ОМА», 2021. – С.109-112. ISSN 2706-7874 (print). DOI:10.31653/2706-7874.SEEEA-2021.11.1-238.