

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

Другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

«Вдосконалення ПД регулятора для лінійної системи автоматизації на основі  
параметричної ідентифікації»

(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи АУТПм-22-1

Скрипниченко В.О.

(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Автоматизоване управління  
технологічними процесами

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Ромашов Ю.В

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту  
Зав. кафедри КІТАР

Невлюдов І. Ш.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

2023 р.

Я, як студент ХНУРЕ (Скрипниченко Владислав Олександрович), розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Дата

23.01.2024

П.І.Б.

Скрипниченко В.О.

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАР \_\_\_\_\_  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_  
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології \_\_\_\_\_  
Тип програм \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
Освітня програма Автоматизоване управління технологічними процесами \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Скрипниченко Владиславу Олександровичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Вдосконалення ПІД регулятора для лінійної системи автоматизації на основі параметричної ідентифікації \_\_\_\_\_

Затверджена наказом по університету від 03.11.2023 р. № 1286 Ст \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 23.01.2024 \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи: Регулятор, управління, асу, об'єкт автоматизації, параметрична ідентифікація, лінеаризація, теорія автоматичного управління та автоматичних регуляторів; комп'ютерна система наукових та інженерних розрахунків та середовище моделювання Scilab. \_\_\_\_\_

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: Вступ; Проблема вдосконалення ПІД-регуляторів для лінійних об'єктів автоматизації; Системи автоматичного регулювання; Закони регулювання та регулятори; Адаптивні системи автоматичного регулювання; Теоретичні основи вдосконалення ПІД регуляторів на основі параметричної ідентифікації; Математична модель лінійного об'єкту автоматизації та визначення параметрів ПІД-регулятора; Вдосконалення ПІД-регуляторів на основі більш деталізованого моделювання процесів тра ідентифікації; Ідентифікація лінійного об'єкту автоматизації методом найменших квадратів; Проектування ПІД-регулятора рівня рідини в циліндричних посудинах; Математична модель зміни рівня рідини в циліндричних корпусах; Комп'ютерна модель рівня рідини в циліндричних корпусах; Параметрична ідентифікація та визначення параметрів ПІД-регуляторів рівня; Охорона праці; Висновки; додатки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Титульний, Вступ(мета; актуальність; задачі роботи) Демонстраційний матеріал у вигляді презентації формату PowerPoint. Висновки; додатки.

---

---

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	04.05 – 08.06.23	Виконано
2	Аналіз стану проблеми	10.06 – 15.07.23	Виконано
3	Розробка теоретичних основ	16.07 – 25.08.23	Виконано
4	Комп'ютерне моделювання	26.08 – 30.09.23	Виконано
5	Охорона праці	01.09 – 10.10.23	Виконано
6	Висновки та додатки	11.10 – 28.11.23	Виконано
7	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichек	15.01 – 06.1.24	Виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	16.01 – 10.1.24	Виконано
9	Подання роботи на рецензію	20.01 – 13.1.24	Виконано
10	Подання роботи на підпис зав. кафедри	22.01 – 10.1.24	Виконано
11	Подання атестаційної роботи в ЕК	23.01.2024	Виконано

Дата видачі завдання 24.10.2023

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Скрипниченко В.О.  
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Ромашов Ю.В  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 96 с., 1 табл., 31 рис., 2 дод., 30 джерел.

РЕГУЛЯТОР, УПРАВЛІННЯ, АСУ, ОБ'ЄКТ АВТОМАТИЗАЦІЇ, ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ, ЛІНЕАРИЗАЦІЯ, ЦИФРО-АНАЛОГОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ПЕРЕТВОРЕННЯ ЛАПЛАСА, УПРАВЛЯЮЧИЙ ПРИСТРІЙ, ПРОГРАМНЕ УПРАВЛІННЯ, ВЕРТИКАЛЬНИЙ ТА ГОРИЗОНТАЛЬНИЙ БАК, РЯД ТЕЙЛОРА, ЛІНЕАРИЗОВАНА ФУНКЦІЯ, РЕГУЛЯТОР – ПРОПОРЦІЙНО-ІНТЕГРАЛЬНИЙ-ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИЙ.

Об'єкт дослідження – пропорційно-інтегральний-диференціальний регулятор.

Мета дослідження – вдосконалення підбору параметрів ПІД регулятора на основі параметричної ідентифікації.

Предмет дослідження – параметри автоматичних регуляторів методом параметричної ідентифікації.

Методи дослідження – комп'ютерне моделювання лінійних об'єктів автоматизації з пропорційно-інтегрально-диференціальним регулятором за допомогою системи Scilab.

Проведено аналіз стану проблеми проектування регуляторів лінійних об'єктів автоматизації. Показано, що поняття автоматизація та механізація пов'язані з такими процесами: виробничими, енергетичними, транспортними, інформаційними. У всіх цих процесах можна виділити два види операцій: робочі операції та операції контролю та управління. Перш ніж вдосконалювати ПІД регулятор доцільно розглянути його принципові можливості для заданого об'єкта або системи.

## ABSTRACT

Explanatory note: 96 pages, 1 table, 31 figures, 2 applications, 30 sources.

REGULATOR, CONTROL, ASU, AUTOMATION OBJECT, PARAMETRIC IDENTIFICATION, LINEARIZATION, DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTER, LAPLACE TRANSFORM, CONTROL DEVICE, SOFTWARE CONTROL, VERTICAL AND HORIZONTAL TANK, TAYLOR SERIES, LINEARIZED FUNCTION, PROPORTIONAL-INTEGRAL-DIFFERENTIAL CONTROLLER.

The object of study is a proportional-integral-differential controller.

Purpose of the study is improvement of PID controller on the basis of parametric identification.

Subject of research is parameters of automatic controllers by the method of parametric identification .

Research methods is computer modeling of linear automation objects with proportional-integral-differential controller using the Scilab system.

An analysis of the state of the problem of designing controllers for linear automation objects is carried out. It is shown that the concepts of automation and mechanization are associated with the following processes: production, energy, transportation, and information. In all of these processes, two types of operations can be distinguished: working operations and control and management operations. Before improving a PID controller, it is advisable to consider its fundamental capabilities for a given object or system.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	9
Вступ.....	10
1 Проблема вдосконалення під-регуляторів для лінійних об'єктів автоматизації.....	13
1.1 Системи автоматичного регулювання .....	14
1.1.1 Принципові схеми САР .....	17
1.2 Закони регулювання та регулятори.....	21
1.2.1 Позиційні (релейні) регулятори.....	22
1.2.2 Пропорційні (статичні) регулятори.....	23
1.2.3 Інтегральні регулятори .....	25
1.2.4 Пропорціонально-інтегральні регулятори.....	27
1.2.5 Пропорційно-диференціальні регулятори.....	31
1.2.6 Пропорційно-інтегрально - диференціальні регулятори .....	36
1.3 Адаптивні системи автоматичного регулювання .....	38
1.3.1 Функціональні особливості та класифікації адаптивних САР .....	38
Висновки за розділом.....	41
2 Теоретичні основи вдосконалення ПІД регуляторів на основі параметричної ідентифікації .....	42
2.1 Математична модель лінійного об'єкту автоматизації та визначення параметрів ПІД-регулятора.....	43
2.2 Вдосконалення ПІД-регуляторів на основі більш деталізованого моделювання процесів та ідентифікації .....	47

2.3 Ідентифікація лінійного об'єкту автоматизації методом найменших квадратів.....	50
Висновки за розділом.....	55
3 Проектування ПІД-регулятора рівня рідини в циліндричних посудинах....	56
3.1 Математична модель зміни рівня рідини в циліндричних корпусах.....	56
3.1.1 Вертикальний циліндр.....	57
3.1.2 Горизонтальний циліндр.....	59
3.2 Комп'ютерна модель рівня рідини в циліндричних корпусах.....	64
3.2.1 Циліндричний корпус вертикального типу.....	64
3.2.2 Циліндричний корпус горизонтального типу.....	70
3.3 Параметрична ідентифікація та визначення параметрів ПІД-регуляторів рівня.....	74
Висновки за розділом.....	82
4 Охорона праці.....	83
4.1 Загальні положення.....	83
4.2 Параметри мікроклімату.....	84
4.3 Виробниче освітлення.....	85
Висновки.....	88
Перелік джерел посилання.....	90

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
- ЕОМ – електронна обчислювальна машина;
- КІТАР – комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки;
- ОУ – об'єкт управління;
- ПІ регулятор – пропорційно-інтегральний регулятор;
- ПІД регулятор – пропорційно-інтегральний-диференціальний регулятор;
- ПУ – пристрій управління;
- САУ – систем автоматичного управління;
- ТАР – теорією автоматичного регулювання;
- ТАУ – теорія автоматичного управління;
- УП – управляючий пристрій;
- ХНУРЕ – Харківський національний університет радіоелектроніки;
- ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;
- ЦОУ – цифровий обчислювальний пристрій;
- ЦСУ – цифрова система управління;
- ЧЕ – чутливі елементи;

## ВСТУП

Природний відбір, що призводить до виживання та розмноження певних особин, а інші зникають, представляє собою особливий механізм управління, що відбувається в природі. У всіх процесах управління, незалежно від їхнього контексту, спільними елементами є отримання, зберігання, перетворення інформації та формування (організація) управлінських рішень на її основі.

Оцінка поточного стану досліджуваного об'єкта. Системи автоматичного управління (САУ) широко застосовуються в промисловості, автомобільній та інших рухомих платформах. Існує значна кількість роботизованих систем. Навіть при наявності значних досягнень в галузі автоматизованого проектування, повне автоматизування процесів проектування практично неможливе, оскільки ці процеси досить складні для формалізації. Автоматизація процесу проектування регуляторів зводиться до автоматизації окремих етапів цього процесу.

Глобальні тенденції у вирішенні поставлених завдань. При аналізі та синтезі систем управління важливо працювати з їх математичними моделями. Математична модель представляє собою систему рівнянь, передавальних або часових функцій, які описують процеси у системі управління. Використання математичного моделювання в процесі проектування автоматичних регуляторів стає особливо ефективним, особливо коли воно реалізується за допомогою комп'ютерних технологій. Це дозволяє проводити значну кількість розрахунків протягом короткого часу. Використання комп'ютерних технологій в свою чергу відкриває широкі можливості для автоматизації процесу проектування автоматичних регуляторів з використанням програмного управління цим процесом.

Актуальність роботи та обґрунтування її виконання. Існує низка ситуацій, в яких використання роботизованих систем є надійнішим варіантом

порівняно з роботою людини. Серед них можна виділити ліквідацію різних техногенних катастроф, де підвищене радіаційне зафіксоване значення унеможлиблює працю людини. Сюди також відноситься робота з токсичними речовинами та виконання підводних робіт на великій глибині. Системи автоматичного управління рухом з зворотнім зв'язком широко використовуються в сучасних машинах як один із найефективніших методів підвищення точності та швидкодії. Практично всі енергетичні агрегати та циклові технологічні машини забезпечуються системами стабілізації кутової швидкості. З розвитком верстатів з програмним управлінням, автоматичних маніпуляторів і роботів, системи позиціонування, що забезпечують точне переміщення робочих органів, стають все більш популярними, а контурні системи управління, контрольні та корекційні закони знаходять широке застосування.

Мета роботи та можливі сфери застосування. Робота виконується для підвищення ефективності вже існуючих, та широко використовуваних систем на ПД регуляторі. За допомоги комп'ютерного моделювання процесів управління Розроблений регулятор дозволяє забезпечити об'єкту автоматизації здатність утримувати встановлений стан при наявності неконтрольованих впливів. [1].

Мета роботи – вдосконалення ПД регулятора для лінійної системи автоматизації на основі параметричної ідентифікації.

Об'єкт розробки – лінійні об'єкти автоматизації.

Предмет розробки – автоматичні регулятори лінійних об'єктів автоматизації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– провести аналіз стану проблеми проектування ПД регуляторів лінійних об'єктів автоматизації;

– провести дослідження щодо теоретичних основ проектування ПД регуляторів;

– визначити основні недоліки і можливі методи вдосконалення ПД регуляторів.

– побудувати модель для проведення дослідів математичних моделей.

– за допомогою комп’ютерного моделювання отримати результати які можна порівняти.

Звіт з передатестаційної практики виконано згідно з [1], [2].

Результати роботи опубліковані в [3].

## **1 ПРОБЛЕМА ВДОСКОНАЛЕННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ ЛІНІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ**

Термін керування (також використовується термін управління) охоплює широкий спектр понять, що виникають унаслідок різної природи об'єктів, таких як управління технологічними процесами, підприємствами або державами. Крім цього, під керуванням (управлінням) розуміється також керівництво військами, управління транспортними засобами (судном, літаком, автомобілем), диригування оркестром і інше. З цієї точки зору, ТАУ є частиною кібернетики, яка досліджує процеси використання інформації та управління в системах різної фізичної природи.

Автоматизація виробництва визнається ключовим аспектом науково-технічного процесу, що сприяє інтенсифікації виробничих процесів та зниженню витрат енергії та матеріальних ресурсів. Сучасні системи управління володіють складною багаторівневою (ієрархічною) структурою, в якій використовуються обчислювальні мережі на різних рівнях, базуючись на електронно-обчислювальних машинах та мікропроцесорних засобах. У цьому посібнику розглядаються локальні системи автоматичного регулювання, які спрямовані на забезпечення необхідних технологічних режимів, що характеризуються конкретним набором значень технологічних параметрів, таких як температура, рівень, тиск, концентрація та інші. Також розглядаються аспекти оптимізації технологічних режимів та можливості пристосування (адаптації) систем до змінних робочих умов. Для складних технологічних об'єктів розробляються системи управління зі складною структурою та розвиненими взаємозв'язками між окремими компонентами.

## 1.1 Системи автоматичного регулювання

Автоматичні системи регулювання (АСР) широко використовуються у різних галузях життя. Теорія автоматичного керування розвивалася з середини 19 століття.

Класифікація автоматичних систем базується на трьох ключових характеристиках:

- алгоритм керування;
- алгоритм функціонування;
- наявність або відсутність здатності до самопристосування.

Залежно від алгоритму керування, автоматичні системи можуть бути розділені на дві основні категорії:

- розімкнуті системи, в яких вхідні впливи надходять тільки ззовні;
- замкнуті системи зі зворотніми зв'язками, де вхідні впливи надходять не тільки ззовні, але також і з самої автоматичної системи.

За характером функціонування автоматичні системи поділяються на такі групи:

- стабілізуювальні системи, які прагнуть підтримувати постійне значення керованої величини. Це означає, що АСР намагаються забезпечити постійну стабільність контрольованих параметрів;

- програмні автоматичні системи відомі тим, що їх алгоритм функціонування визначає, що треба змінювати керовану величину відповідно до заданої програми;

- здійснювальні системи, натомість, мають алгоритм функціонування, який вимагає змінювати керовану величину залежно від значення вхідної величини, яка може бути невідомою наперед. Щодо наявності здатності до самопристосування, автоматичні системи поділяються на ті, які цього не мають, і ті, які можуть самопристосовуватися;

- розімкнуті системи, що не мають зворотних зв'язків від об'єкта і регулюються на основі реакції на збурення, є стійкими, але можуть виникати

значні відхилення керованої величини через відсутність інформації про результати регулювання;

– замкнуті системи, які базуються на принципі реакції на відхилення, мають перевагу, оскільки один регулятор може компенсувати збурення незалежно від їх кількості. Така система не допускає накопичення помилок. Проте, при регулюванні за відхиленням, складно забезпечити одночасну точність, стійкість та швидкість.

Саме тому комбіновані системи, які поєднують різні принципи, є найефективнішими. Система автоматичного регулювання, що складається з одного об'єкта та одного регулятора, називається одиночною. Система автоматичного регулювання, де декілька регуляторів не пов'язані між собою та взаємодіють лише через об'єкт регулювання, називається незв'язаною САР. Система зв'язаного автоматичного регулювання це система, де кілька регуляторів спільно працюють на одному об'єкті і взаємодіють між собою. Більшість САР, які я розглядаю, є стабілізуючими, оскільки їхні регулятори спрямовані на підтримку постійних значень контрольованих параметрів. Проста схема такої системи показана на (рис. 1.1).

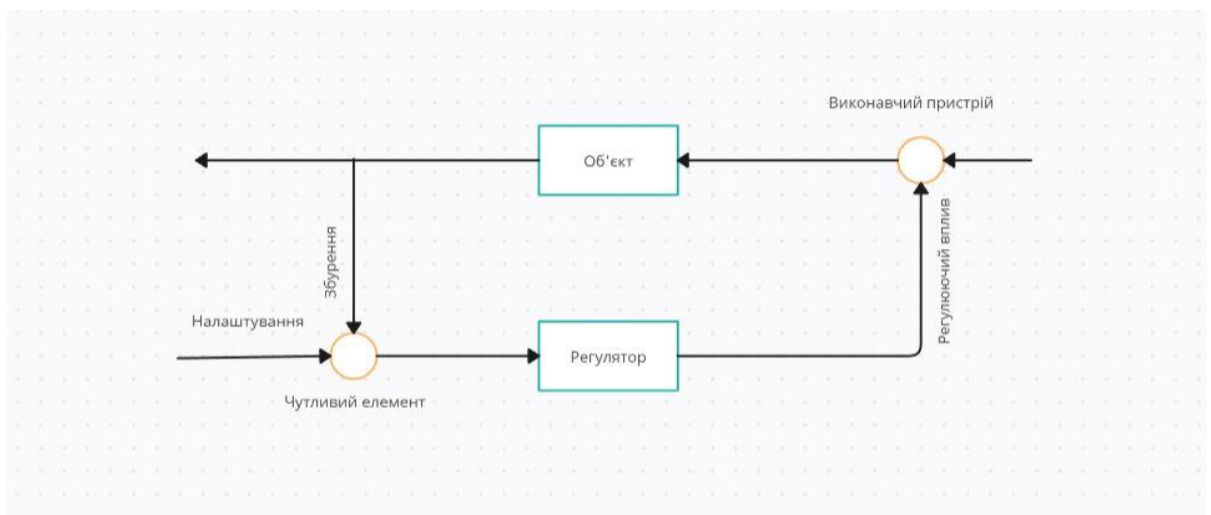


Рисунок 1.1 – Схема роботи САР

Система автоматичного регулювання (САР) включає в себе об'єкт регулювання, регулятора та зв'язки. Давайте розглянемо приклад, де завданням САР є підтримання певного тиску в об'єкті регулювання на заздалегідь встановленому рівні. В умовах нормального функціонування технологічного процесу тиск в об'єкті відповідає встановленому рівню, і система перебуває у стані рівноваги.

Тепер уявімо, що виникає деяка перешкода у технологічному процесі, така як зміна витрати середовища, тиск якого потрібно підтримувати. Ця зміна призводить до відхилення тиску, яке передається на чутливий елемент (ЧЕ) регулятора. ЧЕ порівнює це відхилення з налаштуванням і передає несумісність у формі регулювального впливу на виконавчий пристрій (ВП). Регулювальний елемент (РЕ) змінює гідравлічний опір системи, що призводить до досягнення нового рівноважного стану.

Якщо б не було регулятора, зміна витрати могла б призвести до досягнення тиску в об'єкті, який був би неприйнятним для вказаного технологічного процесу. Однак завдяки регулятору ця зміна витрати перетворюється на регулювальний вплив, який точно підтримує тиск в об'єкті. Розглянутій схемі можуть бути використані два типи регуляторів, які різняться за джерелом енергії для управління. Регулятори, що використовують додаткове джерело енергії для управління процесом регулювання (регулятори непрямої дії). Регулятори, які працюють без зовнішнього джерела енергії і використовують енергію самого об'єкта регулювання для управління процесом регулювання (регулятори прямої дії та регулятори з підсилювачами).

### 1.1.1 Принципові схеми САР

Розглянемо систему автоматичного регулювання (САР) з регуляторами, які можуть або не можуть використовувати додаткову енергію для управління процесом регулювання. Такі системи показані на (рис. 1.2, 1.3 і 1.4).

На (рис. 1.2), показана система з регулятором, який використовує додаткову енергію.

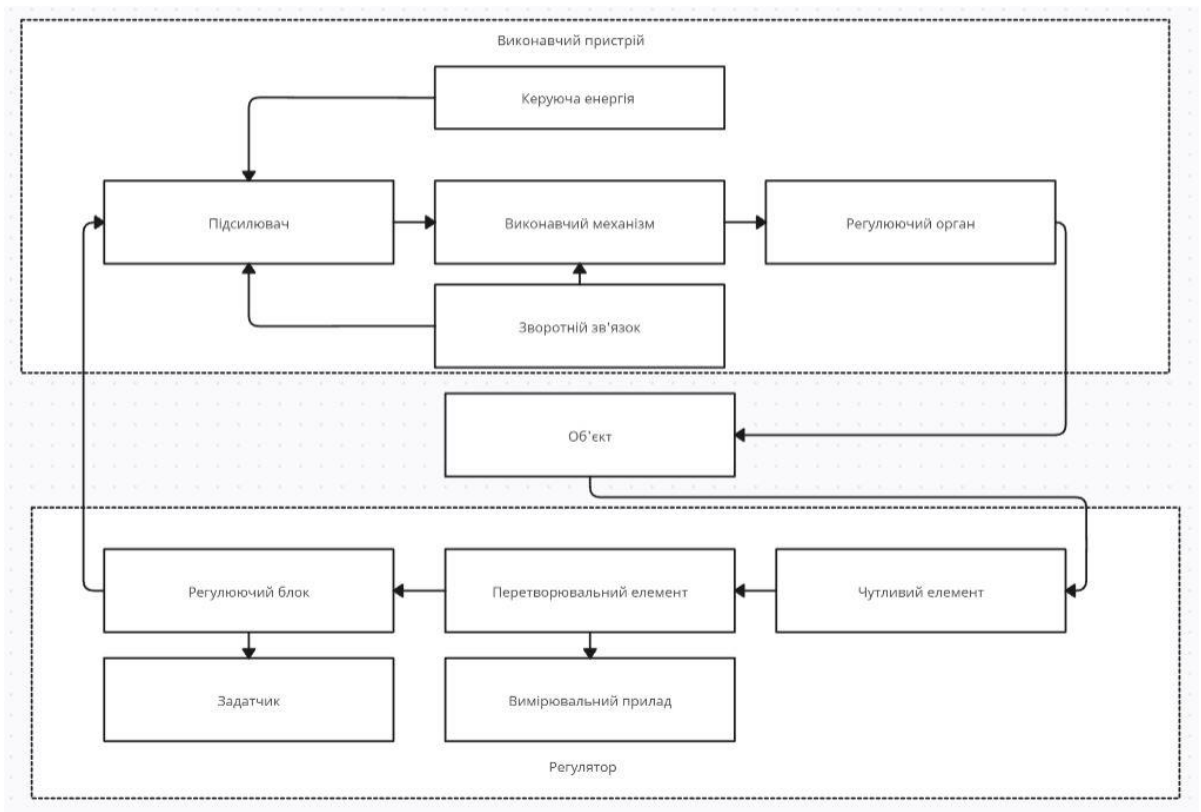


Рисунок 1.2 – Система з регулятором, який використовує додаткову енергію

Регулятор спочатку формує командний сигнал, який подається на підсилювач, такий як позиціонер, якщо як виконавчий механізм використовується регулювальний клапан. Ззовні на підсилювач подається енергія управління, і її вплив на виконавчий механізм визначається командним сигналом, чутливим елементом та задатчиком підсилювача (чутливий елемент і задатчик підсилювача на схемі не показані). Потім сила з виконавчого

механізму передається на регулювальний орган, який змінює подачу робочого середовища в об'єкт регулювання, стабілізуючи в ньому заданий параметр. Якщо відкинути об'єкт регулювання і зв'язки між об'єктом та складовими регулятора на (рис. 1.2), залишаться компоненти регулятора непрямої дії (РНПД). Важливо відзначити, що ці компоненти можуть бути виробленими самостійно, і їх можуть виготовляти в різних місцях наприклад, виконавчий механізм привід, регулювальний орган частина регулювальної арматури без приводу.

На (рис. 1.3) показано САР із регулятором прямої дії (РПД), який не використовує додаткову енергію керування.

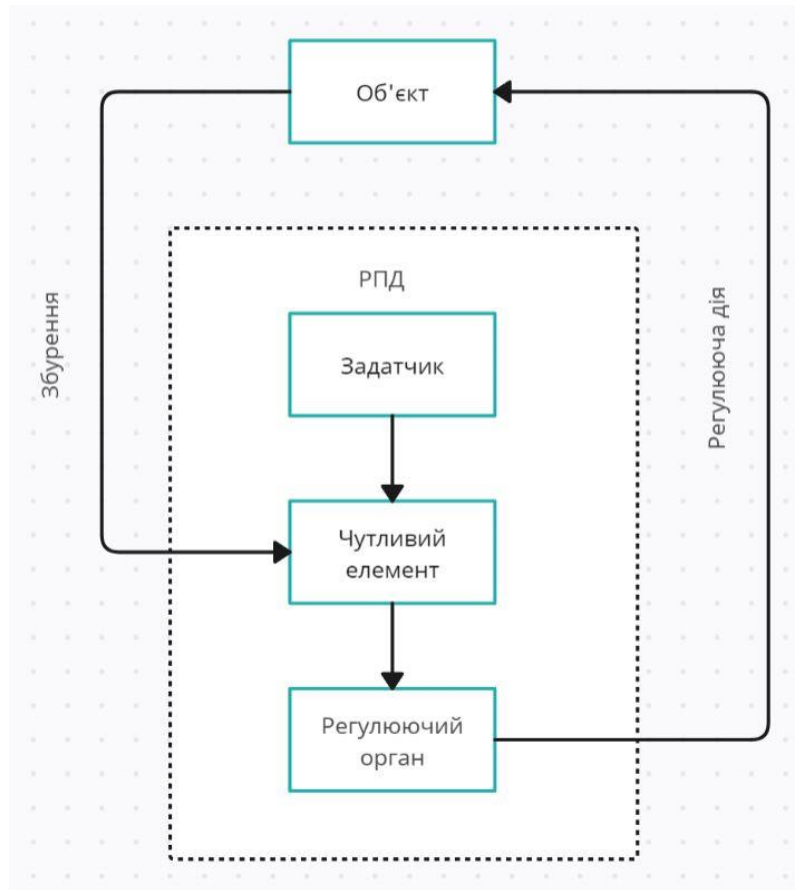


Рисунок 1.3 – САР із регулятором прямої дії, який не використовує додаткову енергію керування

У цьому випадку, зміна стабілізованого параметра передається від об'єкта регулювання до чутливого елемента регулятора, де вона порівнюється з впливом від задатчика. Результат цього порівняння надсилається безпосередньо на регулювальний орган (РО), який регулює подачу робочого середовища в об'єкт регулювання, підтримуючи заданий параметр.

На (рис. 1.4) представлена інша САР з регулятором, який не потребує додаткової енергії для управління процесом регулювання.

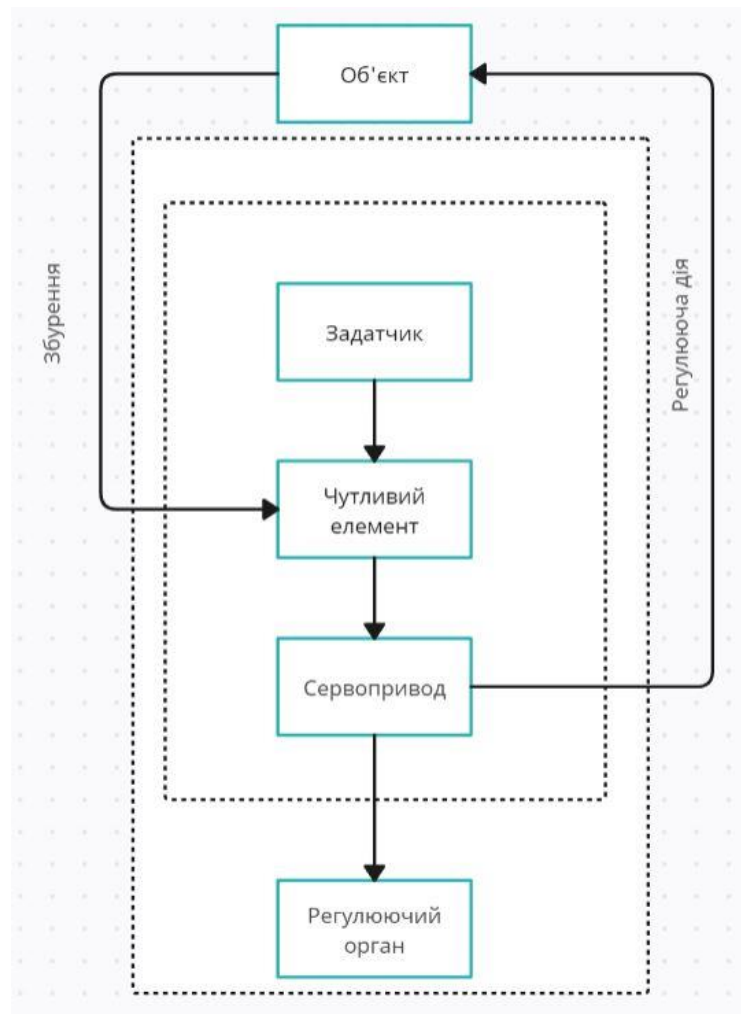


Рисунок 1.4 – САР з регулятором, який не потребує додаткової енергії для управління процесом регулювання

Відмінність цієї схеми від попередньої полягає в наявності вбудованого або зовнішнього підсилювача в регуляторі, з іншими словами, РПД доповнюється підсилювачем.

У цьому випадку результат порівняння не передається безпосередньо на РО, а відбувається через чутливий елемент керування на сервопривід, де потрібно здійснити значно більше зусиль для переміщення затвора регульовального органу, ніж у РПД.

Як видно з порівняння схем, останні дві схеми є значно спрощеними. Це досягнуто завдяки об'єднанню функцій регулятора і виключенню з нього певних елементів, які беруть участь у формуванні командного сигналу. Проте, коли необхідна висока точність регулювання і потрібне управління за певним законом (крім Л-закону та І-закону) та пов'язане регулювання, САР з регулятором РПД на (рис. 1.2) залишається переважною, через відсутність відповідних регуляторів, що працюють без зовнішнього джерела енергії.

У випадках, коли не можливо використовувати доступні регулятори непрямої дії з різних причин наприклад: через обмежені габарити, великі маси, відсутність джерела енергії для управління, або з економічних обмежень часто можна створити регулятори, які працюють без використання зовнішнього джерела енергії і забезпечують вказані та інші закони регулювання.

Перш за все, це пояснюється тим, що багато середовищ, які підлягають регулюванню, можуть бути використані для керування, і їхні параметри у конкретних умовах часто перевищують стандартизовані показники для керуючих середовищ (такі як повітря, рідини, електроенергія), що дозволяє створювати компактні засоби керування регуляторами, які працюють за рахунок енергії регульованого середовища. Крім того, регулятори з підсилювачами у багатьох випадках можуть реалізовувати розглянуті закони регулювання, вводячи механізми з ізодрому та випередження, і без потреби в спеціальних засобах керування. Вони також можуть здійснювати роботу зі стабілізації кількох параметрів в одній конструкції.

Для забезпечення стабільного та якісного регулювання, для кожного об'єкта вибирається або конструюється регулятор, який відповідає його характеристикам. Зазвичай потреби в системах автоматичного регулювання задовольняються регуляторами, які реалізують закони регулювання.

## 1.2 Закони регулювання та регулятори

Закон регулювання представляє собою функціональний зв'язок між вихідною величиною регулятора, яка визначає рух регульовального елемента тобто зміну положення регульовального елемента, і його вхідною величиною, яка вимірює відхилення регульованого параметра. У русі регулятора, який залишається нерухомим, ця функціональна залежність залишається сталою, і її називають законом регулювання. В залежності від конкретних законів регулювання, які реалізовані регуляторами, виділяють такі основні типи. Позиційні (релейні) регулятори (Пз або Рз): Вони використовують принцип реле для внесення змін у положення регульовального елемента залежно від відхилення параметра. Пропорційні (статичні) регулятори (П): Тут зміни на виході регулятора пропорційні відхиленню регульованого параметра. Інтегральні (астатичні) регулятори (і): Ці регулятори накопичують вплив з часом, пропорційно величині та тривалості відхилення, змінюючи положення регульовального елемента. Пропорційно-інтегральні регулятори (П і): Вони поєднують в собі характеристики пропорційного і інтегрального регулювання. Пропорційно-диференціальні регулятори (ПД): Ці регулятори враховують швидкість зміни відхилення регульованого параметра. Пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори (ПІД): Вони комбінують пропорційне, інтегральне і диференціальне регулювання для досягнення більш високої якості регулювання.

Ці різні типи регуляторів використовуються в залежності від конкретних потреб і властивостей системи, яку слід регулювати. У реальних промислових конструкціях регулятори, які використовують енергію регульованого

середовища, з певними обмеженнями, можуть реалізовувати пропорційний та інтегральний закони регулювання. Варто зазначити, що реалізація інших законів може бути обмежена.

Далі будуть наведені приклади регуляторів непрямої дії і регуляторів, які працюють без стороннього джерела енергії, які реалізують основні закони регулювання.

### 1.2.1 Позиційні (релейні) регулятори

Регулятори, які обмежені в кількості можливих положень для регулювання, називаються позиційними автоматичними регуляторами. За способом, яким вони впливають на об'єкт регулювання, їх можна віднести до регуляторів з обмеженим набором положень, які можуть бути застосовані переважно у вигляді дво- або трипозиційних регуляторів. Для них існують наступні закони регулювання:

$$\varphi = \varphi \operatorname{sign}(\mu + \Delta) \text{ при } d\mu / dt > 0, \quad (1.1)$$

$$\varphi = \varphi \operatorname{sign}(\mu - \Delta) \text{ при } d\mu / dt < 0, \quad (1.2)$$

де  $\Delta$  – нечутливість регулятора;

$\operatorname{sign}$  – знак бінома в дужках.

Ця записка про закони означає, що коли регульований параметр збільшується з часом, регулюючий елемент активується, коли  $\mu = +\Delta$  і коли параметр зменшується, регулятор активується при  $\mu = -\Delta$ . На (рис. 1.5) показано графік закону регулювання для Пз-регулятора.

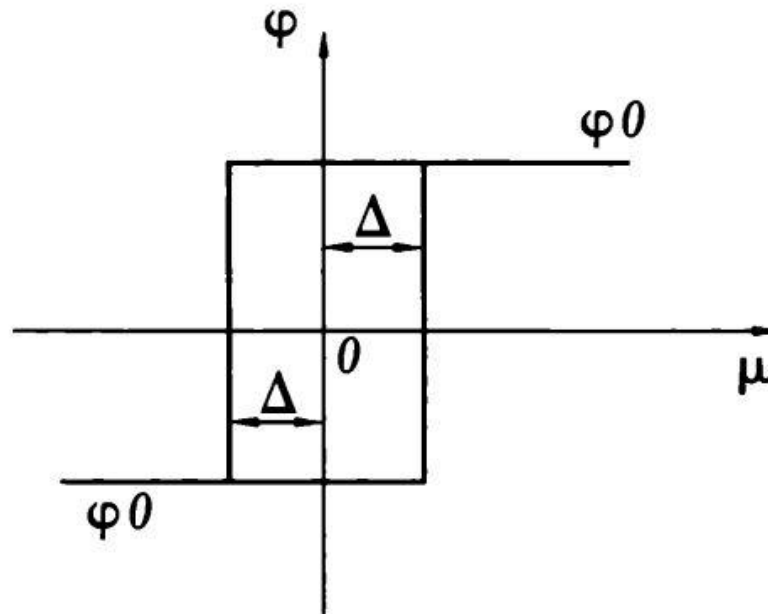


Рисунок 1.5 – Графік закону регулювання для ПЗ-регулятора

### 1.2.2 Пропорційні (статичні) регулятори

Пропорційні або статичні автоматичні регулятори реагують на відхилення регульованої величини від заданого значення шляхом переміщення регульовального елемента в пропорції до величини цього відхилення. Вони відносяться до категорії безперервних регуляторів з урахуванням їх впливу на об'єкт регулювання. За раніше використовуваними позначеннями для таких регуляторів можна записати наступне:

$$\varphi = K_p \cdot \mu, \quad (1.3)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт передачі (посилення) регулятора.

У правій частині рівняння, знак мінус вказує на те, що при від'ємному відхиленні регульованого параметра регульовальний вплив є позитивним.

$$\frac{d\varphi}{dt} = K_p \cdot \left(\frac{d\mu}{dt}\right). \quad (1.4)$$

Це означає, що при  $\text{const} = \mu$ , яке є постійним відхиленням, похідна  $\varphi$  щодо  $t$  дорівнює нулю ( $d\varphi / dt = 0$ ). Отже, пропорційний регулятор не в змозі повністю усунути помилку регулювання. На (рис. 1.6) графік закону регулювання для П-регулятора.

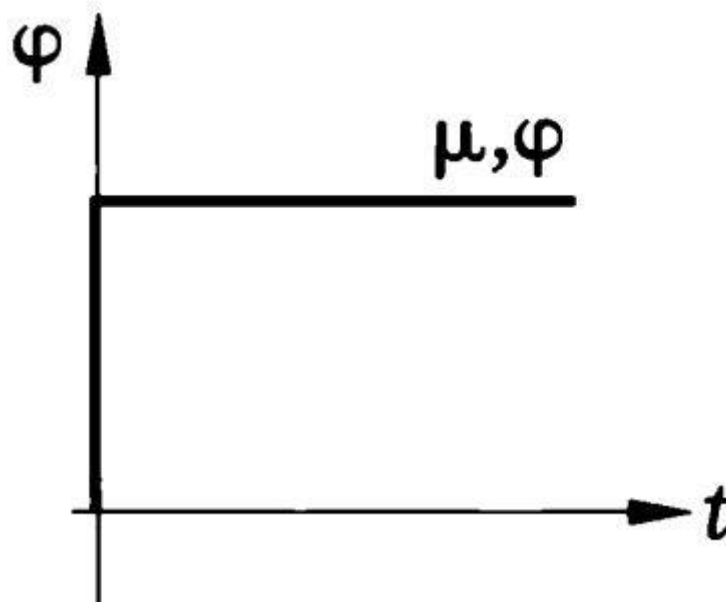


Рисунок 1.6 – Графік закону регулювання для П-регулятора

Коефіцієнт передачі (посилення) – це єдиний налаштовуваний (розраховуваний) параметр пропорційного регулятора. Він представляє собою величину, яка є оберненою до відносного виразу зони регулювання і визначає точність пропорційного регулятора. Пропорційні регулятори вирізняються швидкодією і можуть працювати з об'єктами, які мають або не мають самовирівнювання, завдяки наявності жорсткого зворотного зв'язку. Проте важливо враховувати, щоб навантаження на об'єкт не виходило за межі діапазону регулювання регулятора, і необхідно підтримувати точність параметра в межах зони регулювання. Недоліком пропорційних регуляторів є наявність статичної помилки, як вказано в примітці до формули (1.5).

Якість пропорційного регулювання в значній мірі залежить від коефіцієнта передачі (посилення)  $K_p$ . Цей коефіцієнт дозволяє отримати

стійке регулювання, і він визначається відношенням між властивостями регулятора і об'єкта:

- для об'єкта із самовирівнюванням:

$$K_p \cdot K_o > \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right), \quad (1.5)$$

де  $K_o$  – коефіцієнт передачі об'єкта;

$\eta$  – відносна величина зони регулювання;

- для об'єкта без самовирівнювання:

$$1,57 > K_p \left( \frac{\tau}{T_o} \right) > \frac{1}{\eta}. \quad (1.6)$$

### 1.2.3 Інтегральні регулятори

Регулятори, які можуть мати різні положення регулювального елемента при однаковому значенні регульованої величини, називаються інтегральними або астатичними регуляторами. Вони відносяться до регуляторів з нелінійним впливом на об'єкт відповідно до І-закону, де регулюючий вплив пропорційний інтегралу відхилення регульованої величини від часу.

Рівняння інтегрального регулятора має наступний вигляд:

$$\varphi = - 1/T_u \int \mu dt, \quad (1.7)$$

або

$$d\varphi/dt = (- 1/T_u) \cdot \mu. \quad (1.8)$$

Отже, швидкість руху регулювального органу безпосередньо пропорційна рівні відхилення регульованого параметра. Очевидно, що

регулюючий елемент не може зупинитися, поки значення  $\Delta\varphi$ . Єдиним необхідним і достатнім умовою для досягнення рівноваги регулюючого органу є відсутність цього відхилення:

$$\varphi = \text{const, якщо } \mu = 0 \text{ та } \frac{d\varphi}{dt} = 0. \quad (1.9)$$

Іншими словами, під час регулювання за інтегральним методом, регулятор спрямовується на уникнення статичної похибки (яка виникає через зону нечутливості). Коефіцієнт  $T_i$  вимірює час, необхідний для переміщення регулюючого органу від одного крайнього положення до іншого, за умови  $\mu = \text{max}$ . Інтегральні регулятори ефективні на системах з автоматичним самокоригуванням, оскільки в інших випадках САР стає нестійкою. Оскільки реакція регулятора повільна, система з автоматичним самокоригуванням має бути великою, коефіцієнт  $T$  - малим, перехідне запізнення невеликим, а зміна навантаження повинна бути плавною та рідкісною. Графік закону регулювання І-регулятора, (рис. 1.7).

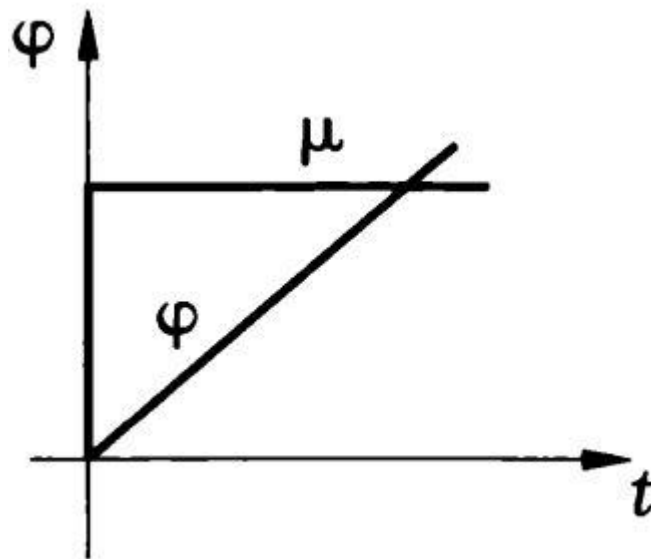


Рисунок 1.7 – Графік закону регулювання для І-регулятора

У відміню від раніше розглянутих статичних регуляторів, астатичні регулятори, незалежно від того, як змінюється навантаження на об'єкт, здатні, на визначеному діапазоні регулювання, управляти регульованою величиною так, щоб досягти бажаного значення без статичної похибки.

Характеристики І-регулятора прямої дії та рекомендації стосовно їх використання повністю відповідають поясненим на початку цього розділу. Основною відмінністю між ними та непрямими І-регуляторами є наявність значної зони нечутливості, яка обумовлена великими опорами тертя в рухомій частині. Ця проблема є загальною для регуляторів прямої дії, але вона особливо помітна у випадку І-регуляторів, де теоретично статична похибка виникати не повинна. Хоча можливим було б запропонувати І-регулятори прямої дії із використанням вантажного задавача або газової камери з редуктором замість інтегрального регулятора прямої дії, за наявною інформацією такі пристрої поки що не виробляються.

#### 1.2.4 Пропорціонально-інтегральні регулятори

Автоматичні регулятори, в яких вплив на регульовану величину обчислюється як сума пропорційного компоненту відхилення та інтегрального компоненту від неї, називаються пропорційно-інтегральними або ізодромними. Порівнюючи розглянуті вище пропорційні та інтегральні регулятори, стає очевидними їх переваги і недоліки. Перші мають високу динамічну реакцію, швидке регулювання та низьке запізнення, а також стійку роботу з багатьма об'єктами регулювання, але вони мають статичну похибку. Другі, навпаки, не мають статичної похибки, але мають гіршу динаміку, ніж пропорційні регулятори. Проте, І-регулятори здатні виправити недоліки обох підходів, забезпечуючи підтримання регульованого параметра на заданому рівні без залишкової похибки. Таким чином, вони широко використовуються в системах автоматичного регулювання. Вони поєднують в собі статичний

пропорційний компонент через тимчасово жорсткий зворотний зв'язок і інтегральний компонент через вбудований механізм ізодрому.

Пропорційно-інтегральні регулятори ідеально підходять для ситуацій, коли висуваються високі вимоги до точності регулювання. Їх можна використовувати для об'єктів різної потужності, незалежно від наявності або відсутності властивостей самовирівнювання об'єкта, а також за умови, що зміни навантаження є значними, але не різкими. Проте, у випадку швидких і частих змін навантаження, застосування пропорційно-інтегрального регулятора може призвести до значних динамічних помилок. Регулюючий П-закон або рівняння для ізодромного регулятора мають такий вигляд:

$$\varphi = -K_p(\mu + 1/T_i \int \mu dt), \quad (1.10)$$

або

$$\frac{d\varphi}{dt} = -K_p \left( \frac{d\mu}{dt} + \frac{\mu}{T_i} \right), \quad (1.11)$$

де  $T_i$  – це час ізодрому або час подвоєння.

Тобто період, за який регулювальний елемент з впливу інтегральної (астатичної, ізодромної) компоненти подвоює попереднє переміщення, отримане від пропорційної компоненти. Це показує, що швидкість регулювального впливу складається з двох складових: одна пропорційна швидкості зміни відхилення регульованого параметра, а інша - пропорційна самому відхиленню. Єдиною необхідною та достатньою умовою рівноваги регулювального органу (тобто  $d\varphi/dt = 0$ ) є відсутність відхилення регульованого параметра ( $e = 0$ ) та відсутність зміни цього відхилення з часом ( $d\mu/dt = 0$ ).

Характеристики регулятора подано на (рис. 1.8).

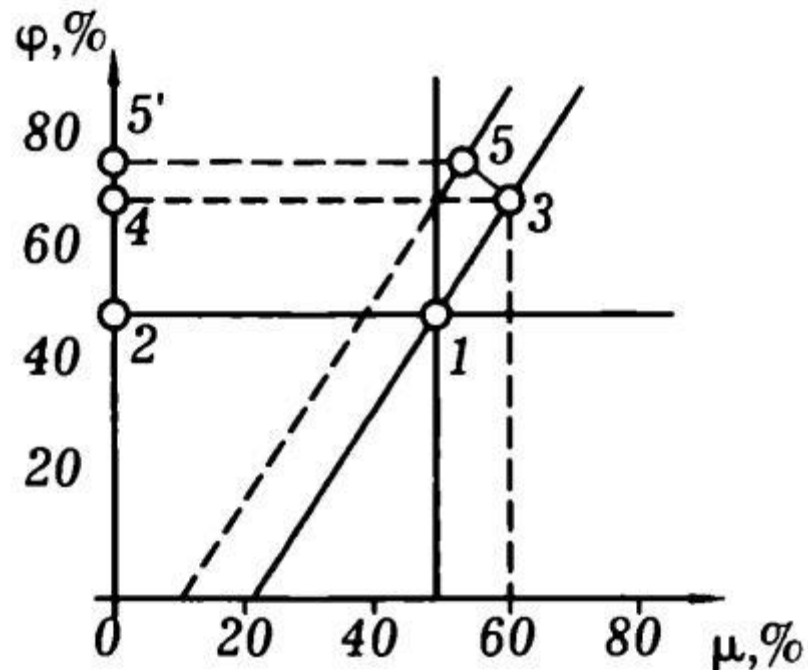


Рисунок 1.8 – Статична характеристика ПІ-регулятора

Припустимо, що регулятор налаштований так, що він забезпечує повний хід величини  $\varphi$  в діапазоні від 20% до 70% зони пропорційності. Рівноважний стан регулятора з системою відбувається в точці 1. Тепер введемо збурення  $\mu$ , яке, як було описано раніше, призведе до переміщення регулятора в точку 3 від пропорційної компоненти. Після цього розпочнеться процес, який поверне регульовану величину до заданого значення в точці 5. Дія регулятора припиниться в точці 5.

Крива розгону на (рис. 1.9).

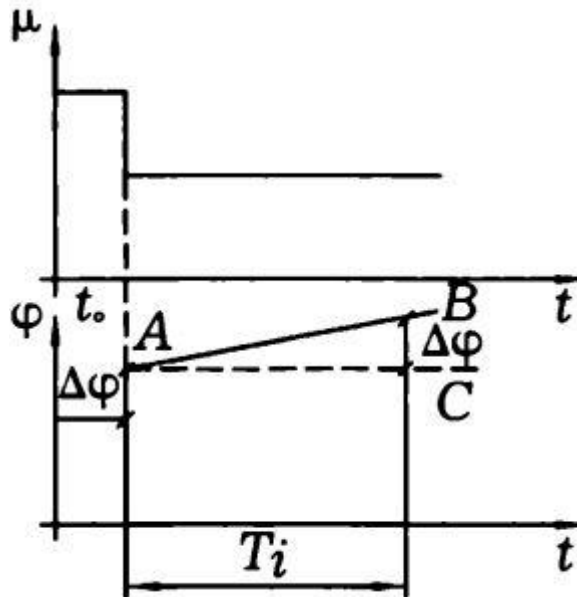


Рисунок 1.9 – Крива розгону на рисунку

На момент часу  $t_0$  помітно, як регулювальний орган швидко переміщується на величину  $\Delta \mu$  по впливом пропорційної компоненти. Потім він продовжує рухатися під дією іздромної компоненти з постійною швидкістю вздовж лінії АВ. Якщо в схемі регулятора клапан іздрому закритий ( $T_i = \infty$ ), то регулятор працює як пропорційний регулятор, і його характеристика представляє собою пунктирну лінію АС. Якщо клапан іздрому відкритий в більшій мірі, тобто коли час  $T_i$  менший, то регулятор рухається швидше, і характеристика лінії АВ стає крутішою.

На (рис. 1.10) зображено криві вимушених перехідних процесів за різного налаштування кр і  $T_i$ .

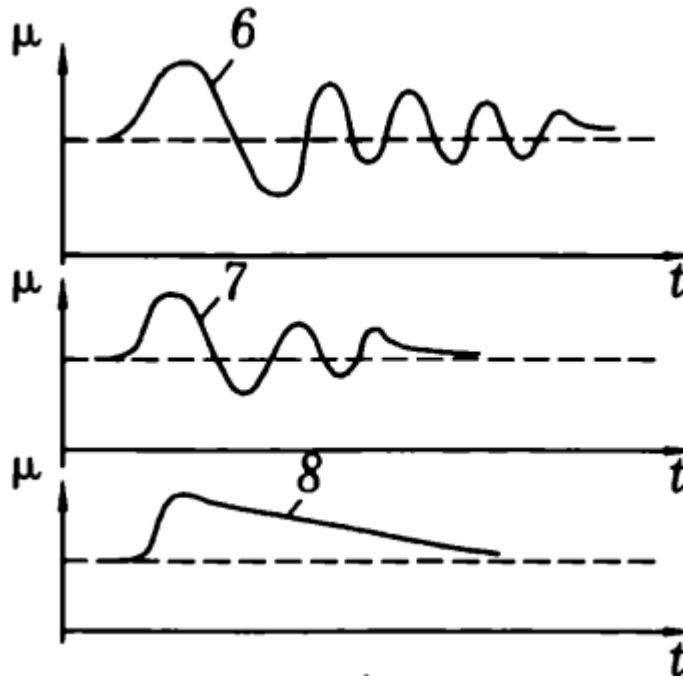


Рисунок 1.10 – Криві вимушених перехідних процесів

На практиці, при мінімальному значенні  $T_i$ , регулятор може вести себе подібно до двопозиційного, тобто виконувати два стани (вкл/викл) з обмеженим числом проміжних значень. При максимальному значенні  $T_i$ , він може функціонувати як пропорційний регулятор, що регулює величину пропорційно до величини відхилення. Сучасні регулятори налаштовуються в межах від 3 с до 1000 годин, щоб відповідати конкретним вимогам і умовам процесу.

### 1.2.5 Пропорційно-диференціальні регулятори

Автоматичні регулятори, де регулювальний вплив пропорційний як величині відхилення регульованої величини, так і швидкості її зміни, називаються пропорційно-диференціальними або регуляторами з випередженням (ПД-регуляторами). Це термінологія виникла через те, що

швидкість зміни відхилення є першою похідною за часом від самого відхилення. Таким чином, у назві цих регуляторів міститься слово диференціальний, оскільки вони враховують цю похідну, і слово випередження, так як вони враховують швидкість зміни перед самою зміною відхилення, ніби випереджуючи її. ПД-регулятори входять до класу регуляторів безперервної дії за їхнім впливом на об'єкт регулювання. З цього випливають формули (1.11) і (1.12):

$$\varphi = -K_p \left( \mu + T \partial \left( \frac{d\mu}{dt} \right) \right), \quad 1.12$$

або

$$\frac{d\varphi}{dt} = K_p \left( \frac{d\mu}{dt} + T \partial \left( \frac{d^2\mu}{dt^2} \right) \right). \quad 1.13$$

Отже, швидкість регулювального впливу (регулювального органу) залежить не лише від швидкості зміни відхилення, але також від прискорення цього відхилення. Якщо відхилення регульованого параметра тільки починає формуватися, тобто коли воно саме почалося і його швидкість дуже мала, прискорення, яке вже відчутне після прикладання збурення (сили), вже значне. Наприклад, миттєво (при  $t = 0$ ) після застосування сили  $F$  до нерухомої маси  $m$ , її прискорення дорівнює  $F/m$ , а швидкість  $(F/m) \cdot t$  і відстань  $(F/m) \cdot t^2/2$  дорівнюють нулю. У випадку виникнення від'ємного прискорення починається сповільнення (зменшення) регульованого параметра, і це негайно відобразиться в наведеному законі регулювання. Тому включення похідної компоненти в закон регулювання через використання блоку випередження дозволяє регулювальному органу, ніби передбачати зміну регульованого параметра та реагувати на неї вчасно. Такий регулятор працює з випередженням і особливо корисний, коли навантаження об'єктів

регулювання (зазвичай середньої ємності) змінюється часто і швидко, а запізнювання в системі велике.

У формулах (1.11) і (1.12),  $K_p$  представляє собою безрозмірний коефіцієнт передачі, який визначає зворотний статизм, а  $T_d$  – постійну диференціювання або час випередження, вимірюваний в одиницях часу. Обидві ці величини є параметрами налаштування регулятора. Припустимо, що регульований параметр  $\mu$  змінюється згідно з кривою, на (рис. 1.11).

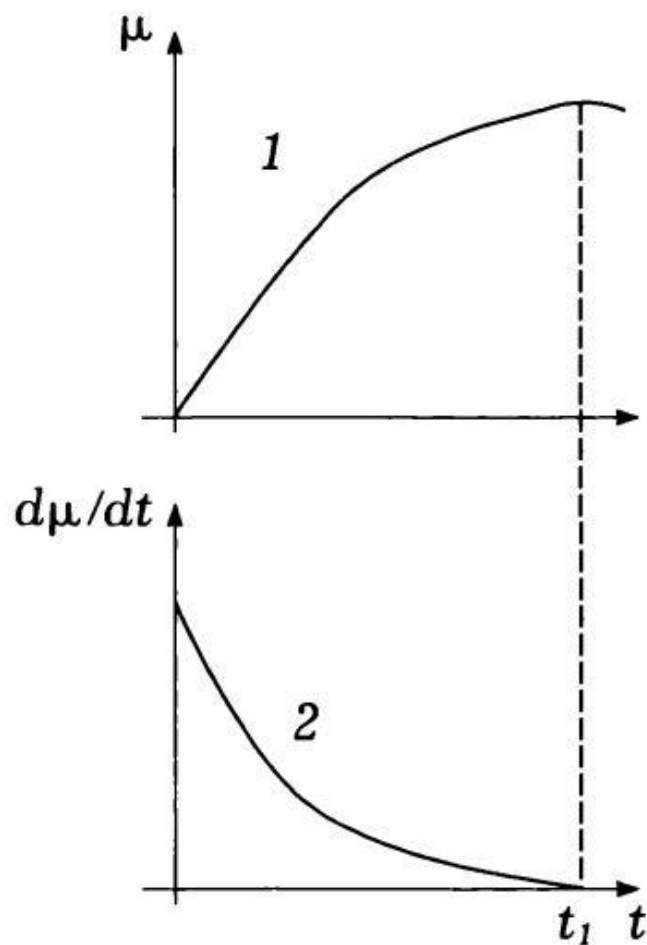


Рисунок 1.11 – Зміна параметру  $\mu$

Припустимо, що регульований параметр  $\mu$  змінюється згідно з кривою, показаною на (рис 1.11). В цьому випадку, його перша похідна за часом буде змінюватися від максимального значення в момент часу  $t_0$  до мінімального значення в момент часу  $t_1$  протягом часу  $T$ . Ефект випередження можна спостерігати на (рис. 1.12).

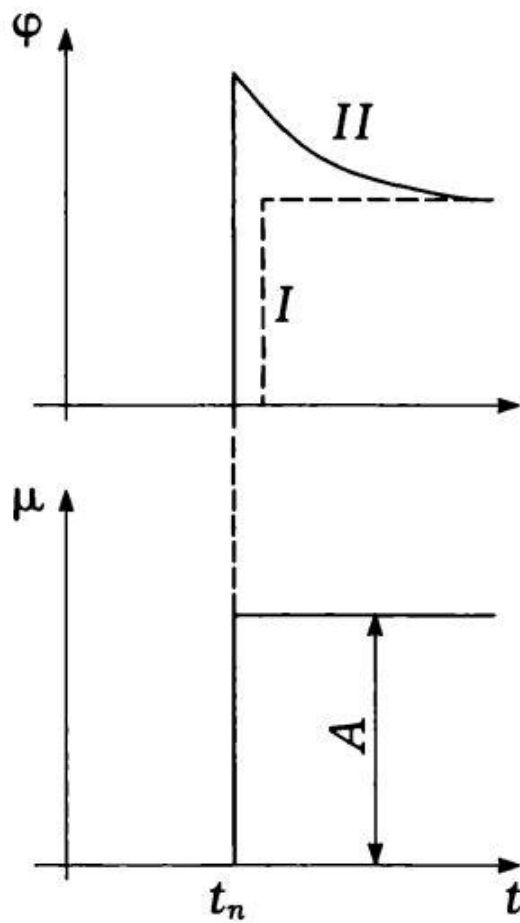


Рисунок 1.12 – Ефект випередження

Якщо  $\mu$  змінюється на величину  $A$ , то вихідний сигнал з блока випередження змінюватиметься за кривою  $P$ . У випадку, коли П-регулятор діяв би, його вплив був би представлений лінією 1. При постійній зміні  $\mu$ , починаючи з моменту часу  $t_0$ , регулювальний елемент П-регулятора буде працювати вздовж лінії 1 (рис. 1.13).

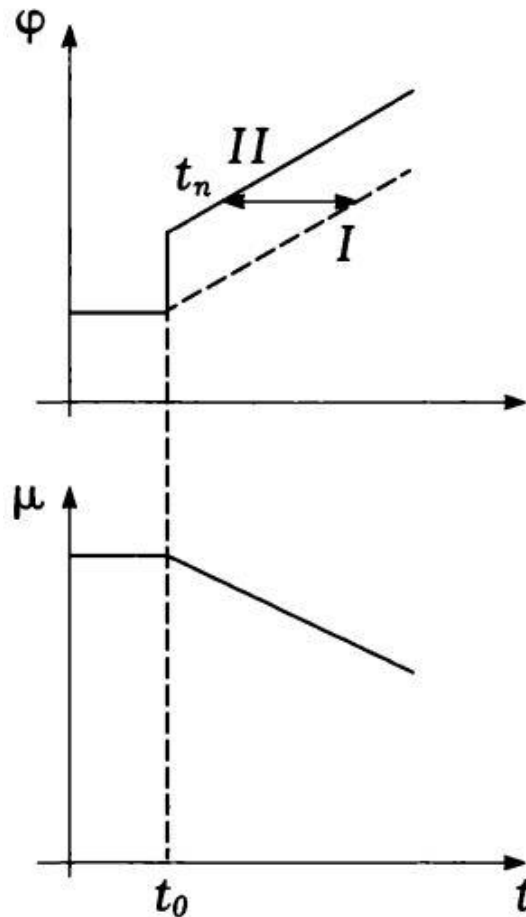


Рисунок 1.13 – Переміщення регульованого органу

А ПД-регулятор буде працювати вздовж лінії 2, ніби передбачаючи зміну регульованого параметра. Час випередження  $t_n$  визначає відносну величину додаткового сигналу за похідною (він пов'язаний із налаштувальним параметром) і зазвичай налаштовується у межах від 0,1 до 10 хвилин.

У ПД-регуляторах непрямої дії блоки випередження розташовані між регулювальним блоком і виконавчим механізмом. Вони змінюють вплив (командний сигнал) залежно від величини і знака похідної. Зі зменшенням абсолютного значення прискорення в дію вступає пропорційна компонента, яка стабілізує відхилення, але, на відміну від ПІ-регулятора, має статичну помилку.

Для керування процесами в об'єктах з дуже низьким інерційним часом (малоінерційні об'єкти), іноді використовують регулятори, де сигнал за похідною використовується для сповільнення руху регулюючого елемента. Це вид випередження відомий як зворотній, на відміну від раніше розглянутого прямого випередження. Подібно до ПД-регуляторів, які працюють без зовнішнього джерела енергії, на даний момент не існує доступних виробів. Однак, при потребі, можуть бути розроблені та виготовлені такі регулятори, що дозволить виконувати процеси регулювання в нестационарних об'єктах, які тривалий час перебувають у невідслужених умовах з обмеженими ресурсами енергії.

#### 1.2.6 Пропорційно-інтегрально - диференціальні регулятори

Автоматичні регулятори, у яких регулювальний вплив залежить від відхилення, інтегралу від відхилення та похідної регульованої величини, відомі як пропорційно-інтегрально-диференціальні або ПІД-регулятори. Інша поширена назва для них – ізодромні регулятори з випередженням. Закон регулювання, який використовується в ПІД-регуляторах, записується наступним чином:

$$\varphi = -K_p(\mu + 1/T_i \int \mu dt + T \partial(\mu/ dt)), \quad 1.14$$

або

$$d\varphi/dt = K_p(d\mu/dt + (1/T_i)\mu + T(\partial^2\mu/dt^2)). \quad 1.15$$

Рівновага регулювального елемента виникає без статичної помилки, коли регульована величина  $\mu$  дорівнює нулю. Це пов'язано з використанням інтеграла від відхилення, як ми раніше вже зрозуміли. В той же час, наявність похідної від відхилення в законі регулювання вказує на роботу регулятора з випередженням. Усі коефіцієнти, що згадувалися раніше, включаються в рівняння (1.13) і (1.14). ПІД-регулятори застосовуються для об'єктів будь-якої ємності, навіть з значним запізнюванням і при значних і різких змінах навантаження. Проте важко виправдати використання цих регуляторів для об'єктів, де співвідношення часу запізнення до часу налаштування ( $t/T_0$ ) більше 1. На (рис. 1.14) наведено графіки перехідних процесів ПІ-та ПІД-регуляторів.

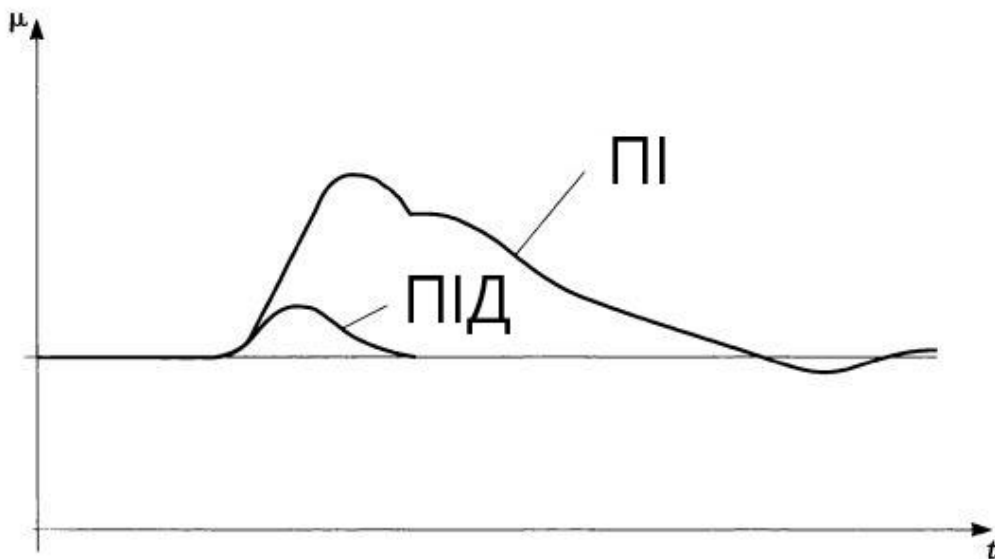


Рисунок 1.14 – Перехідні процеси ПІ-та ПІД-регуляторів

### 1.3 Адаптивні системи автоматичного регулювання

Адаптивні системи автоматичного керування (АСАК) можуть бути розглянуті як системи, які можуть адаптуватися, і включають в себе штучні компоненти. Основна мета АСАК полягає в тому, щоб замінити оператора людину під час виконання розумових завдань. Однією з основних функцій АСАК є прийняття рішень щодо покращення характеристик системи під час її нормальної роботи. Ця потреба може виникнути, наприклад, коли умови функціонування системи не допускають участі оператора. Перші дослідження в галузі самоприспосовувальних систем, що відносяться до класу самоналаштовувальних, виникли в середині 60-х років. В другій половині 70-х років АСАУ почали впроваджувати в різні галузі промисловості, і цьому сприяв швидкий розвиток обчислювальної техніки.

#### 1.3.1 Функціональні особливості та класифікації адаптивних САР

Системи керування, які мають незмінну структуру та параметри налаштування, визначені на етапі проектування, часто не можуть забезпечити ефективне або навіть стійке управління об'єктами. Це пояснюється наступними причинами: по-перше, математична модель системи автоматичного керування (САР) зазвичай не може бути точно визначена під час розробки системи; по-друге, САР завжди функціонує у випадковому середовищі, і реальні характеристики об'єкта можна врахувати лише статистично перед впровадженням. Ці два фактори призводять до ситуації, коли параметри системи змінюються випадковим чином під час нормальної роботи, і ступінь їх невизначеності може варіюватися.

Зміни параметрів САР в процесі її функціонування, які не підлягають контролю, називаються неконтрольованими. Існують різні причини неконтрольованості змін параметрів САР, такі як нестабільність джерел живлення, варіації температури і тиску навколишнього середовища, природне старіння і так далі.

Щодо контрольованих або бажаних змін, то це означає зміни в статичних і динамічних властивостях системи автоматичного керування, які регулюються контролером на основі поточної інформації про зовнішні та внутрішні умови роботи системи. Контрольовані параметри регулятора адаптивної САР називаються налаштованими.

Якщо діапазон зміни неконтрольованих параметрів є невеликим, їх розкид може бути зменшений завдяки зворотному зв'язку у системі під час її роботи. Однак, якщо цей діапазон або ступінь невизначеності параметрів значно великі, то задовільні технічні характеристики можуть бути досягнуті лише завдяки адаптації системи до змінних умов під час нормальної експлуатації. Прикладами таких систем є автоматична система управління надзвуковим літаком, чий характеристики суттєво змінюються залежно від швидкості, та система моделювання високорозмірного об'єкта за допомогою моделі низькорозмірного об'єкта.

Давайте надамо коротку класифікацію адаптивних систем, об'єднавши їх загальним терміном адаптивні САР. Отже, адаптивні САР можна поділити на наступні категорії які показані на (рис. 1.15).

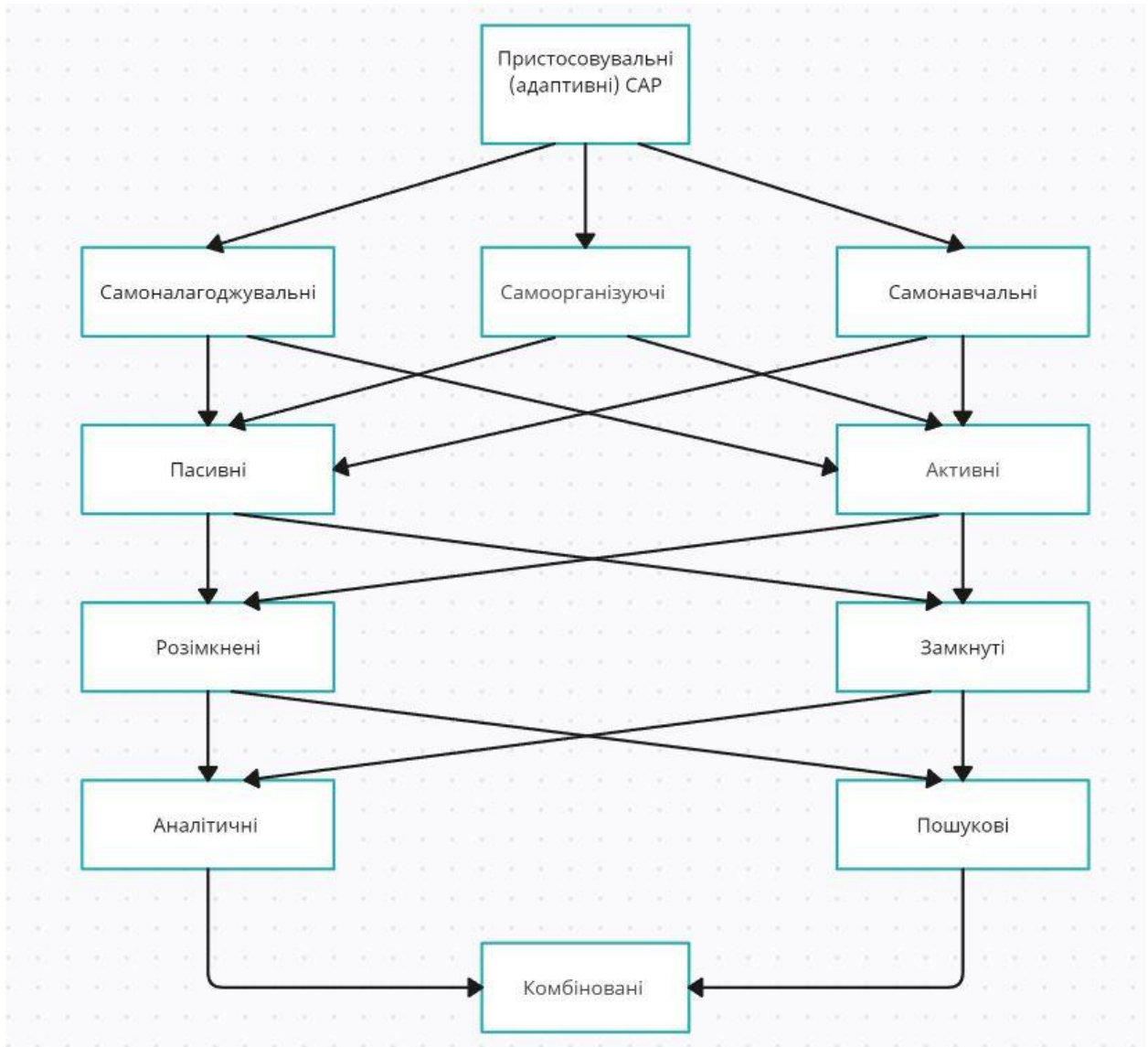


Рисунок 1.15 – Класифікація адаптивних САР

Адаптивні системи керування можуть бути класифіковані наступним чином. Самоналагоджувальні (або системи з параметричною адаптацією) ці системи використовують поточну інформацію про характеристики зовнішніх впливів або динамічні характеристики об'єкта для здійснення контрольованих змін параметрів регулятора. Це дозволяє покращити якість функціонування системи. Самоорганізовані, ці системи зменшують апіорну невизначеність, підвищуючи якість управління технологічним об'єктом. Це досягається шляхом використання інформації, отриманої під час безперервного

вимірювання доступних вхідних і вихідних сигналів. Самонавчаються ці системи генерують інформацію про невідомі характеристики процесу та навколишнього середовища під час навчання. Потім ця інформація використовується для прийняття рішень з метою істотного поліпшення якості роботи системи.

Ця класифікація допомагає розрізнити різні типи адаптивних систем керування залежно від їхніх методів адаптації та способів використання інформації для покращення продуктивності та якості функціонування.

Загальне визначення адаптивної системи керування: система керування вважається адаптивною, якщо вона володіє здатністю зменшувати початкову невизначеність і підвищувати ефективність управління, використовуючи інформацію, яку вона отримує в процесі нормальної експлуатації.

Адаптивні системи стають необхідними тоді, коли інформація про проєктовану систему є неповною. Це може означати, що не відомі параметри об'єкта і точні характеристики їх зміни з часом, або невідомі зовнішні впливи та вимоги до керування.

У адаптивних системах під час нормальної роботи можуть відбуватися зміни контрольованих (налаштовуваних) параметрів, структури системи, мети та критерію управління. Це дозволяє компенсувати зміну неконтрольованих параметрів в широкому діапазоні і підтримувати технічні характеристики системи на необхідному рівні.

#### Висновки за розділом

Можливих варіантів для автоматизації системи багато, як і систем до якої потрібно підібрати необхідний регулятор, що робить цей процес дуже гнучким та варіативним. Але в той же час складнішим та потребуючим багато сил та знань у цій галузі. Саме тому роботи на тему автоматизації були і будуть актуальні та необхідні.

## 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПІД РЕГУЛЯТОРІВ НА ОСНОВІ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ

ПІД-регулятори (пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори) широко використовуються в автоматичному управлінні для підтримки стабільності систем. Однак вони можуть стикатися з низкою проблем під час удосконалення та налаштування.

Перерегулювання (overshoot): це явище відбувається, коли система реагує занадто швидко і перевищує усталене значення перед досягненням стабільного стану. Це може спричинити коливання та нестабільність.

Затримка (delay): деякі процеси можуть мати інерцію або затримку, що може ускладнити ефективне керування ПІД-регулятором, особливо якщо не враховано цю затримку під час налаштування параметрів.

Нелінійність системи: якщо система має нелінійні характеристики, то застосування лінійного ПІД-регулятора може бути недостатнім для забезпечення ефективного управління в усіх умовах.

Невизначеність параметрів: невизначеність або зміна параметрів системи з плином часу може ускладнити точне налаштування ПІД-регулятора і вимагати постійного оновлення параметрів.

Чутливість до збурень: ПІД-регулятори можуть бути чутливими до різних впливів, що обурюють, як-от зміни в навколишньому середовищі, шуми та інші чинники, що може вплинути на якість регулювання.

Недостатня адаптивність: у деяких випадках стандартні ПІД-налаштування можуть бути недостатньо адаптивними до мінливих умов роботи системи.

Складність налаштування: точне налаштування ПІД-регулятора може бути складним завданням, особливо в разі складних систем або систем з нелінійною динамікою.

Інтеграція з нелінійними системами: деякі системи можуть мати складні, нелінійні динамічні характеристики, що може зажадати використання більш складних методів управління, ніж простий ПД-регулятор.

Усі ці проблеми підкреслюють необхідність ретельного налаштування й адаптації ПД-регуляторів для конкретних систем, а також можливе використання складніших методів керування в разі потреби.

Якість проектування ПД-регулятора залежить від врахування властивостей об'єкта автоматизації. Врахування властивостей об'єкта автоматизації це один зі шляхів удосконалення регуляторів врахування властивостей об'єктів автоматизації здійснюється за рахунок вибору відповідної математичної моделі об'єкта автоматизації. Розроблення досконаліших математичних моделей, об'єктів автоматизації, є одним зі шляхів удосконалення ПД-регулятора. Параметрична ідентифікація розглядається як спосіб побудови досконаліших математичних моделей лінійних об'єктів автоматизації, що дозволяють зробити більш якісний опис властивостей.

## 2.1 Математична модель лінійного об'єкту автоматизації та визначення параметрів ПД-регулятора

Математична модель лінійного об'єкта автоматизації може бути представлена в різній формі, однак для визначення параметрів під регулятора таку модель зручно подати у вигляді лінійного звичайного диференціального рівняння.

$$\begin{aligned}
 a_n \frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} \dots + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = \\
 b_m \frac{d^m u}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u}{dt^{m-1}} + b_1 \frac{du}{dt} + b_0 u,
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

$$x(t_0) = x_0^{(0)}; \frac{dx}{dt}(t_0) = x_0^{(1)}, \frac{d^{n-1}x}{dt^{n-1}}(t_0) = x_0^{(n-1)}, \quad (2.2)$$

де  $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m, n, m$  параметри диференціального рівняння математичної моделі;

$x = x(t)$  керований параметр об'єкта автоматизації;

$u = u(t)$  параметр керування об'єкта автоматизації;

$t_0$  заданий момент часу;

$x_0^{(0)}, x_0^{(1)} \dots, x_0^{(u-1)}$  задані значення керованого параметра та його

похідних у момент часу  $t_0$ .

Розглядаємо автоматичне регулювання заданого параметра  $x(t)$  у сталому режимі, що відповідає постійному керуванню:

$$x(t) = \bar{x}, u(t) = \bar{u}, \quad (2.3)$$

де  $x(t)$   $u(t)$  задане значення, що відповідає будь-якому сталому режиму ПД регулятор повинен забезпечувати виконання рівності:

$$x(t) \approx \bar{x}. \quad (2.5)$$

Протягом часу за наявності зовнішніх збурень, що порушують стан системи. Автоматичне регулювання об'єкта автоматизації за допомогою під регулятора реалізується шляхом керування:

$$u(t) = \bar{u} - k_p(x - \bar{x}) - k_I \int (x - \bar{x}) dt - k_0 \frac{d(x - \bar{x})}{dt}, \quad (2.6)$$

де  $k_p, k_I, k_0$  параметри під регулятора;

розглянемо відхилення параметра  $x(t)$  від величини  $\bar{x}$ :

$$y(t) = x(t) - \bar{x} \Rightarrow x(t) = y(t) + \bar{x}, \quad (2.7)$$

де  $y(t)$  відхилення параметрів.

З урахуванням введеного нового параметра (2.7) диференціальне рівняння (2.1) і початкові умови (2.2) приймуть вигляд (2.8):

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0(y + \bar{x}) = \\ & = b_m \left( k_p \frac{d^m y}{dt^m} + k_I \frac{d^{m-1} y}{dt^{m-1}} + k_0 \frac{d^{m+1} y}{dt} \right) + \\ & + b_{m-1} \left( k_p \frac{d^{m-1} y}{dt^{m-1}} + k_I \frac{d^{m-2} y}{dt^{m-2}} + k_0 \frac{d^m y}{dt^m} \right) + \\ & + b_1 \left( k_p \frac{dy}{dt} + k_I y + k_0 \frac{d^2 y}{dt^2} \right) + \\ & + b_0 \left( \bar{u} - k_p y - k_I \int y dt - k_0 \frac{dy}{dt} \right). \end{aligned} \quad (2.8)$$

Співвідношення (2.8) дає змогу визначити:

$$a_0 \bar{x} = b_0 \bar{u}. \quad (2.9)$$

З урахуванням співвідношення (2.9) рівняння (2.8) набуде вигляду (2.10):

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = \\ & = -b_m k_p \frac{d^{m+1} y}{dt^{m+1}} - (b_m k_p + b_{m-1} k_p) \frac{d^m y}{dt^m} - \\ & - (b_m k_I + b_{m-1} k_p + b_{m-2} k_0) \frac{d^{m-1} y}{dt^{m-1}} \dots - (b_1 k_I + b_0 k_p) y - \\ & - b_0 k_I \int y dt \end{aligned} \quad (2.10)$$

Остаточний вигляд рівняння (2.8) залежить від співвідношення між  $m$  і  $n$ . У будь-якому разі матимемо в результаті такий вигляд (2.11):

$$\overline{a}_n \frac{d^n y}{dt^n} + \overline{a}_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} \dots + \overline{a}_1 \frac{dy}{dt} + \overline{a}_0 y + \overline{a}_I \int y dt = 0, \quad (2.11)$$

де  $\overline{a}_0, \overline{a}_1, \dots, \overline{a}_n$ , отримано після приведення подібних доданків у (2.8) щоб привести (2.9) до більш зручного вигляду введемо нову змінну (2.12):

$$\frac{d\overline{y}}{dt} = y, \overline{y}(t_0) = 0. \quad (2.12)$$

З урахуванням нової змінної (2.12) рівняння (2.11) набуде вигляду (2.13):

$$\overline{a}_n \frac{d^{n+1} \overline{y}}{dt^{n+1}} + \overline{a}_{n-1} \frac{d^n \overline{y}}{dt^n} \dots + \overline{a}_1 \frac{d^2 \overline{y}}{dt^2} + \overline{a}_0 \frac{d\overline{y}}{dt} + \overline{a}_I \overline{y} = 0. \quad (2.13)$$

Далі для визначення параметрів ПД регулятора використовуємо умову стійкості характеристичного полінома, що відповідає диференціальному рівнянню (2.14):

$$f(t) = \overline{a}_n t^{n+1} + \overline{a}_{n-1} t^n + \dots \overline{a}_1 t^2 + \overline{a}_0 t + \overline{a}_t. \quad (2.14)$$

Зокрема можна використовувати критерії Рауса відповідно до якого представляємо поліном (2.13) у вигляді (2.14) отримаємо (2.15):

$$f(t) = A_0 t^{n+1} + B_0 t^n + \dots A_1 t^{n-2} + B_1 t^{n-3} + \dots. \quad (2.15)$$

Далі будемо схему Рауса (2.16):

$$\left. \begin{array}{cccc} A_0 & A_1 & A_2 & \\ B_0 & B_1 & B_2 & \\ C_0 & C_1 & C_2 & \dots \\ D_0 & D_1 & D_2 & \\ \dots & \dots & \dots & \end{array} \right\}, \quad (2.16)$$

$$\text{де } C_0 = \frac{B_0 A_1 - A_0 B_1}{B_0} \quad C_1 = \frac{B_0 A_2 - A_0 B_2}{B_0} ;$$

$$D_0 = \frac{C_0 B_1 - B_0 C_1}{C_0} \quad D_1 = \frac{C_0 B_2 - B_0 C_2}{C_0}.$$

Стійкість полінома (2.15) буде за умови що всі елементи першого стовбця схеми Рауса будуть не рівні нулю і одного знака:

$$A_0 > 0, B_0 > 0, C_0 > 0, D_0 > 0 \dots, \quad (2.17)$$

$$A_0 < 0, B_0 < 0, C_0 < 0, D_0 < 0 \dots \quad (2.18)$$

Використовуючи нерівності (2.17) або (2.18) з урахуванням виразів для  $A_0, B_0, C_0, D_0$  отримаємо умови для визначення параметрів під регулятора.

## 2.2 Вдосконалення ПД-регуляторів на основі більш деталізованого моделювання процесів та ідентифікації

Об'єкти автоматизації можуть бути доволі складними технічними системами та характеризуватися станом, стан яких визначають великим числом параметрів які змінюються з плином часу.

Вдосконалення ПД-регуляторів на основі більш деталізованого моделювання процесів та ідентифікації може покращити ефективність систем автоматичного керування в різних застосуваннях. Можливі кроки для вдосконалення ПД-регуляторів.

Деталізоване моделювання процесів. Розробити більш точну математичну модель об'єкта керування. Використовувати фізичні принципи та експериментальні дані для створення більш точної моделі. Враховуючи не лінійність та змінні параметри в моделі для більш точного відображення реального об'єкта.

Ідентифікація параметрів. Зробити ідентифікацію параметрів системи для отримання точних значень коефіцієнтів та параметрів моделі. Використовуючи адаптивні алгоритми ідентифікації для автоматичного оновлення параметрів в реальному часі.

Оптимізація ПД-регулятора. До Отриманої деталізованої моделі для оптимізації параметрів ПД-регулятора можливо. Застосувати методи оптимізації, такі як генетичні алгоритми або методи градієнтного спуску, для пошуку оптимальних значень коефіцієнтів ПД-регулятора.

Адаптивне керування Розглянемо використання адаптивних ПД-регуляторів, які можуть адаптуватися до змін у системі та забезпечувати стабільну роботу в різних умовах.

Симуляції та експерименти Проводити чисельні симуляції та експерименти для валідації вдосконалених ПД-регуляторів у реальних умовах. Використати отримані результати для подальших налаштувань та удосконалень.

Врахування нестандартних ситуацій розглядати можливість включення системи управління, яка може адаптуватися до несподіваних змін у середовищі або умовах роботи.

Тестування на реальному об'єкті провести тестування та налаштування вдосконалених ПД-регуляторів на реальному об'єкті для перевірки ефективності та надійності у реальних умовах.

Використання цих стратегій сприятиме покращенню якості та стабільності автоматичного керування за допомогою ПД-регуляторів.

Вдосконалення ПДД-регулятора може здійснюватися на основі більш деталізованого моделювання процесів. В об'єктах автоматизації. нехай стан об'єкта автоматизації характеризується параметрами стану функцій часу:

$$q_1 = q_1(t), q_2 = q_2(t), \dots q_u = q_u(t), \dots q_p = q_p(t), \quad (2.19)$$

де  $q_u = q_u(t)$  параметр стану об'єкта автоматизації з номером  $u=1,2,\dots,p$ .

У найзагальнішому вигляді математична модель процесу в об'єкті автоматизації з параметрами (2.19) може бути подана системою звичайних диференціальних рівнянь з початковими умовами, яке ми можемо записати в такому вигляді (2.20):

$$\left. \begin{aligned} \frac{dq_1}{dt} &= f_1(t_1, q_1, q_2, \dots, q_p; u(t)) \\ \frac{dq_2}{dt} &= f_2(t_1, q_1, q_2, \dots, q_p; u(t)) \\ &\dots \\ \frac{dq_u}{dt} &= f_u(t_1, q_1, q_2, \dots, q_p; u(t)) \\ &\dots \\ \frac{dq_p}{dt} &= f_p(t_1, q_1, q_2, \dots, q_p; u(t)) \end{aligned} \right\}, \quad (2.20)$$

$$q_1(t_0) = q_{1(0)}, q_2(t_0) = q_{2(0)}, \dots q_u(t_0) = q_{u(0)}, \dots q_p(t_0) = q_{p(0)}, \quad (2.21)$$

де  $f_k(\dots)$  задана швидкість зміни параметра

$q_u, u = 1, 2, \dots, p; t_0$  заданий момент часу, що приймається за початковий  $q_u$  задане значення параметра  $q_u, u=1, 2, \dots, p$  у початковий момент часу  $t = t_0$ .

Швидкість зміна параметра стану в загальному випадку залежить від часу, від поточних значень параметрів стану, а так само від параметра керування. Очевидно що керований параметр об'єкта автоматизації визначатиметься поточним станом тобто буде функцією параметрів стану (2.19):

$$x = x(q_1, q_2, \dots, q_p). \quad (2.22)$$

Нехай маємо деяке  $u = u(t)$  тоді шляхом розв'язання задачі (2.20) і (2.21) можемо отримати параметри стану (2.19), а ці параметри за допомогою функції (2.20) дадуть змогу отримати керований параметр. Таким чином (2.20) і (2.22) маємо задане в невірному вигляді відображення 2.23:

$$u(t) \rightarrow x(t), \quad (2.23)$$

З іншого боку математична модель об'єкта автоматизації у вигляді (2.1) і (2.2) насправді – це найбільш загальна форма визначення відображення (2.23) таким чином деталізована математична модель процесів (2.20) і (2.21) в об'єкті автоматизації разом з визначенням (2.22) керованого параметра – це неявна форма запису математичної моделі (2.1-2.2) в об'єктах автоматизації.

### 2.3 Ідентифікація лінійного об'єкта автоматизації методом найменших квадратів

Метод найменших квадратів (МНК) – це математичний метод, який використовується для знаходження параметрів моделі, мінімізуючи суму квадратів відхилень між спостережуваними і розрахованими значеннями. Цей метод широко застосовується в багатьох областях, включаючи статистику, оптимізацію та ідентифікацію параметрів систем управління.

МНК може бути застосований для вдосконалення ПД-регуляторів та моделей системи управління. Основні кроки методу найменших квадратів в контексті параметричної ідентифікації або оптимізації моделі виглядають наступним чином.

Визначення математичної моделі системи або процесу, яку треба вдосконалити.

Формулювання задачі оптимізації створити функцію відхилень між спостережуваними та розрахованими значеннями. Зазвичай це буде сума квадратів різниць.

Знаходження похідних обчислити часткові похідні функції відхилень по параметрах моделі. Це може вимагати деякого аналітичного або числового обчислення.

Вирішення системи рівнянь. знаходимо значення параметрів, які мінімізують функцію відхилень. Це може бути виконано, наприклад, за допомогою різних методів оптимізації, таких як градієнтний спуск або кінцеві елементи.

Оцінка параметрів. оцінюємо точність та стабільність отриманих параметрів моделі.

Валідація результатів перевіряємо отриману модель на відповідність експериментальним даним та проводимо валідацію для переконливості в точності моделі.

Метод найменших квадратів є потужним інструментом для оптимізації параметрів моделей, і його застосування може значно покращити якість та ефективність систем управління, включаючи ПД-регулятори.

Властивості об'єкта автоматизації є наслідком процесів, які в ньому відбуваються під час експлуатації. Властивості об'єктів автоматизації визначаються математичною моделлю (2.1) і (2.2) а процеси в об'єкті автоматизації – математичною моделлю (2.20) і (2.21) перехід. При цьому математична модель процесів (2.20) і (2.21) зі співвідношенням (2.22) по суті це еквівалентна форма запису моделі (2.1) і (2.2).

У більшості випадків неможливо отримати точне співвідношення, що зв'язують математичні моделі (2.1) (2.2) і (2.20) (2.22), і найзагальнішим підходом отримання таких співвідношень є параметрична ідентифікація. Математична модель (2.20, 2.21, 2.22) дає змогу для заданого керування  $u(t)$

побудувати залежність  $x = x(t)$  за допомогою чисельних методів так, що в результаті матимемо дані про  $u(t)$  і  $x(t)$  у задані моменти часу (2.23) і (2.24):

$$t_u = t_0 + (k - 1)\Delta t, k = 1, 2, \dots, m, \quad (2.24)$$

$$x_u = x(t_u), u_k = u(t_k), k = 1, 2, \dots, m, \quad (2.25)$$

де  $\Delta t$  крок дискретизації (чисельного розв'язання задачі);

$x_u, u_k$  числові значення керованого параметра;

$t = t_k$  керування в момент часу.

Ідентифікація полягає в тому, щоб для відомих значень (2.23) і (2.24) визначити коефіцієнти диференціального рівняння (2.1) зазвичай порядок диференціального рівняння (2.1) може бути оцінено теоретично, тому розглядатимемо далі окремий випадок  $n=1$ , що відповідає найпростішій схематизації об'єкта автоматизації. для  $n=1$  диференціальне рівняння (2.1) записати так (2.26):

$$\frac{dx}{dt} + a_0 x = b_0 u(t), \quad (2.26)$$

Оскільки маємо тільки дискретні значення, (2.21) (2.22) то скористаємося співвідношенням (2.27):

$$\frac{dx}{dt} = \frac{x_{u+1} - x_u}{\Delta t}. \quad (2.27)$$

З урахуванням співвідношення (2.27) рівняння диференціальне (2.26) набуде вигляду 2.28:

$$\frac{x_{u+1} - x_u}{\Delta t} + a_0 x_u = b_0 u_u, u = 1, 2 \dots m - 1. \quad (2.28)$$

Наведемо подібний доданок у (2.28) (2.29):

$$x_{u+1} + (a_0 \Delta t - 1)x_u - \Delta t b_0 u_u = 0, u = 1, 2 \dots m - 1. \quad (2.29)$$

Введемо позначення (2.30):

$$\alpha = (a_0 \Delta t - 1), \beta = \Delta t b_0 \Delta t. \quad (2.30)$$

Тоді з урахуванням позначень (2.30) співвідношення (2.29) набуде вигляду (2.31):

$$x_{u+1} + \alpha x_u + \beta u_u = 0, u = 1, 2 \dots m - 1. \quad (2.31)$$

Величини (2.20) розглядає як проміжні невідомі, що дадуть змогу визначити шукані величини  $a_0$  і  $b_0$  (2.32):

$$a_0 = \frac{\alpha + 1}{\Delta t}, b_0 = \frac{\beta}{\Delta t}. \quad (2.32)$$

Щоб знайти альфа і бета скористаємося методом найменших квадратів. для цього розглянемо нев'язку (2.33):

$$S = \sum_{n=1}^{m-1} (x_{u+1} + \alpha x_u + \beta u_u)^2. \quad (2.33)$$

Метод найменших квадратів і нев'язка (2.33) приводить до системи рівнянь (2.34):

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha} = 0, \frac{\partial S}{\partial \beta} = 0. \quad (2.34)$$

Підставимо нев'язку (2.33 у 2.34) отримаємо (2.35):

$$\sum_{n=1}^{m-1} (x_{u+1} + \alpha x_u + \beta u_u) x_u = 0, \quad (2.35)$$

$$\sum_{n=1}^{m-1} (x_{u+1} + \alpha x_u + \beta u_u) u_u = 0.$$

Перетворимо далі рівняння (2.36):

$$\sum_{n=1}^{m-1} x_{u+1} x_u + \alpha \sum_{n=1}^{m-1} x_u^2 + \beta \sum_{n=1}^{m-1} x_u u_u = 0, \quad (2.36)$$

$$\sum_{n=1}^{m-1} x_{u+1} x_u + \alpha \sum_{n=1}^{m-1} x_u u_u + \beta \sum_{n=1}^{m-1} u_u^2 = 0.$$

У результаті маємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення величин альфа і бета (2.37):

$$\left( \sum_{n=1}^{m-1} x_u^2 \right) \alpha + \left( \sum_{n=1}^{m-1} x_u u_u \right) \beta = - \sum_{n=1}^{m-1} x_{u+1} x_u, \quad (2.37)$$

$$\left( \sum_{n=1}^{m-1} x_u u_u \right) \alpha + \left( \sum_{n=1}^{m-1} u_u^2 \right) \beta = - \sum_{n=1}^{m-1} x_{u+1} u_u.$$

Таким чином маємо можливість визначити параметри математичної моделі об'єкта автоматизації (2.23).

## Висновки за розділом

Вдосконалення ПД-регуляторів на основі більш деталізованого моделювання процесів та ідентифікації може покращити ефективність систем автоматичного керування в різних застосуваннях.

Метод найменших квадратів є потужним інструментом для оптимізації параметрів моделей, і його застосування може значно покращити якість та ефективність систем управління, включаючи ПД-регулятори.

Маючи формули для розрахунків можна перейти до моделювання цих процесів. Комп'ютерне моделювання за допомогою середовища scilab дає можливість подивитись на результат проведеної роботи. За допомогою графічних зображень можна побачити як буде поводитись регулятор і які значення може видавати а головне ми маємо можливість подивитися на їх роботу в порівнянні.

### 3 ПРОЕКТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА РІВНЯ РІДИНИ В ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОСУДИНАХ

Циліндричні ємкості заповнені різними рідинами широко використовуються в різних технічних системах. Наприклад у теплових та ядерних енергоустановках. У процесі експлуатації рівень рідини в таких циліндричних місткостях повинен підтримуватися біля заданого значення з досить високою точністю що вимагає відповідних систем автоматичної стабілізації в таких системах зазвичай використовують ПД регулятори.

#### 3.1 Математична модель зміни рівня рідини в циліндричних корпусах

Циліндричні корпуси заповнені рідиною застосовують залежно від призначення з вертикальною або горизонтальною віссю.

Вертикальні ємності мають ось циліндра, яка перпендикулярна до горизонтальної площини. Утворення циліндра відбувається паралельно лініям схилу, тобто в напрямку сили тяжіння. Горизонтальні ємності мають вісь циліндра паралельну площині горизонту. Всі ємності поділяються на наземні (встановлені вище рівня землі) та підземні (монтаж нижче рівня землі). Залежно від конструкції днища можна придбати ємність із плоским денцем (максимальний об'єм води 10 м<sup>3</sup>), конічним днищем (місткість води від 10 м<sup>3</sup> і більше, до 100 м<sup>3</sup>). Залежно від конструктивних особливостей пропонуються одностінні ємності (РГС) і двостінні резервуари (РГД). Також варіанти включають однокамерні резервуари та багатокамерні (з внутрішніми герметичними перегородками). Горизонтальні резервуари для води об'ємом 5 – 100 м<sup>3</sup> використовуються не лише для зберігання води, але і як баки для зберігання пального, мастила, ПММ, темних і світлих нафтопродуктів, нафти та інших рідин на складах із кількох корпусів. Вертикальні резервуари для води можна використовувати для зберігання питної води, рослинної олії,

відпрацьованої технічної олії, технічної води, а також як горизонтальні пожежні резервуари запасу води.

### 3.1.1 Вертикальний циліндр

На початку розглянемо математичну модель зміни рівня рідини в циліндричному корпусі з вертикальною віссю (рис. 3.1).

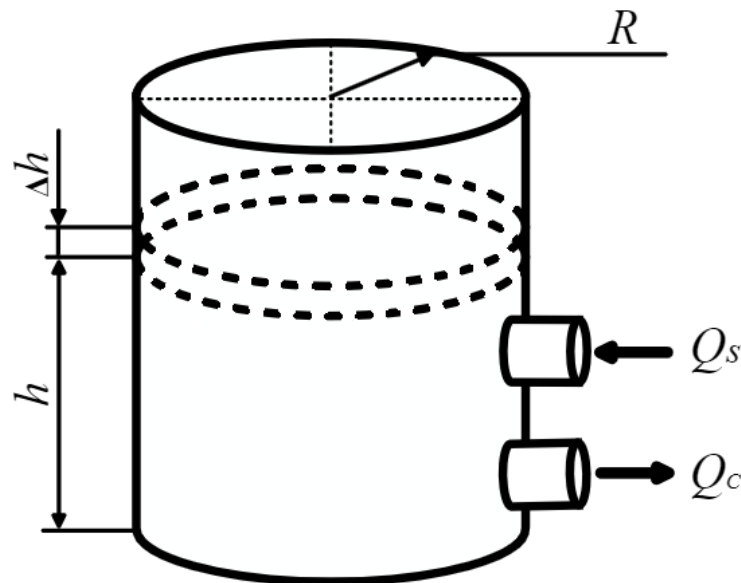


Рисунок 3.1 – Модель зміни рівня рідини в циліндричному корпусі з вертикальною віссю

Нехай за час  $\Delta t$  висота рівня рідини змінилася на величину дельта  $h$  така зміна зумовлена розходом подачі рідини та витратою її виходу з корпусу посудини. з урахуванням цього маємо співвідношення (3.1):

$$\pi R^2 \Delta h = Q_s \Delta t - Q_c \Delta t. \quad (3.1)$$

Розділимо обидві частини співвідношення (3.1) на величину  $\Delta t$  і від  $\Delta t$  до нуля подивимося на диференціальне рівняння (3.2):

$$\pi R^2 \frac{dh}{dt} = Q_s - Q_c(t). \quad (3.2)$$

Диференціальне рівняння (3.2) необхідно розглядати з урахуванням початкової умови (3.3):

$$h(0) = h_0, \quad (3.3)$$

де  $h_0$  задане значення висоти рівня рідини в корпусі.

Таким чином маємо математичну модель зміни рівня рідини у вертикальній циліндричній посудині у вигляді (3.2) і (3.3). Якщо розглядати рівень рідини як об'єкт керування, то замість величини  $h$  зручно використовувати величину (3.4):

$$x(t) = h(t) - h_0, \quad (3.4)$$

де  $x(t)$  це відхилення рівня рідини від початкового значення

У якості керування зручно розглядати величину (3.5):

$$u(t) = Q_s - Q_c. \quad (3.5)$$

З урахуванням нової змінної (3.4) і керування (3.5) диференціальне рівняння (3.2) і початкова умова (3.3) набудуть вигляду (3.6) та (3.7):

$$\pi R^2 \frac{dx}{dt} = u(t), \quad (3.6)$$

$$x(0) = 0. \quad (3.7)$$

У вигляді (3.6) і (3.7) маємо математичну модель рівня рідини у вертикальному циліндрі як об'єкта автоматизації модель (3.6) і (3.7) є лінійною

### 3.1.2 Горизонтальний циліндр

Розглянемо модель рівня рідини в горизонтальному циліндрі (рис 3.2).

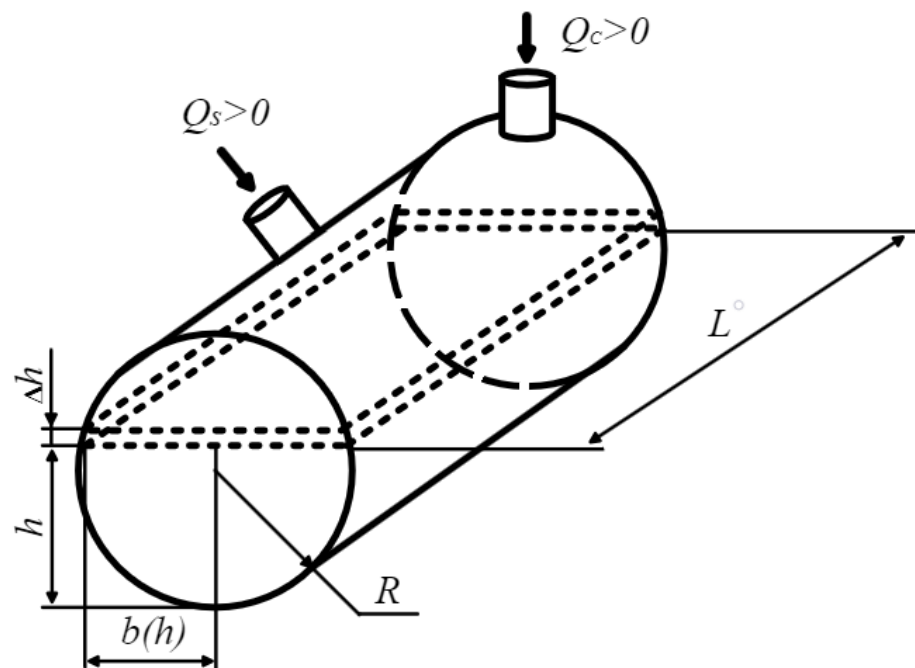


Рисунок 3.2 – Модель зміни рівня рідини в горизонтальному циліндрі

Розглянемо проміжок часу  $\Delta t$ , зміна висоти рівня  $h$  за час  $\Delta t$  зумовлена розходом подачі  $Q_s$  та розходом  $Q_c$  виходу рідини (3.8):

$$2Lb(h)\Delta h = Q_s\Delta t - Q_c\Delta t, \quad (3.8)$$

де  $L$  це довжина;

$b(h)$  половина ширини дзеркала рідини.

Залежність ширини дзеркала рідини визначено так як на (рис.3.3).

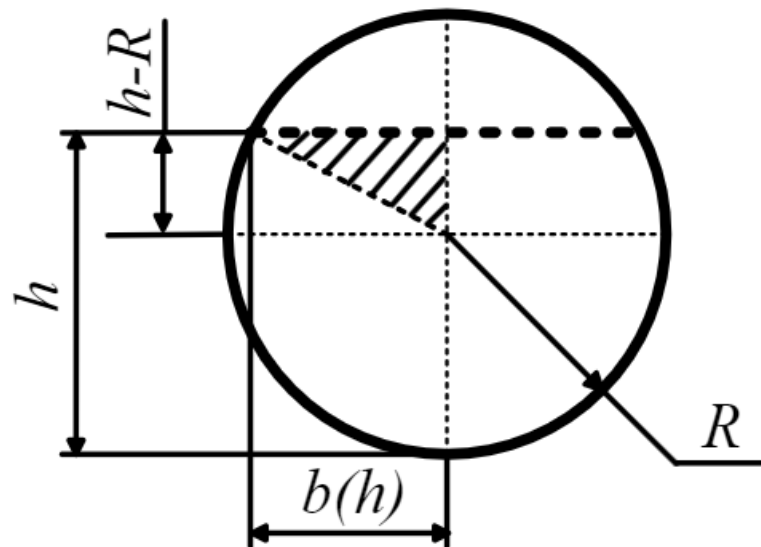


Рисунок 3.3 – Залежність ширини дзеркала рідини в горизонтальному циліндрі

$$b^2(h) = R^2 - (h - R)^2. \quad (3.9)$$

Зі співвідношенням (3.9) після приведення подібних доданків отримуємо (3.10):

$$b(h) = \sqrt{h(2R - h)}. \quad (3.10)$$

Розділимо співвідношення (3.8) на  $\Delta t$  і при  $\Delta t < 0$  з урахуванням виразу (3.10) отримаємо диференціальне рівняння (3.11):

$$2L \sqrt{h(2R - h)} \cdot \frac{dh}{dt} = Q_{\delta} - Q_c, \quad (3.11)$$

Диференціальне рівняння (3.11) потрібно розглядати з урахуванням початкової умови (3.2), тож маємо математичну модель зміни рівня рідини в горизонтальному циліндричному корпусі в такому вигляді (3.12):

$$2L \sqrt{h(2R - h)} \cdot \frac{dh}{dt} = Q_{\delta} - Q_c; h(0) = 0, \quad (3.12)$$

Слід звернути увагу, що можлива лінеаризація рівняння (3.12) на основі наближеного співвідношення (3.13):

$$h \approx h_0. \quad (3.13)$$

З урахуванням (3.13) замість нелінійного рівняння можна розглядати лінеаризоване рівняння (3.14):

$$2L \sqrt{h(2R - h)} \cdot \frac{dh}{dt} = Q_{\delta} - Q_c; h(0) = 0. \quad (3.14)$$

Якщо розглядати рівень рідини як об'єкт автоматизації, то замість  $h(t)$  використовувати нову змінну  $x(t)$  у вигляді (3.4) а керування розглядати у вигляді (3.5) тоді нелінійна задача прийме вигляд (3.12):

$$2L\sqrt{(x + h_0)(2R - x - h_0)} \frac{dx}{dt} = u(t) ; x(0) = 0. \quad (3.15)$$

Можлива лінеаризація задачі (3.15) на основі близького співвідношення (3.16):

$$x \approx 0. \quad (3.16)$$

З урахуванням співвідношення (3.16) замість нелінійної задачі можемо розглядати лінеаризовану задачу (3.17):

$$2L\sqrt{h_0(2R - h_0)} \frac{dx}{dt} = u(t) ; x(0) = 0, \quad (3.17)$$

Слід зазначити, що математичні моделі (3.6, 3.7) і (3.15, 3.16, 3.17) зміну рівня рідини в циліндричних корпусах можна представити в узагальненому вигляді (3.18):

$$A(x) \frac{dx}{dt} = u(t) ; x(\sigma) = 0. \quad (3.18)$$

де  $a(x)$  площа дзеркала рідини в корпусі посудини.

Зрозуміло, що площа дзеркала рідини  $A(x)$  у корпусі посудини залежить від його форми (3.19):

$$A(x) = \begin{cases} \pi R^2 \\ u(x + h_0)(2R - xh_0) \end{cases} \quad (3.19)$$

де  $\pi R^2$  – вертикальний циліндр;

$u(x + h_0)(2R - xh_0)$  – горизонтальний циліндр;

Так само можна використовувати лінерезоване співвідношення (3.20):

$$A(x) = \begin{cases} \pi R^2 \\ 2L\sqrt{h_0(2R - h_0)} \end{cases} \quad (3.20)$$

де  $\pi R^2$  – вертикальний циліндр;

$2L\sqrt{h_0(2R - h_0)}$  – горизонтальний циліндр;

Таким чином маємо математичну модель зміни рівня рідини в циліндричних посудинах у вигляді(3.18),(3.19).

### 3.2 Комп'ютерна модель рівня рідини в циліндричних корпусах

Розглянемо практичний приклад технологічних процесів, пов'язаних із рухом рідин та газів у пристроях і трубопроводах, таких як системи водопідготовки, водоочищення, нафто- та газопереробних виробництв і т. д. Фізичне керування технологічним процесом відбувається шляхом зміни об'єму газоподібного або рідкого середовища. Наприклад, рівень рідини в апараті (будь то ємність або колона) регулюється за допомогою зміни витрати рідини в вхідному або вихідному трубопроводі. Тиск в апараті змінюється внаслідок регулювання витрати газу, що подається або відводиться з апарату. Температура потоку після технологічної печі контролюється зміною витрати палива до пальників. Температура середовища після парового підігрівача регулюється зміною витрати пари в підігрівачі, а температура середовища після теплообмінника змінюється через регулювання витрати через теплообмінник і байпасну лінію.

У прикладі є ємність, до якої подається рідина через одну трубу і відводиться через іншу. На ємності встановлений рівнемір, а на відводі встановлений регулювальний клапан. Рівнемір і клапан з'єднані з програмованим логічним контролером (ПЛК), в якому реалізовано регулятор. Завдання полягає в тому, щоб підтримувати рівень у ємності на заданому значенні.

#### 3.2.1 Циліндричний корпус вертикального типу

За теорією систем автоматичного регулювання об'єктом регулювання не буде сама ємність чи показання рівнеміра, а кількість рідини в ємності. Кількість рідини в ємності є функцією часу і визначається різницею між надходженням та відведенням рідини. Якщо надходить більше, ніж відводиться, то кількість рідини в ємності зростає, і навпаки. Рівень рідини в ємності визначається кількістю рідини, і залежно від форми ємності ця функція може бути лінійною (у випадку вертикального циліндра) або

нелінійною (у випадку горизонтального циліндра чи складнішої форми). Керуючий вплив на об'єкт регулювання полягає не в сигналі виходу контролера чи положенні клапана, а в зміні витрати відводженої рідини в трубопроводі.

Вихідний струм контролера, його перетворення в положення плунжера клапана за допомогою струмового сигналу та зміна витрати від положення плунжера – це всі вузли передачі керуючого впливу, що описуються як функції між вхідними та вихідними змінними з врахуванням певного запізнювання. Наприклад, перетворення інженерних одиниць у струмовий сигнал може бути лінійною ланкою, тоді як зміна витрати від положення плунжера клапана описується видатковою характеристикою, зазвичай будучи нелінійною ланкою.

Рівнемір є ланкою, що перетворює рівень на струмовий вхідний сигнал, виконує функцію перетворення між вхідною та вихідною змінною і вносить деяке запізнювання. Програмований логічний контролер (ПЛК) представляє собою складний пристрій, який реалізує як мінімум функції масштабування змінних, так і розрахункові функції. У теорії систем автоматичного регулювання (САР), ПЛК також буде представлений набором ланок, і лише одна з цих ланок буде виконувати функцію ПД-регулятора.

Ще одним прикладом можуть бути системи нагріву, де об'єктом регулювання є температура як функція різниці тепла, що підводиться та відводиться. Керуючий вплив формується через подачу теплоносія або паливного газу в піч, зміну витрати середовища в змішувачах і т. д.

Ще одним прикладом може бути система контролю температури в приміщенні: об'єкт регулювання – температура в кімнаті, керування термістором, потужність нагрівача, відчинення електроприводом клаптя, що регулює подачу тепла. Це всі ланки, що визначають керуючий вплив та збурювальні впливи, такі як зміна тепловіддачі через стіни, вікна та відчинені двері.

У нашому прикладі всі фізичні компоненти, які використовуються для вирішення завдання підтримання рівня в ємності та їх взаємозв'язки, складають контур регулювання. При проектуванні проєктний інженер управляє саме фізичними пристроями, такими як рівнемір, іскробезпечний бар'єр, вхідний модуль, програмний блок у ПЛК, вихідний модуль, регулювальний клапан. Проте важливо розуміти, що ці контури регулювання не мають прямого відображення на контурах теорії систем автоматичного регулювання (САУ). Для розуміння випадкової зміни рівня води в корпусі була побудована схема на (рис 3.4).

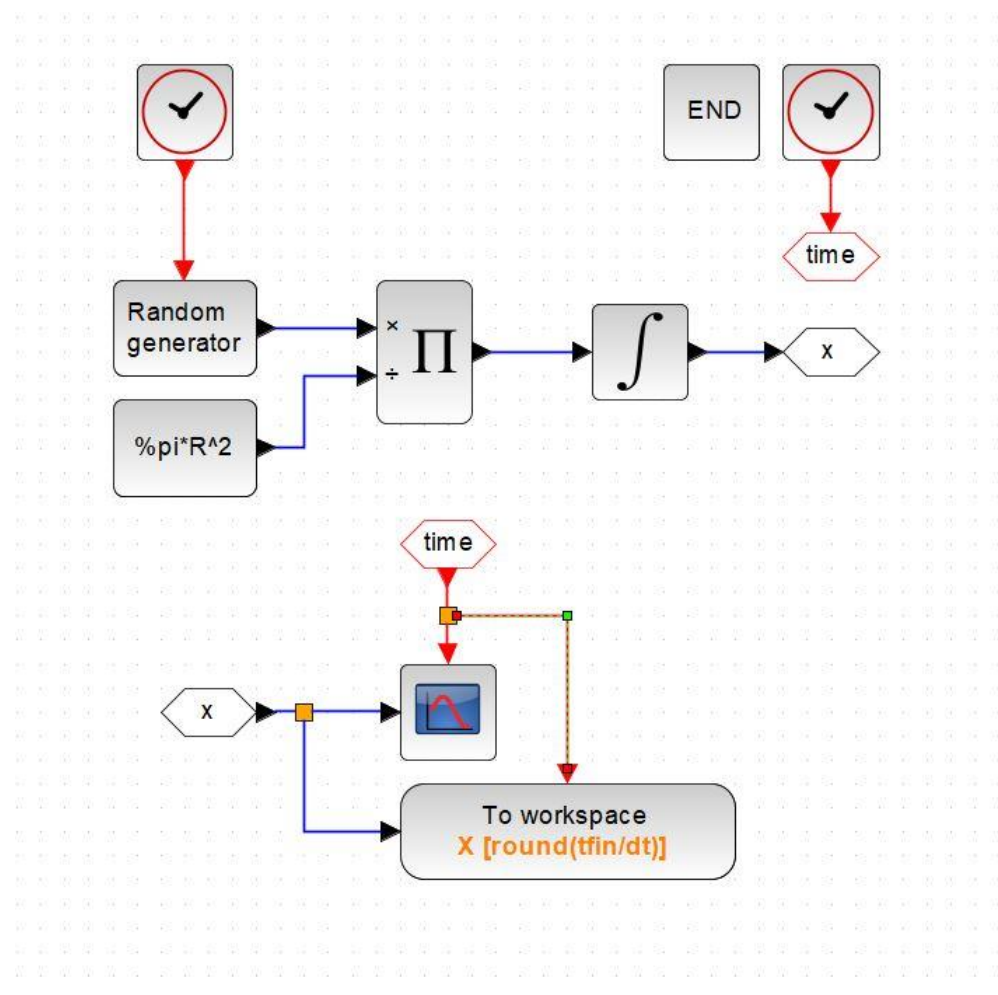


Рисунок 3.4 – Схема симуляції випадкової зміни рідини в корпусі вертикального типу

Формування повного математичного опису САУ, навіть для такого тривіального випадку, є складним завданням, особливо якщо прийняти багато спрощень. Серйозне дослідження з математичним описом є виправданим для завдань, які мають великий обсяг та вимагають великих зусиль і ресурсів для складання математичного опису об'єкта, моделювання, синтезу регуляторів і подальших досліджень. Такі результати можна використовувати багаторазово в кінцевому продукті. Наприклад, САУ для літального апарата (літака, квадрокоптера, ракети) або система регулювання складного блока живлення може бути складною, і їх детальне дослідження та математичний опис буде виправданим для оптимізації їхньої ефективності та надійності. Будь-який фізичний процес у технологічному обладнанні можна розглядати як об'єкт регулювання і кілька передавальних ланок, які формують керувальні та збурювальні впливи. У процесі регулювання рівня у колоні за допомогою регулювального клапана використовується ПД-функція, що містить три складові: пропорційну (П), інтегральну (І) та диференціальну (Д). Нижче розглядається ряд ключових термінів та компонентів цього процесу.

Змінна процесу (PV). Представляє значення поточного рівня, отримане з рівнеміра. Може бути виміряна в інженерних одиницях (наприклад, мм) або в відносних величинах (%).

Уставка (SP). Це значення рівня, яке регулятор повинен підтримувати в автоматичному режимі. Вимірюється в одиницях вимірювання, аналогічних до PV.

Вихід регулятора (OP). Це значення, яке формує регулятор і визначає положення клапана. У даному випадку вимірюється відсотках (від 0 до 100%).

Помилка (E). Це різниця між уставкою та фактичним значенням змінної процесу (PV). Помилка подається на вхід ПД-функції.

Час циклу ( $t_c$ ). Період, з якою ПД-функція виконується в програмованому логічному контролері (ПЛК). Може бути фіксованим часом циклу, якщо вона виконується періодично.

Для більшої зрозумілості та наочності потрібно написати код програму в scilab, для побудування графіка випадкової зміни рівня рідини, які можуть відбуватися за будь яких обставин. Починаючи з технічних помилок закінчуючи людськими помилками які можуть привести до збою роботи обладнання, або повного чи часткового виводу з ладу. Код програми навів на (рис. 3.5).

```

1 clear; clc;
2
3 loadXcosLibs(); loadScicos(); exec('FormatCharts.sce',-1);
4
5 function res=simulation(u)
6     importXcosDiagram("modell1.zcos");
7     typeof(scs_m); scs_m.props.context;
8     Context.u=u;
9     scicos_simulate(scs_m,Context);
10    res=X;
11 endfunction
12
13 res=simulation(0.1); show_window(1);
14 t=res.time; x=res.values; plot(t,x*1000,"k-", "linewidth",2);
15 res=simulation(0.2); show_window(1);
16 t=res.time; x=res.values; plot(t,x*1000,"k--", "linewidth",2);
17 res=simulation(0.3); show_window(1);
18 t=res.time; x=res.values; plot(t,x*1000,"k:", "linewidth",2);
19 titlex="$t, \mathrm{c}$"; titley="$x(t), \mathrm{mm}$";
20 LEG=["$[u]=0,1\mathrm{m}^3/\mathrm{c}$", "$[u]=0,2\mathrm{m}^3/\mathrm{c}$",
21 "$[u]=0,3\mathrm{m}^3/\mathrm{c}$"];
22 FormatCharts(titlex,titley,"",LEG,1);
23 xsave("comp1_mod1.scg");

```

Рисунок 3.5 – Код програми для побудови графіка

За допомогою моделювання ми отримаємо графік на (рис. 3.6).

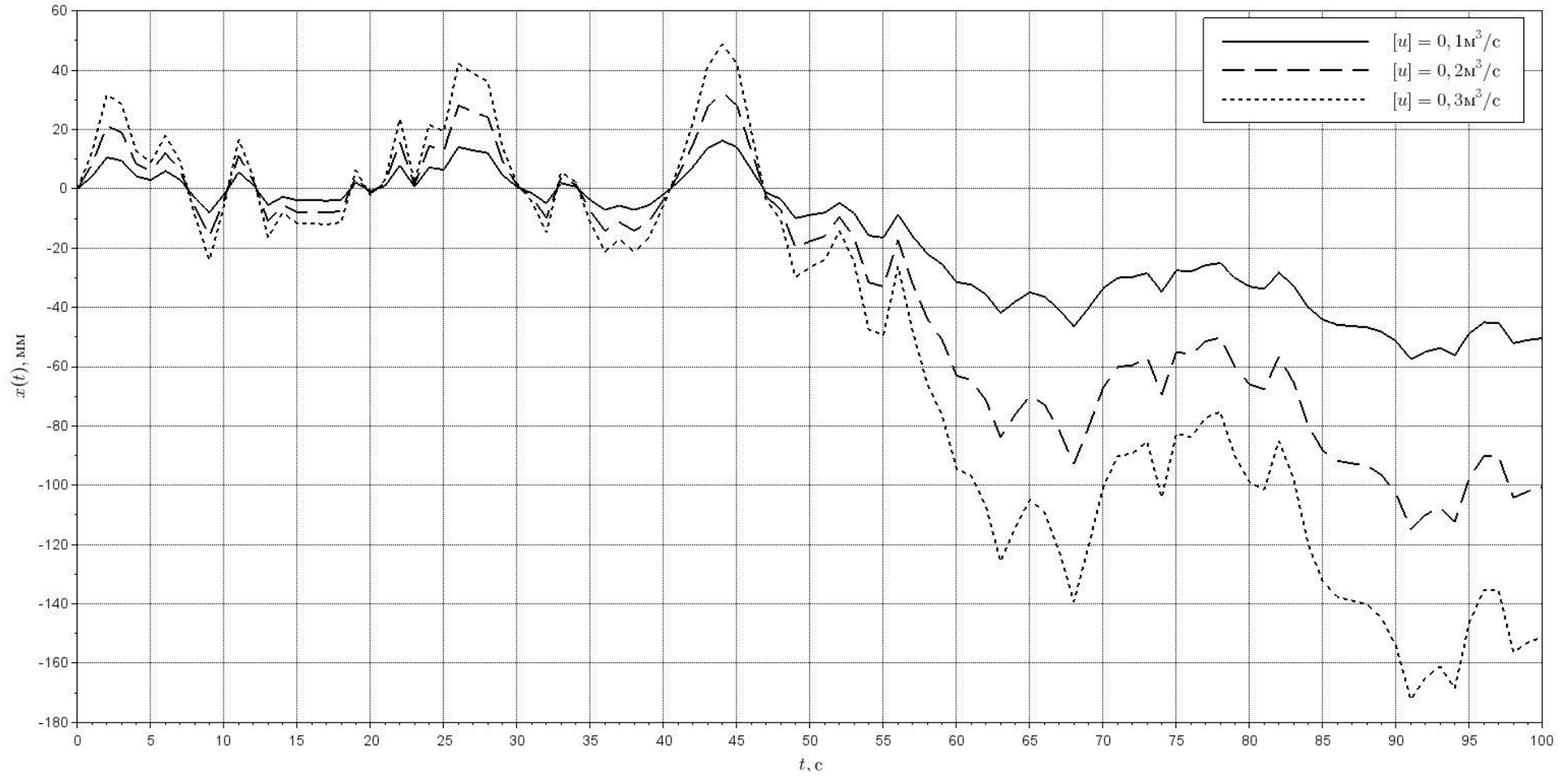


Рисунок 3.6 – Графік зміни рідини в корпусі вертикального типу

Такі зміни в рівні води можуть привести до руйнування обладнання що може привести до травмування персоналу та великих збитків. Саме тому на подібні системи на підприємствах обов'язково потрібна автоматична регуляція подібних параметрів. Людина також може в ручному режимі контролювати цей процес але на це потрібно набагато більше часу.

Прямий/зворотний напрямок дії регулятора. Режим формування регулятором вихідного значення. У прямому напрямку, при збільшенні PV, регулятор збільшує OP, а в зворотному напрямку, збільшення PV призводить до зменшення OP.

Узагальнюючи, ПД-регулятор використовується для автоматичного управління рівнем у колоні, де пропорційна, інтегральна та диференціальна складові забезпечують ефективну реакцію системи на зміни та регулюють положення регулювального клапана відповідно до вимог процесу.

### 3.2.2 Циліндричний корпус горизонтального типу

Навіть при схожості конструкції як за призначенням так і за видом розрахункова модель для горизонтальних корпусів сильно відрізняється що можна побачити на (рис. 3.1, 3.2).

Тому для горизонтальних корпусів було проведено окреме моделювання для якого була побудована нова схема яку можна побачити на (рис. 3.7).

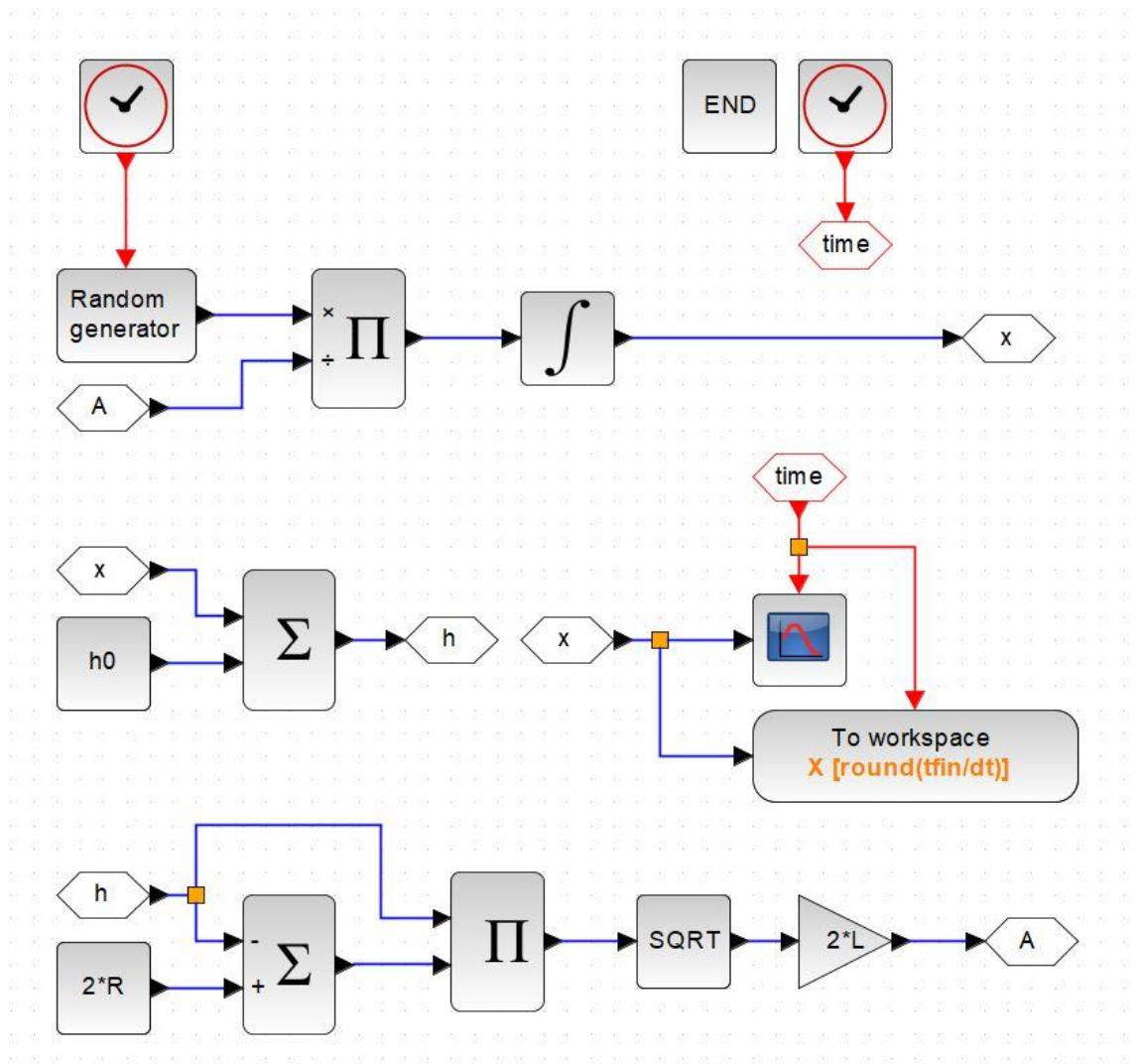


Рисунок 3.7 – Схема симуляції випадкової зміни рідини в корпусі горизонтального типу

З схеми можна побачити що схема дещо збільшилась та стала складнішою. Такі зміни обумовлені тим що площа конструкції не лінійно залежить від висоти. Для такої моделі неможливо побудувати передавальну функцію. Саму залежність можна побачити на (рис. 3.2, 3.3).

Такі зміни дещо ускладнюють побудування графіка та розрахунку параметрів для регулятора. Розробимо код програми для таких конструкцій, цей код на (рис. 3.8).

```

1 clear; clc;
2
3 loadXcosLibs(); loadScicos(); exec('FormatCharts.sce',-1);
4
5 function res=simulation(u)
6     importXcosDiagram("model2.zcos");
7     typeof(scs_m); scs_m.props.context;
8     Context.u=u;
9     scicos_simulate(scs_m,Context);
10    res=X;
11 endfunction
12
13 res=simulation(0.1); show_window(1);
14 t=res.time; x=res.values; plot(t,x*1000,"k-", "linewidth",2);
15 res=simulation(0.2); show_window(1);
16 t=res.time; x=res.values; plot(t,x*1000,"k--", "linewidth",2);
17 res=simulation(0.3); show_window(1);
18 t=res.time; x=res.values; plot(t,x*1000,"k:", "linewidth",2);
19 titlex="$t, \mathrm{c}$"; titley="$x(t), \mathrm{mm}$";
20 LEG=["$[u]=0,1\mathrm{m}^3/\mathrm{c}$", "$[u]=0,2\mathrm{m}^3/\mathrm{c}$",
21 "$[u]=0,3\mathrm{m}^3/\mathrm{c}$"];
22 FormatCharts(titlex,titley,"",LEG,1);
23 xsave("compl_mod2.scg");

```

Рисунок 3.8 – Код програми для побудови графіка

Отже ми маємо графік який показує змінну рівня рідини в баку горизонтального типу на (рис. 3.9).

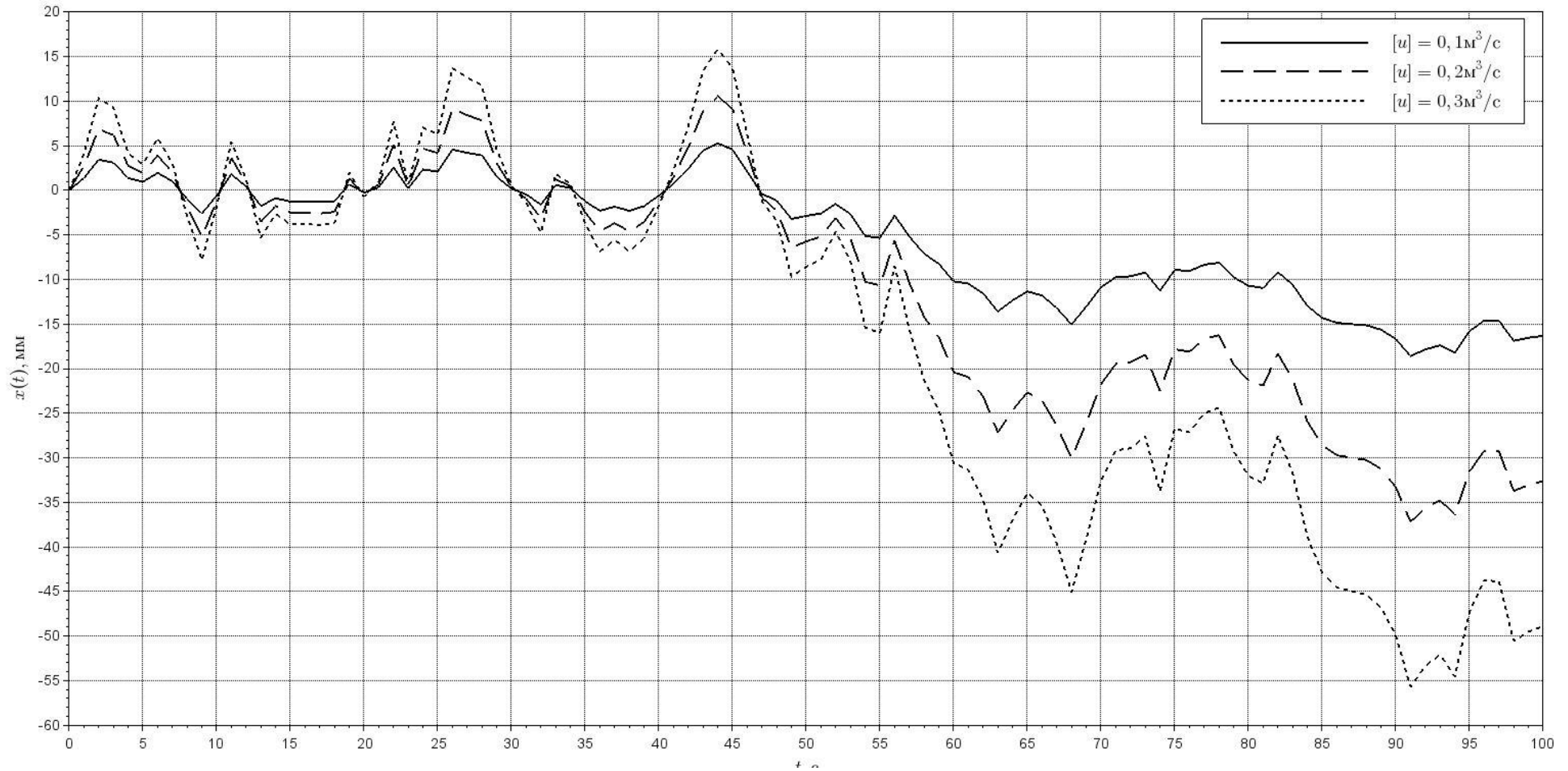


Рисунок 3.9 – Графік зміни рідини в корпусі горизонтального типу

Ми маємо дещо схожі данні але можна побачити що зміна рівня менша за вертикальну конструкцію. Це визвано тим що більша площа дзеркала рідини в горизонтальному корпусі за рахунок чого рівень підіймається набагато довше але кількість води змінюється і ці зміни можуть призвести до спрацювання захисту та блокувань. Що призводить до припинення тех процесу підприємства яке тягне за собою збитки. Окрім цього в сучасному світі підприємства працюють з небезпечними параметрами такі як температура та тиск які навіть при невеликих відхиленнях можуть приводити до непоправних змін в обладнанні.

### 3.3 Параметрична ідентифікація та визначення параметрів ПД-регуляторів рівня

Нормальна робота технологічного обладнання часто визначається якістю забезпечення заданого рівня рідини в різних об'єктах. Щоб забезпечити цей рівень досить точно потрібно використовувати автоматичні регулятори рівня.

Дуже важливим моментом є те, що система від початку є не лінійною. А якщо вона не лінійна, це не дає змоги записати для неї передавальну функцію і визначити параметри ПД регулятора. Традиційний підхід полягає в лінеаризації диференціального рівняння. Я пропоную альтернативний, інший підхід, заснований на параметричній ідентифікації. Параметрична ідентифікація полягає в тому, що ми визначаємо параметри лінійної математичної моделі. Ми припускаємо, що в нас у процесі роботи є дані про дискретні моментні часи (3.21):

$$t = t_1, t_2, \dots, t_k, \dots, t_n; \Delta t = t_{k+1} - t_k, \quad 3.21$$

Значення відхилення рівня:

$$x = x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n; x_k = x_{k+1} - x_k, \quad 3.22$$

Значення управління:

$$u = u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u_n; u_k = u_{k+1} - u_k, \quad 3.23$$

Різниця схем з попередніми схемами в тому, що ми додаємо елемент управління в схему і отримуємо малюнок 3.7.

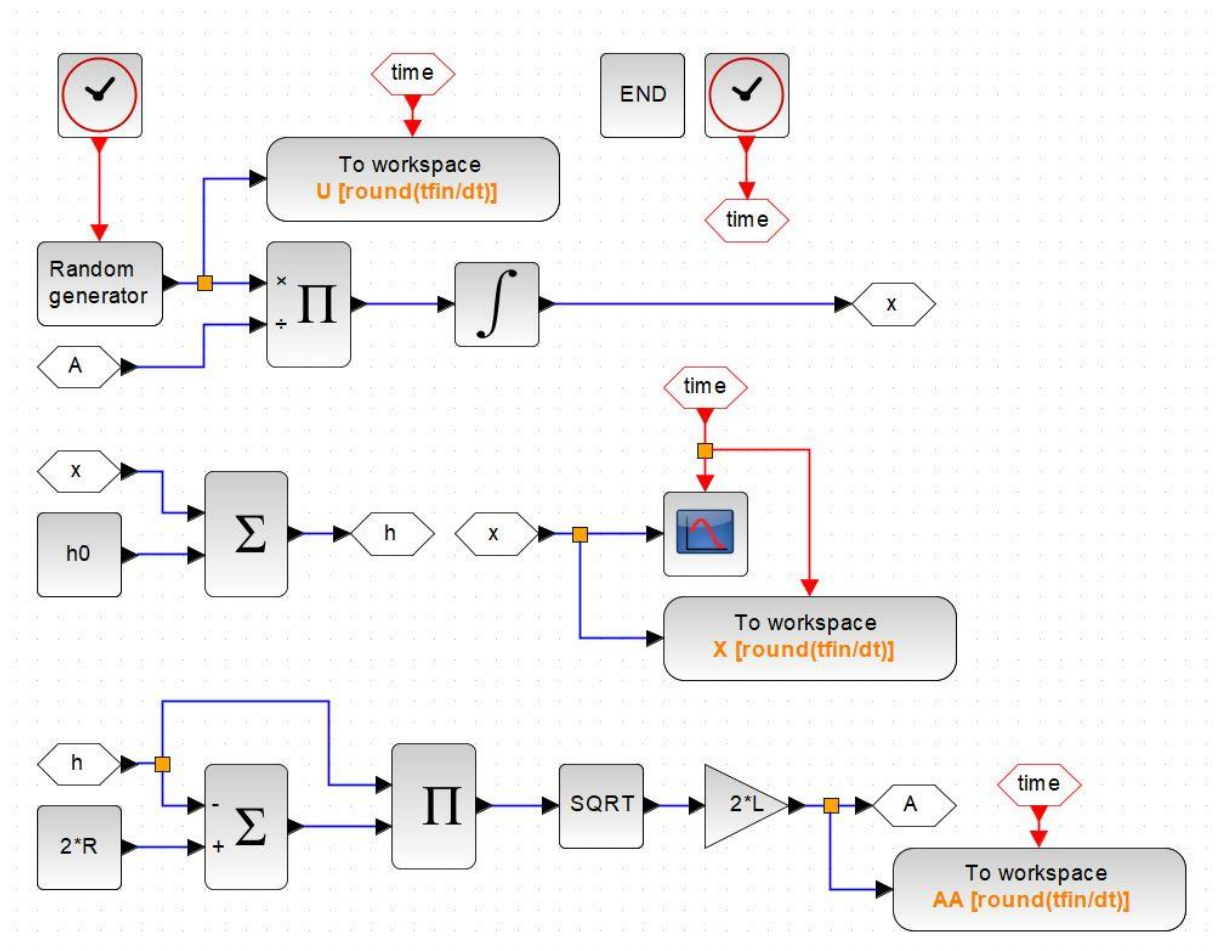


Рисунок 3.10 – Схема симуляції з регулюючим елементом управління

Маємо деякі зміни в коді програмі які зображені на (рис. 3.11).

```

comp1_mod3.sce X
1 clear; clc;
2
3 loadXcosLibs(); loadScicos(); exec('FormatCharts.sce',-1);
4
5 function res=simulation(h0)
6     importXcosDiagram("model3.zcos");
7     typeof(scs_m); scs_m.props.context;
8     Context.h0=h0;
9     scicos_simulate(scs_m,Context);
10    res=[X,U,AA];
11 endfunction
12
13 function res=identification(t,u,x)
14     n=length(t); dt=t(2)-t(1);
15     res=(sum(u(1:n-1).*x(2:n))-sum(u(1:n-1).*x(1:n-1)))*dt;
16     res=res/(sum(x(2:n).^2)-2*sum(x(2:n).*x(1:n-1))+sum(x(1:n-1).^2));
17 endfunction
18
19 res=simulation(2.5);
20 t=res(1).time; x=res(1).values; u=res(2).values;
21 A=identification(t,u,x);
22 disp(A);
23
24 show_window(1); t=res(3).time; x=res(3).values; plot(t,x,"k--","linewidth",2);
25 x=A*ones(1,length(t)); plot(t,x,"k-","linewidth",2);
26 L=10; R=2; h0=2.5; A=2*L*sqrt(h0*(2*R-h0));
27 x=A*ones(1,length(t)); plot(t,x,"k:","linewidth",4);
28 titlex="$t, \mathrm{c}$"; titley="$A(t), \mathrm{m}^2$";
29 LEG=["Actual value", "Identified value", "Linearised value"];
30 FormatCharts(titlex,titley,"",LEG,2);
31 xsave("comp1_mod3.scg");
32

```

Рисунок 3.11 – Код програми для побудови графіка

В результаті маємо графічно відображений результат різниці двох підходів до рішення проблеми визначення параметрів на (рис. 3.12).

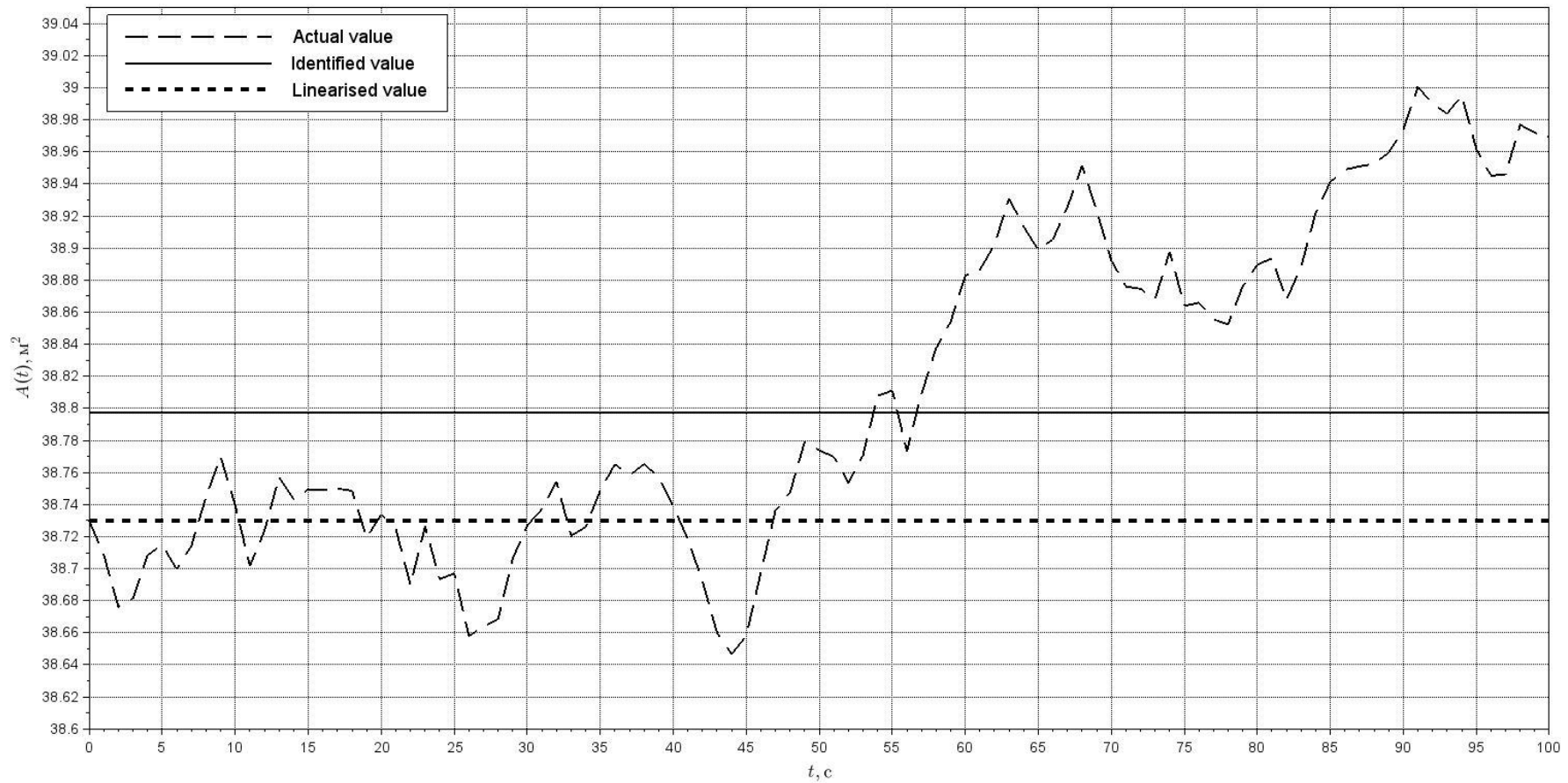


Рисунок 3.12 – Графік різниці підходів до визначення параметрів

Ми бачимо зміни площі дзеркала рідини. Пунктиром позначено значення, яке ми отримали розв'язанням задачі лінеаризації. Прямая ж лінія, це розв'язання задачі через параметричну ідентифікацію. Усе це на тлі графіка зміни рівня рідини. У результаті ми можемо бачити, що за допомогою параметричної ідентифікації досягнуто більш адекватне значення, яке більше відображає дійсність. Що в кінцевому підсумку допомагає нам більш правильно регулювати рівень, і підтримувати його в межах допустимої норми технологічного процесу.

Для порівняння можемо доповнити схему і подивитися на різність корегованого значення. Для більш детального аналізу та побудови математичної моделі.

В результаті маємо такий код (рис. 1.13).

```

1 clear; clc;
2
3 loadXcosLibs(); loadScicos(); exec('FormatCharts.sce',-1);
4
5 function res=simulation3(h0)
6     importXcosDiagram("model3.zcos");
7     typeof(scs_m); scs_m.props.context;
8     Context.h0=h0;
9     scicos_simulate(scs_m,Context);
10    res=[X,U,AA];
11 endfunction
12
13 function res=identification(t,u,x)
14     n=length(t); dt=t(2)-t(1);
15     res=(sum(u(1:n-1).*x(2:n))-sum(u(1:n-1).*x(1:n-1)))*dt;
16     res=res/(sum(x(2:n).^2)-2*sum(x(2:n).*x(1:n-1))+sum(x(1:n-1).^2));
17 endfunction
18
19 function res=simulation4(A)
20     importXcosDiagram("model4.zcos");
21     typeof(scs_m); scs_m.props.context;
22     Context.A=A;
23     scicos_simulate(scs_m,Context);
24     res=[X];
25 endfunction
26
27 res=simulation3(2.5);
28 t=res(1).time; x=res(1).values; u=res(2).values;
29 Ai=identification(t,u,x);
30 L=10; R=2; h0=2.4; A1=2*L*sqrt(h0*(2*R-h0));
31
32 res=simulation4(A1); show_window(1);
33 t=res.time; x=res.values; plot(t,x*1000,"k-","linewidth",2);
34 res=simulation4(Ai); show_window(1);
35 t=res.time; x=res.values; plot(t,x*1000,"k:", "linewidth",4);
36 titlex="$t, \mathrm{c}$"; titley="$x(t), \mathrm{mm}$";
37 LEG=["Linearised value", "Identified value"];
38 FormatCharts(titlex,titley,"",LEG,2);
39 xsave("comp1_mod34.scg");
40

```

Рисунок 3.13 – Код програми для побудови графіка

І отримаємо графік порівняння результатів наших тестів (рис. 1.14).

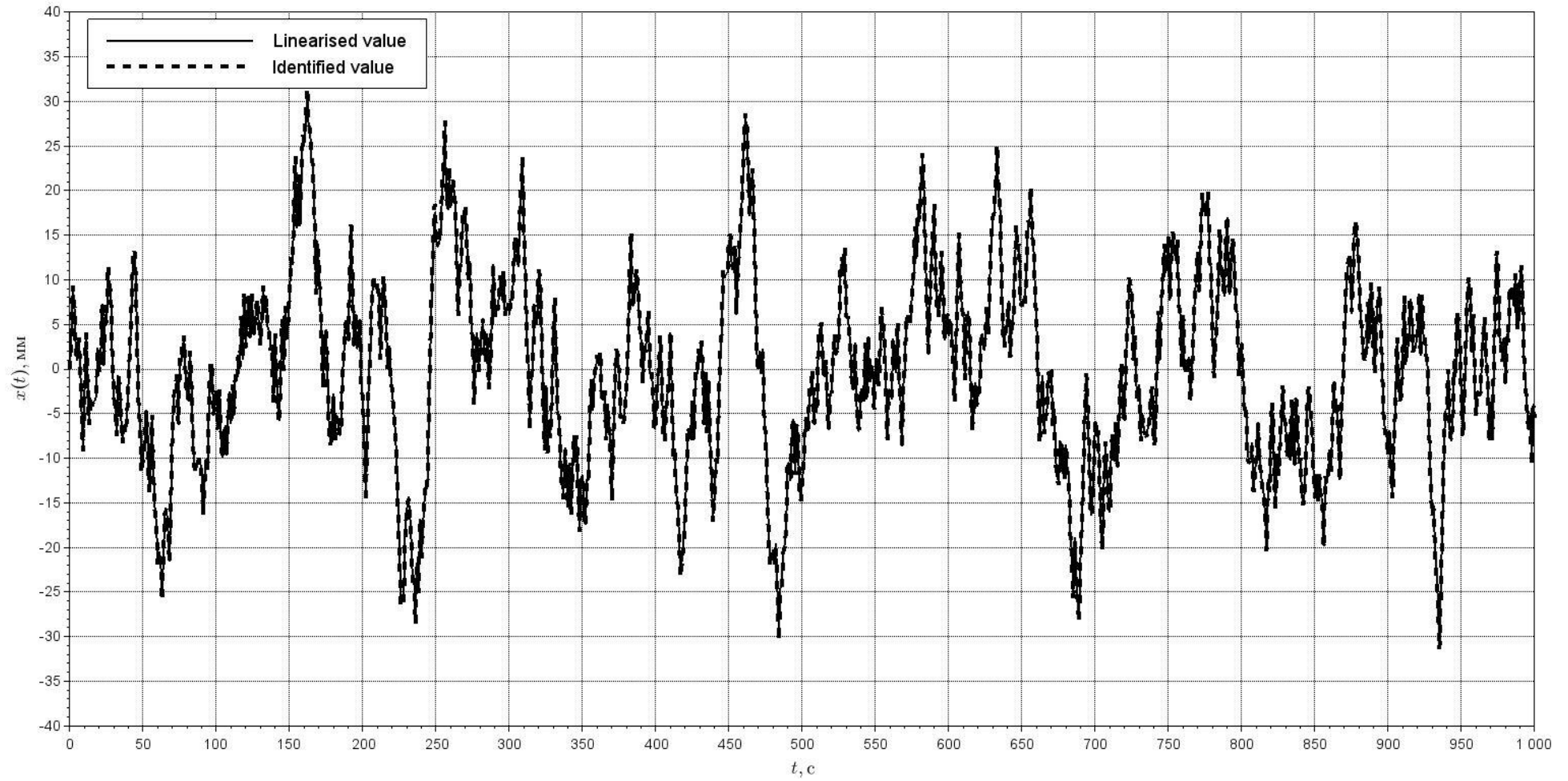


Рисунок 3.14 – Графік відпрацювання регуляторів

На перший погляд дія однакова, але якщо розглядати більш детально то можна побачити відмінності (рис. 1.15).

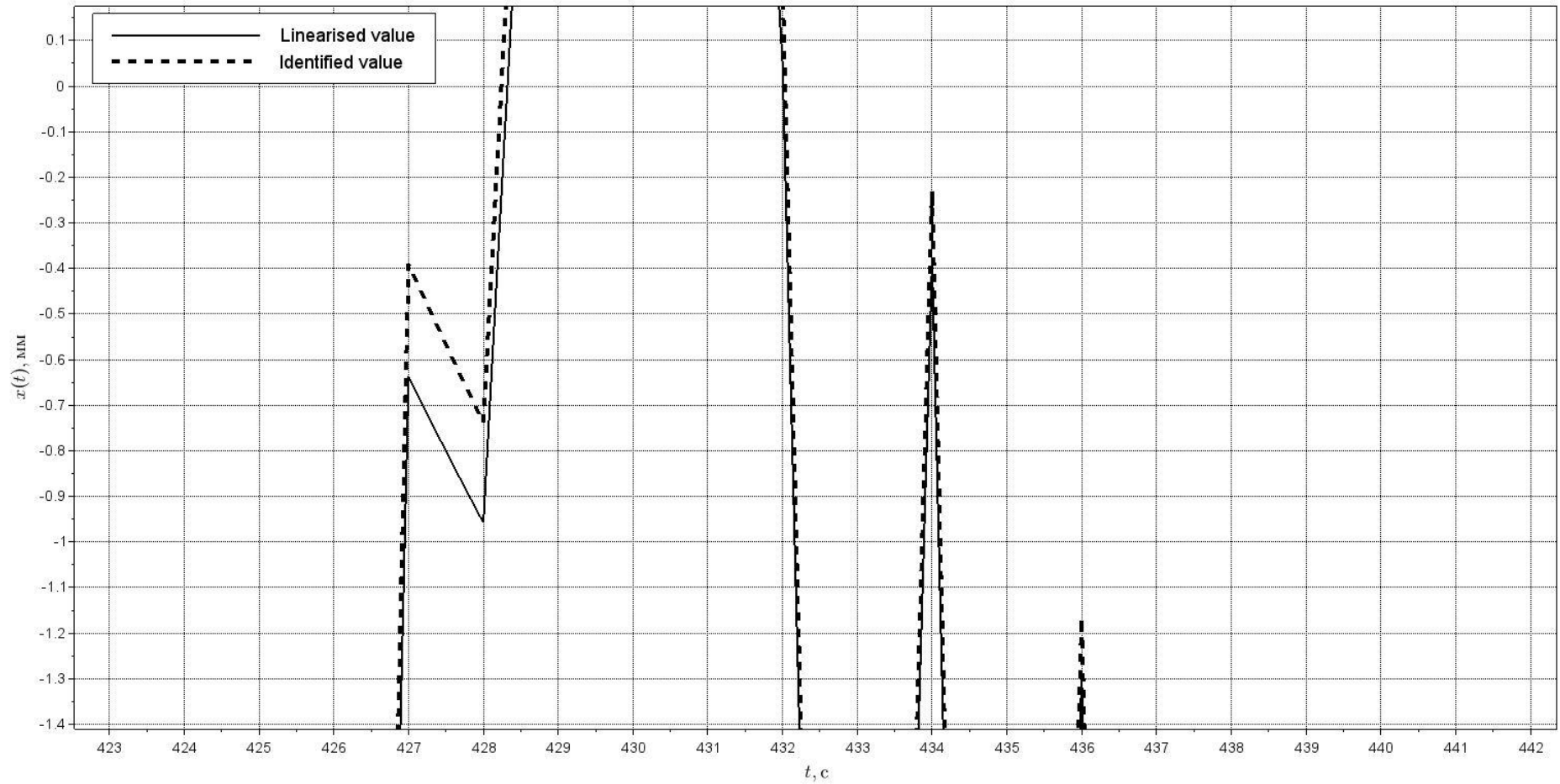


Рисунок 3.14 – Графік відпрацювання регуляторів, масштабований.

Якщо приблизити та більш детально вивчити так звані гострі кути то таких різниць можна побачити багато. Таким чином робимо висновок що робочими є і метод лінеаризації і ідентифікації, але остання дає можливість показувати більш детальну, якісну та реальну картину змін.

#### Висновки за розділом

Шляхом застосування комп'ютерного моделювання були розроблені схеми, які дозволяють спостерігати за фактичними змінами рідини при випадкових змінах та варіаціях подачі води. Оскільки очевидно, що рівень рідини є ключовим параметром, до якого слід підходити максимально точно, ефективність регулятора визначає стабільність роботи системи без втрати коефіцієнта корисної дії. З графіків можна визначити відмінності в рівні води, які залежать від рефлектора рідини.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Загальні положення

Охорона праці представляє собою комплекс заходів і засобів, що включають правові, соціально-економічні, організаційно-технічні, санітарно-гігієнічні та лікувально-профілактичні аспекти. Ці заходи спрямовані на збереження життя, здоров'я та працездатності особи під час виконання праці, згідно із Законом України "Про охорону праці".

Роботодавець може бути власником підприємства, установи або організації, або особою, уповноваженою ним, незалежно від форми власності, виду діяльності чи господарювання. Також, фізична особа, яка використовує найману працю, вважається роботодавцем згідно із Законом України "Про охорону праці".

Працівник – це особа, яка працює на підприємстві, в організації або установі та виконує обов'язки згідно з трудовим договором чи контрактом, згідно із Законом України "Про охорону праці".

Роботодавець зобов'язаний створити на робочому місці в кожному підрозділі умови праці, що відповідають нормативно-правовим актам, і забезпечити дотримання вимог законодавства щодо прав працівників у сфері охорони праці.

З метою забезпечення безпеки праці роботодавець впроваджує систему управління охороною праці, яка регламентується Законом України "Про охорону праці". До основних заходів, які входять до цієї системи, належать.

Створення відповідних служб та призначення посадових осіб, що відповідають за вирішення конкретних аспектів охорони праці. Роботодавець також затверджує інструкції, які визначають обов'язки, права та відповідальність цих посадових осіб, а також контролює їх виконання.

Розробка та впровадження комплексних заходів, спрямованих на досягнення встановлених нормативів та підвищення рівня охорони праці. Ці заходи враховують умови колективного договору.

Забезпечення виконання профілактичних заходів, адаптованих до змінюючихся обставин.

Впровадження передових технологій, досягнень науки і техніки, механізації та автоматизації виробництва, а також врахування ергономічних вимог і позитивного досвіду з охорони праці.

Організація просвітницької роботи для поширення безпечних методів праці та співпраці з працівниками у сфері охорони праці.

Прийняття термінових заходів для допомоги потерпілим та виведення професійних аварійно-рятувальних формувань у випадку аварій та нещасних випадків на підприємстві.

#### 4.2 Параметри мікроклімату

Робота в приміщенні, де проводилася кваліфікаційна робота, виконується в сидячому положенні і не вимагає значної фізичної напруги. Тому ця робота віднесена до категорії Іа (легкі фізичні роботи, з енерговитратами до 120 ккал/год). З метою забезпечення комфортних умов для працівників та відповідно до вимог Державного санітарного нормативу 3.3.6.042-99, в лабораторії встановлені наступні метеорологічні параметри для холодного періоду:

- температура повітря від 22 °С до 24 °С;
- вологість повітря від 40 % до 60 %;
- швидкість руху повітря  $\leq 0,1$  м/с.

А для теплого періоду року:

- температура повітря від 23 °С до 25 °С;
- вологість повітря від 40 % до 60 %;
- швидкість руху повітря  $\leq 0,1$  м/с.

Нормалізація мікрокліматичних умов здійснюється за допомогою раціонального планування приміщення та оптимального розміщення в ньому обладнання. Крім того, використовуються спеціальні прилади регулювання тепловиділення, холодовиділення і вологовиділення для забезпечення оптимальних умов для працівників.

### 4.3 Виробниче освітлення

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2006 у приміщенні передбачено використання природного бічного та штучного загального освітлення. Ефективна організація освітлення робочих місць сприяє підвищенню продуктивності праці. Недостатнє освітлення може змушувати працівників нахилитися близько до робочих поверхонь, що може викликати погіршення їхнього зору.

Допустимі норми освітленості приміщення визначені у таблиці 4.1 згідно з ДБН В.2.5-28-2006.

Таблиця 4.1 – Допустимі норми освітлення для роботи в лабораторії

Характеристика зорових робіт	Мінімальний розмір об'єкта розпізнавання, мм	Розряд та підрозряд зорової роботи	Характеристика фону	Контраст об'єкт з фоном	Освітленість при штучному освітленні, Лк	КЕО, IV при природному бічному освітленні, %
Висока точність	0,3 – 0,5	III в	Світлий	Середній	200	2

Згідно з ДНАОП 0.00-1.31-99, приміщення для моделювання повинно забезпечувати 6 м<sup>2</sup> площі і 20 м<sup>3</sup> об'єму на одне робоче місце з ПК. Фактична корисна площа приміщення становить 18 м<sup>2</sup>, а об'єм – 45 м<sup>3</sup>, що відповідає встановленим вимогам до площі та об'єму робочого місця.

Згідно з ДБН В.25-28-2006, приміщення з ПК мають мати природне та штучне освітлення. Природне світло повинно проникати через бічні світлові прорізи, орієнтовані, зазвичай, на північ або північний схід, та забезпечувати коефіцієнт природної освітленості не менше 1,5%.

Рівень загального штучного освітлення можна визначити за допомогою методу питомої потужності згідно з ДБН В.25-28-2006. Розрахункова формула методу розрахунку освітлення визначається відповідно до даного стандарту:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad 4.1$$

де  $W$  – питома потужність, Вт/м<sup>2</sup>;  $S$  – площа приміщення, м<sup>2</sup>;  $W_{\Sigma}$  – загальна потужність освітлювальної установки Вт, яка розраховується за формулою:

$$W_{\Sigma} = W_{\text{св}} n_{\text{св}}, \quad 4.2$$

де  $W_{\text{св}}$  – потужність одного світильника, Вт;  $n_{\text{св}}$  – кількість світильників в приміщенні, шт.

З урахуванням початкових даних розрахуємо потужність освітлення:

$$W_{\Sigma} = 110 \cdot 4 = 440 \text{ (Вт)},$$

4.2

$$W_{\Sigma} = \frac{440}{18} = 24,4 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right).$$

Згідно з таблицею Б.3 ДБН В.25-28-2006, питомій потужності 24,4 Вт/м<sup>2</sup> відповідає освітленість на рівні 350 лк. Зазначено, що мінімальна допустима освітленість для приміщень з ПК становить 300 лк.

Таким чином, згідно з розрахунками, в приміщенні створено сприятливі зорові умови, оскільки фактичний рівень освітленості перевищує мінімально встановлені нормативи.

## ВИСНОВКИ

В дослідженні розглядаються основні принципи та терміни управління та об'єкти автоматизації. Вказано, що однією з найскладніших задач є визначення оператора управління, оскільки це пов'язано з отриманням необхідної початкової інформації про об'єкт. Для цього вимагаються якісні та кількісні характеристики об'єкта. Також висвітлено, що зі зростанням використання комп'ютерної техніки з'явилися нові методи аналізу систем автоматичного управління. Зокрема, вказано на ефективність методу цифрового моделювання, що базується на використанні різницевих рекурсивних рівнянь.

Починаючи своє дослідження я розібрав основні принципові схеми САР, навів основні закони регулювання та регулятори. Опираючись на минулу свою роботу на яку неодноразово посилався. Після чого було проведено детальний аналіз проблем вдосконалення ПІД регуляторів. Мною було обрано метод вдосконалення математичної моделі підбору параметрів регулятора на базі параметричної ідентифікації. Ідентифікація лінійного об'єкту автоматизації методом найменших квадратів наведені формули та виділені основні моменти при такому підході.

Для розгляду дії ПІД регулятора було обрано циліндричні посудини які використовуються у сучасному промисловому підприємстві. Існують два види циліндричних корпусів з вертикальною віссю та горизонтальною. Розібравши основні фізичні властивості та особливості форм. Визначено формули для розрахунку цих об'єктів та зрозуміло з якими явищами та труднощами можливо зіткнутися у процесі експлуатації та при процесі автоматизації підтримки рівня рідини.

На базі комп'ютерного моделювання було зроблено схеми завдяки яких можна бачити фактичну зміну рідини при різних, випадкових, перепадах подачі води. Оскільки зрозуміло що рівень рідини це важливий параметр

підходити треба максимально точно, тобто чим краще регулятор буде тримати рівень води тим стабільніше буде працювати система без втрачання коефіцієнта корисної дії. По графікам можна побачити різницю при наборі рівня води яка залежить від дзеркала рідини.

Була побудована система з використанням параметричної ідентифікації, з графіків якої зрозуміло як цей метод і покращена математична модель відображає більш якісно рівень води. Якщо зрівнювати ці два методи то можна зрозуміти що вони обидва працюють але якщо покращувати математичну модель і надалі це може не тільки додати безпеки підприємств, а і підняти прибуток за рахунок більш стабільної і якісної роботи об'єкта автоматизації, у нашому випадку циліндричної посудини для рідини.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008–15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015.06.22. – К. : Держстандарт України, 2017. – 29 с.

2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами Другого (магістерського) спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньої програми «Автоматизоване управління технологічними процесами» / Упоряд. Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. М. Замірець, В. В. Невлюдова, Ю. М. Олександров. – Харків : ХНУРЕ, 2021. – 55 с.

3.Скрипниченко В.О. Вплив автоматичних регуляторів на лінійні об'єкти автоматизації // Collection of Students' Scientific Paper «Automation and Development Of Electronic Devices» ADED-2023 Part 1 (Key infrastructure 2023) - Kharkiv/ The Editorial. Nevlyudov I.Sh. (head), that all. Kharkiv: Kind of Kharkiv National University of Radio Elektronics [electronic edition], 2023. 229-234 p with.

4.Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. No 143. – Режим доступу : [https://nure.ua/wp-content/uploads/Main\\_Docs\\_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-dijurishennja-vchenoi-radi -universitetu.pdf](https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-dijurishennja-vchenoi-radi -universitetu.pdf).

5. Стандарт вищої освіти магістра за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» затверджено і введено в дію Наказом Міністерства освіти і науки України від 10.08.2020 р. No 1022. Режим доступу : <https://mon.gov.ua/storage/app/media/vishcha-svita/zatverdzeni%20standarty/2020/08/10/151-avtomatizatsiya-ta-kit-magistr.pdf>

6. Освітньо-професійна програма «Автоматизоване управління технологічними процесами». – Режим доступу : [https://nure.ua/wp-content/uploads/Education\\_programs/2021/2021\\_mag\\_151\\_opp\\_autp.pdf](https://nure.ua/wp-content/uploads/Education_programs/2021/2021_mag_151_opp_autp.pdf).
7. Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва». – Режим доступу : [https://nure.ua/wp-content/uploads/Education\\_programs/2021/2021\\_mag\\_151\\_opp\\_kitpv.pdf](https://nure.ua/wp-content/uploads/Education_programs/2021/2021_mag_151_opp_kitpv.pdf).
8. Освітньо-професійна програма «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи». – Режим доступу : [https://nure.ua/wp-content/uploads/Education\\_programs/2021/2021\\_mag\\_151\\_opp\\_ktrs.pdf](https://nure.ua/wp-content/uploads/Education_programs/2021/2021_mag_151_opp_ktrs.pdf).
9. Невлюдов І.Ш. Основи наукових досліджень: Навч. посібник / І.Ш. Невлюдов, Ю.М. Олександров, А.О. Андрусевич, О.О. Чала. Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ. 2019. 396 с.
10. Невлюдов І.Ш. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: Навч. посібник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. К. : пр. Космонавта Комарова, 1. 2016. 245 с.
11. Невлюдов І.Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації: Підручник / Кривий Ріг: КК НАУ. 2017. 444 с.
12. Невлюдов І.Ш. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. –Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ. 2019. 366 с.
13. Невлюдов І.Ш. Техніко-економічне обґрунтування інженерних рішень: Підручник / І.Ш. Невлюдов. Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ. 2019. 448 с.
14. Raol J.R., Ayuagari R. Control Systems: Classical, Modern, and AI-Based Approaches (1st ed.). – Boca Raton: CRC Press, 2019. – 668 p.
15. Serovajsky S. Mathematical Modelling (1st ed.). – New York: Chapman and Hall/CRC, 2021. – 466 p.
16. Banerjee S. Mathematical Modeling: Models, Analysis and Applications (2nd ed.). – New York: Chapman and Hall/CRC, 2021. – 433 p.

17. Alyokhina S., Nevliudov I., Romashov Yu. Computer simulations of controllability processes for robotic wheeled platforms taking into account restrictions of jerk motions // Innovative technologies and scientific solutions for industries. – No. 1(19). – 2022. – P. 65–75.

18. Alyokhina S., Nevliudov I., Romashov Yu. Safe Transportation of Nuclear Fuel Assemblies by Means of Wheeled Robotic Platforms // Nuclear nad radiation safety. – vol. 3(91). – 2021. – P. 43–50.

19. Mamalis A.G., Nevliudov I., Romashov Yu. An approach for numerical simulating and processing of measured electrical signals from board sensors installed on wheeled electro-mechanical platforms // Journal of Instrumentation. – vol. 16 (10). – 2021. – Article: P10006.

20. Eriksson A., Stanton N.A. Driver Reactions to Automated Vehicles: A Practical Guide for Design and Evaluation (1st ed.). – Boca Raton: CRC Press, 2018. – 176 p.

21. Dixon M.R., Kurdachenko L.A., Subbotin I.Y. Linear Groups: The Accent on Infinite Dimensionality. – New York: Chapman and Hall/CRC, 2020. – 328 p.

22. Gruyitch L.T. Control of Linear Systems: Trackability and Tracking of General Linear Systems (1st ed.). – Boca Raton: CRC Press, 2018. – 396 p.

23. Tovey C.A. Linear Optimization and Duality: A Modern Exposition (1st ed.). – New York: Chapman and Hall/CRC, 2020. – 585 p.

24. Boufadene M. Nonlinear Control Systems Using MATLAB® (1st ed.). – Boca Raton: CRC Press, 2018. – 76 p.

25. Zhou J., Xing L., Wen C. Adaptive Control of Dynamic Systems with Uncertainty and Quantization (1st ed.). – Boca Raton: CRC Press, 2021. – 249 p.

26. Li X. F., Wang, Y.G. (2014) IMC-PID Controller Design for TITO Process Using Relay Feedback Identification Method. 2014 IEEE -SMC., pp 3541 - 3546.

27. Deniz, F. N., Alagoz, B. B., & Tan, N. (2015). PID Controller Design Based on Second Order Model Approximation by Using Stability Boundary Locus Fitting. In 9th ELECO'2015, Bursa, Turkey.

28. Deniz, F. N., Tan, N., Hamamci, S. E., & Kaya, I. (2015). Stability region analysis in Smith predictor configurations using a PI controller. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 37(5), 606–614.

29. Jalilvand A, Vahedi H, Bayat A. Optimal tuning of the PID controller for a buck converter using bacterial foraging algorithm. In: *Proceedings of the international conference on intelligent and advanced systems, ICIAS 2010*; 2010. <https://doi.org/10.1109/ICIAS.2010.5716105>.

30. Verma P, Patel N, Nair NKC, Sikander A. Design of PID controller using cuckoo search algorithm for buck-boost converter of LED driver circuit. In: *Proceedings of the IEEE 2nd annual southern power electronics conference (SPEC)*, Auckland, New Zealand, IEEE; 2016. p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/SPEC.2016.7846102>.

31. Віктор Малишев, Аліна Тропіна, Ірина Висотіна, Сергій Страшний. Книга Охорона праці, 2019. 135 р.