

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування

Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики та
водного господарства
Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-
інтегрованих технологій

04-03-454М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять № 1–4 та самостійної роботи
з навчальної дисципліни
«Автоматизація технологічних процесів»
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
за освітньо-професійною програмою «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка»
денної та заочної форми навчання

Рекомендовано
науково-методичною радою
з якості ННІ ЕАВГ
Протокол № 7 від 25.02.2025 р.

Рівне – 2025

Методичні вказівки до практичних занять № 1–4 та самостійної роботи з дисципліни «Автоматизація технологічних процесів» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» денної та заочної форми навчання. [Електронне видання] / Клепач М. І. – Рівне : НУВГП, 2025. – 38 с.

Укладач: Клепач М. І., к.ф.-м.н., доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Відповідальний за випуск: Древецький В. В., д.т.н., професор кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Керівник групи забезпечення спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» Христюк А. О. к.т.н., доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

© М. І. Клепач, 2025

© НУВГП, 2025

Зміст

Практична робота 1. Розрахунок статичних і динамічних характеристик об'єктів регулювання.....	4
Практична робота 2. Розрахунок оптимальних параметрів PID-регуляторів експериментальним методом...	12
Практична робота 3. Розрахунок оптимальних параметрів PID-регуляторів методом незгасаючих коливань.....	19
Практична робота 4. Розрахунок комбінованої автоматичної системи регулювання.....	26

Практична робота 1. Розрахунок статичних і динамічних характеристик об'єктів регулювання.

Мета: аналіз теплообмінного апарата як об'єкта автоматизації, розрахунок параметрів передавальних функцій та побудова перехідних характеристик теплообмінного апарата.

Теплообмінники - це апарати, в яких відбувається теплообмін між гріючим середовищем (теплоносієм) і середовищем яке нагрівають (продуктом).

У теплообмінниках можуть виконуватися різні теплові процеси: підігрів і охолодження – без зміни фазового стану середовищ; нагрівання, охолодження, випаровування, конденсація і комбіновані процеси – зі зміною фазового стану середовищ.

Залежно від призначення теплообмінні апарати поділяють на підігрівники, випарники, конденсатори, регенератори, парогенератори, кип'ятильники, дефлегматори та ін. За конструкцією теплообмінники поділяються на кожухотрубні, пластинчасті, труба в трубі і інші.

Аналіз теплообмінних апаратів розглянемо на прикладі найбільш поширеного у промисловості кожухотрубного теплообмінника (рис.1.1). На вхід теплообмінника подається технологічний потік (продукт), який проходить по трубах теплообмінника і нагрівається за допомогою теплоносія. Теплоносій проходить по міжтрубному простору і виходить в нижній частині теплообмінника.

Технологічний процес в цьому випадку зводиться до : нагрівання технологічного потоку масової витрати G до температури $\theta^{вих}$ теплоносієм витратою G_m із

незмінним агрегатним станом. Показником ефективності є стабільність $\theta^{вих}$, а мета управління - підтримування заданого значення $\theta^{вих} = \theta_{зд}$.

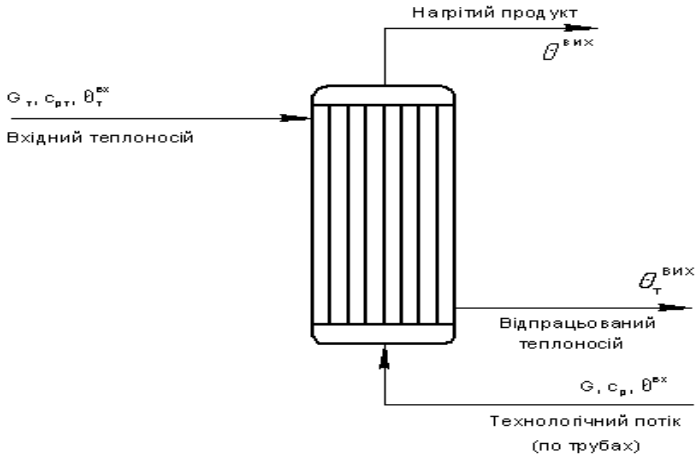


Рис.1.1. Схема кожухотрубного теплообмінника.

На рисунку 1.2. показано схему руху теплоносія і продукту в теплообміннику.

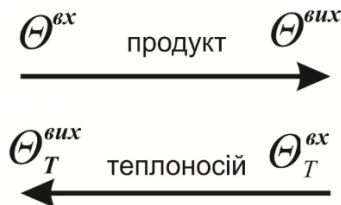


Рис. 1.2. Схема руху теплоносія і продукту.

В інженерній практиці прийняті такі припущення:

- Вважати теплообмінник - об'єктом із зосередженими параметрами.
- Втратами теплоти в навколишнє середовище (2..3)% - нехтувати.
- Втратами теплоти в трубах - нехтувати.

Графіки зміни температур теплоносія і продукту в теплообміннику наведено на рисунку 1.3.

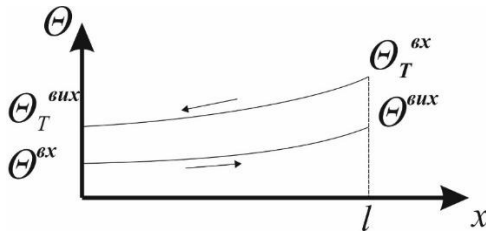


Рис. 1.3. Графік зміни температур в теплообміннику.

За таких умов рушійна сила процесу теплообміну:

$$\Delta\theta_{CP} = \frac{\Delta\theta_{II} + \Delta\theta_K}{2}. \quad (1.1)$$

Початкова $\Delta\theta_{II}$ і кінцева $\Delta\theta_K$ різниці температур рівні

$$\Delta\theta_{II} = \theta_T^{вих} - \theta^{вх}, \quad \Delta\theta_K = \theta_T^{вх} - \theta^{вих}.$$

Теплове навантаження апарата знаходять за формулою:

$$Q = KS\Delta\theta_{cp} \left(\frac{d\theta}{c} \right), \quad (1.2)$$

де K – коефіцієнт теплопередачі, S – площа поверхні теплового контакту.

Схема зв'язків між технологічними параметрами об'єкта показана на рисунку 1.4.

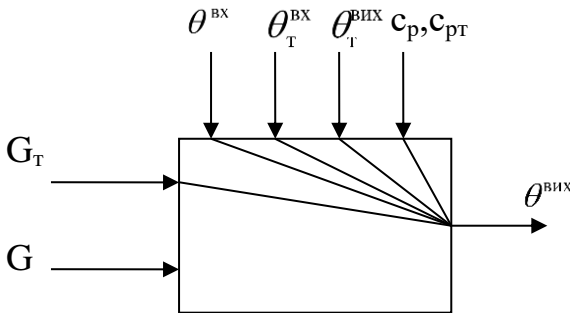


Рис. 1.4. Інформаційна схема об'єкта.

Схема зв'язків між технологічними параметрами об'єкта (інформаційна схема об'єкта) використовується для вибору можливих каналів регулювання та збурень при автоматизації апаратів.

Складемо рівняння динаміки для продукту на основі закону збереження енергії в диференціальній формі

$$\rho V c_p \frac{d\theta^{\text{вих}}}{dt} = G_T c_{pT} (\theta_T^{\text{вх}} - \theta_T^{\text{вих}}) - G c_p (\theta^{\text{вих}} - \theta^{\text{вх}}), \quad (1.3)$$

де: ρ – густина продукту; V – об'єм трубного простору теплообмінника; c_p , c_{pT} – питомі теплоємності продукту і теплоносія при постійному тиску; G , G_m – масові витрати продукту і теплоносія; $\theta_T^{\text{вх}}$, $\theta_T^{\text{вих}}$ і $\theta^{\text{вх}}$, $\theta^{\text{вих}}$ – температури теплоносія і продукту на вході і виході з теплообмінника.

Приведемо рівняння динаміки до нормалізованого вигляду

$$\rho V c_p \frac{d\theta^{\text{вих}}}{dt} + G c_p \theta^{\text{вих}} = G_T c_{pT} (\theta_T^{\text{вх}} - \theta_T^{\text{вих}}) + G c_p \theta^{\text{вх}}$$

На основі цього рівняння передавальна функція по каналу регулювання $G_T \rightarrow \theta^{\text{вих}}$ рівна

$$W(s) = \frac{K_o}{T_o s + 1}, \quad (1.4)$$

а постійна часу об'єкта

$$T_o = \frac{\rho \cdot V}{G^0}; \quad (1.5)$$

та коефіцієнт передачі об'єкта

$$K_o = \frac{G_m^0 \cdot c_{pT} \cdot (\theta_m^{\text{вх}0} - \theta_m^{\text{вих}0})}{G^0 \cdot c_p \cdot \theta^{\text{вих}0}}. \quad (1.6)$$

Постійне запізнення виникає в протяжному трубопроводі при транспортуванні рідини від регулюючого органу до апарату

$$\tau = \frac{\rho_n \cdot V_{\text{труб}}}{G_m}, \quad (1.7)$$

де $V_{\text{труб}}$ – об'єм трубопроводу.

При врахуванні транспортного запізнення передавальна функція теплообмінника виражається аперіодичною ланкою із запізненням

$$W_o(s) = \frac{\Delta\theta^{\text{ВВХ}}(s)}{\Delta G_T(s)} = \frac{K_o}{T_o s + 1} e^{-\tau s} \quad (1.8)$$

Передавальній функції (1.8) відповідають вирази для перехідної характеристики об'єкта

$$\begin{cases} y(t) = K_o \left(1 - e^{-\frac{t-\tau}{T_o}} \right) & \text{при } t \geq \tau \\ y(t) = 0 & \text{при } t < \tau \end{cases} \quad (1.9)$$

З рівняння динаміки (1.3) легко отримати рівняння статички, для цього необхідно прирівняти до нуля усі похідні, в результаті отримаємо

$$G_T c_{\text{PT}} (\theta_T^{\text{ВВХ}} - \theta_T^{\text{ВВХ}}) = G c_p (\theta^{\text{ВВХ}} - \theta^{\text{ВВХ}}) \quad (1.10)$$

Рівняння статички можна розв'язати відносно $\theta^{\text{ВВХ}}$ в явному виді:

$$\theta^{\text{ВВХ}} = \frac{G c_p (\theta^{\text{ВВХ}} - \theta^{\text{ВВХ}})}{G c_p} + \theta^{\text{ВВХ}} \quad (1.11)$$

З рівняння (1.9) слідує, що:

- Статична характеристика лінійна за каналами: $\theta^{\text{ВВХ}}, \theta_T^{\text{ВВХ}}, \theta_T^{\text{ВВХ}}, G_T \rightarrow \theta^{\text{ВВХ}}$.
- Нелінійна - по каналу $G \rightarrow \theta^{\text{ВВХ}}$.

Лінеаризоване представлення статичної характеристики розкладанням в ряд Тейлора в околі робочої точки:

$$\Delta\theta^{\text{ВВХ}} = \left(\frac{\partial\theta^{\text{ВВХ}}}{\partial G_m} \right)^0 \Delta G_m + \left(\frac{\partial\theta^{\text{ВВХ}}}{\partial G} \right)^0 \Delta G + \left(\frac{\partial\theta^{\text{ВВХ}}}{\partial\theta^{\text{ВВХ}}} \right)^0 \Delta\theta^{\text{ВВХ}} +$$

$$+ \left(\frac{\partial \theta^{вих}}{\partial \theta_m^{вх}} \right)^0 \Delta \theta_m^{вх} + \left(\frac{\partial \theta^{вих}}{\partial \theta_m^{вх}} \right)^0 \Delta \theta_m^{вих} ,$$

або

$$\Delta \theta^{вих} = K_1 \Delta G_T + K_2 \Delta G + K_3 \Delta \theta^{вх} + K_4 \Delta \theta_T^{вх} + K_5 \Delta \theta_m^{вих}$$

Це рівняння виражає прирости вихідної змінної через прирости всіх можливих вхідних змінних.

Статичні характеристики використовуються для аналізу лінійних зон характеристик та можливих нелінійностей в об'єктах. За статичною характеристикою об'єкта можна визначити також зону нечутливості; зону насичення (обмеження); коефіцієнти передачі об'єкта за каналами керування та збурення.

Завдання 1.

Знайти передавальні функції теплообмінника (додаток 1) і трубопроводу від регулюючого органу до теплообмінника (додаток 2), включаючи регулюючий орган. Побудувати перехідну характеристику об'єкта. Переконайтеся у відповідності графічної побудови розрахованим параметрам.

Вихідні дані для розрахунку варіант №0.

Параметри теплообмінника

№	ρ - густина продукт $y, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	V - об'єм трубного простору , м^3	G_0 - масова витрата продукту, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$\theta_0^{вих}$ - темпе- ратура продукту , $^{\circ}\text{C}$	$\theta_0^{вх}$ - те мпе- ратура продукту , $^{\circ}\text{C}$
0	820	0.01	0.05	90	20

Параметри трубопроводу

	$V_{\text{тр}}$ - об'єм трубопроводу, м^3	ρ - густина теплоносія $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	G_T - витрата теплоносія, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$\nabla \mu$ - переміще ння РО, %
0	0.0016	1000	0,02	100

(варіант вибирається за другою цифрою у списку групи)

Рішення

Знаходимо постійну часу теплообмінника відповідно до варіанту №0

$$T_0 = \frac{\rho \cdot V}{G^0} = \frac{820 \cdot 0.01}{0.05} = 164 \text{ с}$$

Коефіцієнт передачі теплообмінника

$$K_T = \frac{\Delta \theta}{\nabla G_T} = \frac{\theta_0^{\text{вих}} - \theta_0^{\text{вх}}}{G_T} = \frac{90 - 20}{0.02} = 3500 \frac{\text{°C} \cdot \text{с}}{\text{кг}}$$

Зміна номінальної витрати від 0 до $3500 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ забезпечується переміщенням регулюючого органу від 0 до 100%. У такому разі, коефіцієнт передачі регулюючого органу

$$K_\mu = \frac{\Delta G_T}{\nabla \mu} = \frac{0.02}{100} = 0.0002 \frac{\text{кг}}{\% \text{РО} \cdot \text{с}}$$

Загальний коефіцієнт передачі об'єкта

$$K_o = K_T K_\mu = 0.0002 \cdot 3500 = 0.7 \frac{\text{°C}}{\% \text{РО}}$$

За даними таблиці 1.2 знаходимо транспортне запізнення об'єкта

$$\tau = \frac{\rho_T \cdot V_{\text{труб}}}{G_T} = \frac{1000 \cdot 0.0016}{0.02} = 80 \text{ с}$$

Остаточно, передавальну функцію отримуємо у вигляді

$$W_o(s) = \frac{0.7}{164s + 1} e^{-80s}$$

Вирази для перехідної характеристики заданого варіанта

$$\begin{cases} y(t) = 0.7 \left(1 - e^{-\frac{t-80}{164}} \right) & \text{при } t \geq 80 \\ y(t) = 0 & \text{при } t < 80 \end{cases}$$

Графік перехідної характеристики розрахованої за отриманими виразами наведено на рисунку 1.5.

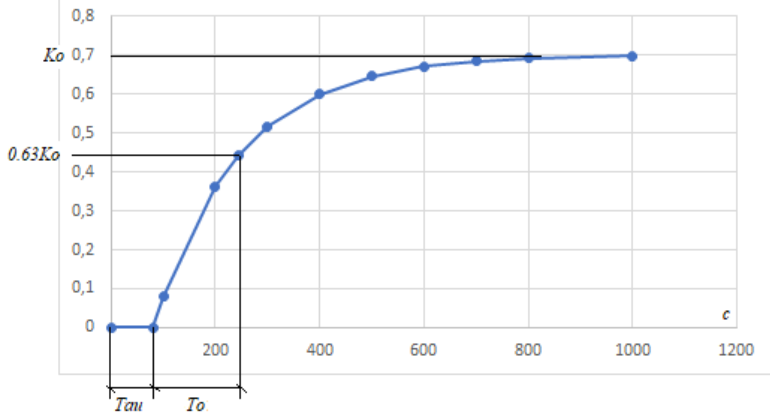


Рис.1.5. Перехідна характеристика об'єкта.

З рисунка видно, що дійсно $K_0=0.7 \text{ } ^\circ\text{C}/\% \text{PO}$, $\tau=80 \text{ c}$ і $T_0 = 244-80 = 164 \text{ c}$. Отже, за допомогою додаткових побудов за перехідною характеристикою можна ідентифікувати об'єкт, тобто визначити структуру та параметри передавальної функції.

Контрольні запитання

1. Яке призначення теплообмінників?
2. Як визначається рушійна сила процесу теплообміну?
3. Якими методами характеризують динамічні властивості об'єктів?
4. Які властивості об'єктів визначають за їх статичними характеристиками?
5. Які параметри об'єктів можна знайти за їх перехідними характеристиками?

Практична робота 2. Розрахунок оптимальних параметрів PID-регуляторів експериментальним методом.

Мета заняття — засвоїти експериментальний метод знаходження параметрів ПІД-регуляторів на основі експериментальної кривої розгону об'єкта.

Експериментальний (формульний) метод ґрунтується на використанні параметрів кривої розгону ОР визначених експериментально. Експеримент розпочинається з того, що здійснюється ступінчаста зміна положення регулюючого органу на 15...20% РО (ходу регулюючого органу). Далі в процесі експерименту фіксують значення регульованої величини через певні проміжки часу. В результаті будують криву розгону об'єкта (рис.2.1). На етапі пуско-налагоджувальних робіт в експерименті можуть бути задіяні змонтовані технічні засоби такі як, ручний задавач, контрольно-вимірювальні прилади чи SCADA-система.

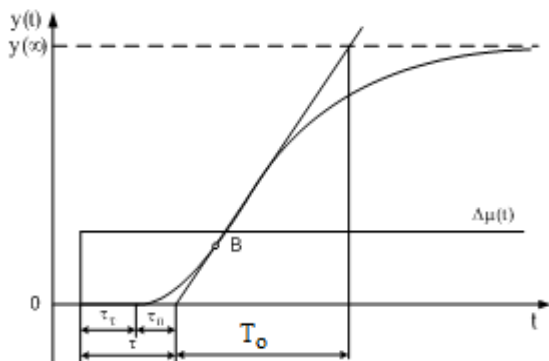


Рис. 2.1. Крива розгону об'єкта управління.

При такій формі кривої розгону об'єкт ідентифікують диференціальним рівнянням першого порядку, а

передавальну функцію об'єкта приймають у вигляді аперіодичної ланки першого порядку із запізненням *FOPDT - first order plus delay time model* .

$$W_o(s) = \frac{K_o}{T_o s + 1} e^{-\tau s} \quad (2.1)$$

В точці перегину *B* (рис.2.1) ставиться дотична, далі з графіка визначаються стала часу T_o та час запізнення τ Коефіцієнт передачі об'єкта знаходять за формулою

$$K_o = \frac{\Delta y}{\Delta \mu} . \quad (2.2)$$

Коефіцієнт передачі K_o має розмірність *т.о.в.у/%РО* . де через *т.о.в.у* позначено технологічні одиниці вимірювання регульованої величини.

Співвідношення запізнення і постійної часу об'єкта служить для вибору алгоритму роботи регулятора:

- позиційний регулятор при $\frac{\tau}{T_o} < 0.2$;
- неперервний закон регулювання при $0.2 \leq \frac{\tau}{T_o} \leq 0.8$;
- імпульсне або спеціальне регулювання при $\frac{\tau}{T_o} \geq 0.8$.

Оптимальні параметри налаштування регулятора знаходять за визначеними із кривої розгону параметрами об'єкта. Використовуючи дані про постійну часу, постійне запізнення і коефіцієнт передачі об'єкта оптимальні параметри регуляторів розраховують за формулами наведеними табл.2.1. Вони забезпечують перехідний процес з мінімальним часом регулювання.

Таблиця 2.1.

Оптимальні настроювання регуляторів за експериментальним методом

Регулятор	Оптимальне настроювання		
	$K_{p,on}$	$T_{i,on}$	$T_{d,on}$
П	$\frac{0.3T_o}{K_o\tau}$	–	–
ПІ	$\frac{0.6T_o}{K_o\tau}$	$0,6T_o$	–
ПІД	$\frac{0.7T_o}{K_o\tau}$	$2,4\tau$	$0,4\tau$

Завдання 2. За результатами ідентифікації теплообмінника як об'єкта автоматизації проведеного в прикладі 1 для заданого варіанта експериментальним методом знайти оптимальні настроювання ПІД регулятора.

Рішення:

Для об'єкта з передавальною функцією (див. приклад 1)

$$W_o(s) = \frac{0.7}{164s + 1} e^{-80s}$$

проведемо віртуальний експеримент в моделюючому середовищі Simulink (рис.2.2).

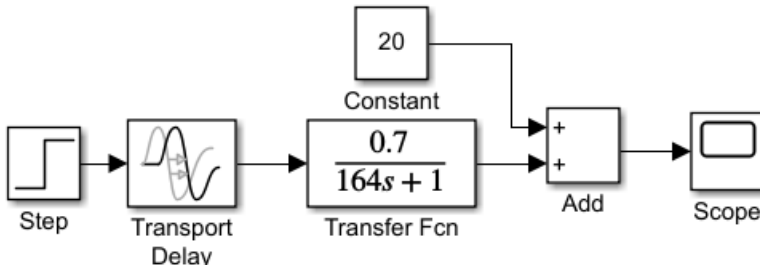


Рис.2.2. Схема дослідження об'єкта.

Результати віртуальних експериментальних досліджень теплообмінника як об'єкта управління при

20% переміщенні регулюючого органа у вигляді кривої розгону наведено на рисунку 2.3. Константа 20 враховує початкове значення температури в теплообміннику. Крива розгону отримується при ступінчастій вхідній дії відмінній від одиниці.

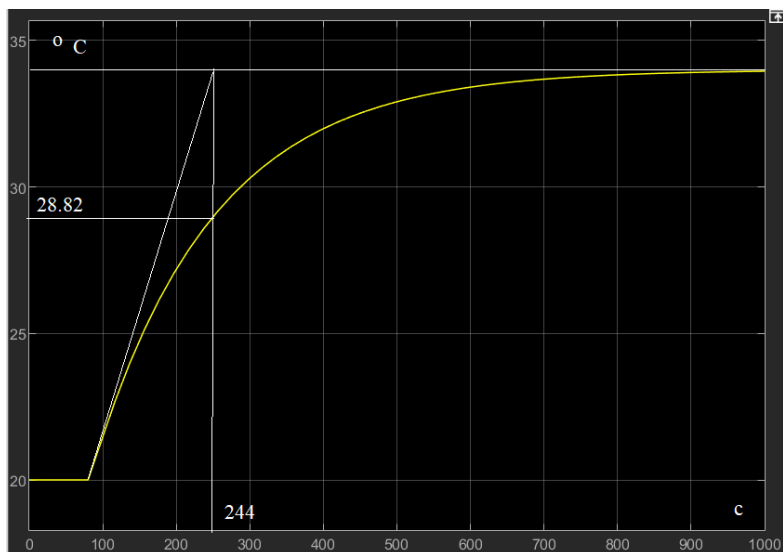


Рис.2.3. Крива розгону при 20% ступінчастій вхідній дії.

Провівши дотичну на початку наростання характеристики до перетину з усталеним значенням (34°C) опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис і отримуємо інтервал часу 244 с від початку експерименту. Постійну часу знайдемо коли з цього інтервалу вирахуємо запізнення 80 с, тобто $T_o=244-20=164$ с. Коефіцієнт передачі знаходимо діленням діапазону зміни кривої на величину вхідної дії $K_o=14/20=0.7$.

За формулами наведеними в табл.2.1 на основі визначених параметрів об'єкта знаходимо значення оптимальних налаштувань ПІД регулятора:

Коефіцієнт передачі регулятора

$$K_{pon} = \frac{0.7T_o}{K_o\tau} = \frac{0.7 \cdot 164}{0.7 \cdot 80} = 2.05 \frac{\%PO}{^\circ C}.$$

Постійна часу інтегруючої складової регулятора (час ізодрома)

$$T_{ion} = 2.4\tau = 2,4 \cdot 80 = 192 \text{ с}.$$

Коефіцієнт передачі при диференціюючій складовій (час випередження)

$$T_{доп} = 0.4\tau = 0,4 \cdot 80 = 32 \text{ с}.$$

Складемо Simulink модель замкнутої системи автоматичного регулювання (рис.2.3)

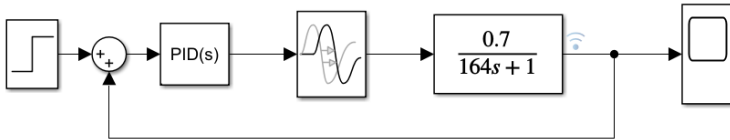


Рис.2.4.Схема моделювання АСР.

В діалоговому вікні блока PID-регулятора вибираємо структуру регулятора типу Ideal (рис.2.5)

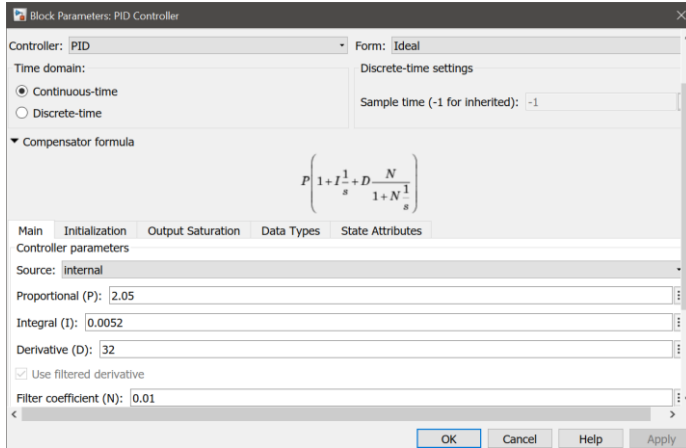


Рис.2.5. Блок PID-регулятора.

Інтегральну складову регулятора знаходимо за формулою

$$I = \frac{1}{T_{ion}} = \frac{1}{192} = 0.0052.$$

Результати моделювання наведено на рис.2.6

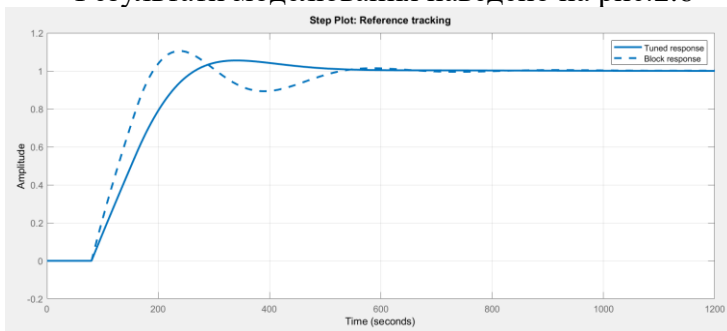


Рис.2.6. Перехідні характеристика розрахованої системи - пунктирна лінія і оптимізованої - суцільна лінія.

В табл. 2.2 зведено параметри регуляторів і прями показники якості.

Таблиця 2.2

Параметри регуляторів і прямі показники якості

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	1.5748	2.05
I	0.0062258	0.0052
D	5.9275	32
N	0.014296	0.01
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	133 seconds	84.4 seconds
Settling time	468 seconds	501 seconds
Overshoot	5.5 %	10.5 %
Peak	1.05	1.11
Gain margin	9.18 dB @ 0.0202 rad/s	6.21 dB @ 0.0219 rad/s
Phase margin	60 deg @ 0.00673 rad/s	63.8 deg @ 0.00875 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Аналіз результатів показує, що параметри регулятора визначені експериментальним методом забезпечують показники якості перехідного процесу в замкнутій системі близькі до оптимальних, отриманих при оптимізації системи із використання Automated tuning з блоку PID-регуляра в програмному пакеті Simulink.

Контрольні запитання.

1. Які вимоги ставляться до якості роботи промислових АСР?
2. Якими передаточними функціями ідентифікують об'єкт при експериментальному методі оптимізації?
3. Які умови проведення експерименту на об'єкті управління?
4. Які недоліки і переваги експериментального методу оптимізації АСР?
5. Які критерії вибору закону регулювання в АСР за відхиленням?

Практична робота 3. Розрахунок оптимальних параметрів PID-регуляторів методом незгасаючих коливань.

Мета заняття — засвоїти методи параметричної оптимізації одноконтурних систем регулювання за відхиленням метод незгасаючих коливань.

Метод незгасаючих коливань Циглера – Нікольса (Ziegler -Nichols) є одним із перших розрахункових методів. При відомій передавальній функції еквівалентного об'єкта $W_{eo}(s)$ оптимальні настроювання регуляторів можна знайти за параметрами незгасаючих коливань, які виникають у автоматичній системі регулювання з пропорційним регулятором. За критерієм стійкості Найквіста автоматична система регулювання знаходиться на межі стійкості, тобто в ній виникають коливання регульованої величини з постійними амплітудою і частотою, якщо годограф амплітудно фазової частотної характеристики розімкнутої системи проходить через точку з координатами $(-1, j0)$. Для одноконтурної АСР з комплексною частотною характеристикою регулятора $W_{pez}(j\omega)$ і еквівалентного об'єкта $W_{eo}(j\omega)$ умова виникнення автоколивань має вигляд

$$W_{pez}(j\omega)W_{eo}(j\omega) = -1, \quad (3.1)$$

або в експоненціальній формі

$$A_{pez}(\omega)e^{j\varphi_{pez}(\omega)}A_{eo}(\omega)e^{j\varphi_{eo}(\omega)} = -1. \quad (3.2)$$

Комплексне рівняння (3.2) можна замінити системою двох скалярних рівнянь виду

$$\begin{cases} A_{pez}(\omega_{кр})A_{eo}(\omega_{кр}) = 1 \\ \varphi_{pez}(\omega_{кр}) + \varphi_{eo}(\omega_{кр}) = \pi \end{cases} \quad (3.3)$$

На першому етапі розрахунку приймають, що регулятор реалізує пропорцій закон регулювання. Частотна характеристика такого регулятора

$$W_{pez}(j\omega) = A_{pez}(\omega_{кр})e^{j\Phi_{pez}(\omega_{кр})} = K_{кр} \quad (3.4)$$

У цьому разі система рівнянь (3.3) спрощується:

$$\begin{cases} K_{кр} = \frac{1}{A_{eo}(\omega_{кр})} \\ \varphi_{eo}(\omega_{кр}) = \pi \end{cases} \quad (3.5)$$

Далі із другого рівняння системи (3.5) знаходять критичну частоту коливань $\omega_{кр}$. Підставивши цю частоту у перше рівняння системи отримують значення критичного коефіцієнта передачі регулятора $K_{кр}$.

На другому етапі за знайденими критичними параметрами $K_{кр}$ і $\omega_{кр}$ розраховують оптимальні значення параметрів регулятора за формулами, наведеними в табл.3.1.

Таблиця.3.1

Оптимальні настроювання регуляторів

Регулятор	Оптимальне настроювання		
	$K_{p,on}$	T_{ion}	T_{don}
II	$0,5K_{кр}$	–	–
III	$0,45K_{кр}$	$T_{кр}/1.2$	–
ПД	$0,6K_{кр}$	$T_{кр}/2$	$T_{кр}/8$

Як і більшість розглянутих в теорії методів розрахунку параметрів систем регулювання, метод незгасаючих коливань орієнтований на класичну чи паралельну форми ПД-алгоритму. Однак, сучасні контролери можуть мати різні модифікації структури ПД-алгоритму, що потребує перерахунку параметрів регуляторів. Крім того, реальні регулятори можуть містити додаткові блоки внутрішніх фільтрів, динамічного і статично балансування, обмеження сигналу та захисту від інтегрального насичення, які

суттєво впливають на якість перехідного процесу.

Завдання.3. Знайти оптимальні значення параметрів ПД-регулятора методом незгасаючих коливань (Циглера- Нікольса), якщо передавальна функція теплообмінника за каналом керування для заданого варіанту отримана в прикладі 1 має вигляд

$$W_{eo}(s) = \frac{0.7}{164s+1} e^{-80s}.$$

Розв'язання:

За передавальною функцією об'єкта знаходимо його комплексну частотну характеристику шляхом підстановки $s = j\omega$

$$W_{eo}(j\omega) = \frac{0.7}{164j\omega+1} e^{-80j\omega}.$$

З комплексної частотної характеристики знаходимо вирази для амплітудно-частотної характеристики об'єкта

$$A_{eo}(\omega) = \frac{k}{\sqrt{T_o^2 \omega^2 + 1}} = \frac{0.7}{\sqrt{164^2 \omega^2 + 1}}$$

і фазово-частотної характеристики об'єкта

$$\varphi_{eo}(\omega) = -(\arctg T_o \omega + \tau \omega) = -(\arctg 164\omega + 80\omega)$$

На першому етапі приймаємо, що регулятор реалізує пропорційний закон регулювання, тобто є П-регулятором. На основі критерію стійкості Найквіста, запишемо умови знаходження системи регулювання на межі стійкості і виникнення незгасаючих коливань

$$\begin{cases} K_{кр} A_{eo}(\omega_{кр}) = K_{кр} \frac{0.7}{\sqrt{164^2 \omega_{кр}^2 + 1}} = 1 \\ \varphi(\omega_{кр}) = -(\arctg 164\omega_{кр} + 80\omega_{кр}) = -\pi \end{cases}$$

Із другого рівняння системи рівнянь методом послідовних наближень знаходимо значення критичної

частоти $\omega_{кр}$. Це рівняння трансцендентне тому розв'язок знаходимо графічним способом. Для цього покроково збільшуємо частоту, розраховуємо і будуємо таблицю залежності $\varphi(\omega)$ та знаходимо частоту при якій фазова характеристика пересікає рівень 3.14 рад. (табл.3.2).

Таблиця 3.2.

ω, c^{-1}	0	0.01	0.02	0.022	0.0228	0.0229
$\varphi(\omega),$ <i>рад</i>	0	1.82	2.87	3.06	3.13	3.14

Із таблиці видно, що критичне значення частоти складає $\omega_{кр} = 0.0229 c^{-1}$ при $\varphi(\omega) = \pi$ рад.

Підставляючи знайдене значення критичної частоти в перше рівняння системи знаходимо критичне значення коефіцієнта передачі П-регулятора для заданого об'єкта

$$K_{кр} = \frac{\sqrt{164^2 * 0.0229^2 + 1}}{0.7} = 5.53$$

Період критичних коливань перераховуємо за значенням критичної частоти

$$T_{кр} = \frac{2\pi}{\omega_{кр}} = \frac{6.28}{0.0229} = 274.24 c$$

На рисунку 3.1. наведено перехідну характеристику системи автоматичного регулювання при критичному значенні коефіцієнта передачі.

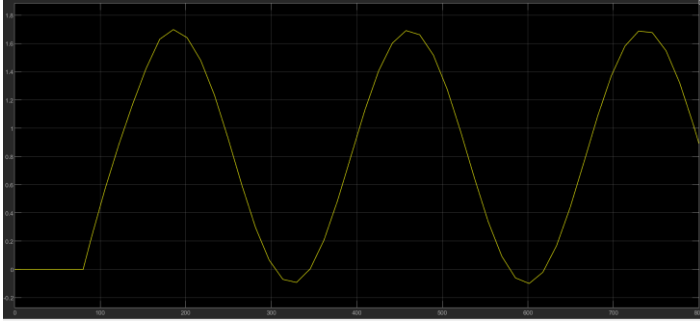


Рис.3.1. Режим незгасаючих коливань в АСР.

На другому етапі за отриманими критичними значеннями $K_{кр} = 5.53$ та періодом $T_{кр} = 274.24$ знаходимо оптимальні параметри настроювання ПІД-регулятора за табличними формулами.

Коефіцієнт передачі пропорційної частини регулятора

$$K_p = 0.6K_{кр} = 0.6 * 5.53 = 3.32$$

Постійна часу інтегрування

$$T_i = \frac{T_{кр}}{2} = \frac{274.24}{2} = 137.12 \text{ c}$$

Постійна часу диференціювання

$$T_d = \frac{T_{кр}}{8} = \frac{274.24}{8} = 34.28 \text{ c}$$

Коефіцієнт при інтегральній складовій

$$I = \frac{1}{T_i} = \frac{1}{137.12} = 0.0073 \text{ c}$$

Перехідні процеси та показники якості розрахованої АСР дослідимо моделюванням в пакеті Simulink

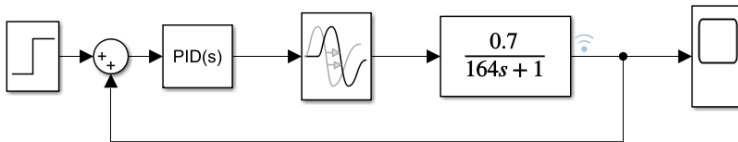


Рис.3.2.Схема моделювання АСР.

Перехідна характеристика АСР з розрахованими параметрами PID-регулятора температури теплообмінника наведена на рисунку 3.3.

З рисунка видно, що перерегулювання у системі більше 40% процентів, що не задовільняє типові вимоги до якості регулювання.

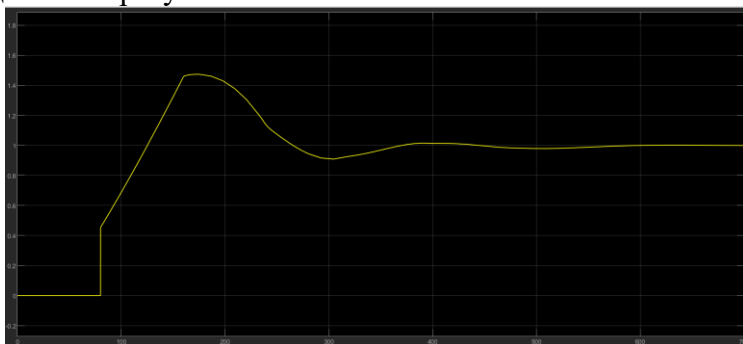


Рис.3.3. Перехідна характеристика розрахованої системи

Для порівняння результатів проведемо оптимізацію даної АСР використовуючи Automated Tuning з блоку PID-регулятора (рис3.4).

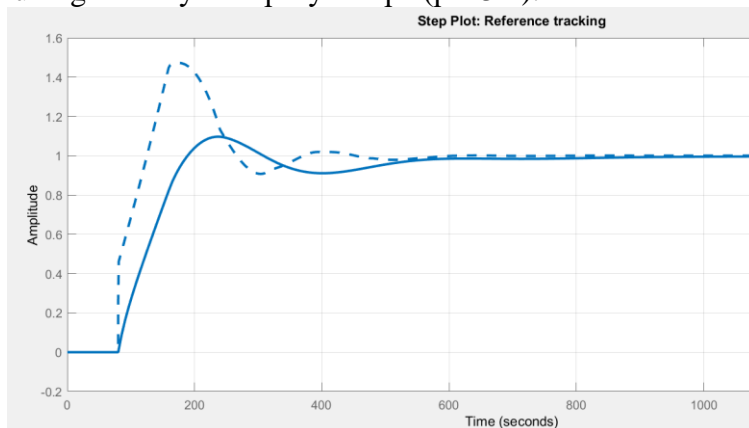


Рис.3.4. Перехідні характеристики розрахованої системи - пунктирна лінія і оптимізованої - суцільна лінія.

Налаштування регуляторів і показники якості зведені в табл.3.1.

Таблиця 3.1

Параметри регуляторів і прямі показники якості

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	2.42	3.32
I	0.0042173	0.0073
D	8.0365	32
N	0.097506	1000
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	83.5 seconds	37.3 seconds
Settling time	564 seconds	524 seconds
Overshoot	9.67 %	47.3 %
Peak	1.1	1.47
Gain margin	6.82 dB @ 0.0228 rad/s	4.88 dB @ 0.0299 rad/s
Phase margin	60 deg @ 0.0093 rad/s	47.3 deg @ 0.013 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Порівняння результатів моделювання перехідних процесів автоматизованої системи регулювання температури до і після оптимізації показують, що розраховані параметри регулятора за критерієм Циглера – Нікольса забезпечують оптимальний час регулювання, але не враховують необхідний запас стійкості., що може призводити до перевищення перерегулювання.

Контрольні запитання

1. На якому критерії стійкості ґрунтується метод незгасаючих коливань?
2. Для якого типу регулятора знаходять критичні параметри в методі незгасаючих коливань?
3. Як за критичними параметрами знаходять оптимальні настроювання регуляторів?
4. Які переваги методу незгасаючих коливань?
5. Які критерії якості забезпечуються цим методом?

Практична робота 4. Комбіновані АСР

Мета заняття — вивчити методику розрахунку комбінованих систем регулювання, розрахувати передавальну функцію компенсатора з умови інваріантності, переконатися в ефективності алгоритму компенсації збурення.

Комбіновані системи регулювання використовують при автоматизації об'єктів, на які діють істотні збурення, які піддаються автоматичному вимірюванню. Існує два способи побудови комбінованих систем автоматичного регулювання. Їх можна будувати подаванням коригуючого сигналу на вхід регулятора, або на вхід виконавчого механізму (рис. 4.1).

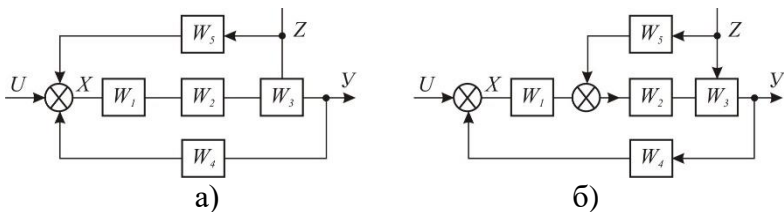


Рис. 4.1. Структурні схеми комбінованої АСР у разі подавання коригуючого сигналу на вхід: а) - регулятора; б) - виконавчого механізму.

Використання коригуючого імпульсу за найсильнішим збуренням дозволяє істотно зменшити динамічну помилку регулювання за умови правильного вибору та розрахунку динамічного пристрою - компенсатора, який формує закон зміни цього впливу.

Основою розрахунку комбінованих систем є принцип інваріантності. Суть цього принципу полягає в тому, що відхилення вихідної координати системи регулювання від заданого значення має тотожно дорівнювати нулю при довільних задавальних або збурюючих впливах. Для виконання принципу

інваріантності необхідні дві умови: ідеальна компенсація всіх збурюючих впливів та ідеальне відтворення сигналу завдання. Очевидно, що досягти абсолютної інваріантності в реальних системах регулювання практично неможливо. Тому, зазвичай, обмежуються частковою інваріантністю відносно найнебезпечніших впливів.

Розглянемо умови інваріантності для розімкненої та замкненої систем регулювання відносно одного збурюючого впливу.

Для розімкненої системи (рис. 4.2) умову інваріантності можна записати у вигляді $y(t) = 0$.

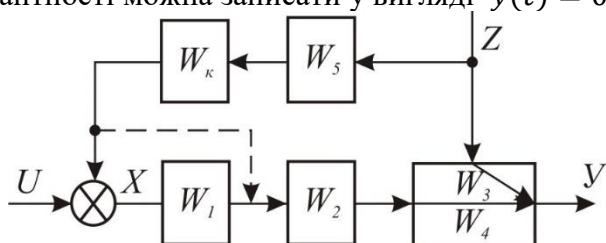


Рис. 4.2. Структурна схема розімкненої комбінованої АСР.

При цьому вважаємо, що задання залишається незмінним $U = const$, а збурюючий сигнал Z діє на вихідну координату Y двома шляхами - по каналу $Z \rightarrow Y$ та по каналу $Z \rightarrow X \rightarrow Y$. В операторній формі умова інваріантності приймає вигляд

$$Y(s) = Z(s)[W_z(s) + W_1(s)W_2(s)W_3(s)W_5(s)W_k(s)] = 0$$
 За наявності збурення $Z(s) \neq 0$ умова інваріантності виконується, якщо

$$W_z(s) + W_1(s)W_2(s)W_3(s)W_5(s)W_k(s) = 0 \quad (4.1)$$

З (4.1) знаходимо передавальну функцію, яку повинен мати компенсатор, щоб виконувалась умова інваріантності

$$W_k(s) = - \frac{W_z(s)}{W_1(s)W_2(s)W_3(s)W_5(s)} \quad (4.2)$$

Таким чином, щоб забезпечити інваріантність системи регулювання відносно заданого збурення необхідно встановити динамічний компенсатор, передавальна функція якого дорівнює відношенню передавальної функції об'єкта по каналу збурення до передавальної функції еквівалентного об'єкта, взятого з протилежним знаком.

Якщо компенсуючий сигнал надходить на вхід виконавчого механізму, то умова інваріантності спрощується

$$W_z(s) + W_2(s)W_3(s)W_5(s)W_k(s) = 0. \quad (4.3)$$

Одержимо умови інваріантності для замкнутої комбінованої АСР, коли компенсуючий сигнал надходить на вхід регулятора. У цьому разі передавальна функція комбінованої системи регулювання по каналу $Z \rightarrow U$ набере вигляду

$$W(s) = \frac{W_z(s) + W_1(s)W_2(s)W_3(s)W_5(s)W_k(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)W_3(s)W_4(s)}. \quad (4.4)$$

Для виконання умови інваріантності замкнутої комбінованої системи необхідно чисельник передавальної функції (4.4) прирівняти до нуля. Легко побачити, що така умова співпадає з рівнянням (4.1). Отже, у разі під'єднанні виходу компенсатора до входу регулятора передавальна функція компенсатора, одержана з умови інваріантності, буде залежати від характеристик не лише об'єкта, а й налаштувань регулятора.

Однією з основних проблем, що виникають у процесі побудови інваріантних систем регулювання, є можливість їх фізичної реалізації, тобто реалізації компенсатора з передавальною функцією, яка відповідає вимогам умов інваріантності. „Ідеальні” компенсатори фізично неможливо реалізувати у двох випадках:

- Якщо час чистого запізнення по каналу регулювання більший, ніж по каналу збурення $\tau_U > \tau_Z$. У цьому разі ідеальний компенсатор реалізувати неможливо, оскільки за допомогою компенсатора не можна зменшити запізнення в об'єкті.
- Якщо в передавальній функції компенсатора степінь полінома в чисельнику перевищує степінь полінома в знаменнику, тобто $m > n$. У цьому випадку компенсатор повинен мати ідеальну диференціальну ланку, яку реалізувати неможливо.

При практичній реалізації комбінованих АСР добиваються наближеної інваріантності системи відносно прийнятого збурення в найнебезпечнішому діапазоні частот. При цьому реальний компенсатор вибирають із таких ланок, які можна найлегше реалізувати. Параметри цих ланок розраховують з умови, щоб частотні характеристики ідеального $W_{ki}(j\omega)$ та реального $W_{kp}(j\omega)$ компенсаторів перебували приблизно в одному і тому самому діапазоні. Тобто, має виконуватись рівність

$$W_{ki}(j\omega) \approx W_{kp}(j\omega) \text{ при } \omega_n \leq \omega \leq \omega_e, \quad (4.5)$$

де ω_n, ω_e - нижнє та верхнє значення частот найнебезпечнішого діапазону смуги пропускання відповідно. При цьому умова наближеної інваріантності має вигляд

$$|Y(j\omega)| \approx 0 \text{ при } \omega_n \leq \omega \leq \omega_e, \quad (4.6)$$

Найчастіше умови наближеної інваріантності комбінованих АСР знаходять для двох частот: нульової $\omega = 0$ та робочої $\omega = \omega_p$, яка відповідає максимуму амплітудно-частотної характеристики - АЧХ (рис.4.3).

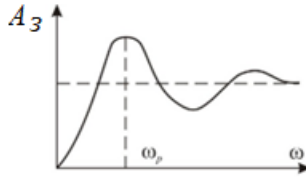


Рис. 4.3. АЧХ замкненої АСР

Розрахунок комбінованої частково інваріантної АСР складається з таких етапів:

- розрахунок налаштувань регулятора та визначення робочої частоти, як в одноконтурній системі регулювання;
- одержання передавальної функції ідеального компенсатора з умови інваріантності та аналіз можливості його реалізації;
- вибір структури реального компенсатора та визначення його параметрів з умови наближеної інваріантності в найістотнішому для системи діапазоні частот.

Структура реального компенсатора також залежить від частотних характеристик ідеального компенсатора в діапазоні частот $(0, \omega_p)$. При цьому компенсатори вибирають як комбінацію найпростіших лінійних ланок: аперіодичної першого порядку чи реальної диференціюючої (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Динамічні характеристики типових компенсаторів

Тип компенсатора	Передавальні функції і частотні характеристики
1. Аперіодична ланка першого порядку	$W(s) = \frac{K}{Ts+1}; \quad A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{T^2\omega^2+1}};$ $\phi(\omega) = -\arctg(T\omega)$
2. Реальна диференціююча ланка	$W(s) = \frac{T_1s}{T_2s+1};$ $A(\omega) = \frac{T_1\omega}{\sqrt{T_2^2\omega^2+1}};$ $\phi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \arctg(T_2\omega)$
4. Інтегро-диференціююча ланка	$W(s) = K \frac{T_1s+1}{T_2s+1};$ $A(\omega) = K \frac{\sqrt{T_1^2\omega^2+1}}{\sqrt{T_2^2\omega^2+1}};$ $\phi(\omega) = \arctg(T_1\omega) - \arctg(T_2\omega)$
4. Немінімально-фазова ланка	$W(s) = K \frac{1-Ts}{1+Ts};$ $A(\omega) = K;$ $\phi(\omega) = -2\arctg T\omega$

Завдання 4.

Знайти передавальну функцію “ідеального” компенсатора з умови інваріантності, якщо передавальна функція об’єкта за каналом збурення $W_{Oz}(s) = \frac{0.1}{20s+1} e^{-10s}$, а передавальна функція об’єкта за каналом керування $W_{Ou}(s) = \frac{0.02}{20s+1} e^{-10s}$. При цьому передавальна функція виконавчого механізму $W_{P0}(s) = 10$, а компенсуючий сигнал подається на вхід виконавчого механізму.

Рішення.

Складемо структурну схему комбінованої автоматичної системи регулювання при подаванні компенсуючого сигналу на вхід регулюючого органу (рис.4.4).

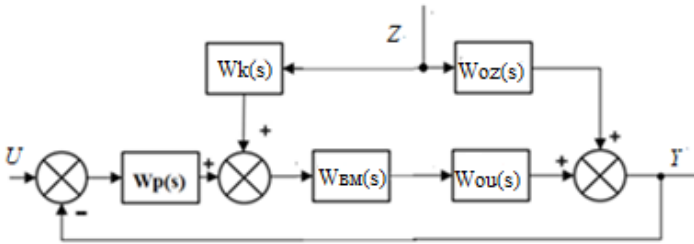


Рис.4.4. Структурна схема комбінованої АСР.

Запишемо умову інваріантності для даної системи

$$Y(s) = (W_{Oz}(s) + W_k(s)W_{BM}(s)W_{Ou}(s))Z(s) = 0$$

З умови інваріантності

$$W_{Oz}(s) + W_k(s)W_{BM}(s)W_{Ou}(s) = 0$$

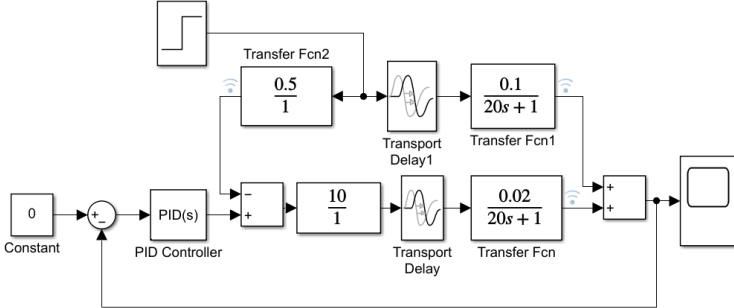
Знаходимо передавальну функцію компенсатора

$$W_k(s) = -\frac{W_{Oz}(s)}{W_{BM}(s)W_{Ou}(s)}$$

В загальний розв’язок підставимо задані вирази передавальних функцій

$$W_k(s) = -\frac{0.1}{20s+1} e^{-10s} \frac{1}{\frac{0.02}{20s+1} e^{-10s} 10} = -\frac{0.1}{0.02 \cdot 10} = -0.5$$

Проведемо моделювання комбінованої АСР в пакеті Simulink. Схему моделювання показано на рисунку (рис.4.5).



1. Рис.4.5. Схема моделювання комбінованої АСР.

На рисунку 4.6 показано перехідну характеристику комбінованої АСР по каналу збурення при відсутності компенсатора.

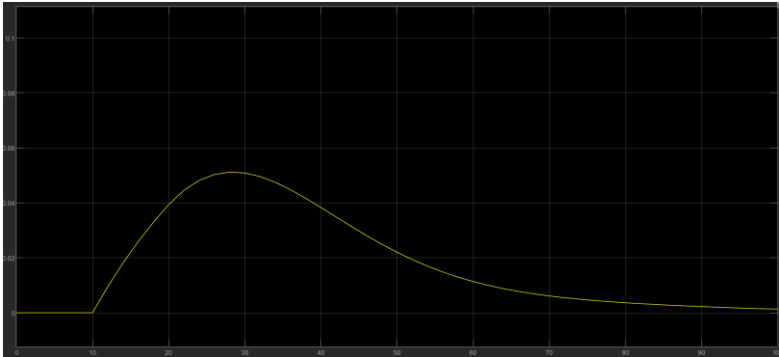


Рис.4.6. Перехідна характеристика комбінованої АСР по каналу збурення при відсутності компенсатора.

Перехідна характеристика інваріантної комбінованої автоматичної системи регулювання після приєднання компенсатора наведена на рисунку 4.7.



Рис.4.7. Перехідна характеристика інваріантної комбінованої АСР по каналу збурення.

Як слідує з рисунка 4.7, при коректному розрахунку компенсатора відбувається ефективна компенсація впливу збурення.

Контрольні запитання.

1. У яких випадках використовують комбіновані АСР?
2. З якої умови розраховують компенсатор?
3. Які способи побудови комбінованих АСР існують?
4. У яких випадках реалізація компенсаторів неможлива?
5. Якими ланками реалізують компенсатор при наближеній інваріантності?

Параметри теплообмінника

№	ρ - густина продукт $\gamma, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	V - об'єм трубного простору м^3	G_0 - масова витрата продукту, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$\theta_0^{\text{внх}}$ – темпе- ратура продукту $^{\circ}\text{C}$	$\theta_0^{\text{вх}}$ – те мпе- ратура продукту $^{\circ}\text{C}$
0	820	0.01	0.05	90	20
1	800	0.01	0.05	80	20
2	820	0,006	0,03	90	20
3	840	0,007	0,04	70	20
4	860	0,004	0,02	66	20
5	880	0,005	0,02	60	20
6	890	0,007	0,05	90	20
7	900	0,006	0,04	80	20
8	940	0,008	0,05	70	20
9	950	0,006	0,04	90	20
10	960	0,008	0,06	80	20

Параметри трубопроводу

	$V_{\text{тр}}$ - об'єм трубопрово ду, м ³	ρ - густина теплоносія $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	G_{T} - витрата теплоносія, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$\nabla\mu$ - переміщен ня РО, %
0	0.0016	1000	0,02	100
1	0.001	1000	0,02	100
2	0,0008	1000	0,01	100
3	0,0012	1000	0,02	100
4	0,0013	1000	0,04	100
5	0,0012	1000	0,01	100
6	0,0012	1000	0,01	100
7	0,0014	1000	0,04	100
8	0,0015	1000	0,02	100
9	0,002	1000	0,04	100
10	0,0011	1000	0,02	100

Передавальні функції об'єкта

№	Канал керування $W_{ou}(s)$	Канал збурення $W_{oz}(s)$	Регулюючий орган, $W_{PO}(s)$
0	$\frac{0.02}{20s+1} e^{-10s}$	$\frac{0.1}{20s+1} e^{-10s}$	10
1	$\frac{1}{20s+1} e^{-20s}$	$\frac{0.2}{20s+1} e^{-20s}$	5
2	$\frac{1}{100s+1}$	$\frac{0.3}{100s+1} e^{-20s}$	1
3	$\frac{0.1}{20s+1} e^{-30s}$	$\frac{0.4}{20s+1} e^{-30s}$	10
4	$\frac{1}{50s+1} e^{-10s}$	$\frac{0.5}{50s+1} e^{-10s}$	5
5	$\frac{6}{40s+1}$	$\frac{0.6}{40s+1}$	2
6	$\frac{0.1}{60s+1} e^{-10s}$	$\frac{0.7}{60s+1} e^{-30s}$	5
7	$\frac{0.2}{40s+1}$	$\frac{0.8}{40s+1} e^{-10s}$	6
8	$\frac{0.01}{30s+1} e^{-10s}$	$\frac{0.1}{30s+1} e^{-10s}$	10
9	$\frac{0.1}{50s+1}$	$\frac{1}{50s+1} e^{-10s}$	1
10	$\frac{1}{40s+1} e^{-5s}$	$\frac{10}{40s+1} e^{-10s}$	2

Література

1. Сільвестров А. М., Островерхов М. Я., Шефер О. В., Ладік Н. А., Зіменков Д. К. Системи автоматичного керування технологічними комплексами : навчальний посібник. К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022. 466 с.
2. Комп'ютеризовані системи керування : монографія. / Ковела. І. М., Древецький В. В., Ковела С. І. Рівне : Овід, 2017. 672 с.
3. Пальчевський Б. О. Автоматизація технологічних процесів : навч. посіб. Львів : Світ, 2007. 392 с.
4. Бобух А. О. Автоматизовані системи керування технологічними процесами : навч. посібник. Харків : ХНАМГ, 2006. 186 с.
5. Синєглазов В. М., Сергєєв І. Ю. Автоматизація технологічних процесів. К. : Видавництво «Київ», 2015. 444 с.
6. Стенцель Й. І. Математичне моделювання технологічних об'єктів керування : навч. посібник. К. : ІСДО, 1993. 320 с.
7. Лазарєв Ю. Ф. Моделювання динамічних систем у Matlab : електронний навчальний посібник. Київ : НТУУ "КПІ", 2011. 421 с. URL: http://elprivod.nmu.org.ua/files/mathapps/mds_matlab.pdf
8. Клепач М. І. Теорія автоматичного керування : навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2007. 206 с.
9. Ziegler J. G., Nichols N. B., Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME*. 1942, Vol. 64. P. 759–768.