

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОКОНТУРНИХ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З
ПРОПОРЦІЙНИМИ ТА ПРОПОРЦІЙНО-
ІНТЕГРАЛЬНИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК
до виконання лабораторних робіт

*Рекомендовано Методичною радою КПІ імені Ігоря Сікорського
для студентів денної та заочної форми навчання, які навчаються за спеціальністю
144 «Теплоенергетика» (освітньо-професійна програма «Теплоенергетика та
теплоенергетичні установки електростанцій»),*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Дослідження одноконтурних систем автоматичного регулювання з пропорційними та пропорційно-інтегральними регуляторами. Навчальний посібник до виконання лабораторних робіт для студентів денної та заочної форм навчання, які навчаються за спеціальністю 144 «Теплоенергетика» (освітньо-професійна програма «Теплоенергетика та теплоенергетичні установки електростанцій») / Укладачі: П.П. Меренгер, Т.В. Нікуленкова, Л. Майер. – К: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – Електронні текстові дані (1 файл: 990 кбайт). – 37 с.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №8 від 24.06.2021 р.) за поданням Вченої ради Теплоенергетичного факультету (протокол №12 від 31.05.2021 р.)

Електронне мережне навчальне видання

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОКОНТУРНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З ПРОПОРЦІЙНИМИ ТА ПРОПОРЦІЙНО-ІНТЕГРАЛЬНИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

Навчальний посібник до виконання лабораторних робіт

Укладачі: *Меренгер Петро Петрович, ст. викл.
Нікуленкова Тетяна Володимирівна, канд. техн. наук., доц.
Майер Леонід, асист.*

Відповідальний редактор: *Сірий О.А., канд. техн. наук., доц.*

Рецензент: *Білоус І.Ю., канд. техн. наук, доц.*

За редакцією укладачів

© П.П. Меренгер, Т.В. Нікуленкова, Л. Майер, 2021

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

ЗМІСТ

Вступ	5
Вимоги техніки безпеки	5
Лабораторна робота №1. Дослідження одноконтурної системи автоматичного регулювання з пропорційним автоматичним регулятором	6
1.1. Мета роботи	6
1.2. Опис лабораторної установки «Автоматичної системи регулювання температури електричної печі з жорстким зворотнім зв'язком»	6
1.3. Отримання «кривих розгону» об'єктів регулювання	7
1.3.1. Отримання «кривої розгону» з об'єкту регулювання	7
1.3.2. Моделювання «кривої розгону» об'єкту регулювання на ПЕОМ	7
1.3.3. Попередньо зняті «криві розгону» об'єктів регулювання	9
1.4. Отримання динамічної моделі об'єкта керування по експериментально знятій перехідній характеристиці	9
1.5. Порядок розрахунку комплексно-частотної характеристики об'єкту керування	10
1.6. Методика розрахунку оптимального налаштування регулятора	11
1.7. Порядок розрахунку параметрів установки з пропорційним регулятором	12
1.8. Оцінка якості процесів регулювання при різних видах збурювання	13
1.8.1. Оцінка якості процесів регулювання на реальному об'єкті	13
1.8.2. Оцінка якості процесів регулювання шляхом моделювання на ПЕОМ	13
1.9. Порядок виконання роботи	15
1.10. Вимоги до звіту	16
1.11. Контрольні запитання	16
Лабораторна робота №2. Дослідження одноконтурної системи автоматичного регулювання з пропорційно-інтегральним регулятором	17
2.1. Автоматична система регулювання температури електричної печі	17
2.2. Мета роботи	17
2.3. Опис принципової схеми лабораторної установки	18
2.4. Зовнішній вигляд панелі управління	21
2.5. Органи динамічного налаштування регулятора та їх установка	22
2.6. Порядок виконання роботи	23
2.7. Розрахунок оптимальних параметрів динамічного налаштування	24

	пропорційно-інтегрального регулятора	
2.7.1.	Апроксимація динамічних характеристик об'єкту диференціальним рівнянням другого порядку	24
2.7.2.	Порядок розрахунку комплексно-частотної характеристики об'єкту	25
2.7.3.	Методика розрахунку оптимального налаштування регулятора	26
2.8.	Отримання перехідних процесів в замкнутій системі регулювання	28
2.9.	Зміст звіту	29
2.10.	Контрольні питання	30
	Перелік посилань	31
	Додатки	32

ВСТУП

Навчальний посібник містить рекомендації до виконання лабораторних робіт для студентів очної та заочної форми навчання спеціальності 144 «Теплоенергетика» КПІ ім. Ігоря Сікорського, які вивчають дисципліну «Автоматизовані системи управління теплоенергетичними процесами».

Тут містяться вказівки до проведення робіт як на лабораторних установках, так і на ПЕОМ. Лабораторні установки являють собою автоматичні системи регулювання (АСР) температури електричної печі з різними алгоритмами автоматичних регуляторів.

При роботі на лабораторних установках студенти набувають навичок зняття перехідних характеристик на реальному об'єкті управління, виставляння параметрів динамічної настройки на промислових автоматичних регуляторах, зняття процесів регулювання в замкнутій АСР з різних каналів збурень та оцінки якості регулювання.

При виконанні лабораторних робіт на ПЕОМ з використанням пакета прикладних програм студенти набувають навичок моделювання перехідних характеристик об'єктів управління, схем АСР, з різними алгоритмами автоматичних регуляторів, оцінювати якість процесів регулювання при різних параметрах динамічної настройки регуляторів і різних збуреннях.

Вимоги техніки безпеки

1. Забороняється залишати місце проведення лабораторної роботи або переходити до іншого стенду, – цим самим залишати без нагляду увімкнене обладнання та прилади.
2. Категорично забороняється торкатися рухомих частин обладнання стендів (МЕО, вказівників положення, важелів органів регулювання і та ін.).
3. Не торкатись оголених клем автотрансформаторів регулюючих органів.
4. Про всі неполадки в лабораторії необхідно повідомити викладача.

Лабораторна робота №1
ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОКОНТУРНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО
РЕГУЛЮВАННЯ З ПРОПОРЦІЙНИМ РЕГУЛЯТОРОМ

1.1. Мета роботи

1. Ознайомитися зі схемою, конструктивним виконанням і роботою АСР з жорстким зворотнім зв'язком за положенням регулюючого органу.
2. Вивчити один із способів отримання динамічної моделі об'єкта управління у вигляді передаточної функції з експериментально знятої перехідної характеристики.
3. Вивчити методику розрахунку оптимальної настройки пропорційного регулятора по комплексно-частотній характеристиці (КЧХ) об'єкта управління.

1.2. Опис лабораторної установки «Автоматичної системи регулювання температури електричної печі з жорстким зворотнім зв'язком»

На рис. 1.1 зображена принципова схема установки електронного регулятора з жорстким зворотнім зв'язком.

Сигнал жорсткого зворотного зв'язку включається послідовно з сигналом ТЕП на вхід вимірювального пристрою регулятора. Розрахункові значення величини сигналу ЖЗЗ встановлюються за допомогою потенціометра 8 за шкалою 11. Колонка дистанційного керування, повзунок ЛАТР-2 і потенціометра 7 жорстко пов'язані між собою, у зв'язку з чим, кожному положенню регулюючого органу відповідає певне значення сигналу ЖЗЗ.

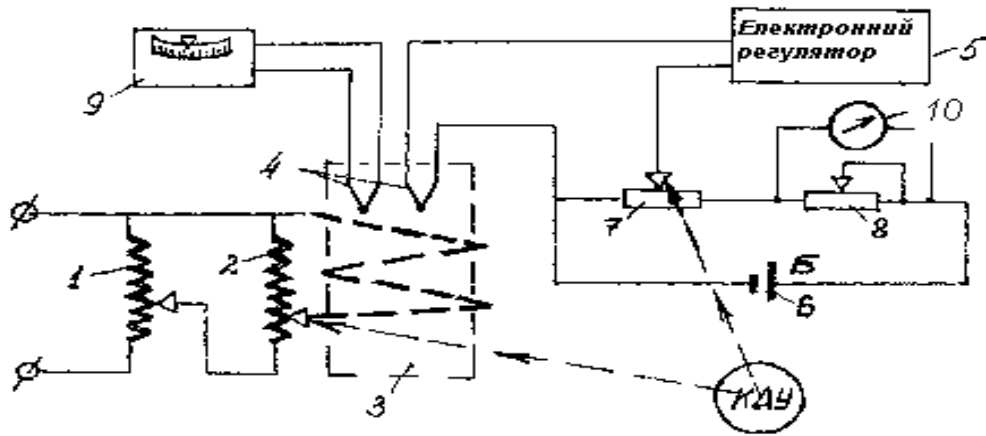


Рис. 1.1. Схема лабораторної установки

- 1 – Лабораторний автотрансформатор ЛАТР-2
- 2 – Лабораторний автотрансформатор ЛАТР-1
- 3 – Об'єкт регулювання – піч
- 4 – Термоелектричний перетворювач (ТЕП)
- 5 – Електронний регулятор
- 6 – Джерело живлення в ланцюгу жорсткого зворотного зв'язку
- 7 – Реостат в ланцюгу зворотного зв'язку
- 8 – Потенціометр «Настройка ЖЗЗ»
- 9 – Показуючий мілівольтметр
- 10 – Показуючий прилад величини сигналу ЖЗЗ

1.3. Отримання «кривих розгону» об'єктів регулювання

1.3.1. Отримання «кривої розгону» з об'єкту регулювання

Зняти експериментально перехідну характеристику об'єкта регулювання по каналу: положення регулюючого органу – регульована величина. Значення збурень наведені у Додатку В, криві розгону об'єкту керування знімаються як для позитивного так і для негативного збурення.

1.3.2. Моделювання кривої розгону об'єкту регулювання на ПЕОМ

«Криву розгону» об'єкту регулювання можливо отримати за допомогою моделювання перехідних процесів на ПЕОМ за допомогою пакета прикладних програм, а також змоделювати роботу регулятора (за оптимальними параметрами, які були отримані в результаті обрахунку «кривих розгону») та оцінити якість

процесів регулювання при різних збуреннях.

Запускаємо програму моделювання перехідних процесів. На екрані з'явиться схема досліджуваного об'єкта регулювання і нижче з'явиться пропозиція ввести номер варіанта завдання. За допомогою цифрових клавіш необхідно набрати номер свого варіанту та натиснути клавішу <Enter>. Після цього, на схемі з'явиться склад об'єкта регулювання у відповідності з варіантом.

Для дослідження динаміки об'єкта приймається стрибкоподібне збурення, значення якого в такий же спосіб буде запропоновано ввести. Чисельне значення збурення видає викладач.

Потім необхідно буде ввести час спостереження перехідного процесу. Орієнтовано можна його прийняти рівним 2000 с. «Для просмотра графика переходной характеристики нажмите “Пробел”...», після чого необхідно натиснути клавішу <Пробіл> і спостерігати на екрані графічне зображення перехідної характеристики (рис. 1.3).

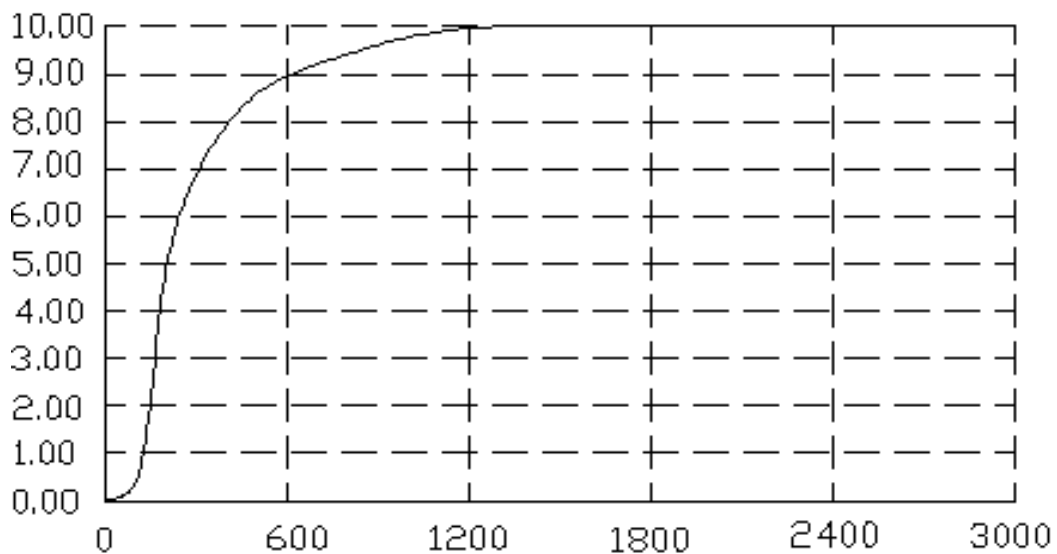


Рис. 1.3. Графічне зображення перехідної характеристики

Для припинення перегляду натисніть клавішу <Esc>. На наступному екрані буде запропоновано вибрати одну з двох дій. Якщо час спостереження малий, то графік процесу буде обрізаний праворуч, так і не досягши сталого стану. У цьому випадку необхідно натиснути клавішу <2> і повторно ввести час спостереження процесу і повторити операції описані вище.

У випадку, коли на екрані графік перехідної характеристики прийняв сталий стан, натисканням клавіші <1> закінчується перегляд графіка.

Подальше користування інтерфейсом програми ідентичне раніше наведеному, якщо зробити вибір натиснувши клавіші <1> або <2>.

1.3.3. Попередньо зняті «криві розгону» об'єктів регулювання

У випадку навчання в дистанційній формі можна скористатись експериментальними перехідними характеристиками об'єктів регулювання наведеними в Додатку Г.

1.4. Отримання динамічної моделі об'єкта керування по експериментально знятій перехідній характеристиці

Промислові об'єкти керування в більшості випадків можуть бути апроксимовані диференціальними рівнянням другого порядку (1.1, 1.2).

Динамічні властивості промислового об'єкта можна наближено описати передаточною функцією виду:

$$W_{об}(P) = \frac{K \cdot e^{-P\tau}}{(T_1P+1)(T_2P+1)} \quad (1.1)$$

$$W_{об}(P) = \frac{K}{(T_1P+1)(T_2P+1)} \quad (1.2)$$

У виразі (1.1) об'єкт управління має чисте запізнювання, у виразі (1.2) – ні.

τ – час чистого запізнювання, с;

K – коефіцієнт передачі об'єкта, $\left[\frac{\text{од.вим.рег.величини}}{\text{од.вим.упр.взаємодії}} \right]$;

T_1, T_2 – коефіцієнти, які називаються постійними часу;

P – комплексна змінна (оператор Лапласа).

Час запізнювання τ і коефіцієнт передачі знаходять за графіком перехідної функції (див. Додаток А). Запізнювання τ визначається як відрізок часу від моменту

нанесення збурення до початку видимого відхилення регульованої величини, коефіцієнт передачі об'єкта K , як відношення усталеного значення регульованої величини до величини збурюваного впливу.

Постійні часу T_1 , T_2 визначають наступним чином (див. Додаток Б).

Якщо на графіку перехідної функції об'єкта виділити попередньо час запізнювання, то залишившиюся частину кривої буде представляти суму експонент. Знаходячи на цій кривій точку перегину, тобто точку максимальної кручі, проводять через неї дотичну стосовно до кривої, визначають сумарну постійну часу $T_c = T_1 + T_2$ та загальну постійну часу.

Найбільше відхилення точки перегину перехідної характеристики від початку координат для двухемносної ланки при заданому нахилі дотичної має місце, якщо ємності прийняті однаковими: $T_1 = T_2$. Цьому випадку відповідає $T_c/T_a = 0,73$ та $T_1 = T_2 = 0,37 T_a$. При $T_2 = 0$ сума експонент перетворюється в одну експоненту і тоді $T_c/T_a = 1$. Таким чином T_c/T_a знаходиться в межах $0,73 \leq T_c/T_a \leq 1$, що відповідає $0 \leq T_2/T_1 \leq 1$.

У додатку Б зображена номограма для визначення постійних часу аперіодичних ланок і за сумарною та загальною постійним часу перехідної характеристики [1].

1.5. Порядок розрахунку комплексно-частотної характеристики об'єкта керування [2]

З передаточної функції, отриманої в п. 1.3, можна визначити КЧХ об'єкта керування.

Якщо надати її у вигляді:

$$W_{o\delta}(j\omega) = A_{o\delta}(\omega)e^{-j\Phi_{o\delta}(\omega)} \quad (1.3)$$

То модуль КЧХ буде дорівнювати:

$$A_{o\delta}(\omega) = \frac{K}{\sqrt{(1+T_1^2 \cdot \omega^2)(1+T_2^2 \cdot \omega^2)}} \quad (1.4)$$

А фаза:

$$\phi_{o\sigma}(\omega) = -(\tau \cdot \omega + \arctg(T_1 \cdot \omega) + \arctg(T_2 \cdot \omega)) \quad (1.5)$$

Розрахунок КЧХ рекомендується виконувати для 15–20 значень частоти ω .

Діапазон розрахункових частот залежить від особливостей динамічних характеристик конкретної установки і вказується викладачем, орієнтовно він дорівнює 0–0,3 рад/с, і вибирається з умови, що КЧХ повинна займати 2–2,5 квадранта площини координат.

1.6. Методика розрахунку оптимального налаштування регулятора

У даній роботі розрахунок оптимального налаштування П-регулятора заснований на використанні одного з непрямих критеріїв якості регулювання – показника коливань [2].

Показником коливань називають відношення резонансної амплітуди частотної характеристики замкненої системи до амплітуди при нульовій частоті:

$$M = \frac{A_{max}}{A(0)} \quad (1.6)$$

Вимога забезпечити показник коливань M зводиться до наступного: налагодження регулятора повинна підбиратися так, щоб КЧХ розімкнутої системи дотикалась до окружності з заданим індексом M .

КЧХ розімкнутих системи з П-регулятором:

$$W_{pc}(j\omega) = W_{o\sigma}(j\omega) \cdot W_p(j\omega) = W_{o\sigma}(j\omega)K_p \quad (1.7)$$

Частотні характеристики об'єкта і розімкнутих систем розрізняються тільки розмірністю і перестроювання характеристики об'єкту з метою їх отримання не потрібно.

1.7. Порядок розрахунку параметрів установки з пропорційним регулятором

Будують $W_{об}(j\omega)$, яка при $K_p = 1$, приймається за $W_{pc}(j\omega)$.

1. Проводять в площині $W_{об}(j\omega)$ пряму OE з початку координат під кутом $\beta = \arcsin 1/M$ до від'ємної гілки дійсної осі. Зазвичай, рекомендується приймати показник коливаний $M = 1,62$, що відповідає $\beta = 38^\circ$ ($\psi = 0,90$).

2. Підбирають коло з центром на від'ємній дійсній осі, що стосується одночасно $W_{об}(j\omega) = W_{pc}(j\omega)$ прямої OE (рис. 1.2). Коефіцієнт передачі регулятора, що забезпечує заданий показник коливаний $M = 1,62$ знаходиться через радіус кола за виразом:

$$K_p = \frac{M}{M^2 - 1} \cdot \frac{1}{r} \approx \frac{1}{r} \quad (1.8)$$

Величина жорсткого зворотного зв'язку розраховується за формулою:

$$\delta = \frac{1}{K_p} \approx r \quad (1.9)$$

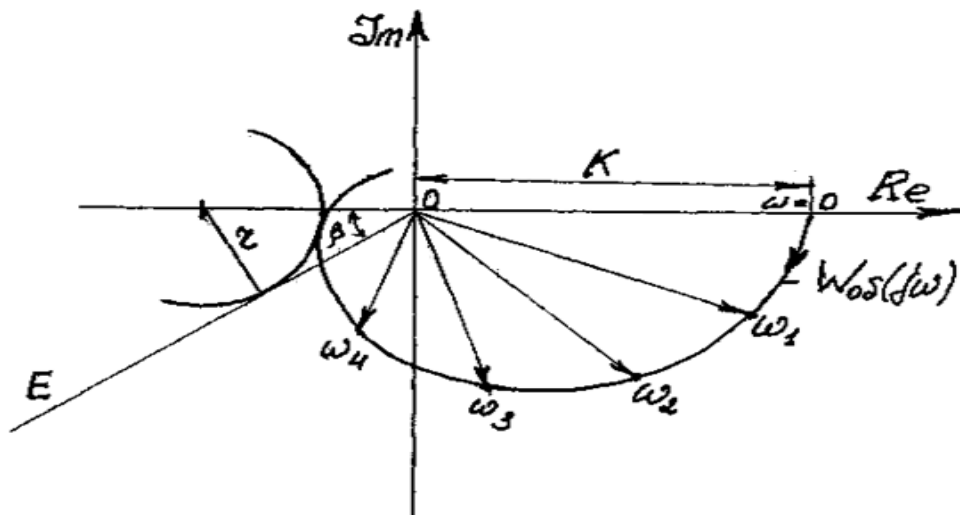


Рис. 1.2. Графоаналітичний розрахунок П-регулятора.

1.8. Оцінка якості процесів регулювання при різних видах збурення

1.8.1. Оцінка якості процесів регулювання на реальному об'єкті

1. Знайдений параметр налаштування δ , встановити відповідно до п.1.2 інструкції. При цьому необхідно встановити регулюючий орган на 100% відкриття та виставити величину $\delta' = \delta \times 100\%$.

2. Перевести регулюючий орган в положення, які вказуються викладачем, дочекатись сталого значення температури в печі (стрілка мілівольтметра 9 впродовж 3-х хвилин не відхиляється).

3. Нанести збурення (величина вказується викладачем) за допомогою регулюючого органу і зняти перехідні процеси в замкнутій системі регулювання (2–3 криві при різних збуреннях).

1.8.2. Оцінка якості процесів регулювання шляхом моделювання на ПЕОМ

За результатами обробки перехідної характеристики об'єкту регулювання, яка була отримана (див. п. 1.3) та проведених розрахунків для отримання оптимальних значень налаштування пропорційного регулятора оцінимо якість регулювання (див. п. 1.7).

Щоб змодельовати роботу регулятора та оцінити якість процесів регулювання при різних збуреннях, – запускаємо програму моделювання перехідних процесів. Заходимо до меню користувача, натиснувши клавішу <F2>. Обираємо потрібну лабораторну роботу, навівши курсор на назву роботи за допомогою клавіш <↑,↓> і натиснувши клавішу <Enter>. Далі знову натискаємо клавішу <F2> – з'являється меню самої роботи. Для того, щоб запустити програму, яка моделює роботу системи з П-регулятором необхідно вибрати пункт меню <2 Процесс регулирования>.

Після її запуску на екрані з'явиться загальна схема регулятора, об'єкта зі зворотнім зв'язком. Нижче з'явиться пропозиція ввести кілька ланок у об'єкті регулювання. За допомогою цифрових клавіш необхідно набрати число, що відповідає кількості ланок і натиснути клавішу <Enter>. Після цього, починається етап введення параметрів об'єкта, отриманих у результаті попередніх розрахунків,— на екрані з'явиться діалог. У ньому, за допомогою цифрових клавіш 1–5 вибирається тип ланки. Потім, за допомогою цифрових клавіш вводиться чисельне значення параметра і натискається <Enter>.

Аналогічним образом послідовно вводяться усі ланки об'єкту регулювання.

На наступному етапі здійснюється введення оптимальних параметрів динамічного налаштування регулятора. Як і раніше введення здійснюється цифровими клавішами з наступним натисканням клавіші <Enter>.

Наступний етап являє собою послідовне спостереження графіків процесів регулювання АСР із П-регулятором (або ПИ-регулятором), параметри якого були введені вище, при різних збуреннях. Розглядається одиничний стрибок по каналу внутрішнього збурення (з боку об'єкта регулювання), під дією зовнішнього впливу і по лінії завдання. Імпульсне збурення розглядається з боку об'єкту регулювання. Випадкове збурення розглядається з боку об'єкту регулювання і по лінії зовнішнього впливу.

Перегляд відбувається в такий спосіб. Перед переглядом чергового графіку вводиться час спостереження процесу регулювання. На екрані за замовченням буде запропонований час 2000 умовних одиниць виміру (наприклад секунди) або число, введене при перегляді даного графіку попереднього разу.

Після натискання клавіші <Enter>, нижче з'явиться повідомлення: «Для просмотра графика переходной характеристики нажмите «Пробел»...», відповідно натискаємо клавішу <Пробіл> і спостерігаємо графік процесу регулювання. Після перегляду графіку, на екрані буде запропоновано вибрати (за допомогою клавіш 1–2) одну з двох дій:

- Клавіша <1> – перейти до перегляду наступного графіку.
- Клавіша <2> – переглянути графік ще раз.

Натиснувши клавішу <2> надається можливість для спостереження процесу з можливістю ввести інше значення часу спостереження. Цей режим необхідний у тому випадку, коли час, введений раніше, виявився недостатнім і графік процесу наприкінці не одержав сталого стану.

При натисканні клавіші <1> здійснюється перехід до перегляду наступного графіку, при якому здійснюються операції, аналогічні описаним вище.

По закінченню перегляду на екрані з'явиться меню. Операції після натискання клавіш <1> і <2> ідентичні описаним раніше.

1.9. Порядок виконання роботи

1. Отримати експериментально перехідну характеристику об'єкту відповідно до п. 1.3 даної лабораторної роботи

2. Побудувати графік нормованої перехідної характеристики, обробити її відповідно до п. 1.4 інструкції та знайти передаточну функцію об'єкту регулювання.

3. Розрахувати КЧХ об'єкту регулювання (див. п.1.5.). Діапазон зміни частоти вибирати так, щоб КЧХ розташовувалася, в основному, у II-му квадранті координатної площини.

4. По КЧХ об'єкту визначити оптимальну величину жорсткого зворотнього зв'язку за методикою, викладеної в п. 1.7 інструкції.

5. Оцінка якості процесів регулювання при різних видах збурення. Побудувати графіки перехідних процесів по регулюючому впливу і регульованій величині, оцінити якість регулювання.

1.10. Вимоги до звіту

У звіт входить короткий опис установки та всі графіки і розрахунки, пов'язані з виконанням роботи.

1.11. Контрольні запитання

1. Як користуватися номограмою Додатку Б?
2. Як обробляється перехідна характеристика для складання передаточної функції об'єкту регулювання?
3. Вкажіть одиниці вимірювання коефіцієнтів передачі амплітудно-частотних характеристик об'єкту та регулятора для лабораторної установки, на якій виконується робота.
4. Вкажіть, яким чином розраховується та встановлюється оптимальна величина ЖЗЗ при виконанні цієї роботи.
5. Які особливості перехідного процесу в замкнутій системі регулювання з П-регулятором?
6. Як обробляються перехідні характеристики об'єкту для складання динамічної моделі об'єкта керування?
7. Що розуміють під КЧХ, АЧХ та ФЧХ?
8. Які показники якості процесів Ви знаєте?

Лабораторна робота №2

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОКОНТУРНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З ПРОПОРЦІЙНО-ІНТЕГРАЛЬНИМ РЕГУЛЯТОРОМ

2.1. Автоматична система регулювання температури електричної печі

Практичний інтерес представляють експериментальні методи, які вимагають мінімальних відомостей про суть процесів, що протікають в досліджуваних об'єктах, і з достатньою точністю дають уявлення про динамічні властивості об'єктів. Ці методи прості в застосуванні і дозволяють порівняно швидко отримати математичну модель об'єкту [1]. Внаслідок цього вони набули на ТЕС і АЕС широкого поширення при дослідженні об'єктів з метою їх автоматизації.

Дані вказівки містять рекомендації до проведення роботи на лабораторній установці, представляючи собою АСР температури електричної печі і виконаною на апаратурі управління, що серійно випускається. При роботі на цій установці студенти набувають навиків зняття «кривих розгону» на реальному об'єкті управління, виставляння параметрів динамічної настройки на промисловому автоматичному регуляторі, зняття перехідних процесів в замкнутій АСР по різних каналах збурень і оцінки якості регулювання.

2.2. Мета роботи

Ознайомити з схемою, конструктивним виконанням і роботою автоматичної системи регулювання, методикою експериментального визначення динамічних характеристик («кривих розгону») об'єкту регулювання по каналах: від основного збурення, внутрішнього збурення, зовнішнього збурення; вивчити методику розрахунку оптимальних параметрів динамічної моделі настройки ПІ-регулятора для даного об'єкту, методику виставляння розрахункових параметрів динамічної настройки на електронному регуляторі.

2.3. Опис принципової схеми лабораторної установки

Лабораторна установка представляє собою АСР температури печі. Принципова схема установки зображена на рис. 2.1. Об'єктом регулювання служить електрична піч, нагрівальна обмотка якої живиться від мережі змінного струму через два послідовно включених лабораторних автотрансформатора (ЛАТР). Автотрансформатор ЛАТР-1 встановлений на виконавчому механізмі регулятора і є регулюючим органом, ЛАТР-2 встановлений на лицьовій панелі лабораторного стенду і служить для нанесення внутрішніх збурень на об'єкт регулювання.

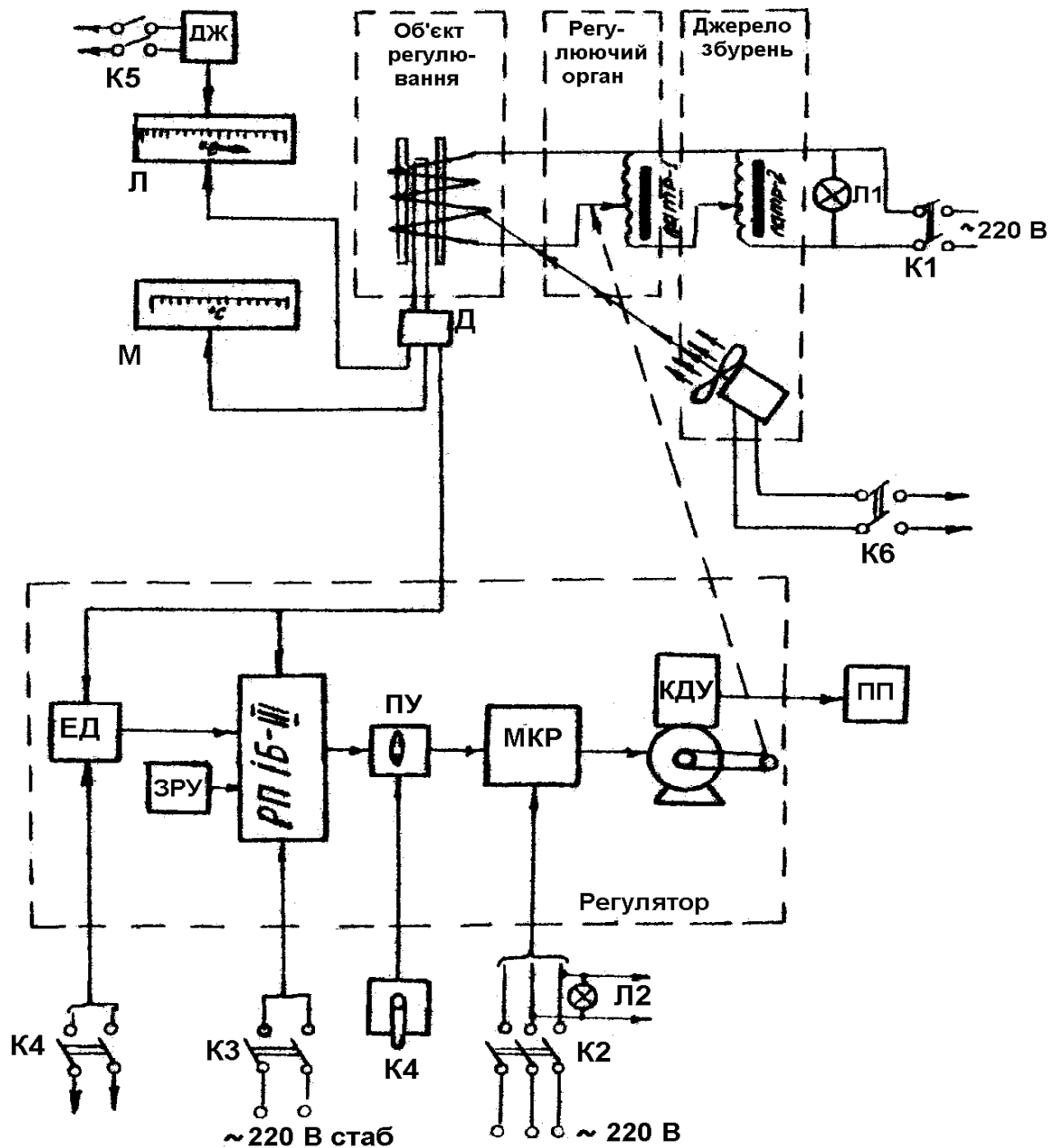


Рис. 2.1. Принципова схема регулювання

Регулюючий прилад типу «РПБ-III» разом з колонкою дистанційного керування (КДУ) в пульсуючому режимі роботи приблизно формує пропорційно-інтегральний закон регулювання. Для введення диференціальної складової в закон регулювання в установці передбачений електронний диференціатор типу ЕД. Вимірювання температури в печі здійснюється за допомогою трьох датчиків Д, змонтованих в загальній гільзі; два термометри опору і одна термопара. Термопара разом з показуючим мілівольтметром М служить для візуального спостереження за нагрівом печі в широких межах зміни температури.

Одним з термометрів опору включений в схему логометра Л з межами вимірювання 200–250 °С і служить для реєстрації відносно малих змін температури в процесі регулювання. Другий термометр опору є чутливим елементом регулятора і включений в одне з плечей мостової вимірювальної схеми регулюючого приладу (рис. 2.2).

На рис. 2.2 показана лише та частина схеми вимірювального блоку, яка відноситься до способу включення термометра. Останній підключається через спеціальні накладки Н, що дозволяють в ході виконання лабораторних робіт замінити термометр опору магазином опорів. Якщо температура (0 °С) термометра Д буде такою, що його опір рівний опору постійного резистора R, в середньому дроті струму не буде. При відхиленні температури від вказаного по резистору R81 "чутливість I" протікає струм і а на виході схеми виникає змінна напруга $U_{вих}$, фаза якої визначається напрямом відхилення (тобто зростанням або зниженням температури), а значення пропорційне відхиленню.

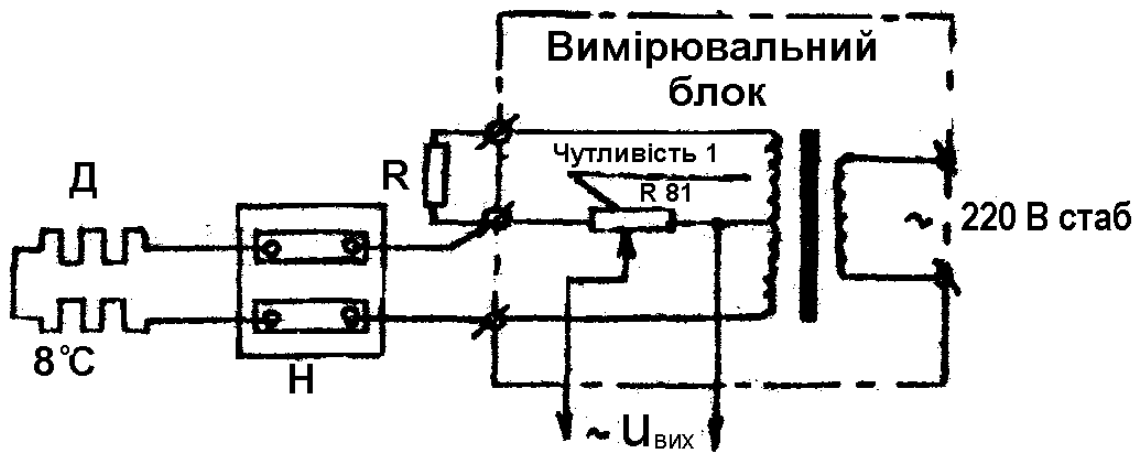


Рис. 2.2. Схема установки коефіцієнта посилення регулятора

В регуляторі напруга $U_{вих}$ порівнюється з сигналом задатчика ручного управління – (ЗРУ – див. рис. 2.1). Таким чином, формується сигнал, який після певних перетворень управляє рухом виконавчого механізму регулятора, – КДУ. Отже, в замкнутий ланцюг регулювання входять наступні основні ланки: нагрівач пічки, термометр опору, регулюючий прилад (з диференціатором або без нього), колонка дистанційного керування, автотрансформатор ЛАТР-1.

Лабораторна установка дозволяє виконати наступні експериментальні роботи:

1. Отримання «кривих розгону» температури печі при основному збуренні (ЛАТР-1), внутрішньому збуренні (ЛАТР-2) і зовнішньому збуренні.
2. Отримання перехідних процесів в реальних ПІ-регуляторах.
3. Отримання перехідних процесів в об'єкті регулювання по різних каналах дій: від основного, внутрішнього і зовнішнього збурень, задатчика ручного управління.
4. Отримання перехідних процесів в замкнутій АСР при двох варіантах регуляторів: пропорційно-інтегральному і пропорційно-інтегральному з введенням реального диференціювання.

2.4. Зовнішній вигляд панелі управління

Регулюючий прилад, диференціатор, апаратура управління установкою і контролю її роботи поміщені на лицевій панелі (рис. 2.3). Електричне живлення на нагрівач пічки і ланцюг управління подається через вимикачі К1 і К2 і контролюється сигнальними лампами Л1 і Л2 (див. рис. 2.1 і 2.3), а на регулюючий прилад «РПБ» і на електронний диференціатор ЕД – через окремі вимикачі К3 і К4. Розділення ланцюгів живлення дозволяє включати регулятор як з диференціатором, так і без нього. До органів управління регулятором відносяться деякі допоміжні елементи (див. рис. 2.1, 2.3):

- а) задатчик ручного управління ЗРУ, призначений для зміни заданого значення температури печі;
- б) ключ ручного управління КУ;
- в) перемикач управління ПУ, призначений для переходу з автоматичного управління на ручне і навпаки;
- г) вказівник положення регулюючого органа ВП;
- д) реверсивний магнітний контактор /МКР/ (змонтований на стійці КДУ).

На лицеву панель стенду винесені також накладки Н, через які термометр опору включений у вимірювальний блок регулятора (див. рис. 2.2 та 2.3) При вивченні перехідних процесів в регуляторі на вхід його подають сигнали, не пов'язані з нагрівом печі. В цьому випадку за допомогою накладки термометр відключають і замість його підключають магазин опорів. Необхідний сигнал отримують зміною опору магазину.

Напруга на джерело живлення ДЖ подається на логометр (див. рис. 2.1 та 2.3) вимикачем К5. Слід пам'ятати, що включати логометр можна тільки тоді, коли температура печі знаходиться в межах 200–250 °С, інакше стрілка логометра "зашкалюватиме" і прилад може вийти з ладу.

На панель управління винесений движок автотрансформатора ЛАТР-2, за допомогою якого можна змінювати ступінь нагріву печі. При зниженні напруги живлення печі вона починає остигати, а при підвищенні напруги – нагріватися.

Таким чином наносять внутрішні збурення на об'єкт регулювання, їх значення контролюють за шкалою ЛАТРа.

Для нанесення зовнішніх збурень служить вентилятор, що включається тумблером К6. Це збурення умовно береться за одиницю. Основне збурення подається регулюючим органом і контролюється безпосередньо показчиком положення (ПП).

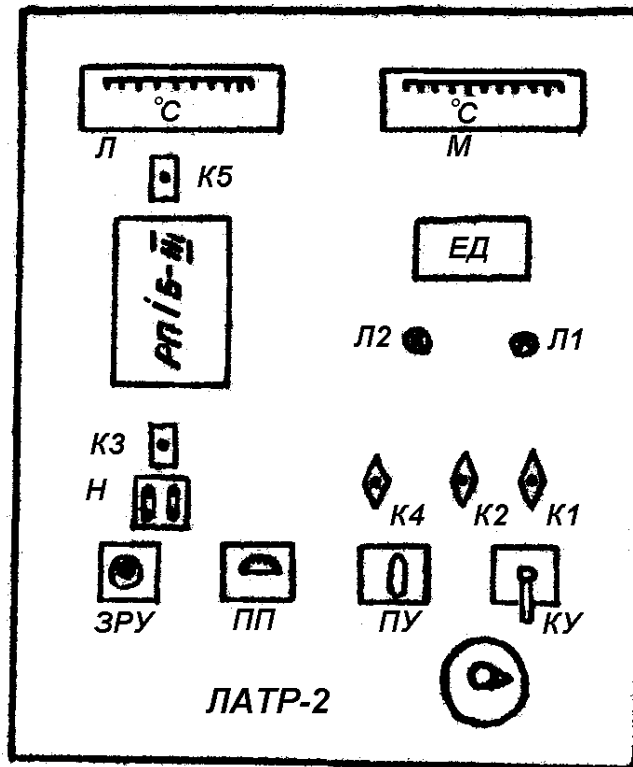


Рис. 2.3. Зовнішній вигляд панелі управління установкою

2.5. Органи динамічного налаштування регулятора та їх установка

Практично для динамічного налаштування регулятора використовують два параметри: час ізодрому T_i і швидкість зворотного зв'язку V_{ac} . Час ізодрому задається змінним опором R_9 і для «РПБ-III» його визначають по формулі, с:

$$T_i = C_3 \cdot R_9 \quad (2.1)$$

У формулі (2.1) при заданій ємкості $C_3 = 20$ мкф і розрахованому значенні T_i визначають змінний опір R_9 .

Інший параметр динамічного налаштування регулятора – швидкість

зворотного зв'язку – визначається положенням ручки потенціометра і «швидкістю зв'язку». Розраховану заздалегідь швидкість зворотного зв'язку можна встановити на регулятор таким чином: розраховують коефіцієнт передачі регулятора K_p у відсотках ходу КДУ на градус зміни температури печі; потім встановлюють цю величину по першому включенню регулятора при стрибкоподібній зміні опору на вході в регулятор. Для цього за допомогою накладок Н (див. рис. 2.2 та 2.3) відключають робочий термометр опору і підключають замість нього магазин опорів. Підбором опорів на магазині добиваються балансування регулятора. При цьому слід почекати розрядку PC – ланцюга зворотного зв'язку, або розрядити конденсатор ланцюга зворотного зв'язку замкнувши резистор "Час ізодрому". Потім наносять стрибкоподібне збурення за допомогою магазину опорів. За перше включення регулятор повинен переставити регулюючий орган на величину $K_p \cdot \Delta\Theta$, % · град/град. Цього досягають підбором положення ручки "швидкість зв'язку".

На лабораторній установці можна отримати пропорційно-інтегрально-диференціальний закон регулювання (ПІД), який формується шляхом послідовного включення до входу електронного регулятора РПБ-III реального електронного диференціатора (ЕД) (див. рис. 2.1).

2.6. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з принциповою схемою системи регулювання температури.
2. Включити ланцюги живлення і управління електричної печі автоматичної системи регулювання.
3. Перевірити працездатність АСР при положеннях перемикача управління ПУ: "Дистанційне керування", "Автоматичне управління".
4. Встановити вплив на температуру електричної печі основного, внутрішнього і зовнішнього збурень.
5. Зняти «криві розгону» при стрибкоподібному збуренні регулюючим органом.

5.1. Для отримання «кривої розгону» температури печі з реального об'єкту, - значення збурень наведені у Додатку В, «криві розгону» об'єкту керування знімаються як для позитивного так і для негативного збурення.

5.2. При отриманні «кривої розгону» шляхом моделювання на ПЕОМ – виконати умови п.1.3.2 цього навчального посібника.

5.3. Якщо виконати п.1.3.1 та п.1.3.2 неможливо, – можна скористатись рекомендаціями п.1.3.3.

2.7. Розрахунок оптимальних параметрів динамічного налаштування пропорційно-інтегрального регулятора

Методика розрахунку ПІ-регулятора по комплексно-частотній характеристиці (КЧХ) об'єкта управління приводиться в [2, 4]. При виконанні лабораторної роботи слід користуватися описом лабораторної установки і справжнім описом методики розрахунку.

2.7.1. Апроксимація динамічних характеристик об'єкту диференціальним рівнянням другого порядку

Динамічні властивості промислового об'єкту можна наближено описати передаточною функцією вигляду:

$$W_{об}(P) = \frac{K}{(T_1P+1)(T_2P+1)} \quad (2.2),$$

або

$$W_{об}(P) = \frac{K \cdot e^{-p\tau}}{(T_1P+1)(T_2P+1)} \quad (2.3)$$

де:

τ – час чистого запізнювання, с;

K – коефіцієнт передачі об'єкту, $\left[\frac{\text{од.вим.рег.величини}}{\text{од.вим.упр.взаємодії}} \right]$;

T_1 і T_2 – постійні часу, с;

P – комплексна змінна (оператор Лапласа).

Час запізнювання і коефіцієнт передачі об'єкту знаходять простими прийомами по графіку отриманої на експериментальній установці перехідної характеристики (Додаток А). Запізнювання τ визначається як відрізок часу з моменту нанесення збурення до початку видимого відхилення регульованої величини.

Розглянемо один із способів визначення сталих часу T_1 і T_2 . Будують графік перехідної функції об'єкту. Якщо на графіці виділити попередній час запізнювання, то частина кривої, що залишилася, представлятиме суму експонент. На цій кривій знаходять точку перегину, тобто точку максимальної крутизни. Проводять через цю крапку дотичну до кривої і визначають сумарну сталу часу $T_C = T_1 + T_2$ і загальну постійну часу T_a (Додаток А).

Найбільше відхилення точки перегину перехідної характеристики від початку координат для двохемної ланки при заданому нахилі дотичної має місце, якщо ємкості прийняті однаковими: $T_1 = T_2$. Цьому випадку відповідає $T_C/T_a = 0,73$ і $T_1 = T_2 = 0,37 T_a$. При $T_2 = 0$ сума експонент перетворюється на одну експоненту і тоді $T_C/T_a = 1$. Таким чином T_C/T_a знаходиться в межах $0,73 < T_C/T_a < 1$, що відповідає $T_2/T_1 = 1$.

Додаток Б містить номограму Ольденбурга-Сарторіуса для визначення сталих часу аперіодичних ланок T_1 і T_2 по сумарній T_C і загальній T_a сталих часу перехідної характеристики [1].

2.7.2. Порядок розрахунку комплексно-частотної характеристики об'єкту

З передаточної функції, приведеної у формулі (2.3), можна визначити КЧХ об'єкту регулювання. Якщо представити її у вигляді:

$$W_{об}(j\omega) = A_{об}(\omega) \cdot e^{-j \varphi_{об}(\omega)} \quad (2.4)$$

де модуль КЧХ буде рівний:

$$A_{заг}(\omega) = \frac{K}{\sqrt{(1+T_1^2 \cdot \omega^2)(1+T_2^2 \cdot \omega^2)}} \quad (2.5)$$

фаза:

$$\varphi_{об}(\omega) = -(\tau \cdot \omega + \arctg(T_1 \cdot \omega) + \arctg(T_2 \cdot \omega)) \quad (2.6)$$

Розрахунок КЧХ рекомендуються виконувється для 15–20 значень частот. Діапазон розрахункових частот залежить від особливостей динамічних характеристик конкретної установки і вказується викладачем. Орієнтовано він рівний 0–0,3 рад/с і вибирається з умови, що КЧХ повинна займати два – два з невеликим квадранта комплексної площини.

Потім будують КЧХ об'єкту на комплексній площині (рис. 2.4).

2.7.3. Методика розрахунку оптимального налаштування регулятора

У цій роботі розрахунок оптимального налаштування ПІ-регулятора оснований на використанні одного з непрямих критеріїв якості регулювання – показника коливання. Показником коливання називають відношення резонансної амплітуди частотної характеристики замкнутої системи до амплітуди при нульовій частоті:

$$M = \frac{A_{макс}}{A(0)} \quad (2.7)$$

Вимога забезпечити показник коливання $M_{зд}$ зводиться до наступної: настройка регулятора повинна підбиратися так, щоб КЧХ розімкненої системи стосувалася б кола із заданим індексом M [2, 4].

АЧХ розімкненої системи з ПІ-регулятором:

$$W_{р.с}(j\omega) = K_p(1 + 1/(\omega \cdot T_i)) \cdot W_{об}(j\omega) \quad (2.8)$$

при $K=1$ має вигляд:

$$W_{1р.с}(j\omega) = W_{об}(i\omega) - i \cdot \frac{W_{об}(j\omega)}{\omega \cdot T_i} \quad (2.9)$$

Таким чином, для отримання КЧХ розімкненої системи з ПІ-регулятором при $K_p=1$ і деякому заданому T_i слід до кожного вектора характеристики об'єкту регулювання додати вектор завдовжки:

$$\Delta A = \frac{OA}{\omega \cdot T_i} \quad (2.10)$$

(OA – довжина вектора КЧХ об'єкту), повернений на кут 90° за годинниковою стрілкою (рис. 2.4).

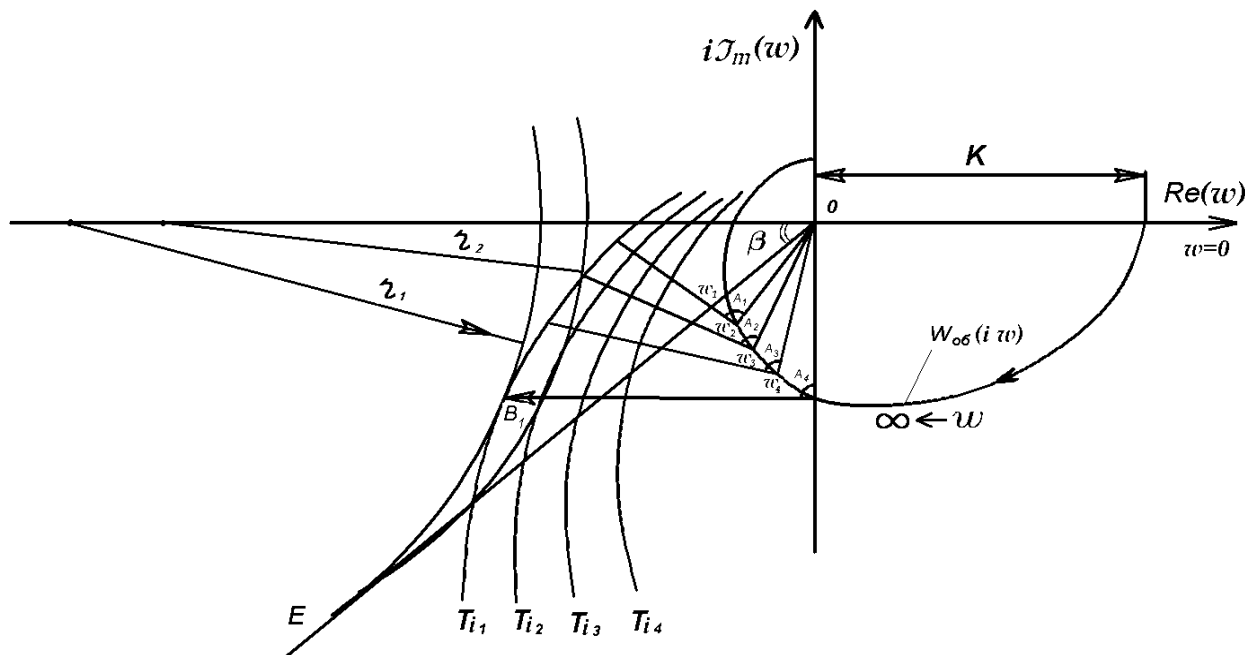


Рис. 2.4. До визначення параметрів настройки ПІ – регулятора

Порядок розрахунку налаштувань:

1. Робиться побудова $W_{об}(j\omega)$.
2. На цієї характеристиці вибираються 6–10 точок $A_1, A_2, A_3 \dots$ з частотами $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots$ які з'єднуються з початком координат OA_1, OA_2, OA_3, \dots

Для побудови рекомендується брати ті частоти, при яких КЧХ розташовується в третьому квадранті координатної площини.

3. До цих відрізків в точках A_1, A_2, A_3, \dots відновлюються перпендикуляри.
4. Визначають положення точок $W_{1р.с.}(j\omega)$ для частоти ω_1 і різних значень часу ізодрому T_{i1}, T_{i2}, T_{i3} . Всього слід узяти 5–8 значень від 50 до 500 с. причому рекомендується погоджувати ці межі з викладачем.

5. Будують $W_{1р.с.}(j\omega)$ для інших частот і тих же значень часу ізодрому $T_{i1}, T_{i2} \dots$. З'єднавши крапки з однаковими T_i плавними кривими, отримують сімейство

шуканих $W_{1p.c.}(j\omega)$.

6. Проводять пряму лінію ОЕ під кутом $\beta = \arcsin \frac{1}{M}$. Зазвичай рекомендується приймати показник тієї, що має $M=1,62$, що відповідає $\beta=38^\circ$ ($\psi=0,9$). Будують кола з центром на від'ємній півосі, що одночасно торкаються до кривих $W_{1p.c.}(j\omega)$ і прямої ОЕ. Коефіцієнти передачі регулятора, що забезпечує задані показники коливання $M=1,62$ при прийнятих T_i визначаються через радіуси кіл по формулі:

$$K_p = \frac{M}{M^2-1} \cdot \frac{1}{\tau} \approx \frac{1}{\tau} \quad (2.11)$$

7. У координатах T_i-K_p будують межу області $M \leq M_{зд}$ (рис. 2.5). Оптимальній настройці відповідатиме точка на цій межі, для якої K_p/T_i максимально.

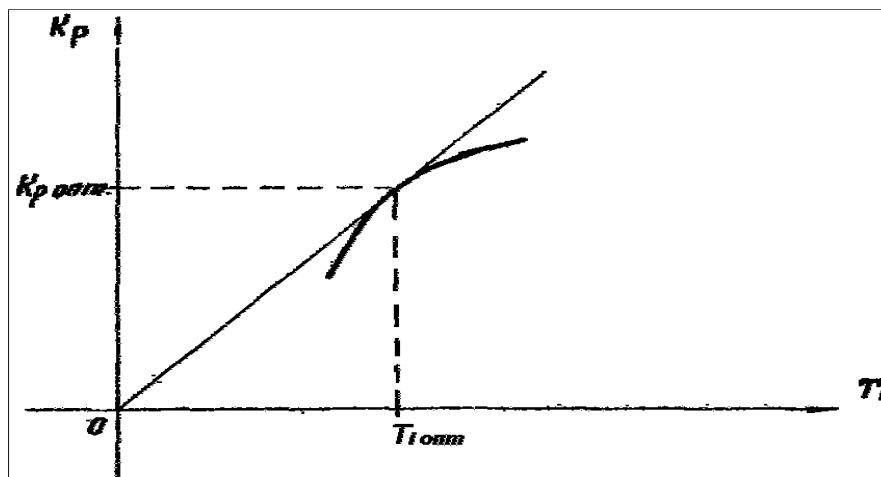


Рис. 2.5. Визначення оптимальних параметрів $K_{p\text{ опт}}$ і $T_{i\text{ опт}}$

2.8. Отримання перехідних процесів в замкнутій системі регулювання

1. Побудувати графік нормованої перехідної характеристики за отриманими експериментальними даними в п. 1.3, обробити його згідно п. 2.7.1 і знайти передаточну функцію об'єкту регулювання.

2. Розрахувати комплексно-частотну характеристику об'єкту регулювання відповідно до методики п. 2.7.2. Діапазон зміни частот вибрати так, щоб КЧХ займала два (або дещо більше) квадранти координатної площини.

3. По КЧХ об'єкту визначити оптимальну настройку регулятора по методиці, викладеній в п. 2.7.3.
4. Знайдені параметри налаштування встановити в регуляторі, користуючись описом лабораторної установки.
5. Зняти перехідні процеси в замкнутій системі регулювання при збуренні регулюючим органом на реальному об'єкті (лабораторному стенді) або змодельовати процес регулювання на ПЕОМ (див. п.1.8.2).
6. Побудувати графіки перехідних процесів по регульованій величині і оцінити якість регулювання.

2.9. Зміст звіту

Звіт повинен містити:

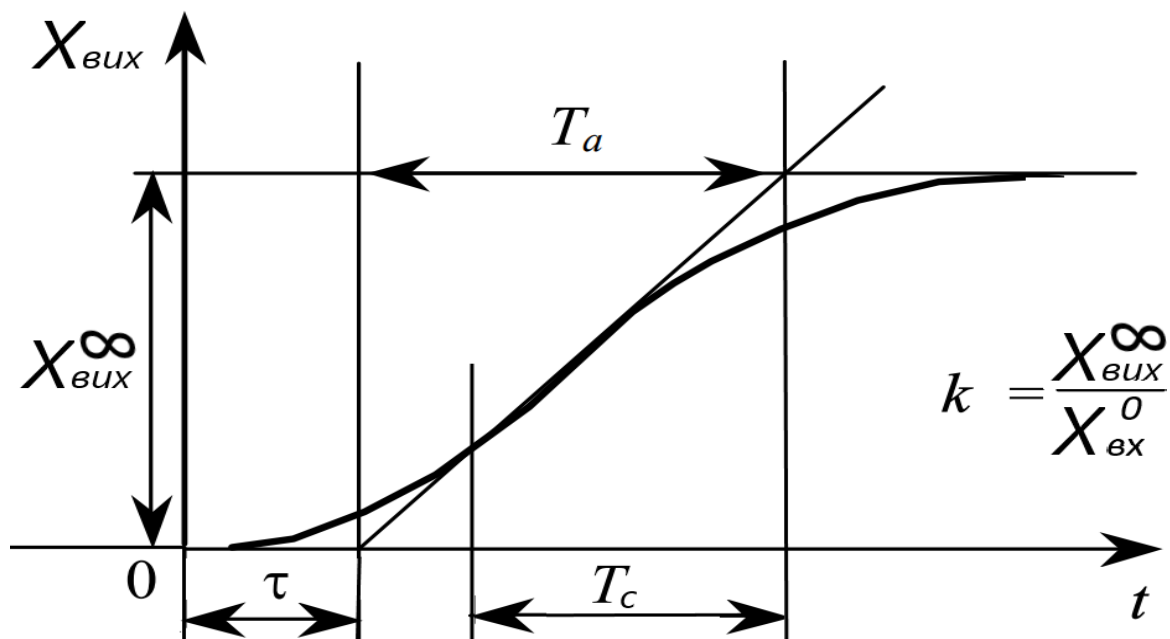
1. Опис лабораторної установки і принципову схему АСР.
2. Методику виставляння на електронному регуляторі оптимальних параметрів динамічного налаштування.
3. Побудовані експериментальні криві розгону по каналах від основного і внутрішнього збурень.
4. Всі розрахунки і графіки, пов'язаних з визначенням оптимальних параметрів динамічного налаштування ПІ-регулятора.
5. Процеси регулювання АСР по різних каналах збурень.
6. Виводи по лабораторній роботі.

2.10. Контрольні питання

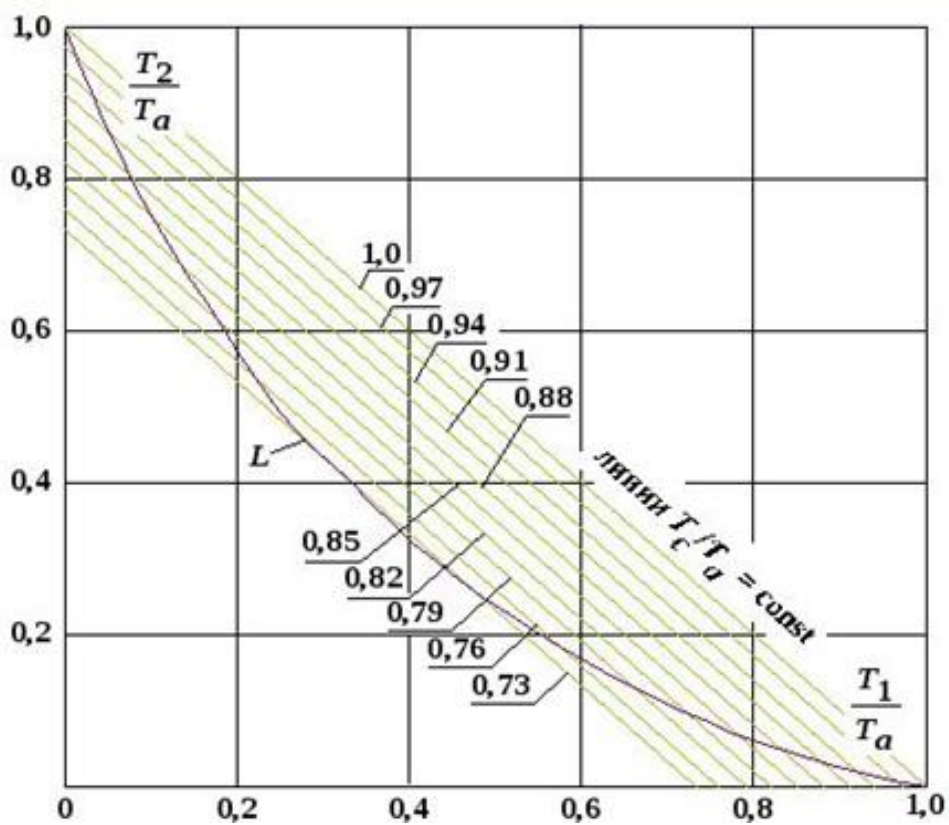
1. Показати на принциповій схемі і лабораторній установці з яких елементів складається АСР температури електричної печі.
2. Які прилади і за допомогою яких вимикачів необхідно включити в роботу об'єкт регулювання і автоматичний регулятор.
3. Перерахувати різні способи нанесення збурень на об'єкт регулювання і АСР.
4. Як користуватися номограмою Додаток Б.
5. Вкажіть, яким способом встановлювати параметри динамічного налаштування регулятора при виконанні цієї роботи.
6. Як обробляються перехідні характеристики об'єкта для складання динамічної моделі об'єкта управління?
7. Що розуміють під КЧХ, АЧХ та ФЧХ?
8. Які показники якості процесів регулювання Ви знаєте?

Перелік посилань

1. Балакирев Б.С., Дудников Е.Г., Цирлин А.М. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. М: Энергия, 1977.– 270 с.
2. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами (для студентов вузов).– М: Энергоатомиздат, 1985.– 385 с.
3. Георгієв О.В. Конспект лекцій з курсу «Автоматизовані системи керування теплоенергетичними процесами»
4. Плетнев Г.П. Автоматизированные системы управления объектами тепловых электростанций. – М.: Изд-во МЭИ, 1995.– 352 с.



Графік перехідної функції об'єкту



Номограма для визначення сталих часу T_1 та T_2 об'єкта (за Ольденбургом і Сарторіусом)

Таблиця В.1 – Завдання на лабораторні роботи №1 та 2 для об'єктів регулювання №1 та 2

Об'єкт регулювання	Початкове значення напруги в електричній печі, В	Кінцеве значення напруги в електричній печі, В
1	100 (105)	120 (125)
2	105 (95)	130 (120)

Таблиця В.2 – Завдання на лабораторні роботи №1 та 2 для об'єктів регулювання №3 та 4

Об'єкт регулювання	Початкове положення регулюючого органу, %УП	Кінцеве положення регулюючого органу, %УП
3	17 (18)	23 (25)
4	30 (35)	55 (65)

Примітка: В дужках наведений альтернативний варіант завдання

Експериментальні перехідні характеристики об'єктів регулювання

Варіант № 1

Таблиця Г.1

t, с	0	2	5	9	14	19	24	29	34	39	44	49	54	59	64	69	74	79	84
X _{вих} (t)	0	0	0	0,01	0,02	0,04	0,08	0,09	0,11	0,14	0,17	0,2	0,23	0,26	0,29	0,32	0,35	0,38	0,41

Продовження таблиці Г.1

t, с	89	94	99	104	109	114	119	129	139	149	159	163	179	189	199	209	219	230	242
X _{вих} (t)	0,44	0,47	0,5	0,53	0,55	0,58	0,6	0,65	0,69	0,73	0,77	0,8	0,83	0,86	0,89	0,91	0,93	0,95	0,97

Продовження таблиці Г.1

t, с	249	264	281	301	337	382	417	456	522	624				
X _{вих} (t)	0,98	1	1,02	1,04	1,07	1,09	1,1	1,11	1,12	1,12				

Варіант № 2

Таблиця Г.2

t, с	0	9	20	38	50	62	80	98	110	128	140	154	170	200	225	270	305	344	485	630
X _{вих} (t)	0	0,01	0,02	0,07	0,1	0,14	0,19	0,23	0,26	0,29	0,31	0,33	0,35	0,38	0,4	0,42	0,43	0,44	0,45	0,45

Варіант № 3

Таблиця Г.3

t, с	0	2	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41	45	49	53	57	61	65	69
X _{вих} (t)	0	0	0,01	0,02	0,04	0,07	0,1	0,14	0,18	0,22	0,26	0,31	0,36	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,64

Продовження таблиці Г.3

t, с	73	77	81	89	97	105	109	117	125	133	141	149	153	161	185	177	189	201	213
X _{вих} (t)	0,69	0,74	0,78	0,87	0,98	1,04	1,08	1,15	1,22	1,28	1,34	1,4	1,42	1,47	1,49	1,56	1,61	1,66	1,71

Продовження таблиці Г.3

t, с	225	237	245	260	277	297	325	356	398	449	488	578	623	
X _{вих} (t)	1,74	1,78	1,8	1,83	1,86	1,89	1,92	1,94	1,97	1,98	1,99	2	2	

Варіант № 4

Таблиця Г.4

t, с	0	2	5	9	14	41	76	104	132	164	194	248	299	338	404	453	534	593	624
X _{вих} (t)	0	0	0	0	0,01	0,06	0,14	0,2	0,25	0,29	0,32	0,38	0,37	0,38	0,39	0,39	0,4	0,4	0,4

Варіант № 7

Таблиця Г.7

t, с	0	2	5	9	14	19	24	29	34	39	44	49	54	59	64	69	74	79	84
X _{вих} (t)	0	0	0	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,13	0,15	0,18	0,21	0,23	0,26	0,29	0,32	0,34	0,37

Продовження таблиці Г.7

t, с	89	94	99	109	119	129	139	149	159	169	179	189	209	221	234	249	287	341	411	650
X _{вих} (t)	0,39	0,42	0,44	0,49	0,54	0,58	0,61	0,65	0,68	0,71	0,74	0,76	0,8	0,82	0,84	0,86	0,9	0,93	0,96	0,97

Варіант № 8

Таблиця Г.8

t, с	0	2	5	9	14	20	27	34	41	48	55	62	69	76	83	90	97	104	111
X _{вих} (t)	0	0	0	0	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,1	0,12	0,14	0,16	0,17	0,19	0,2	0,22	0,23

Продовження таблиці Г.8

t, с	118	125	132	146	162	181	204	231	262	297	336	379	650	
X _{вих} (t)	0,24	0,26	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,39	0,4	