

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:

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИК НАЛАШТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ
ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ У СУДНОВИХ СИСТЕМАХ
АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

Виконав: здобувач другого
(магістерського) рівня вищої освіти
спеціальності
271 Морський та внутрішній водний
транспорт
(шифр і назва спеціальності)

Кирсанов Микита Олегович
(підпис, прізвище та ініціали)

допущений до захисту _____
(дата малого захисту)

Завідувач кафедри Гвоздева І. М.
(підпис, прізвище та ініціали)

Керівник Гвоздева І. М.
(підпис, прізвище та ініціали)

Нормоконтролер В. Кензель
(підпис, прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(підпис, прізвище та ініціали)

Одеса

2023

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ

створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 12:35:57 19.12.2023

Назва файлу з підписом: ДП_Кирсанов_181223.pdf.p7s

Розмір файлу з підписом: 787.5 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: ДП_Кирсанов_181223.pdf

Розмір файлу без підпису: 769.4 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: Кирсанов Микита Олегович

ПІБ: Кирсанов Микита Олегович

Країна: Україна

РНОКПП: 3653505595

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 13:35:52

19.12.2023

Сертифікат виданий: "Дія". Кваліфікований надавач електронних довірчих послуг

Серійний номер: 382367105294AF9704000000AB4314002535C201

Тип носія особистого ключа: ЗНКІ криптомодуль ІІТ Гряда-301

Алгоритм підпису: ДСТУ-4145

Тип підпису: Кваліфікований

Тип контейнера: Підпис та дані в CMS-файлі (CADES)

Формат підпису: 3 повними даними ЦСК для перевірки (CADES-X Long)

Сертифікат: Кваліфікований

Кариник роботи

підтверджені підписи

1. Строк надання

3. Вихідні дані для

енергетичних уст

4. Зміст розрахунку

1. Математичні

2. Методи розрахунку

3. Інформація

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.
„15” 12 2023р.

ЗАВДАННЯ
ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА

КИРСАНОВА МИКИТИ ОЛЕГОВИЧА

_____ ,
(прізвище, ім'я, по батькові)
1. Тема роботи УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИК НАЛАШТУВАННЯ
РЕГУЛЯТОРІВ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ У СУДНОВИХ
СИСТЕМАХ 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 „12” грудня 2023 року № 2003

2. Строк подання курсантом закінченої роботи 15.12.2023р.

3. Вихідні дані до роботи: параметри та схеми автоматизації суднових енергетичних установок, структури та параметри локальних суднових систем автоматичного управління, параметри типових регуляторів, параметри суднових енергетичних установок

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці)

1 Математичні моделі елементів суднових САУ. 2 Типові математичні моделі регуляторів режимних параметрів в суднових САУ та їх співставлення.

3 Методи забезпечення робастності суднових САУ.

4. Цифрова реалізація регуляторів режимних параметрів суднових САУ.

5. Перелік графічного матеріалу (з точними вказівками обов'язкових креслень)
Класифікація математичних моделей. Структурна схема локальної САУ.
Структурна схема керуючого пристрою локальної САУ. Амплітудно-фазово
частотні характеристики розімкнених САУ із астатичною та статичною
незмінними частинами. Перехідна характеристика робастної САУ із астатичною
незмінною частиною. Експериментальна перехідна характеристика об'єкту.
Експериментальна розгінна характеристика об'єкта та її апроксимація. Моделі
аналогової та цифрової САУ.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Отримання завдання до ДРМ	01.10.22	Виконано
2	Вивчення методів проектування суднових САУ та їх огляд	01.10.22-30.11.22	Виконано
3	Ознайомлення та огляд сучасних методів синтезу регуляторів суднових САУ	01.10.22-30.11.22	Виконано
4	Аналіз методів забезпечення робастності суднових САУ	01.12.22-08.02.23	Виконано
5	Вивчення особливостей цифрової реалізації регуляторів режимних параметрів суднових САУ	09.02.22-08.03.23	Виконано
6	Вивчення роботи програмного середовища MATLAB	09.03.23-08.06.23	Виконано
7	Розробка комп'ютерних моделей для розрахунку необхідних залежностей	09.06.2023-03.10.23	Виконано
8	Проведення комп'ютерних експериментів	03.10.22-09.12.2023	Виконано
9	Створення пояснювальної записки	13.11.23-15.12.23	Виконано

Курсант-дипломник

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пропонована дипломна магістерська робота присвячена встановленню властивостей, особливостей та обмежень застосування пропонованих відомих та новітніх методик налаштувань регуляторів суднових систем автоматичного управління. Значна увага у роботі приділяється дослідженню та моделюванню процесів у суднових системах автоматичного управління, зокрема, цифрових, а також в умовах невизначеності

Мета роботи полягає у удосконаленні методик налаштування класичних регуляторів в умовах невизначеності щодо зміни параметрів, методів побудови їх дискретних аналогів та дослідженні процесів у суднових системах автоматичного управління шляхом узагальнення математичних моделей таких систем і їх складових, встановленні умов робастності та особливостей цифрової реалізації.

СУДНОВА ЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА, СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО
УПРАВЛІННЯ, РЕГУЛЯТОР, РОБАСТНІСТЬ, ЦИФРОВА РЕАЛІЗАЦІЯ

ABSTRACT

The proposed master's thesis is devoted to the establishment of properties, features and limitations of the proposed well-known and latest methods of setting regulators of ship automatic control systems. Considerable attention is paid in the work to the research and modeling of processes in ship automatic control systems, in particular, digital ones, as well as in conditions of uncertainty

The purpose of the work is to improve the methods of setting classic regulators in conditions of uncertainty regarding the change of parameters, methods of building their discrete analogs and researching processes in shipboard automatic control systems by summarizing mathematical models of such systems and their components, establishing robustness conditions and features of digital implementation.

SHIP POWER PLANT, AUTOMATIC CONTROL SYSTEM, REGULATOR,
ROBUSTNESS, DIGITAL IMPLEMENTATION

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ СУДНОВИХ САУ	14
1.1 Загальна характеристика елементів суднових САУ	14
1.2 Типові математичні моделі об'єктів в суднових САУ	19
1.2.1 Класифікація математичних моделей	19
1.2.2 Математичні моделі сигналів	21
1.2.3 Математичні моделі об'єктів і складових САУ	23
1.2.4 Непараметричні моделі	24
Висновки до розділу 1.....	27
2. ТИПОВІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ РЕГУЛЯТОРІВ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ В СУДНОВИХ САУ ТА ЇХ СПІВСТАВЛЕННЯ	28
2.1 Регулятор в складі САУ	28
2.2 Типові регулятори в складі САУ	31
2.2.1 Класифікація типових регуляторів	31
2.2.2 Пропорційний регулятор	32
2.2.3 Інтегральний регулятор	34
2.2.4 Пропорційно – інтегральний регулятор	36
2.2.5 Пропорційно – диференційний регулятор.....	37
2.2.6 Пропорційно – інтегрально – диференційний регулятор	39
Висновки до розділу 2	42
3. МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБАСТНОСТІ СУДНОВИХ САУ	43
3.1 Робастність суднових САУ та засоби її досягнення	43
3.2 Методика дослідження робастності суднових САУ	45
3.3 Критерії робастності суднових САУ.....	45

3.4 Вирішення прикладного завдання	46
Висновки до розділу 3	50
4 ЦИФРОВА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕГУЛЯТОРІВ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ	
СУДНОВИХ САУ	51
4.1 Методи цифрової реалізації регуляторів	51
4.1.1 Використання квадратурних формул (прямокутників)	51
4.1.2 Перетворення Тастіна	52
4.2 Вирішення прикладного питання цифрової реалізації регуляторів режимних параметрів суднових САУ	53
4.2.1 Вихідні дані	53
4.2.2 Апроксимація перехідної характеристик об'єкту	54
4.3 Структури моделей аналогової та цифрової САУ для дослідження процесів керування	56
4.4 Результати моделювання цифрової САУ	57
Висновки до розділу 4	59
ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	63
ДОДАТКИ	65

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВП – виконавчий пристрій,

ЕМС – електромеханічна система,

ЕОМ – електронна обчислювальна машина,

ОУ – об'єкт управління,

ПІД – пропорційний інтегрально диференціальний,

ППП – підсилювально-перетворюючий пристрій,

САУ – система автоматичного управління,

СЕЕС – суднова електроенергетична система,

СЕУ – суднова енергетична установка,

УП – управляючий пристрій.

ВСТУП

Актуальність. Застосування сучасних підходів для проектування суднових САУ, що враховують апріорну невизначеність параметрів об'єктів управління, випадкові збурення, що діють на вказані об'єкти, та похибки вимірювань, дозволяє запропонувати нові підходи щодо удосконалення методик налаштування регуляторів та підвищити техніко-економічні показники суднових енергетичних установок.

САУ суднових енергетичних установок, як правило, є підпорядкованими системами, в яких на виконавчому рівні використовуються типові пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори. Такі регулятори, за умови їх належного налаштування, забезпечують затребувані показники запасів сталості та показники якості перехідних процесів. Налаштування таких регуляторів є важливим науково-прикладним завданням багатовимірної оптимізації. Але при налаштуванні таких регуляторів за типовими методиками не завжди враховується можливість підтримання запасів сталості та показників якості перехідних процесів у САУ в процесі експлуатації СЕУ при можливій зміні параметрів системи, наприклад, за умов експлуатаційній деградації. Забезпечення сталості таких показників САУ є предметом окремого питання теорії автоматичного керування, а саме: теорії робастності.

Метою магістерської роботи є удосконалення методик налаштування класичних регуляторів в умовах невизначеності щодо зміни параметрів, методів побудови їх дискретних аналогів та дослідження процесів у суднових системах автоматичного управління шляхом узагальнення математичних моделей таких систем і їх складових, встановлення умов робастності та особливостей цифрової реалізації.

Для досягнення вказаної мети було поставлено та вирішено наступні завдання:

1) Провести математичний опис, критичний огляд та порівняння типових математичних моделей складових суднових систем автоматичного управління і їх структурної організації.

2) Провести огляд, аналіз та встановити математичний опис типових регуляторів у суднових системах автоматичного управління з урахуванням можливостей реалізації.

3) Розглянути методи забезпечення робастності суднових систем автоматичного управління щодо зміни параметрів об'єкту шляхом відповідних налаштувань регуляторів та запропонувати методіку налаштування таких регуляторів на умовах забезпечення робастності системи.

4) Узагальнити методи побудови цифрового регулятора за аналоговим прототипом та виконати синтез цифрового регулятора для прикладного завдання синтезу суднової системи автоматичного управління та дослідження її характеристик.

Об'єктом дослідження є процеси керованої зміни стану об'єктів, які входять до складу суднових енергетичних установок, процеси проектування і налаштування регуляторів керованої зміни стану.

Предмет дослідження. Математичні моделі складових суднових систем автоматичного управління, методики налаштування класичних регуляторів в умовах невизначеності щодо зміни параметрів, методики побудови їх дискретних аналогів та дослідження процесів у суднових системах автоматичного управління.

Гіпотеза дослідження: За умови складності та невизначеності процесів перетворення енергії в суднових енергетичних установках є необхідність побудови відповідного математичного опису таких процесів відповідно завдань автоматичного управління такими процесами. Пропоновані методи та засоби

автоматичного управління потребують удосконалення, що може бути досягнуто забезпеченням умов робастності відносно зміни параметрів об'єкту, що потребує певних налаштувань регуляторів. Прикладні питання цифрової реалізації регуляторів потребують дослідження їх динамічних характеристик та можливості досягнення затребуваних показників сталості та якості перехідних процесів.

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

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1) Запропоновано узагальнення математичних моделей складових частин судових систем автоматичного управління з урахуванням багатовимірності та врахування фундаментальних властивостей сталості, керованості і спостережуваності.

2) Вперше розглянуто питання робастності судових систем автоматичного управління відносно зміни параметрів об'єкту та запропоновані критерії забезпечення робастності і методика її забезпечення шляхом відповідного налаштування регуляторів.

3) Набула подальший розвиток методика проектування цифрових регуляторів за аналоговим прототипом у складі судових систем автоматичного управління та вирішено прикладне завдання синтезу такого регулятора у порівнянні з аналоговою реалізацією.

Практичне значення отриманих результатів. Запропоновані узагальнені математичні моделі складових судових систем автоматичного управління дозволяють встановити їх фундаментальні властивості, а саме: простори сталості, керованості та спостережуваності, що дозволяє удосконалити процес

проектування.

Запропоновані нові критерії робастності суднових систем автоматичного управління дозволяють виконати налаштування регуляторів за умови нечутливості (або незначної чутливості) до зміни параметрів об'єкту.

Дослідження форм цифрової реалізації регуляторів у суднових системах автоматичного управління дозволяє встановити обмеження на технічні параметри аналогово-цифрового перетворення.

Особистий внесок здобувача. Розроблені комп'ютерні моделі суднових систем автоматичного управління, які засновані на різних методиках налаштування цифрових регуляторів, що дозволяє оцінити якісні характеристики процесів, що відбуваються у об'єктах СЕУ та обрати доцільне технічне рішення.

Апробація роботи. Результати роботи було оприлюднено на міжнародній науково-технічній конференції «СУДНОВА ЕЛЕКТРОІНЖЕНЕРІЯ, ЕЛЕКТРОНІКА І АВТОМАТИКА» (СЕЕА-2023); яка проходила у національному університеті “Одеська морська академія”, м. Одеса.

1. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ СУДНОВИХ САУ

1.1 Загальна характеристика елементів суднових САУ

У суднових САУ об'єктом управління є енергетичний процес, керовані вихідні змінні якого необхідно змінювати за заданим законом в часі і в просторі для досягнення поставленої мети.

Особливості об'єктів: об'єкти в суднових електромеханічних системах (ЕМС) умовно можна розділити на 2 класи: природні та конструйовані, тому об'єкти в ЕМС є незмінною частиною системи, в першому випадку однозначно, в другому випадку - з потреби, зважаючи на високу вартість заміни.

Конструйованість об'єктів зовсім не означає, що їх властивості відповідають системі управління. Властивості об'єктів призначені для забезпечення заданих характеристик керованих процесів, зокрема високій швидкості зміни керованих змінних. Тому конструйовані об'єкти часто є нелінійними і нестійкими і без систем управління непрацездатні.

У складних ЕМС об'єкти перебувають під впливом великого числа дій, частина з яких є керованими і утворюють вектор управління

$$\vec{U} = \{ U_1, U_2, \dots, U_M \},$$

інша частина є такими, що обурюють, і утворює вектор обурюючих дій

$$\vec{V} = \{ V_1, V_2, \dots, V_S \}.$$

Координати об'єкту, які повинні змінюватися системою управління і вимірюються датчиками, утворюють вектор вихідних координат

$$\vec{y} = \{ y_1, y_2, \dots, y_k \}$$

Ряд параметрів об'єкту може змінюватися в процесі його регулювання - такі параметри утворюють вектор

$$\vec{\alpha} = \{ \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_\alpha \}$$

Таким чином, в загальному випадку об'єкт управління (ОУ) в ЕМС може бути представлений у виді, зображеному на Рис. 1.1

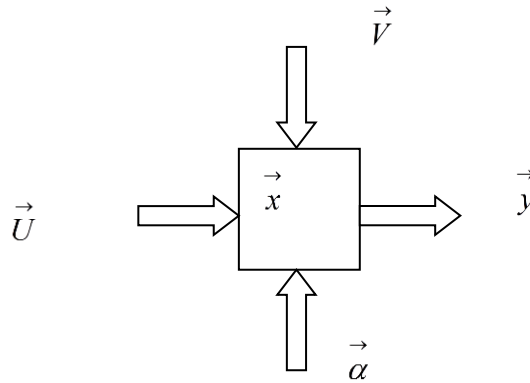


Рисунок 1.1 – Об'єкт управління складних ЕМС

Слід відмітити, що розмірність вказаних векторів в загальному випадку не співпадає, найбільш важливими є наступні співвідношення:

$$\dim \vec{U} \neq \dim \vec{y},$$

$$\dim \vec{y} \leq n,$$

де n - порядок об'єкту.

Під порядком об'єкту розуміється сумарний порядок диференціальних рівнянь, якими описується його стан і зміна цього стану.

Таким чином вимірюваних вихідних змінних як правило недостатньо для того, щоб вичерпним чином охарактеризувати стан об'єкту. Тому виникає необхідність введення вектору координат стану об'єкту

$$\vec{x} = \{ x_1, x_2, \dots, x_n \},$$

які мають бути лінійно незалежними і повністю характеризувати рух об'єкту і зміни його стану. Простір, утворений такими координатами, визначається як простір стану [1].

Розглянемо фундаментальні властивості об'єктів управління [2,3].

Стійкість. По цій властивості об'єкти розділяються на стійкі, нестійкі і нейтральні. Якщо раніше нестійкі об'єкти вважалися непридатними для експлуатації, то нині конструйовані об'єкти управління часто є нестійкими, оскільки швидкість зміни керованих координат в нестійких об'єктах може бути досягнута багаторазово більшою, в порівнянні із стійкими об'єктами. Наприклад, для рухомих суднових об'єктів відповідно кращими досягаються маневрені властивості. Об'єкти такого типу без відповідних систем управління, що забезпечують стійкість, непрацездатні.

Керованість. Керованість є структурною властивістю складних об'єктів. Зміні компонент вектору управлінь повинна відповідати зміна компонент вектору вихідних координат. Часто це зовсім неочевидно, якщо вхідних і вихідних змінних досить багато, а їх зв'язки складні. Якщо відносно i -ої компоненти вектору управлінь до j -ій компоненті вектору вихідних координат є мінімум 2 канали передачі дії, то по цих каналах зміна може компенсуватися на j -му виході і відповідно об'єкт по j -му виходу відносно i -го входу виявиться некерованим. Цей ефект може бути шкідливим і приведе до створення в об'єкті некерованої (але контрольованою) частини, але може використовуватися і для отримання позитивних результатів, наприклад для досягнення незалежності (інваріантності) руху об'єкту відносно зовнішніх обурюючих дій.

Спостережуваність. Спостережуваність також є структурною властивістю складних об'єктів.

По-перше, $\dim \vec{y} \leq \dim \vec{x}$, і якщо виконується строга нерівність, то числа вимірюваних вихідних координат недостатньо, щоб охарактеризувати стан об'єкту.

По-друге, не усі вихідні координати можуть виявитися лінійно незалежними і встановити цю властивість є неочевидним.

По-третє, вимірювані координати схильні до шумів вимірів і у кращому разі можна отримати лише їх наближену оцінку.

Найбільш небезпечною є наявність в об'єкті неспостережуваної частини, координати якої змінюються неконтрольованим чином.

Ще одним важливим елементом САУ є виконавчий пристрій [4,5]. Під виконавчим пристроєм розуміється сукупність технічних засобів, що змінюють стан об'єкту за допомогою стандартних (типових) сигналів: електричних, пневматичних, гідравлічних і так далі.

У конструйованих об'єктах, зокрема, суднових, часто виконавчий пристрій (ВП) і ОУ нероздільні. Проте звичайно це типові блоки на основі електричних, пневматичних, гідравлічних пристроїв - приводів. У складних системах ВП є підпорядкованою локальною ЕМС (зазвичай стежачою системою) із заздалегідь розрахованими і підтвердженими характеристиками.

ВП характеризуються технологічними (енергетичними) параметрами і типовими математичними моделями. Однією з проблем використання ВП є проблема нелінійності характеристик, оскільки високі питомі характеристики досягаються тільки в релейних ВП. Для типових ВП характерні нелінійності обмеження по рівню, зважаючи на обмеженість енергетичних можливостей, зони нечутливості і люфти в механічних передачах, запізнювання в гідравлічних ВП, гістерезис в електромагнітних ВП.

Підсилювально - перетворюючі пристрої призначені для посилення і узгодження потоків стандартних сигналів : вихідних управляючого пристрою (УП) і входних ВП. Будучи різноманітними по фізичних принципах, підсилювально - перетворюючий пристрій (ППП) мають однакову математичну модель - пропорційну, зазвичай безінерційну, ланку. Тому при аналізі і синтезі систем управління їх частенько не виділяють в окрему ланку і об'єднують з ВП.

Спільно ОУ, ВП і ППП утворюють незмінну частину системи управління ЕМС. Змінювані цих блоків, причому в зворотному пріоритеті, відбувається лише,

якщо системи непрацездатні ні при яких можливих УП, або, якщо можливі аварійні ситуації. Такі режими не повинні входити на рівень УП : ні при яких налаштуваннях алгоритмів управління, що реалізуються, аварійний режим не повинен виникати.

Датчики є найважливішим елементом систем управління, оскільки їх точність і визначає досягну точність регулювання.

Номенклатура використовуваних датчиків в системах управління суднових САУ дуже велика, оскільки один і той же фізичний параметр може бути виміряний різними способами.

Датчики в системах управління мають бути лінійними пропорційними ланками. Якщо це недосяжно, то нелінійність статичної характеристики коментується окремими засобами. Інерційність датчиків, якщо вона істотна, також може компенсуватися, проте таке завдання являється істотно складнішій в порівнянні з компенсацією нелінійності. У сучасних системах управління сукупності датчиків сигналів утворюють окрему інформаційно-вимірвальну систему.

Управляючий пристрій є єдиним блоком в системі управління, суднової САУ, параметрами якого майже необмежено варіювати для досягнення поставленої мети.

У відносно простих і локальних ЕМС УП надає собою спеціалізований блок для реалізації одного і того ж закону регулювання. Це може бути електронний пристрій або спеціалізовані ЕОМ.

У складніших ЕМС закони управління (регулювання) реалізується програмним способом і УП може бути реалізовано на ЕОМ широкого призначення.

У системах управління УП оперує з множиною вхідних сигналів:

- задаючих дій ,
- керованих координат, або їх оцінок,

– обурюючих дій, якщо є можливість їх виміряти.

Усі ці сигнали є векторними різній розмірності. Алгоритм управління, оперуючи з множиною вхідних сигналів, формує множину вихідних дій, що управляють, розмірність якої рівна $\dim \vec{U}$.

Оскільки в сучасних системах управління УП є цифровими, тому включення таких УП у будь-яку систему управління перетворює її на дискретну і нелінійну, незалежно від того, який являється незмінна частина системи управління ЕМС. При цьому нелінійність УП обумовлена квантуванням сигналів по рівню, а дискретність - використанням решітчастих функцій координат замість безперервних.

1.2 Типові математичні моделі об'єктів в суднових САУ

1.2.1 Класифікація математичних моделей

Найбільш загальною математичною моделлю об'єктів і систем управління є операторна [1,.

$$\vec{x}(t) = F \left\{ \vec{u}(t), V(t), t \right\} \quad (1.1)$$

де $\vec{x}(t) \in X$, $\vec{u}(t) \in U$, $\vec{V}(t) \in V$,

X , U , V - метричні простори, різній розмірності, в загальному випадку з неспівпадаючим способом завдання норми.

Властивості моделі визначає оператор F , що відображає простори вхідних сигналів в простір вихідних.

$$F: U \rightarrow X.$$

Можливість побудови математичної моделі істотно залежить від сигналів, їх властивостей, з яких просторів вибираються (який вигляд має норма - відстань між елементами просторів).

Під моделюванням об'єктів і систем управління розуміється:

- визначення виду, властивостей і параметрів оператора відображення F ;
- опис сигналів, на яких отримано це відображення.

Під реалізацією моделей розуміється

- отримання чисельних, комп'ютерних орієнтовних методів розрахунку;
- розробка безпосередньо програм моделювання.

Залежно від властивостей оператора відображення F математичні моделі, найбільш широко використовувані на практиці, можуть бути класифіковані згідно ілюстрації на рис. 1.2.

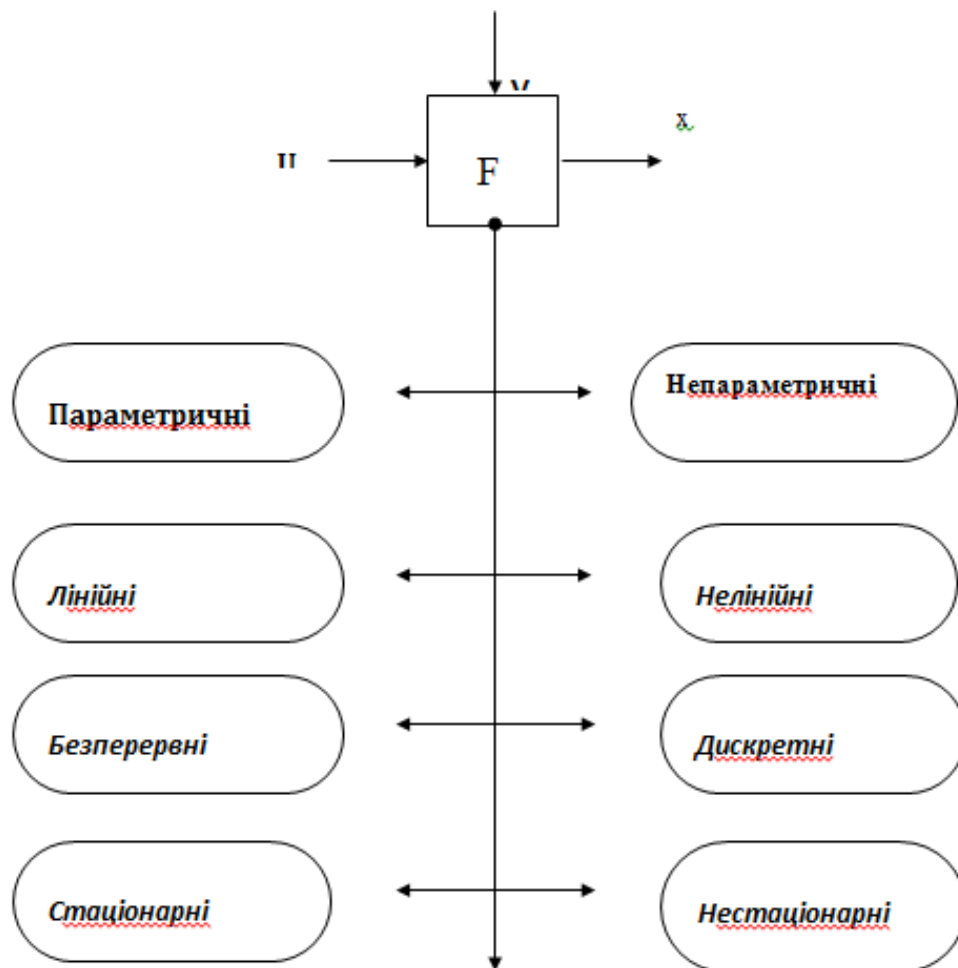


Рисунок 1.2 – Класифікація математичних моделей

У теорії управління ЕМС під безперервними сигналами зазвичай розуміють реалізацію деякого процесу, тобто реакцію деякої динамічної системи, зазвичай лінійної і стаціонарної, на стандартну дію: $\delta(t)$ - дельта - функцію Дираку.

Випадковими сигналами $x(t)$, $u(t)$, $v(t)$ являються реалізації випадкових процесів $X(t)$, $U(t)$, $V(t)$, в кожному перерізі t_k що є випадковими величинами X , U , V .

Випадкові сигнали визначаються статистичними характеристиками:

– Багатовимірною щільністю вірогідності

$$p(\vec{x}, t_1, t_2, \dots, t_n)$$

чи багатовимірною характеристичною функцією

$$\theta(\vec{w}, t_1, t_2, \dots, t_n) = F\left\{p(\vec{x}, t_1, t_2, \dots, t_n)\right\}$$

де $F\{\bullet\}$ - символ перетворення Фур'є;

– Моментними функціями, з яких найчастіше використовуються

$m(t)$ - середнє значення,

$D(t) - \sigma^2(t)$ – дисперсія,

$K(t_1, t_2)$ - кореляційний момент.

Для стаціонарних випадкових сигналів перші два моменти постійні числа, а функція кореляції залежить лише від різниці аргументів :

$$m(t)=m$$

$$D(t)=D$$

$$K(t_1, t_2)=K(t_2 - t_1)= K(\tau).$$

Найбільш важливе значення в теорії управління ЕМС мають випадкові сигнали Гаусівського типу, оскільки вказані моменти є вичерпною характеристикою таких сигналів. Слід зауважити, що випадкові сигнали, навіть не будучи Гаусовими, проходячи через лінійні динамічні ланки ЕМС, піддаються нормалізації, тобто їх характеристики наближаються до Гаусових.

Тому в теорії управління ЕМС під випадковим Гаусовим сигналом зазвичай розуміють реалізацію випадкового процесу, отриманого в результаті дії білого шуму (сигналу з $K(\tau) = \delta(\tau)$) на деяку лінійну стаціонарну систему (формульований фільтр). Разом з функцією кореляції широко використовується спектральна щільність

$$S(\omega) = F\{K(\tau)\}$$

Згідно з теоремою Вінера - Хінчина.

$$K(\tau) = F^{-1}\{S(\omega)\}$$

1.2.3 Математичні моделі об'єктів і складових САУ

До параметричних моделей відносяться [2]:

– Звичайні диференціальні управління

$$f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n)}; u, \dot{u}, \dots, u^{(m)}) = 0$$

структура $f(\bullet)$ і порядок n відомі, $m \leq n$.

– Звичайні лінійні диференціальні управління

$$\sum_{i=1}^{n-1} a_i \cdot x^{(i)}(t) = \sum_{i=1}^{m-1} b_i \cdot u^{(i)}(t)$$

для нестационарних моделей $a_i = a_i(t)$, $b_i = b_i(t)$.

– Передатні функції (лінійні стаціонарні моделі на класі детермінованих сигналів)

$$X(p) = W(p)U(p)$$

де $X(p) = L\{x(t)\}$; $U(p) = L\{u(t)\}$; $L\{\bullet\}$ - символ перетворення Лапласа.

– Моделі простору стану

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \vec{x}(t) = A \vec{x}(t) + B \vec{u}(t) \\ \vec{y}(t) = C \vec{x}(t) \end{cases}$$

де A, B, C - матриці розмірності $n \times n$, $n \times m$, і $n \times k$ відповідно, для нестационарних моделей містять елементи, залежні від часу.

– Дискретні моделі у вигляді різницьових рівнянь

$$\sum_{i=1}^{n-1} a_i' x(k-i) = \sum_{i=1}^{m-1} b_i' u(k-i)$$

де $x(k-i)$ є гратчастою функцією, причому коефіцієнти a_i', b_i' не співпадають з коефіцієнтами відповідної безперервної моделі, і залежать від періоду дискретизації.

– Дискретні передатні функції

$$X(z) = W(z) U(z)$$

де z оператор Z - перетворення.

– Моделі дискретного простору стану

$$\begin{cases} \vec{x}(k+1) = A' \vec{x}(k) + B' \vec{u}(k) \\ \vec{y}(k) = C' \vec{x}(k) \end{cases}$$

де $\vec{x}(k), \vec{u}(k), \vec{y}(k)$ - векторні гратчасті функції координат стану, управління і виходу, а матриці не співпадають з матрицями безперервної моделі і їх елементи залежать від періоду дискретизації.

1.2.4 Непараметричні моделі

– Інтеграл згортки на множині детермінованих сигналів (лінійна модель)

$$x(t) = \int_0^t w(t-\tau) u(\tau) d\tau$$

де $w(t)$ імпульсна перехідна функція: реакція системи на $\delta(t)$ - функцію Діраку.

Може бути задана у формі інтеграла Дюамеля з використанням перехідної функції $h(t)$ - реакція системи на $\bar{b}(t)$ - одиничну ступінчасту функцію $1(t)$, функцію Хевисайда, причому

$$w(t) = \frac{d}{dt} h(t)$$

Якщо відома параметрична модель $W(p)$, то

$$w(t) = Z^{-1} \{W(p)\}$$

– Частотна модель для детермінованих сигналів

$$X(\omega) = A(\omega) U(\omega)$$

де $A(\omega)$ - амплітудно-частотна характеристика системи.

Якщо відома параметрична модель $W(p)$, то

$$A(\omega) = |W(j\omega)|$$

– Інтеграл згортки для стаціонарних випадкових сигналів (рівняння Вінера - Хопфа)

$$R_{xx}(t) = \int_0^t R_{xu}(t-\tau) R_{uu}(\tau) d\tau$$

де R_{xx}, R_{xu}, R_{uu} - нормовані кореляційні функції відповідних сигналів.

– Частотна модель для стаціонарних випадкових сигналів

$$S_x(\omega) = P(\omega) S_u(\omega)$$

де S_x, S_u - спектральна щільність відповідних сигналів.

Якщо відома параметрична модель $W(p)$, то

$$P(\omega) = |W(j\omega)|^2$$

– Нелінійна модель у вигляді ряду Вольтерра [2]

$$x(t) = \int_0^t w_1(t-\tau) u(\tau) d\tau + \int_0^t \int_0^t w_2(t-\tau_1, t-\tau_2) u(\tau_1) u(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + \int_0^t \int_0^t \int_0^t w_3(t-\tau_1, t-\tau_2, t-\tau_3) u(\tau_1) u(\tau_2) u(\tau_3) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \dots$$

де $w_k(\tau)$ - багатовимірні ядра Вольтерра, причому $w_1(\tau)$ - імпульсна передатна функція системи в лінійному наближенні.

Перераховані математичні моделі не вичерпують різноманіття математичних моделей САУ, а лише є найчастіше використовуваними, і приведені переважно з тією метою, щоб показати їх взаємозв'язок. Є ряд об'єктів, які описуються складнішими рівняннями в часткових похідних, інтегральними і інтегро-дифференціальними рівняннями і тому подібне, навіть релейні системи, що найчастіше зустрічаються, строго кажучи, мають бути описані рівняннями в контингенціях, тобто у вигляді дифференціальних включень, оскільки інакше неможливо пояснити один з їх режимів функціонування, а саме ковзний режим, оскільки функція управління не задовольняє умові безперервності. З точки зору теорії управління САУ отримана математична модель має бути параметризованою, що часто є далеко не простим завданням. Проте тільки математичні моделі в параметричній формі дозволяють в алгоритмічному виді отримати необхідні для досягнення мети регулювання відповідні закони.

Висновки до розділу 1

1. Запропоновано узагальнення опису сучасних суднових систем автоматичного управління та їх складових як багатовимірних систем із множиною вхідних управляючих та збурюючих дій, вихідних вимірювальних координат, змінних параметрів, що дозволило встановити визначення їх фундаментальних властивостей стійкості, керованості та спостережуваності.
2. Запропонована класифікація математичних моделей сучасних суднових систем автоматичного управління та множин управляючих і збурюючих дій як елементів метричних просторів сигналів.
3. Визначені основні особливості застосування та вимоги щодо виконавчих пристроїв та вимірювальних пристроїв у суднових САУ.

2. ТИПОВІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ РЕГУЛЯТОРІВ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ В СУДНОВИХ САУ ТА ЇХ СПІВСТАВЛЕННЯ

2.1 Регулятор в складі САУ

Автоматичний регулятор є складовою частиною будь-якої системи регулювання. Але автоматичний регулятор не вичерпує можливості забезпечити задані показники точності та якості САУ, оскільки реальна система функціонує в умовах як змінних програм регулювання, так і в умовах впливу зовнішніх обурюючих дій. Тому загальна структура локальної САУ набуває вигляду, зображеного на рис. 2.1.

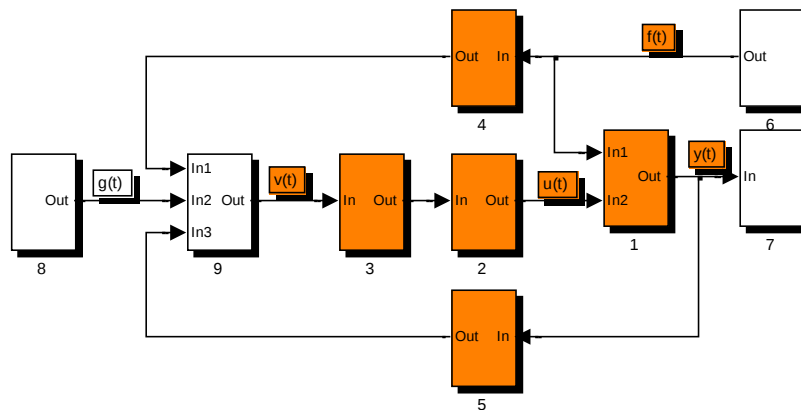


Рисунок 2.1 – Структурна схема локальної САУ

На рис. 2.1 позначені:

- Блок 1 – об'єкт керування;
- Блок 2 – виконавчий пристрій;
- Блок 3 – підсилювачно-перетворювальний пристрій;
- Блок 4 – датчик збурень;
- Блок 5 – Датчик регульованої величини;
- Блок 6 – формувач збурень;

- Блок 7 – реєстратор виходу;
- Блок 8 – формувач програми регулювання;
- Блок 9 – пристрій керування.

Характеризуючи складові частини локальної САУ, слід зауважити, що виділені блоки, а саме: об'єкт керування (ОК), виконавчий пристрій (ВП), підсилювально-перетворюючий пристрій (ППП), та датчики (Д) є незмінною частиною системи. Їх зміна можлива тільки за умови, якщо не існує законів регулювання, які дозволяють забезпечити затребувані її показники. Майже єдиною можливістю забезпечити такі показники, є зміна пристрою керування (ПК). В поточний час існує тенденція поєднання (інтегрування) ВП з ОК. Якщо ВП є окремим виробом, то в поточний час він є окремою підпорядкованою слідкуючою системою із заздалегідь відомими та підтвердженими характеристиками (приклади: система керування стерном, автоматизований електропривод тощо). Для SMART – ВП наявність PPP не є обов'язковою, оскільки його керування здійснюється за відповідним інтерфейсом. Слід мати на увазі, що ОК в поточний час будуються для забезпечення їх певних властивостей (маневреність, ефективність тощо), які ніяк не пов'язані з можливостями їх автоматичного керування, зокрема, вони можуть не мати властивостей стійкості.

Пристрій керування загалом має складну структуру, що представлено на рис. 2.2.

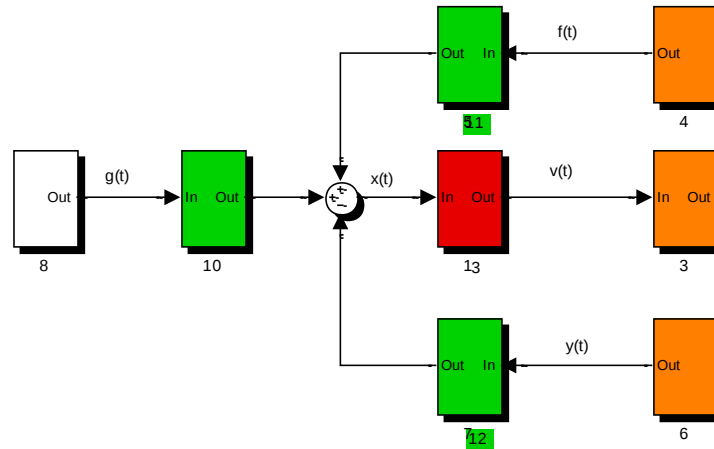


Рисунок 2.2 – Структурна схема керуючого пристрою локальної САУ

Таким чином, керуючий пристрій має у своєму складі, крім регулятора (Блок 13), також блок 11 корекції (компенсації) зовнішніх збурень, блок 10 корекції завдаючої змінної дії, блок 12 корекції сигналу зворотного зв'язку. Необхідність введення вказаних блоків зумовлена умовами функціонування ОК. Блоки 10 та 11 мають алгоритмічне забезпечення, яке знаходиться з умов інваріантності (загалом, часткової) похибки регулювання щодо зміни задаючої дії та зовнішніх збурень. Блок 12 корекції сигналу зворотного зв'язку уводиться для компенсації інерційних властивостей датчиків, або для покращення характеристик перехідних процесів в САУ. Загалом налаштування вказаних блоків є предметом спеціальних розділів теорії автоматичного управління (ТАУ), зокрема теорії інваріантності САУ та теорії оцінки параметрів стану САУ. Однак, завдяки гіпотезі лінійності САУ, їх налаштування може бути розглянуто окремо і ніяк не впливає на налаштування основного елемента КП, а саме, регулятора.

2.2 Типові регулятори в складі САУ

2.2.1 Класифікація типових регуляторів

За умов фізичної реалізуємості, в типових регуляторах САУ можуть бути застосовані тільки операції підсилення (масштабування), інтегрування та знайдення похідної (наближено) сигналу похибки. Тому типові регулятори можуть бути реалізовані як виконання вказаних операцій та деяких їх комбінацій.

Тому типові регулятори локальних САУ розподіляються на такі класи:

- Односкладові: пропорційні (П) та інтегральні (І) регулятори. Диференційні не мають сенсу, оскільки похідна від постійної помилки є тотожно нуль і керуюча дія не формується.
- Двоскладові: пропорційно-інтегральні (ПІ) та пропорційно-диференційні (ПД) регулятори. Слід враховувати, що за умов неможливості сформувати ідеальну диференційну складову, насправді такі ПД – регулятори є трискладові.
- Тriskладові пропорційно-інтегрально-диференційні (ПІД) регулятори. Слід враховувати, що за умов неможливості сформувати ідеальну диференційну складову, насправді такі ПІД – регулятори є чотирискладові.

Звичайно, якщо мета регулювання досягається більш простим засобом, а саме, односкладовим регулятором, то саме такий регулятор рекомендується до застосування. Відповідно, наступний щабель складають двоскладові регулятори. І тільки якщо застосування таких регуляторів не дозволяє досягти мети проектування у вигляді гарантованих показників запасів сталості та показників якості перехідних процесів, застосовуються більш складні регулятори.

Типові регулятори не вичерпують множину теоретико-технічних рішень щодо архітектури регуляторів в САУ. Існують та пропонуються деякі інші рішення, які можуть мати певні переваги в конкретних галузях застосування.

2.2.2 Пропорційний регулятор

Пропорційне регулювання може вважатись найбільш простим і власне забезпечує основний принцип регулювання в САУ за похибкою (відхиленням регульованої величини від завдання). Вказаний закон керування визначається наступним рівнянням регулятора:

$$u(t) = k_p x(t)$$

Відповідно, передатна функція регулятора дорівнює:

$$W_r(p) = k_p$$

При застосуванні П – регулятора статична похибка замкненої САУ визначається наступним виразом:

$$x_{st} = g \frac{1}{1 + k_p k_n} + f \frac{k_f}{1 + k_p k_n} = S(g + k_f f)$$

де k_n – статичний коефіцієнт передачі незмінної частини САУ як добуток таких коефіцієнтів її складових, k_f – статичний коефіцієнт передачі об'єкту по збуренню, S – статизм САУ.

За звичай, позначається $k_r = k_n k_p$ коефіцієнт передачі розімкненої САУ.

З останнього виразу видно, що усталена похибка пропорційна коефіцієнту статизма системи – S .

Отже, при пропорційному законі керування система є статичною (якщо об'єкт чи виконавчий пристрій не мають інтегруючу властивість).

Пропорційне керування дозволяє зменшити усталену помилку більш ніж в $k_r = k_n k_p$ раз. Збільшення коефіцієнта підсилення системи приводить до зменшення усталеної похибки. Саме в такій властивості П – регулятора, окрім простоти реалізації, є його переваги.

Однак, збільшення коефіцієнта підсилення системи одночасно призводить до пропорційного зменшення запасів сталості. Значення такого коефіцієнту, який відповідає межі сталості, позначається як k_{kr}

Таке значення є важливим для застосування багатьох практичних методик синтезу регуляторів, що потрібно мати до уваги. У більшості реальних систем, порядок яких вище 2, та астатичних за незмінною частиною, збільшення коефіцієнта підсилення вище деякої межі приводить до того, що система стає несталою.

Таким чином формулюються висновки щодо застосування П – регулятора.

Переваги:

1. Простота технічної реалізації.
2. Нескладність налаштування.
3. Зменшення похибки регулювання в усталеному режимі САУ.

Недоліки:

1. Зменшення запасів сталості.
2. Недостатні показники якості перехідних процесів.
3. Висока чутливість до помилок налаштування.
4. Обмеженість галузі застосування за властивостями об'єкту регулювання.

2.2.3 Інтегральний регулятор

Інтегральне регулювання також може вважатись найбільш простим і також забезпечує основний принцип регулювання в САУ за похибкою (відхиленням регульованої величини від завдання). Вказаний закон керування визначається наступним рівнянням регулятора:

$$u(t) = k_i \int x(t) dt$$

Відповідно, передатна функція регулятора дорівнює:

$$W_r(p) = \frac{k_i}{p}$$

З рівняння динаміки САУ неважко встановити, що в усталеному режимі ($P=0$) при постійних входних сигналах $g(t)$ і $f(t)$ статична похибка дорівнює нулю.

При вказаному законі регулювання система є астатичною при статичній незмінній частині (якщо збурювання прикладене до точки системи, розташованої за інтегруючою ланкою, тобто за регулятором).

У порівнянні з П – регулятором І – закон регулювання забезпечує астатизм системи, однак, динамічні властивості системи з І – законом керування за звичай гірше, ніж у системи з П – законом.

Причина такого явища досить очевидна, оскільки введення інтегральної складової в регулятор безпосередньо зменшує запас сталості по фазі майже на 90 град. Тому інтегральне регулювання має обмежену галузь застосування, зокрема, к це встановлено з практичного досвіду, об'єкти регулювання із значним транспортним запізненням можливо стабілізувати тільки за допомогою застосування саме такого закону.

Слід врахувати, що застосування інтегрального закону регулювання має деякі особливості при практичному застосуванні, що ще не описані алгоритмічно. Зокрема, при виникненні імпульсної завади, що характерно для комбінованих

САУ, інтегруюча компонента виводить регулятор в режим насичення, що виключає його працездатність. Тому необхідно передбачити відповідні заходи щодо скиду вихідного сигналу регулятора для унеможливлення виникнення аварійної ситуації.

Ще досі застосовується спрощений закон інтегрального регулювання у вигляді

$$u(t) = U_i \operatorname{sign}\left(\int x(t) dt\right).$$

Для гідравлічних та пневматичних регуляторів такий закон є характерним і повинен бути врахованим.

Слід також зауважити, що «ідеальну» інтегральну складову може бути забезпечено виключно цифровими засобами, з деякими обмеженнями. При практичній реалізації слід враховувати інерційні властивості робочого тіла, тому фактична передатна функція регулятора має наступний вигляд

$$W_r(p) = \frac{k_i}{p(T_i + 1)}$$

де T_i – деяка постійна часу виконавчих приладів регулятора.

Таким чином формулюються висновки щодо застосування І – регулятора.

Переваги:

1. Простота технічної реалізації.
2. Нескладність налаштування.
3. Досягнення похибки регулювання в усталеному режимі САУ, що дорівнює 0.

Недоліки:

1. Зменшення запасів сталості по фазі майже на 90 град.
2. Незадовільні показники якості перехідних процесів.
3. Обмеженість галузі застосування за властивостями об'єкту регулювання.

2.2.4 Пропорційно – інтегральний регулятор

Пропорційно – інтегральне регулювання історично також може вважатись найбільш простим і запропонований як удосконалення пропорційного закону регулювання для зменшення похибок в усталених режимах, зокрема, для систем стеження та наведення.

Вказаний закон керування визначається наступним рівнянням регулятора:

$$u(t) = k_p x(t) + k_i \int x(t) dt$$

Відповідно, передатна функція регулятора дорівнює:

$$W_r(p) = k_p + \frac{k_i}{p}$$

Пропонований регулятор поєднує властивості розглянутих законів регулювання. Таким чином формулюються висновки щодо застосування ПІ – регулятора.

Переваги:

1. Простота технічної реалізації.
2. Нескладність налаштування.
3. Досягнення похибки регулювання в усталеному режимі САУ, що дорівнює 0.

Недоліки:

1. Деяке зменшення запасів сталості по фазі.
2. Як правило, коливальний характер перехідних процесів.
3. Необхідність обмеження, або скиду інтегральної складової.

Останній недолік зумовлений тим, що при наявності імпульсної завади на вході, що характерно для САУ з комбінованим принципом регулювання,

інтегральна складова формує сигнал, пропорційний площі імпульсу. Така реакція є шкідливою і потребує засобів щодо її усунення.

2.2.5 Пропорційно – диференційний регулятор

Пропорційно – диференційне регулювання також може вважатись достатньо простим, оскільки є теоретично дво-параметричним, але має досить обмежену галузь застосування. Такий закон регулювання також є удосконаленням пропорційного закону регулювання і запропонований для зменшення похибок в динамічних перехідних режимах, але на статичну похибку САУ не впливає. Галузь застосування пропорційно – диференційного регулювання, як правило, обмежена САУ з астатичною незмінною частиною. Переважно до такого класу відносяться САУ з виконавчими пристроями інтегруючого типу. В такому випадку мають місце особливості застосування розглядаємого закону регулювання завдяки перетворенню виконавчої дії, яка керує зміною стану об'єкту управління.

Вказаний закон керування в ідеальному випадку визначається наступним рівнянням регулятора:

$$u(t) = k_p x(t) + k_d \frac{dx(t)}{dt}.$$

Відповідно, передатна функція регулятора дорівнює:

$$W_r(p) = k_p + k_d p.$$

На жаль, ідеальний ПД – регулятор не може бути фізично реалізованим за неможливості реалізувати технічними засобами (аналоговими або цифровими) ідеальну операцію обчислення похідної. Тому передатна функція реального ПД – регулятора має наступний вигляд:

$$W_r(p) = k_p + \frac{k_d p}{T_b p + 1}.$$

де T_b – постійна часу «інерційної» ланки.

Звідси, рівняння реального ПД – регулятора мають наступний вигляд:

$$u(t) = k_p x(t) + k_d w(t),$$

де $w(t)$ визначається наступним диференціальним рівнянням:

$$T_b \frac{d}{dt} w(t) + w(t) = k_d x(t).$$

Історично застосовується також наступний вигляд математичної моделі ПД – регулятора:

$$W_r(p) = k_p + \frac{\tau_d p}{T_b p + 1},$$

де T_b – постійна часу «баластної» ланки, τ_d має назву «часу упередження».

Таким чином, насправді, реальний ПД – регулятор має три параметра, що визначають його динамічні властивості, що значно ускладнює процеси його налаштування, оскільки вплив інерційної ланки є дуже суттєвим.

Окремий, і дуже розповсюджений випадок становлять САУ з інтегруючим виконавчим пристроєм, наприклад у вигляді ВП, що має передатну функцію виду:

$$W_{vp}(p) = \frac{k_{vp}}{p},$$

де k_{vp} – коефіцієнт передачі ВП.

Оскільки регулятор та ВП з'єднані послідовно, передатна функція такого з'єднання має наступний вигляд:

$$W_r(p) = \left(k_p + \frac{\tau_d p}{T_b p + 1} \right) \frac{k_{vp}}{p} = \frac{k_p k_{vp}}{p} + \frac{k_{vp}}{p} \frac{\tau_d p}{T_b p + 1} = \frac{k_p k_{vp}}{p} + \frac{k_{vp} \tau_d}{T_b p + 1}.$$

Таким чином, в такому випадку, керуюча дія щодо об'єкту управління перетворюється в пропорційно – інтегральне управління.

Пропонований регулятор має особливі властивості щодо галузі застосування та налаштувань.

Таким чином формулюються висновки щодо застосування ПД – регулятора.

Переваги:

1. Простота технічної реалізації, але тільки для САУ, де незмінна частина має відповідні датчики швидкості зміни регульованої координати (слідкуючі системи, зокрема САУ курсом судна, рульовий привід, електроприводи механізмів тощо).
2. Суттєве покращення параметрів якості перехідних процесів, зменшення коливальності.
3. Інваріантність щодо статичної похибки регулювання в усталеному режимі САУ.

Недоліки:

1. Складність налаштування у просторі трьох важливих параметрів.
2. Недостатня завадостійкість відповідно застосування похідної від сигналу похибки.
3. Складність програмної реалізації у цифровому вигляді.

2.2.6 Пропорційно – інтегрально – диференційний регулятор

Пропорційно – інтегрально – диференційне регулювання історично може вважатись найбільш універсальним засобом вирішення більшості завдань практичного застосування методів автоматичного управління для широкого класу об'єктів в різноманітних галузях автоматизації технологічних процесів, управління рухомими об'єктами, тощо. Вказаний метод управління запропонований як удосконалення односкладових пропорційного та інтегрального

закону регулювання, двоскладових пропорційно – інтегрального та пропорційно – диференційного законів регулювання як їх композиція для досягнення показників сталості та якості проєктованих САУ.

Вказаний закон керування в ідеальному випадку визначається наступним рівнянням регулятора [3]:

$$u(t) = k_p x(t) + k_i \int x(t) dt + k_d \frac{dx(t)}{dt}$$

Відповідно, передатна функція ПД - регулятора в ідеальному випадку дорівнює:

$$W_r(p) = k_p + \frac{k_i}{p} + k_d p.$$

Як відомо, ідеальна диференційна складова не може бути фізично реалізованою за неможливості реалізувати технічними засобами (аналоговими або цифровими) ідеальну операцію обчислення похідної. Тому передатна функція реального ПД – регулятора має наступний вигляд:

$$W_r(p) = k_p + \frac{k_i}{p} + \frac{k_d p}{T_b p + 1}.$$

Звідси, рівняння реального ПД – регулятора мають наступний вигляд:

$$u(t) = k_p x(t) + k_i \int x(t) dt + k_d w(t),$$

де $w(t)$ диференційної складової визначається наступним диференціальним рівнянням:

$$T_b \frac{d}{dt} w(t) + w(t) = k_d x(t).$$

Пропонований регулятор поєднує властивості розглянутих законів регулювання. Таким чином формулюються висновки щодо застосування ПД – регулятора.

Переваги:

1. Універсальність застосування.
2. Вирішення завдань досягнення затребуваних показників запасів сталості та якості перехідних процесів.
3. Досягнення похибки регулювання в усталеному режимі САУ, що дорівнює 0.

Недоліки:

1. Складність налаштування.
2. Складність програмно-технічної реалізації.
3. Недостатня заводо захищеність.

Висновки до розділу 2

1. Визначена структурна організація управляючих дій в судновій САУ та особливості побудови регуляторів режимів функціонування.
2. Розглянуті основні закони регулювання режимних параметрів у суднових САУ, деталізовано їх математичний опис з врахуванням можливостей практичної реалізації.
3. Встановлені переваги та недоліки основних законів регулювання режимних параметрів у суднових САУ, що дозволяє обрати відповідне практичному застосуванню рішення.

3. МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБАСТНОСТІ СУДНОВИХ САУ

3.1 Робастність суднових САУ та засоби її досягнення

САУ суднових енергетичних установок (СЕУ), як правило, є підпорядкованими системами, в яких на виконавчому рівні використовуються типові пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори. Такі регулятори, за умови їх належного налаштування, забезпечують затребувані показники запасів сталості та показники якості перехідних процесів. Налаштування таких регуляторів є важливим науково-прикладним завданням багатовимірної оптимізації. Але при налаштуванні таких регуляторів за типовими методиками не завжди враховується можливість підтримання запасів сталості та показників якості перехідних процесів у САУ в процесі експлуатації СЕУ при можливій зміні параметрів системи, наприклад, за умовами експлуатаційної деградації. Забезпечення сталості таких показників САУ є предметом окремого питання теорії автоматичного керування, а саме: теорії робастності.

Проблемним науково-прикладним завданням, на яке спрямовано поточне дослідження, є удосконалення методів синтезу суднових автоматичних систем регулювання шляхом застосування алгоритмічних засобів налаштування регуляторів, що забезпечують властивості нечутливості або слабкої чутливості до зміни параметрів елементів САУ на основі методів теорії робастності, зокрема підходів, що забезпечують гарантовані запаси сталості.

Синтез САУ за умови забезпечення певних показників робастності розглядається в низці праць [2,3,5,8]. Але їх загальним недоліком є значна алгоритмічна складність. В розглядаємій галузі такі методи пропонуються в [6,7].

Робастні регулятори в САУ СЕУ, що засновані на відповідній теорії чутливості, мають властивості, які дозволяють значно зменшити вплив зміни

параметрів САУ в процесі експлуатації на показники сталості. Але встановлення таких умов і залежностей параметрів ПД – регуляторів для забезпечення вказаних вимог є ще невирішеним завданням. Відомо, що регулятор, що синтезується методом логарифмічних амплітудних частотних характеристик (ЛАЧХ), повинен забезпечити нахил бажаної ЛАЧХ незмінної частини розімкненої САУ в області перетину вісі частот не більше, ніж 20 db/dec для забезпечення найменшої чутливості відносно зміни параметрів САУ. Але такий підхід пропонується виключно з досвіду експлуатації і є емпіричним, не обґрунтованим аналітичними методами. Має місце протиріччя між можливостями типових методик налаштування ПД - регуляторів суднових САУ та вимогами практичного застосування з урахуванням варіації параметрів САУ. Тому пропонованим методом дослідження САУ з такими регуляторами є комплексне застосування аналітичних методів та методів математичного моделювання. Таким чином, об'єктом поточних досліджень є динамічні процеси в суднових САУ. Предметом поточних досліджень є математичні моделі САУ та методики синтезу робастних регуляторів. Метою пропонованого дослідження в роботі є вирішення вказаного протиріччя, що пропонується шляхом застосування методики наближеного синтезу регуляторів, що володіють властивостями робастності, зокрема, до найбільш важливого показника якості суднових САУ, а саме, запасів сталості.

3.2 Методика дослідження робастності суднових САУ

Пропонована методика дослідження складається в наступному:

Виконується аналіз суднової САУ, з класичним ПІД - регулятором, що заздалегідь налаштований за верифікованою типовою методикою, та встановлюються відповідні показники запасів сталості та показники якості.

Деякою варіацією параметрів регулятора та об'єкту в межах експлуатаційних вимог та обмежень встановлюються можливі варіації запасів сталості та показників якості.

Якщо варіація запасів сталості перевищує встановлені заздалегідь межі, використовується пропонована алгоритмічна послідовність синтезу робастного регулятора та моделювання САУ. Виконується додаткова перевірка збіжності результатів моделювання для різних параметрів ПІД - регулятора.

За позитивним результатом перевірки встановлюються межі застосування в САУ робастного регулятора [6 – 9].

3.3 Критерії робастності суднових САУ

Деталізація пропонованої методики полягає в наступному. Як це відомо, найкращі показники робастності може мати така САУ, в якій регулятор забезпечує перший перетин АФЧХ розімкненої системи $W_r(j\omega)$ уявної вісі у лівій напівплощині під кутом в 90 град. Тобто дотична до годографу АФЧХ (годографу Найквіста) в такій точці повинна мати нахил саме 90 град. Будь-який інший кут перетину призводить до збільшення чутливості запасів сталості від зміни параметрів САУ. Вказані вимоги відповідають вирішенню наступних рівнянь

$$\text{Im}\{W_r(j\omega)\} = 0.$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial \omega} \operatorname{Re}\{W_r(\omega)\} \right)_{\omega=\omega_k} = 0.$$

Рішення першого рівняння відносно частоти можуть мати деяку множину коренів, з яких обирається таке значення частоти перетину ω_k вісі у лівій напівплощині, що є найменшим. Рішення другого рівняння відшукується відносно невідомих параметрів регулятора. Але такі вимоги, вочевидь, відповідають максимуму модуля АФЧХ, що не відповідає емпіричній вимоги щодо регулятора, який синтезується методом ЛАЧХ та який повинен забезпечити нахил бажаної ЛАЧХ незмінної частини розімкненої АСР в області перетину вісі частот не більше, ніж 20 db/dec [7].

Тому пропонований підхід потребує удосконалення, для чого використовується наступне рівняння для шуканих параметрів регулятора із використанням ЛАЧХ розімкненої системи $L_r(\omega)$:

$$L_r(\omega_k - \delta\omega) - L_r(10\omega_k) = 20\text{db}.$$

Стабілізаційна варіація частоти в першій складовій в деяку частину декади призначена для гарантованого вигляду бажаної ЛАЧХ.

3.4 Вирішення прикладного завдання

Верифікація пропонованого підходу виконана на прикладі САУ газотурбінного приводу [7]. На рис. 3.1 – рис. 3.3 представлено АФЧХ та ЛАЧХ розімкненої системи зі статичною незмінною частиною, на рис. 3.4, рис. 3.5 відповідно – з астатичною незмінною частиною, а рис. 3.6 ілюструє перехідний процес в такій системі.

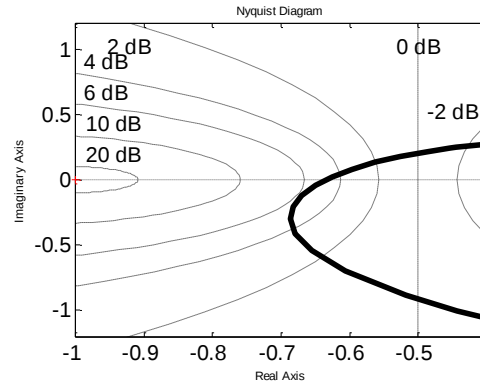


Рисунок 3.1 – Амплітудно-фазова частотна характеристика розімкненої САУ із статичною незмінною частиною

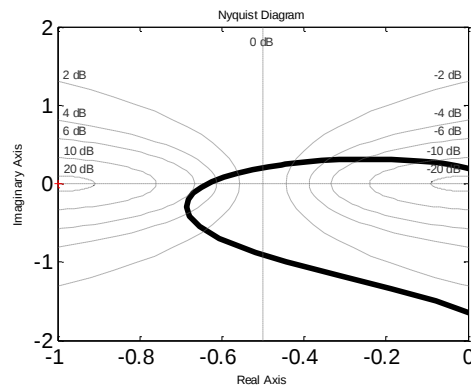


Рисунок 3.2 – Амплітудно-фазова частотна характеристика розімкненої САУ із статичною незмінною частиною в іншому масштабі

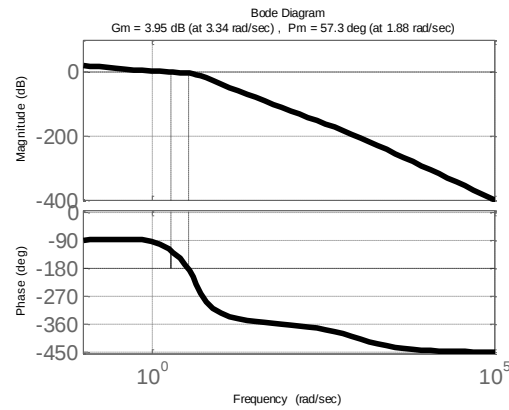


Рисунок 3.3 – ЛАЧХ робастної САУ зі статичною незмінною частиною

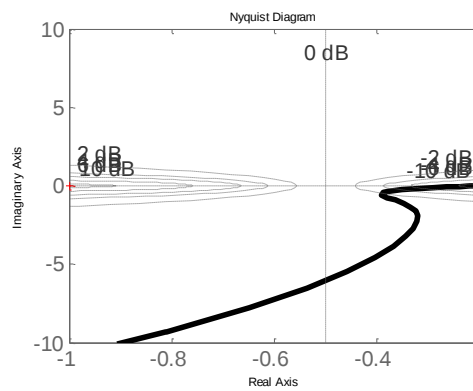


Рисунок 3.4 – Амплітудно-фазова частотна характеристика розімкненої САУ із астатичною незмінною частиною

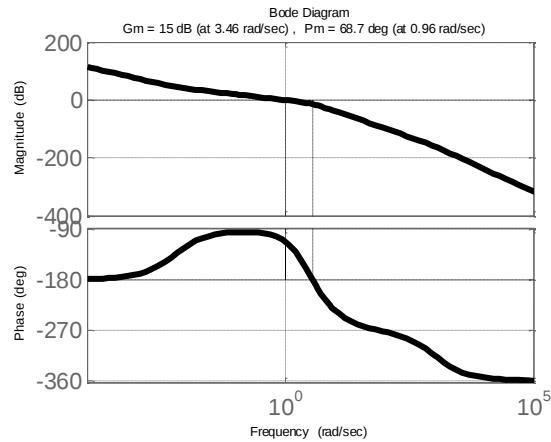


Рисунок 3.5 – ЛАЧХ робастної СА з астатичною незмінною частиною

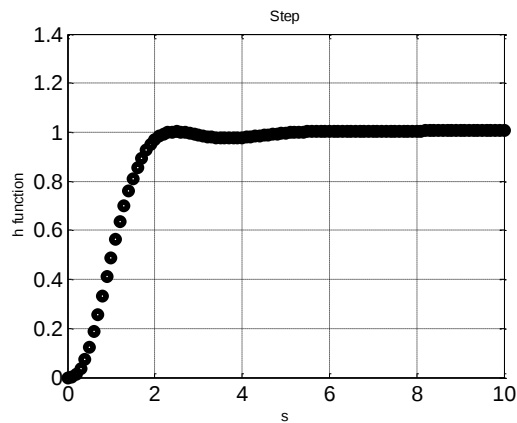


Рисунок 3.6 – Перехідна характеристика робастної САУ із астатичною незмінною частиною

Таким чином встановлено, що запропонована методика наближеного синтезу регуляторів, що мають властивостями робастності, зокрема, до найбільш важливого показника якості судових САУ, а саме, запасів сталості, досягнута шляхом аналітичного обґрунтування умов робастності та вирішенням прикладних завдань [9, 10].

Висновки до розділу 3

1. Запропоновано підхід щодо удосконалення методик синтезу регуляторів суднових систем автоматичного управління, що враховує можливу зміну параметрів об'єкту.
2. Вперше запропоновані критерії робастності САУ на основі властивостей об'єкту у вигляді амплітудно-фазової характеристики та логарифмічної частотної характеристики САУ.
3. Запропоновано методику синтезу регуляторів режимних параметрів суднових САУ за умов забезпечення робастності.
4. Вирішено прикладне завдання синтезу робастного регулятора суднової САУ

4 ЦИФРОВА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕГУЛЯТОРІВ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ СУДНОВИХ САУ

4.1 Методи цифрової реалізації регуляторів

Загалом пропонується низка методів цифрової реалізації регуляторів в САУ, з яких є найбільш розповсюдженим наступні:

- За аналоговим прототипом
- Методами цифрової фільтрації

Особливості методу цифрової реалізації регуляторів за аналоговим прототипом наступні:

- вирішується завдання синтезу аналогової САУ
- знаходиться цифрова реалізація ПІД – регулятора за певними умовами відповідності.

До методів цифрової реалізації ПІД – регуляторів відносяться наступні:

- використання квадратурних формул (прямокутників, трапецій, Сімпсона, сплайнів тощо)
- використання методів простору стану
- перетворення Тастіна тощо (при операторній формі завдання та частотних хаактерисик)

4.1.1 Використання квадратурних формул (прямокутників)

Рівняння аналогового ПІД – регулятора [8]:

$$u(t) = k_p x(t) + k_i \int x(t) dt + k_d \frac{dx(t)}{dt}$$

або в еквівалентній формі має вигляд:

$$u(t) = k_p \left(x(t) + \frac{k_i}{k_p} \int x(t) dt + \frac{k_d}{k_p} \frac{dx(t)}{dt} \right) = k_p \left(x(t) + \frac{1}{T_i} \int x(t) dt + T_d \frac{dx(t)}{dt} \right)$$

Рівняння цифрового ПІД – регулятора при застосуванні найбільш простих формул апроксимації методом прямокутників мають наступний вигляд:

$$u(t_k) = k_p \left(x(t_k) + \frac{1}{T_i} \sum x(t_k) \Delta t + T_d \frac{\Delta x(t_k)}{\Delta t} \right)$$

При використанні такої, найбільш вживаної форми перетворень, є питання щодо еквівалентності, а саме::

Вибір частоти дискретизації

Вибір параметрів регулятора

Моделювання цифрової САУ.

4.1.2 Перетворення Тастіна

Перетворення Тастіна спирається на еквівалентність аналогової САУ як прототипу до проекрованої цифрової САУ в області низьких частот, які вважаються робочими для проектовано САУ.

Формула Тастіна

$$p = \frac{2z-1}{t_d z + 1}.$$

де z – оператор Z – перетворення, що відповідає затримці на один такт дискретизації за часом, є справедливою за умови, що частота дискретизації сигналу значно перевищує смугу пропускання незмінної частини САУ, а саме якщо :

$$\omega t_d \leq 1$$

в смузі пропускання САУ.

Підстановка формули Тастіна в передатну функцію регулятора дозволяє отримати форму його цифрової реалізації у вигляді рекурентного співвідношення.

4.2 Вирішення прикладного питання цифрової реалізації регуляторів режимних параметрів суднових САУ

4.2.1 Вихідні дані

Вихідними даними є зміна параметрів об'єкту СЕЕС при зміні навантаження, завданими експериментальною перехідною характеристикою (рис. 4.1).

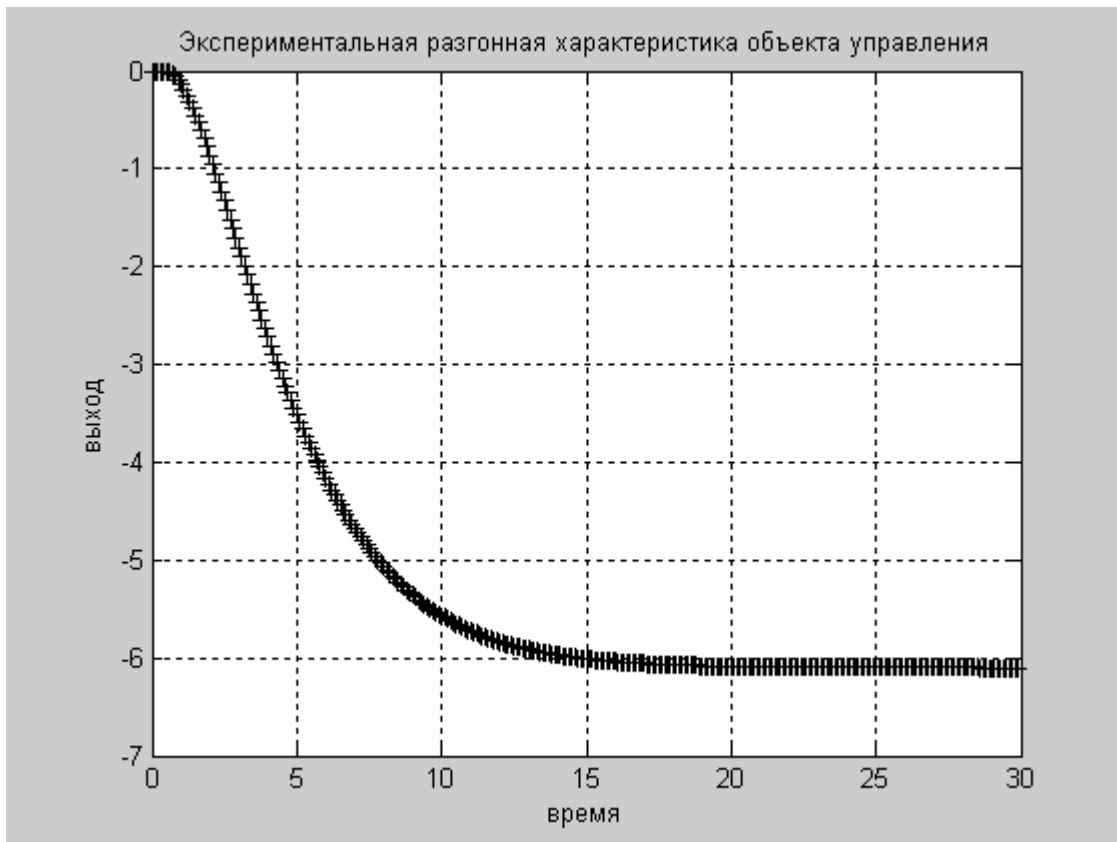


Рисунок 4.1 – Експериментальна перехідна характеристика об'єкту

4.2.2 Апроксимація перехідної характеристик об'єкту

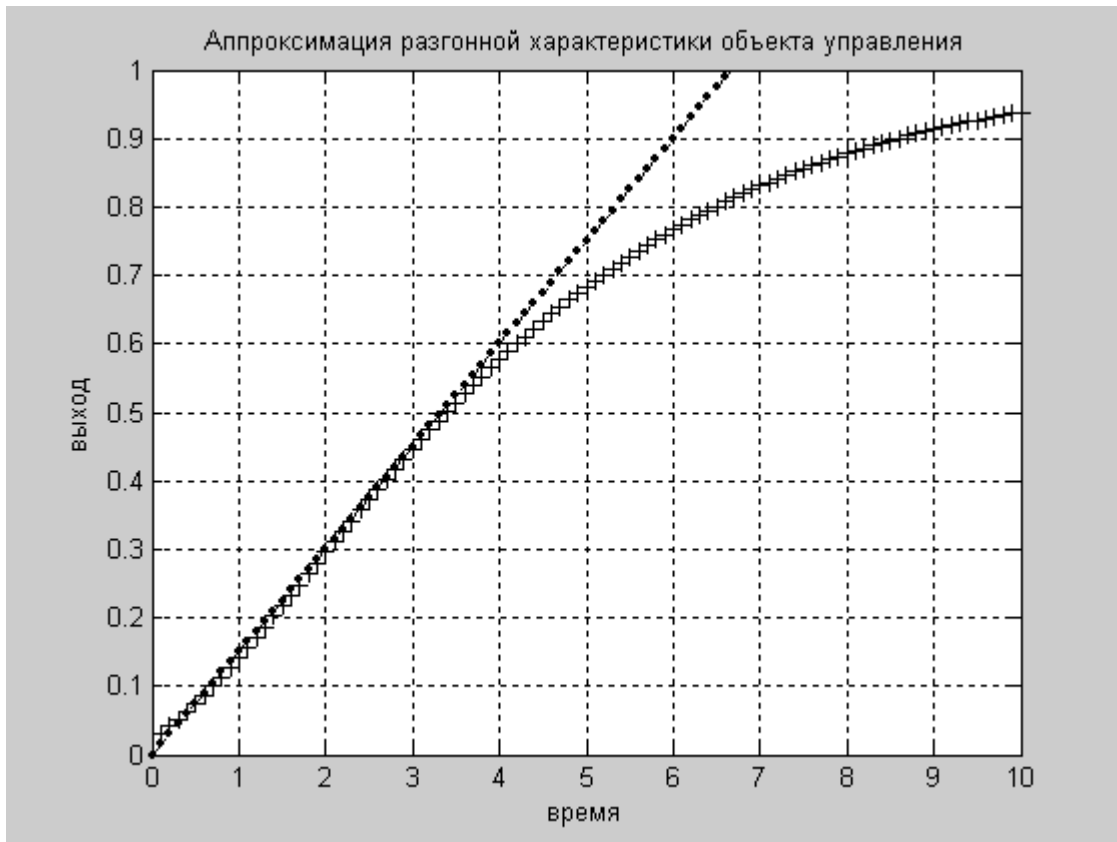


Рисунок 4.2 – Апроксимація експериментальної перехідної характеристики об'єкту

За результатами апроксимації експериментальної характеристики об'єкту отримуємо параметри його математичної моделі до аперіодичної ланки першого порядку із запізнюванням з параметрам [11]:

$$\tau = 1.5000 \text{ с}, T_0 = 4 \text{ с}, k_0 = -6.1000$$

Отримуємо передатну функцію об'єкту та її цифрове перетворення:

Передатна функція об'єкту без запізнювання:

$$W_o = \frac{-0.1525}{s + 0.25}.$$

Z-перетворення

$$W_o = \frac{-0.1506}{z - 0.9753}.$$

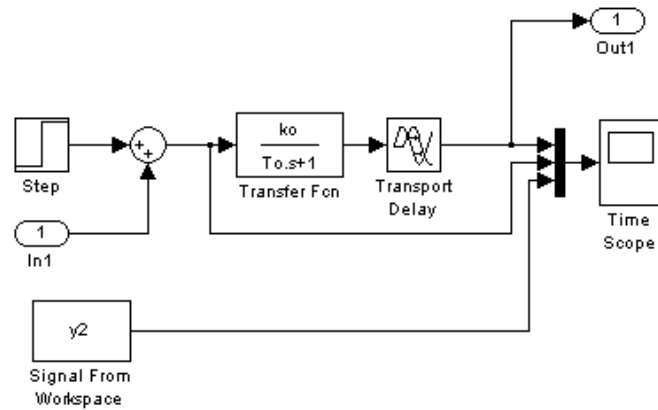


Рисунок 4.3 – Модель об'єкта

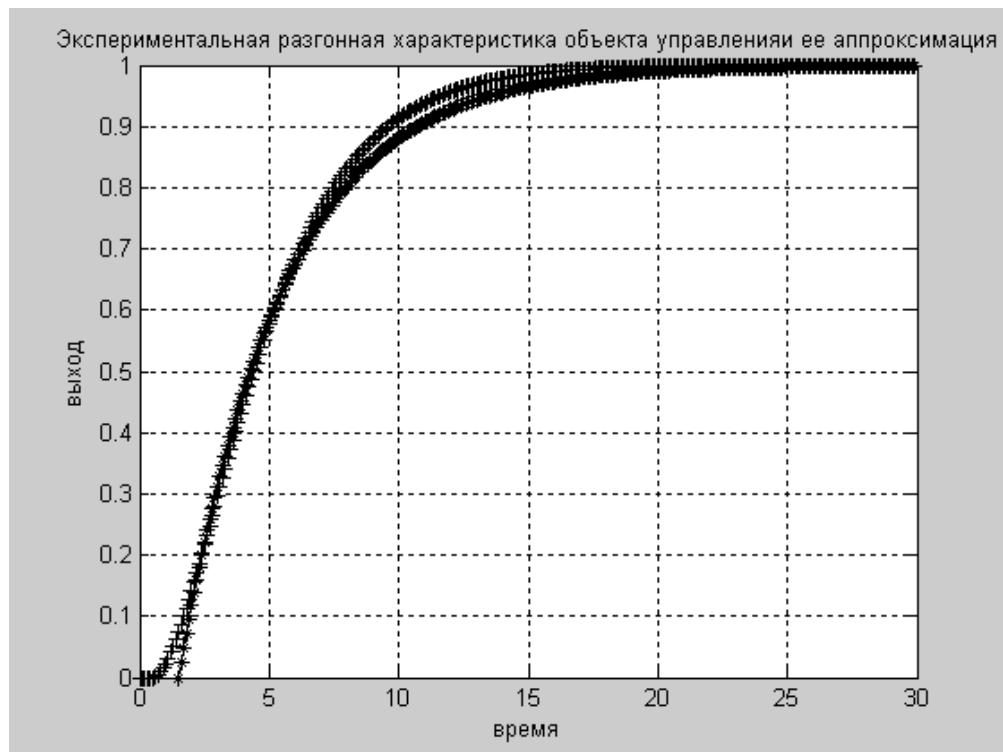


Рисунок 4.4 – Експериментальна розгінна характеристика об'єкта та її
апроксимація

4.3 Структури моделей аналогової та цифрової САУ для дослідження процесів керування

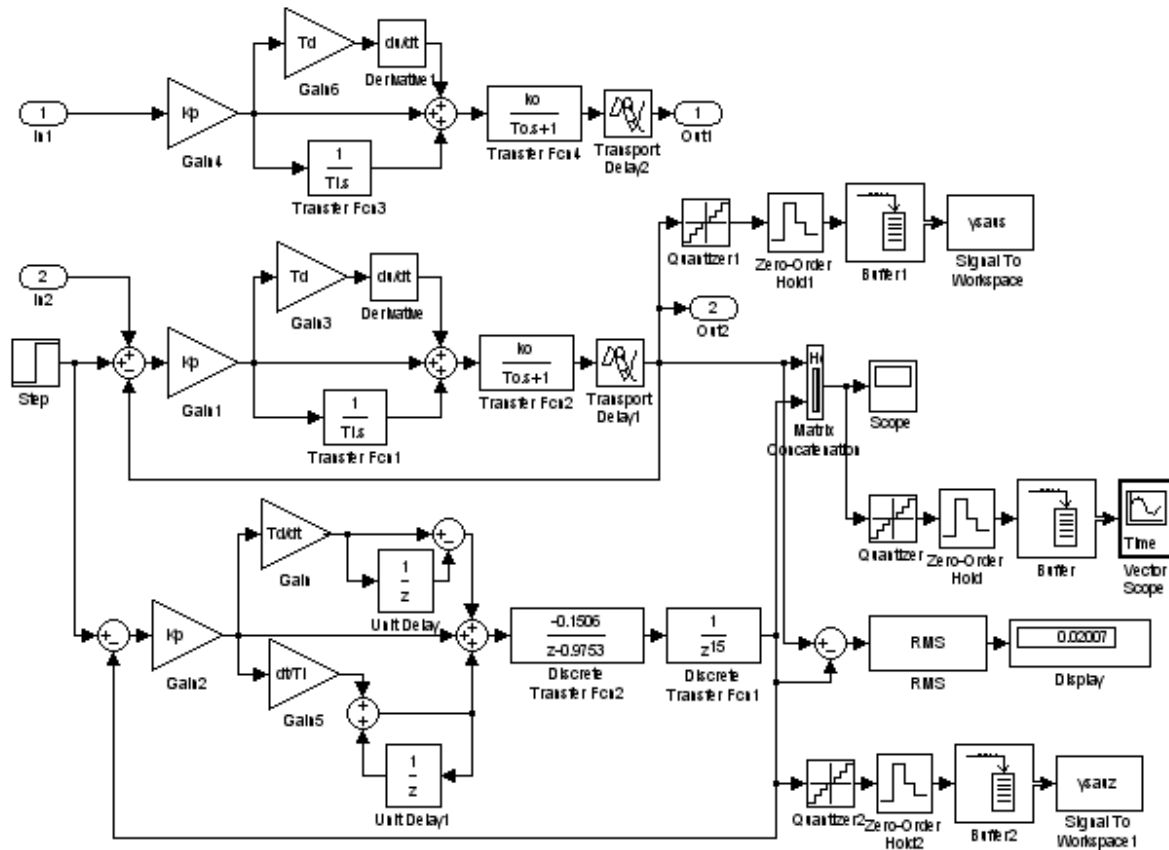


Рисунок 4.4 – Моделі аналогової та цифрової САУ

4.4 Результати моделювання цифрової САУ

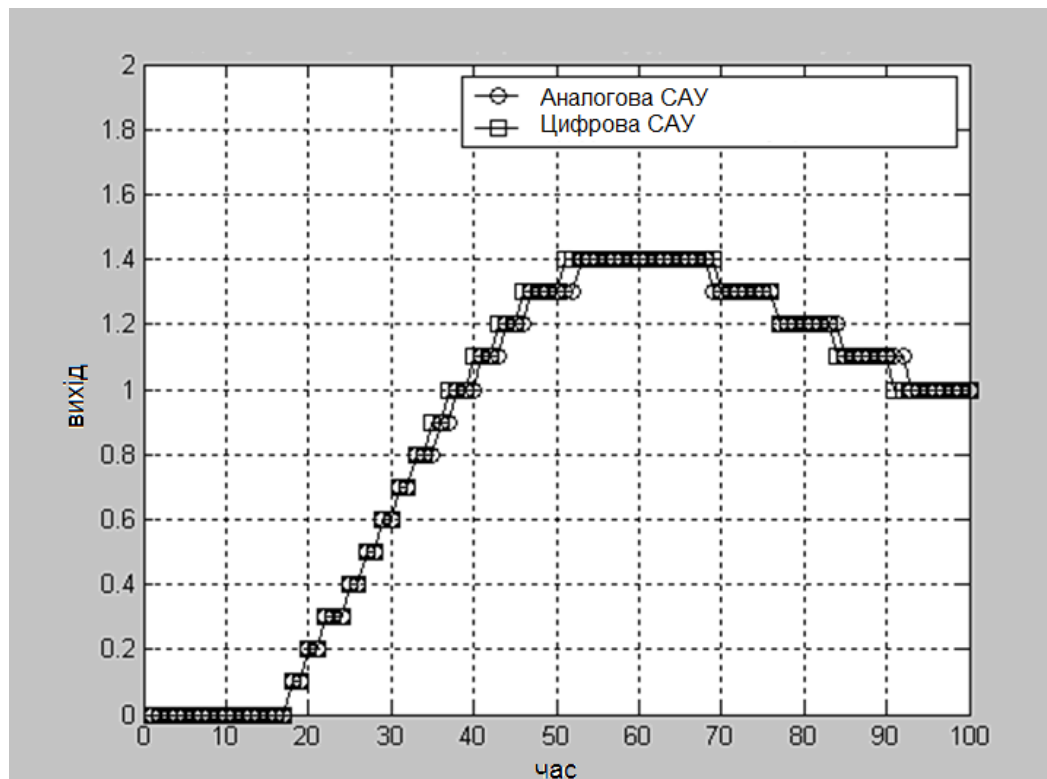


Рисунок 4.5 – Моделювання роботи аналогової та цифрової систем управління

Час перехідного процесу

$T_{pps} = 9.3000$

$T_{ppz} = 9.1000$

похибка статизма

$\delta = 0$

перерегулювання %

$\sigma_s = 40.0000$

$\sigma_z = 40.0000$

Запаси стійкості по фазі і по амплитуді.

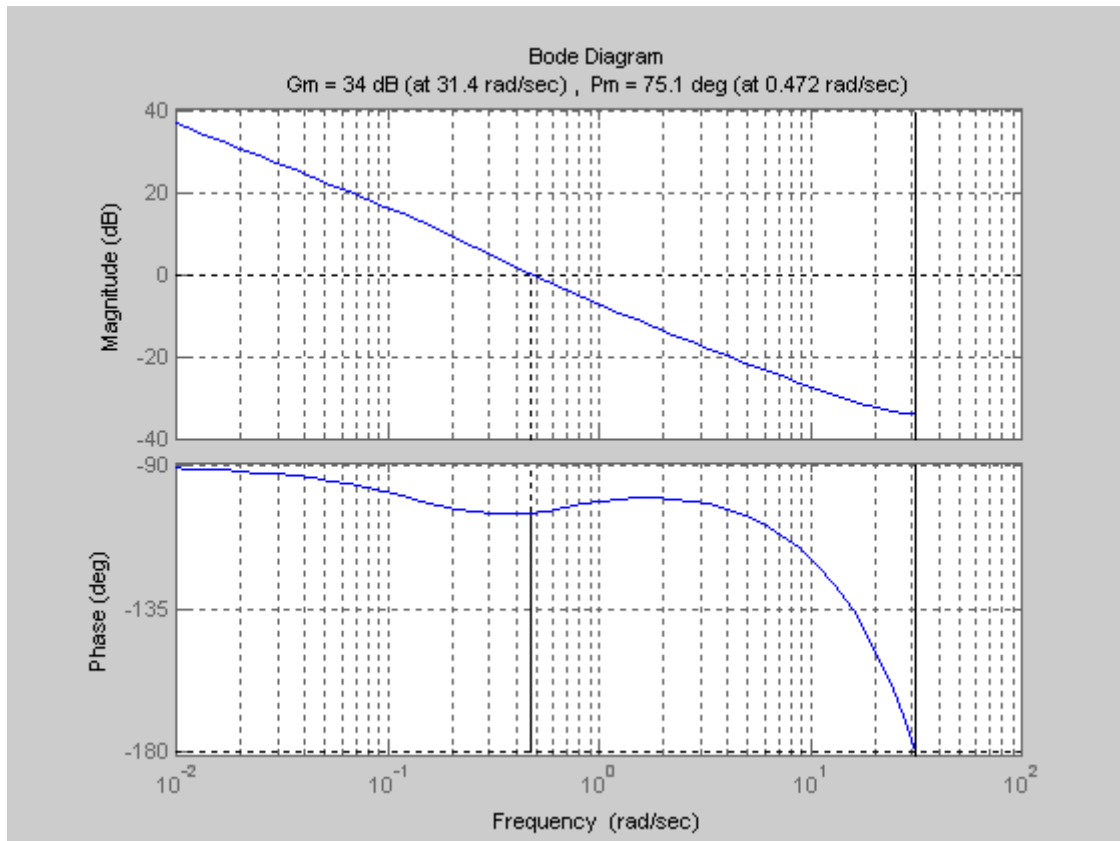


Рисунок 4.6 – ЛАЧХ та ФЧХ

Запас стійкості по амплитуді

 $G_m =$

49.9983

Запас стійкості по фазі

 $P_m =$

75.1188

Висновки до розділу 4

1. Розглянуто методики проектування цифрового регулятора режимних параметрів суднових САУ за аналоговим прототипом та встановлено межі їх застосування.
2. Вирішено прикладне завдання синтезу цифрової САУ у порівнянні з аналоговою реалізацією
3. Отримані показники сталості та якості перехідних процесі у синтезованій цифровій САУ..

ВИСНОВКИ

Мета роботи у вигляді удосконалення методик налаштування класичних регуляторів в умовах невизначеності щодо зміни параметрів, методів побудови їх дискретних аналогів, та дослідження процесів у суднових системах автоматичного управління шляхом узагальнення математичних моделей таких систем і їх складових, встановлення умов робастності та особливостей цифрової реалізації досягнута шляхом вирішення встановлених завдань..

Для досягнення вказаної мети було поставлено та вирішено наступні завдання:

1) Виконано математичний опис, критичний огляд та порівняння типових математичних моделей складових суднових систем автоматичного управління, і їх структурної організації

2) Виконано огляд, аналіз та встановити математичний опис типових регуляторів в суднових системах автоматичного управління з урахуванням можливостей реалізації

3) Розглянуто методи забезпечення робастності суднових систем автоматичного управління щодо зміни параметрів об'єкту шляхом відповідних налаштувань регуляторів та запропонувати методику налаштування таких регуляторів на умови забезпечення робастності системи.

4) Узагальнено методи побудови цифрового регулятора за аналоговим прототипом та виконати синтез цифрового регулятора для прикладного завдання синтезу суднової системи автоматичного управління та дослідження її характеристик

Висновки по окремим розділам роботи становлять наступне:

1. Запропоновано узагальнення опису сучасних суднових систем автоматичного управління та їх складових як багатовимірних систем

із множиною вхідних управляючих та збурюючі дій, вихідних вимірювальних координат, змінних параметрів, що дозволило встановити визначення їх фундаментальних властивостей стійкості, керованості та спостережуваності.

2. Запропонована класифікація математичних моделей сучасних суднових систем автоматичного управління та множин управляючих і збурюючі дій як елементів метричних просторів сигналів.
3. Визначені основні особливості застосування та вимоги щодо виконавчих пристроїв та вимірювальних пристроїв у суднових САУ.
4. Визначена структурна організація управляючих дій в судновій САУ та особливості побудови регуляторів режимів функціонування.
5. Розглянуті основні закони регулювання режимних параметрів у суднових САУ, деталізовано їх математичний опис з врахуванням можливостей практичної реалізації.
6. Встановлені переваги та недоліки основних законів регулювання режимних параметрів у суднових САУ, що дозволяє обрати відповідне практичному застосуванню рішення.
7. Запропоновано підхід щодо удосконалення методик синтезу регуляторів суднових систем автоматичного управління, що враховує можливу зміну параметрів об'єкту.
8. Вперше запропоновані критерії робастності САУ на основі властивостей об'єкту у вигляді амплітудно-фазової характеристики та логарифмічної частотної характеристики САУ.
9. Запропоновано методику синтезу регуляторів режимних параметрів суднових САУ за умов забезпечення робастності.
10. Вирішено прикладне завдання синтезу робастного регулятора суднової САУ

- 11.Розглянуто методики проектування цифрового регулятора режимних параметрів суднових САУ за аналоговим прототипом та встановлено межі їх застосування.
- 12.Вирішено прикладне завдання синтезу цифрової САУ у порівнянні з аналоговою реалізацією
- 13.Отримані показники сталості та якості перехідних процесі у синтезованій цифровій САУ..

Пропозиції щодо використання результатів дослідження складають удосконалення методик проектування регуляторів САУ в складі СЕС.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Пушкар, М.С. Проектування систем автоматизації [Текст]: навч. посібник / М.С. Пушкар, С.М. Проценко – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 268 с.
2. Жукова Н.В. та ін. Сучасна теорія керування динамічних систем // Навч. посібник. . – Донецьк, . – ДонНТУ. 2013 – 292 с.
3. R.C. Dorf, R.H. Bishop., Modern Control Systems // Prentice Hall– 2004. – 832 с.
4. Попович М.Г. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник – К.: Либідь, 2005. - 680 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. Myrhorod, V. “Dynamic Systems, Similar to the Time Scale” in Books of Abstracts/ V. Myrhorod, I. Hvozdeva // Tenth International Conference on Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences 20-25 June 2018, Albena, Bulgaria, P.43-44.
7. Миргород, В.Ф. Методика наближеного синтезу регуляторів за умов забезпечення властивостей робастності / В.Ф. Миргород, І.М. Гвоздева // Авіаційно-космічна техніка і технологія – № 4 ч.1 – 2023. – С.58-63, DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2023.4sup1/>
8. Поповіч М.Г. Теорія автоматичного керування. / М.Г. Поповіч, О.В. Ковальчук // Навчальний посібник. – К. – Либідь, 1997. – 544 с:
9. Миргород, В.Ф. Застосування методики синтезу регуляторів з властивостями робастності / В.Ф. Миргород, І.М. Гвоздева, В.В. // Тези доповідей

28 Міжнародного конгресу двигунобудівників [Збірка тез (4-9 вересня 2023 р.). – Харків: НАУ «ХАІ», 2023. – С.55.

<https://propulsioncongress.com/ru/proceedings/>

10. Миргород В.Ф., Дослідження процесів у судновій системі регулювання тиску пари у допоміжному котлі засобами математичного моделювання [Текст] / Миргород В.Ф., Гвоздева І.М., Рашков В.В.// Матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 22.11.2022 - 23.11.2022. – Одеса: НУ «ОМА», 2022. – С.136-139. ISSN 2706-7874 (print). DOI:10.31653/2706-7874.SEEEA-2022.11.1-203

11. 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.