

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни
«ОСНОВИ АВТОМАТИКИ Й АВТОМАТИЗАЦІЇ»
(для здобувачів вищої освіти 3 курсу навчання
зі спеціальності 174
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»)

ЗАТВЕРДЖЕНО

на засіданні кафедри
автоматизації технологічних процесів

Протокол № _ від « __ » ____ 2025 р.

Київ 2025

УДК 681.518

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Основи автоматики й автоматизації» для здобувачів вищої освіти 3 курсу навчання/Укладач: Єлісеєв П.Й. – Київ: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля, 2025.– 38 с.

Методичні вказівки містять загальні положення, теоретичні відомості, основні матеріали та пояснення про зміст і хід виконання роботи, а також варіанти завдань до виконання лабораторних робіт.

Укладач: П.Й. Єлісеєв, доцент

Відп. за випуск: М.Г. Лорія, професор

Рецензент: О.Б. Целіщев, професор

Зміст

1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ	4
2. МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ	4
3. ТЕМА 1. Дослідження властивостей датчиків температури.....	4
3.1. Теоретичні основи.....	4
3.2. Завдання до лабораторної роботи 1	8
3.3. Приклад виконання лабораторної роботи 1.....	9
3.4. Завдання до лабораторної роботи 2.....	11
3.5. Приклад виконання лабораторної роботи 2.....	12
3.6. Методичні вказівки	14
3.7. Контрольні запитання	14
3.8. Варіанти контрольних завдань, Тема 1	15
4. ТЕМА 2. Дослідження властивостей коригуючих зв'язків АСР	17
4.1. Теоретичні основи.....	17
4.2. Завдання до лабораторної роботи 3.....	21
4.3. Приклад виконання лабораторної роботи 3.....	21
4.4. Завдання до лабораторної роботи 4.....	23
4.5. Приклад виконання лабораторної роботи 4.....	23
4.6. Завдання до лабораторної роботи 5.....	24
4.7. Приклад виконання лабораторної роботи 5.....	24
4.8. Методичні вказівки	25
4.9. Контрольні запитання	26
4.10. Варіанти контрольних завдань, Тема 2	26
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	29
Додаток 1	30
Додаток 2	31
Додаток 3	32

1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Методичні вказівки складені відповідно до робочої програми з курсу «Основи автоматики й автоматизації» зі спеціальності 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Метою даних вказівок є допомога студентам у формуванні загальної уяви про теорію та принципи побудови автоматичних пристроїв і систем, мету та область їх застосування.

В результаті вивчення дисципліни студент повинен знати:

- Структуру й призначення систем автоматики й автоматизації;
- Загальні характеристики елементів автоматики й область їх застосування;
- Класифікацію систем автоматики й автоматизації;
- Оцінки якості систем автоматики й автоматизації.

Уміти і мати навички:

- Здійснювати найпростіші розрахунки характеристик елементів автоматики;
- Розробляти структурні схеми систем автоматики й автоматизації;
- Проводити розрахунки для порівняння якості регулювання окремих систем автоматики й автоматизації;
- Робити висновки про можливість застосування різних видів систем автоматики й автоматизації.

2. МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Для виконання лабораторних робіт необхідно уважно ознайомитися з теоретичними основами кожного завдання, приведеними в методичних вказівках. Для більш глибокого ознайомлення з матеріалом, необхідно звертатися до конспекту лекцій, а також до технічної літератури, на яку приводяться посилання у вказівках.

Якщо під час вивчення дисципліни з'являться запитання, на які не знаходиться відповідь у конспекті лекцій або технічній літературі, необхідно звертатись за консультацією до ведучого лектора.

Розрахунки до лабораторних робіт бажано виконувати за допомогою комп'ютера, але ця умова не обов'язкова.

3. ТЕМА 1. Дослідження властивостей датчиків температури

3.1. Теоретичні основи

Датчик є найважливішим елементом системи автоматичного регулювання. За допомогою датчика регулятор одержує данні про дійсне значення регульованого параметра. Чим точніше і швидше надходить сигнал від датчика, тим краще працює вся система в цілому. У найпростішій системі автоматичного регулювання дійсне значення регульованого параметра ви-

міряється одним датчиком. Від якості датчика залежить точність підтримки регульованого параметра на заданому рівні. У більш складних промислових системах керування необхідна інформація про режим роботи установки надходить від декількох датчиків, що пред'являє до них більш складні вимоги.

У сучасних технологічних установках необхідне регулювання різноманітних технологічних параметрів: температури, тиску, рівня, витрат, якості і складу. Для виміру параметрів у системах автоматичного регулювання застосовують найрізноманітніші датчики.

У загальному випадку датчик можна представити у виді *чутливого елемента і перетворювача*.

Чутливий елемент у системах автоматики і телемеханіки виконує функції «органів почуттів». Він призначений для перетворення контрольованої величини у такий вид сигналу, якій зручний для виміру. У перетворювачах, як правило, відбувається перетворення неелектричного сигналу в електричний сигнал. Наприклад, тиск у електроконтактному манометрі спочатку перетворюється за допомогою чутливого елемента в механічне переміщення стрілки, а потім вже в перетворювачі – у зміну опору.

На вхід датчика можуть надходити як електричні, так і неелектричні сигнали. З виходу датчика звичайно одержують електричні сигнали. Це викликано тим, що електричний сигнал простіше підсилювати і передавати на різні відстані.

Найбільше поширення в автоматичній і телемеханіці одержали електричні датчики, які можна розділити на дві великі групи:

- параметричні датчики;
- генераторні датчики (або датчики електрорушійної сили (ЕРС)).

Параметричні датчики служать для перетворення неелектричного контрольованого або регульованого параметра в параметри електричного ланцюга (R, L, C). Ці датчики одержують електричну енергію від допоміжного джерела енергії. Параметричні датчики поділяються на:

- датчики активного опору (контактні, реостатні, потенціометричні, тензодатчики, терморезистори);
- реактивні опори (індуктивні, ємнісні).

Генераторні датчики призначені для перетворення неелектричного контрольованого або регульованого параметра в ЕРС. Ці датчики не вимагають стороннього джерела енергії, тому що самі є джерелами ЕРС. Генераторні датчики бувають:

- термоелектричними;
- п'єзоелектричними;
- тахометричними.

До параметричних та генераторних датчиків пред'являються наступні загальні вимоги:

- 1) безупинна і лінійна залежність вихідної величини від вхідної;
- 2) висока динамічна (диференціальна) чутливість;
- 3) мала інерційність;
- 4) найменший вплив датчика на вимірюваний чи регульований параметр;
- 5) надійність у роботі;
- 6) застосовність до використовуваної вимірювальної апаратури і джерел живлення;

- 7) найменша собівартість;
- 8) мінімальні маса і габарити.

При виборі датчика необхідно також враховувати особливості досліджуваного процесу: періодичність і максимальну частоту впливів, атмосферні умови (вологість і температуру повітря), наявність вібрацій в установці і т.д.

Одним із самих широко розповсюджених технологічних параметрів, вимірювати і регулювати який необхідно дуже часто, є температура. Різні властивості речовин залежать від температури, тому температура є одним з головних параметрів стану більшості технологічних процесів. У свою чергу, контроль температури і підтримка її на заданому рівні є одними з найпоширеніших задач систем автоматизації.

Температурою називають фізичну величину, що характеризує ступінь нагрятості тіла. Вимірювати температуру можна тільки непрямим шляхом, ґрунтуючись на залежності від температури фізичних властивостей тіл, що піддаються безпосередньому вимірюванню. Ці властивості тіл називають термометричними. До них відносять довжину, обсяг, густину, термоЕРС, електричний опір і т.д. Засіб виміру температури називають термометром [1,2].

Засіб виміру температури, заснований на властивості металів і напівпровідників змінювати свій електричний опір зі зміною температури, називають термометром опору або термоперетворювачем опору. Якщо апріорно відома залежність між електричним опором R_T термоперетворювача опору і його температурою T , (тобто $R_T = f(T)$ – градувальна характеристика), то, вимірювши R_T , можна визначити значення температури середовища, у яке він занурений. Термоперетворювачі дозволяють надійно вимірювати температуру в межах від -260 [°C] до $+1100$ [°C].

До чутливих елементів термоперетворювачів опору (металевих дротів) пред'являється ряд вимог, основними з яких є стабільність градувальної характеристики, а також її відтворюваність, що забезпечує взаємозамінність виготовлених термоперетворювачів опору. До числа не основних, але бажаних вимог відносяться: лінійність функції $R_T = f(T)$, по можливості високе значення температурного коефіцієнта електричного опору (зміна електричного опору речовини при зміні його температури) $\alpha = \frac{1}{R_T} \cdot \frac{dR_T}{dT}$, великий питомий опір і невисока вартість матеріалу. Матеріал, застосований для чутливого елемента термометра опору, повинний бути хімічно інертним і не змінювати своїх фізичних властивостей в інтервалі робочих температур. Дослідженнями встановлено, що чим чистіше метал, тим у більшій ступені він відповідає зазначеним основним вимогам.

У промисловості часто застосовуються термоперетворювачі опору, залежність опору яких від температури в робочому діапазоні температур описується рівнянням:

$$R_T = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)], \quad (1)$$

де R_T – електричний опір термоперетворювача при температурі T , [Ом];

R_0 – електричний опір термоперетворювача при температурі T_0 , [Ом];

α – температурний коефіцієнт, [K^{-1}].

Градувальна характеристика (1) буде лінійною при постійному значенні температурного коефіцієнта α . Температурний коефіцієнт прийнято характеризувати рівнянням:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100},$$

де R_0 і R_{100} – відповідно опір речовини при 0 і 100 [°C].

Для виготовлення термометрів опору найбільш придатні по своїх фізико-хімічних властивостях платина і мідь. У діапазоні температур, для яких застосовуються термометри опору, можна вважати значення температурних коефіцієнтів α постійними і рівними для платини $\alpha_{Pt} \approx 3.9 \cdot 10^{-3} [K^{-1}]$, для міді $\alpha_{Cu} \approx 4.28 \cdot 10^{-3} [K^{-1}]$ [3].

Особливо важливу роль при використанні датчиків у системах виміру, контролю і регулювання грають їхні динамічні характеристики: передавальна функція, перехідна характеристика тощо.

Передавальна функція термометра опору має вигляд [4]:

$$W_T = \frac{R(s)}{T(s)} = \frac{T_0 \cdot \alpha}{\theta \cdot s + 1}, \quad (2)$$

$$\theta = \frac{V_T \cdot \gamma_T \cdot C_T}{\beta_T \cdot F_T}, \quad (3)$$

де V_T – об'єм матеріалу, з якого виготовлений термометр опору, [м³];

γ_T – густина матеріалу, [кг/м³];

C_T – питома теплоємність матеріалу, [Дж/(кг · °C)];

β_T – коефіцієнт тепловіддачі, [Вт/(м² · K)];

F_T – площа поверхні тепловіддачі термометра опору, [м²].

Будемо вважати, що термометр опору встановлений у трубці, по якій протікає рідина з турбулентним режимом течії. При цьому коефіцієнт тепловіддачі від рідини до термометру опору (при відсутності захисного кожуха) можна розраховувати по спрощеній формулі, що враховує властивості матеріалу, з якого виготовлений термометр опору [5]:

$$\beta = 0.76 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{C_p}{\lambda}\right)^{0.8}, \quad (4)$$

де β – коефіцієнт тепловіддачі, [Вт/(м² · K)];

λ – коефіцієнт теплопровідності, [Вт/(м · K)];

c_p – питома теплоємність, [Дж/(кг · °C)].

Промислові термометри опору виготовляються незахищеними, захищеними від впливу неагресивних середовищ і захищеними від впливу агресивних середовищ. Матеріал захисної арматури термометрів опору не повинний робити хімічного впливу на дріт чутливого елемента, повинний бути жаростійким, вологонепроникним і мати досить високу механічну міцність. Захисна арматура складається з труби з завареним дном, пересувного або нерухомого штуцера і голівки. Пересувний штуцер має чепцеве ущільнення [2].

Передавальна функція захисного кожуха визначається рівнянням:

$$W_K = \frac{T_K(s)}{T(s)} = \frac{1}{\psi \cdot s + 1}, \quad (5)$$

$$\psi = \frac{V_K \cdot \gamma_K \cdot C_K}{\beta_K \cdot F_K}. \quad (6)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від вимірюваного середовища до захисного кожуха у вираженні (6) визначається залежністю (4). Термометр опору, поміщений у захисний кожух, відділений від кожуха практично нерухомим шаром повітря, що зменшує коефіцієнт теплопровідності. Коефіцієнт тепловіддачі від захисного кожуха до термометра опору можна приблизно оцінювати по спрощеній формулі:

$$\beta = 0.08 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{C_P}{\lambda}\right)^{0.8} \left[\frac{Вт}{м^2 \cdot К}\right]. \quad (7)$$

Загальна передавальна функція термометра опору в захисному кожусі буде визначатися вираженням:

$$W_{TK} = W_T \cdot W_K = \frac{T_0 \cdot \alpha}{(\theta \cdot s + 1)(\psi \cdot s + 1)}. \quad (8)$$

Лабораторна робота 1

3.2. Завдання до лабораторної роботи 1

1. За одержаним варіантом завдання (таблиця 1) визначити початковий електричний опір датчика термометра.
2. Побудувати статичну характеристику датчика.
3. Визначити постійну часу датчика без захисного кожуха і його передавальну функцію.
4. Побудувати перехідну характеристику датчика без захисного кожуха.

3.3. Приклад виконання лабораторної роботи 1

В якості прикладу оберемо такі дані:

Матеріал термометра опору	–	мідь
Діаметр дроту термометра опору	–	$d = 0.5$ [мм]
Матеріал захисного кожуха	–	сталь легована конструкційна
Довжина захисного кожуха	–	$l_K = 120$ [мм]
Внутрішній діаметр захисного кожуха	–	$D_B = 2.5$ [мм]
Зовнішній діаметр захисного кожуха	–	$D_3 = 4$ [мм]
Початкова температура	–	$t_0 = 20$ [°C] ($T_0 = 293$ [K])
Діапазон вимірювання	–	$t = 0 \dots 150$ [°C] ($T = 0 \dots 423$ [K])

- 1). Розрахуємо електричний опір датчика при початковій температурі виходячи з рівняння [6]:

$$R_0 = \rho \cdot \frac{4 \cdot l}{\pi \cdot d^2}, \quad (9)$$

де ρ – питомий електричний опір матеріалу, з якого виготовлений термометр опору, [Ом · м];

l – довжина термометру опору, [м];

d – діаметр дроту, з якого виготовлений термометр опору, [м].

Вважаючи, що довжина дроту, з якого виготовлений датчик термометра опору, у три – чотири рази більше довжині захисного кожуху (з урахуванням намотування), розрахуємо довжину дроту датчика з рівняння:

$$l = 4 \cdot l_K. \quad (10)$$

Підставив у рівняння (9) та (10) значення величин з завдання, а також довідникові дані з таблиці Д1 (див. додаток), будемо мати:

$$R_0 = 0.017 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot (4 \cdot 120) \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot (0.5 \cdot 10^{-3})^2} = 0.04 \text{ [Ом]}. \quad (11)$$

- 2). Статична (градувальна) характеристика датчика визначається рівнянням (1). Після підстановки відповідних значень отримаємо таке рівняння:

$$R_T = 0.04 \cdot [1 + 4.28 \cdot 10^{-3} \cdot (t - 20)] \text{ [Ом]}.$$

Статична (градувальна) характеристика термометра опору за даними рівняння (11) приведена на рис. 1.

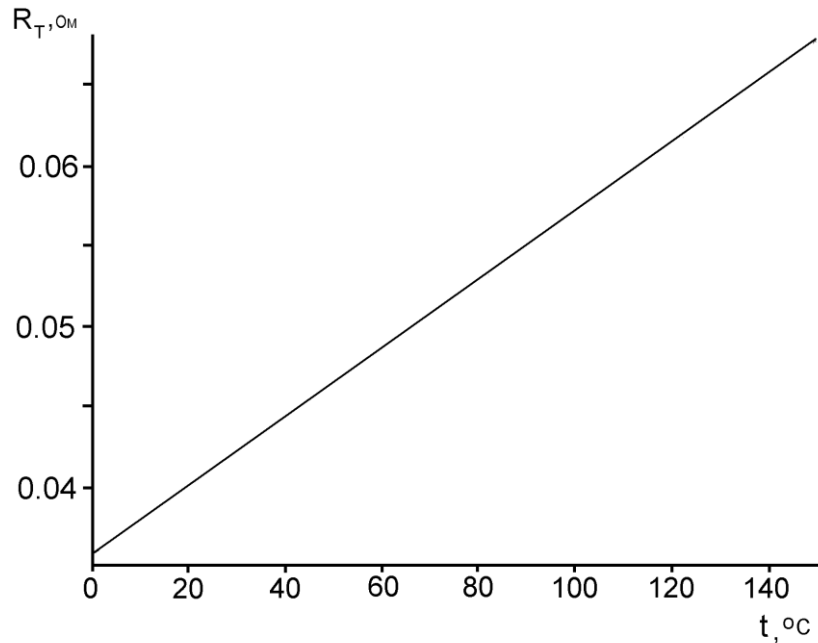


Рисунок 1 – Статична характеристика датчика

- 3). Для визначення постійної часу термометра без захисного кожуха скористуємося рівнянням (3). Розрахуємо об'єм мідного дроту, з якого виготовлено датчик.

$$V_T = S \cdot l = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l = \frac{\pi \cdot (0.5 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 4 \cdot 120 \cdot 10^{-3} = 94.2 \cdot 10^{-9} [M^3].$$

Коефіцієнт тепловіддачі від вимірюваної рідини до термометра опору визначимо з формули (4).

$$\beta_T = 0.76 \cdot 390 \cdot \left(\frac{200}{390}\right)^{0.8} = 173.2 \left[\frac{Вт}{M^2 \cdot K}\right].$$

Знайдемо поверхню теплообміну мідного дроту датчика:

$$F_T = \pi \cdot d \cdot l = \pi \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 120 \cdot 10^{-3} = 754 \cdot 10^{-6} [M^2].$$

Підставивши отриманні значення, а також довідникові дані (додаток 1) у формулу (3) будемо мати:

$$\theta = \frac{94.2 \cdot 10^{-9} \cdot 8940 \cdot 200}{173.2 \cdot 754 \cdot 10^{-6}} = 1.29 [с].$$

Виходячи з цього, передавальна функція термометра опору без захисного кожуха буде мати вигляд:

$$W_T = \frac{R(s)}{T(s)} = \frac{T_0 \cdot \alpha}{\theta \cdot s + 1} = \frac{1.25}{1.29 \cdot s + 1}.$$

Відповідно перехідний процес датчика буде описуватися рівнянням:

$$y_T(t) = 2.5 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0.34 \cdot t}.$$

- 4). Динамічна характеристика датчика без захисного кожуха приведена на рис. 2.

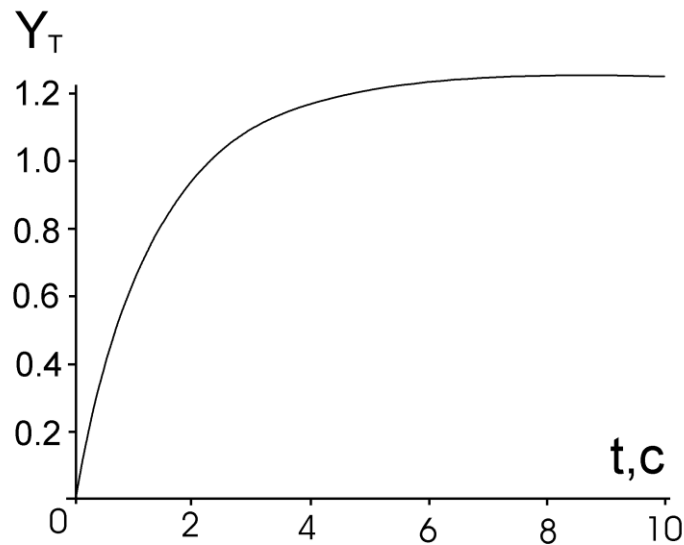


Рисунок 2 – Динамічна характеристика датчика без захисного кожуха

Лабораторна робота 2

3.4. Завдання до лабораторної роботи 2

1. Визначити постійну часу датчика із захисним кожухом і його передавальну функцію.
2. Побудувати перехідну характеристику датчика у захисному кожусі.
3. Побудувати перехідні характеристики датчиків без захисного кожуха та у захисному кожусі.
4. Порівняти одержані динамічні характеристики, та зробити висновки щодо впливу захисного кожуха на динамічні характеристики термометра опору.

3.5. Приклад виконання лабораторної роботи 2

- 1). Для визначення постійної часу термометра із захисним кожухом скористуємося рівнянням (6). Розрахуємо об'єм матеріалу захисного кожуха.

$$V_K = S \cdot l = \frac{\pi \cdot (D_3^2 - D_B^2)}{4} \cdot l_K = \frac{\pi \cdot [(4 \cdot 10^{-3})^2 - (2.5 \cdot 10^{-3})^2]}{4} \cdot 120 \cdot 10^{-3} = 918.9 \cdot 10^{-9} \text{ [м}^3\text{]}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від вимірюваної рідини до захисного кожуха визначимо з формули (4).

$$\beta_K = 0.76 \cdot 38 \cdot \left(\frac{480}{38}\right)^{0.8} = 219.7 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}\right].$$

Знайдемо поверхню теплообміну захисного кожуха датчика:

$$F_K = \pi \cdot D_3 \cdot l_K = \pi \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 120 \cdot 10^{-3} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ [м}^2\text{]}.$$

Підставивши отриманні значення, а також довідникові дані (додаток 1) у формулу (6), будемо мати:

$$\psi = \frac{918.9 \cdot 10^{-9} \cdot 7780 \cdot 480}{219.7 \cdot 1.5 \cdot 10^{-3}} = 10.4 \text{ [с]}.$$

Прийmemo, що температурний коефіцієнт кожуха на порядок менше, ніж температурний коефіцієнт датчика. Виходячи з цього, передавальна функція захисного кожуха буде мати вигляд:

$$W_K = \frac{T_K(s)}{T(s)} = \frac{1}{\psi \cdot s + 1} = \frac{1}{10.4 \cdot s + 1}.$$

Відповідно перехідний процес для захисного кожуха буде описуватися рівнянням:

$$y_K(t) = 2 \cdot e^{-0.05 \cdot t}.$$

Динамічні характеристики датчика термометру опору при встановленні його у захисний кожух буде змінено. Головним чином це станеться за рахунок зміни коефіцієнта тепловіддачі від захисного кожуха до термометру опору. Додатковий опір теплопередачі буде чинити прошарок повітря між захисним кожухом та чутливим елементом термометру опору. В цьому випадку для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі треба використовувати рівняння (7):

$$\beta_T = 0.08 \cdot 390 \cdot \left(\frac{200}{390}\right)^{0.8} = 18.3 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}\right].$$

Відповідно зміниться й значення постійної часу термометру опору. Воно буде визначатися як:

$$\theta = \frac{94.2 \cdot 10^{-9} \cdot 8940 \cdot 200}{18.3 \cdot 754 \cdot 10^{-6}} = 13.9 [\text{сек}].$$

Загальна передавальна функція термометра опору із захисним кожухом визначиться з рівняння (8):

$$W_{TK} = \frac{1.25}{(10.4 \cdot s + 1)(13.9 \cdot s + 1)}.$$

Перехідний процес термометра опору, розташованого в захисному кожусі, описується таким рівнянням:

$$y_{TK}(t) = 1.25 - 1.25 \cdot e^{-0.08t} - 8.68 \cdot e^{-0.08t}.$$

- 2). Динамічна характеристика датчика у захисному кожусі приведена на рис. 3.

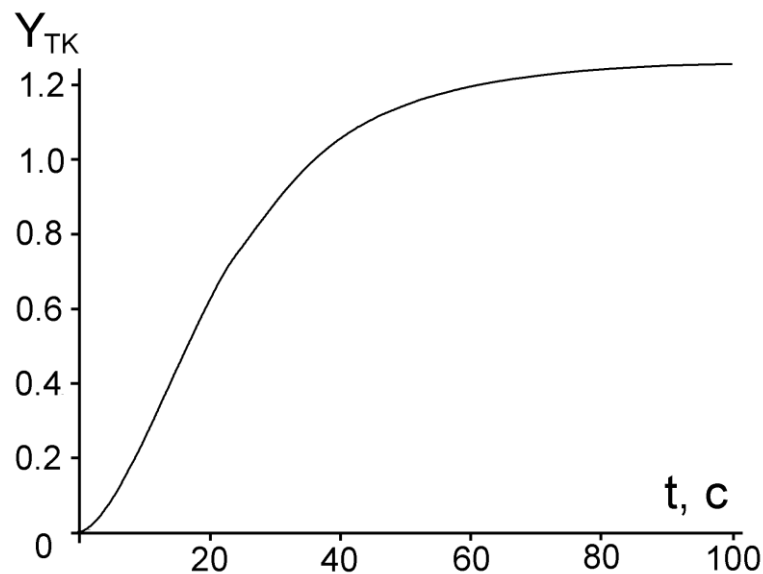


Рисунок 3 – Динамічна характеристика датчика у захисному кожусі

- 3). Для порівняння динамічних характеристик термометру опору у випадках, коли чутливий елемент знаходиться безпосередньо у вимірювальному середовищі, або відокремлений від нього захисним кожухом, побудуємо їх динамічні характеристики на одному графіку (рис. 4).

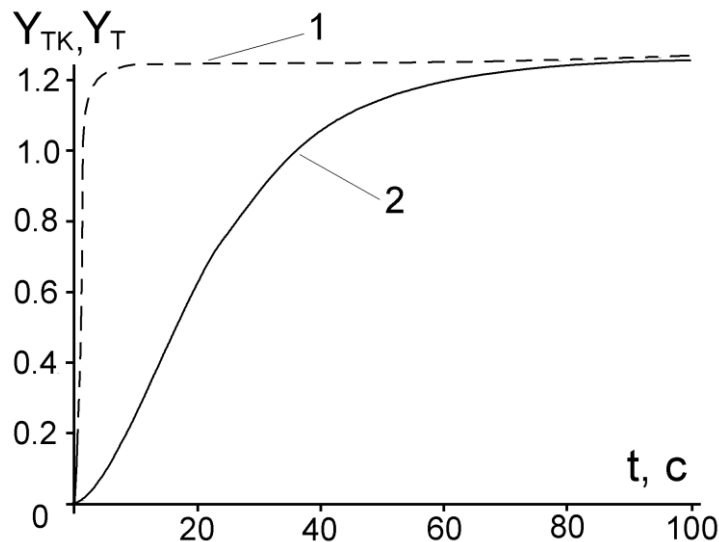


Рисунок 4 – Динамічна характеристика термометру опору із датчиком без захисного кожуха (крива 1), та у захисному кожусі (крива 2)

- 4). З порівняння цих характеристик видно, що захисний кожух значно погіршує динамічні характеристики термометру опору. Час виходу термометра на стає значення після внесення збурення збільшується практично на порядок і складає приблизно 90 [с].

3.6. Методичні вказівки

При проведенні розрахунків бажано користуватись пакетами прикладних програм для виконання математичних розрахунків на комп'ютері. До їх складу входять MatLab, Maple, MathCAD тощо. Відповідні функції, які реалізовані в даних пакетах, дозволяють легко робити зворотні перетворення Лапласа, переходячи від передавальної функції до функції часу, а також будувати графіки перехідних процесів.

Описання деяких функцій, необхідних для розрахунків даного завдання у пакеті прикладних програм Maple, наведено у Додатку 2.

Приклади виконання лабораторних робіт у пакеті прикладних програм MatLab наведено у Додатку 3.

3.7. Контрольні запитання

1. Визначення датчика.
2. Структура датчика.
3. Параметричні датчики.
4. Генераторні датчики.

5. Статична характеристика датчика.
6. Інерційність датчика.
7. Динамічна чутливість датчика.
8. Поріг чутливості датчика.
9. Погрішність виміру. Види погрішностей.
10. Перехідні процеси в датчиках.
11. Фізичні принципи, які лежать у основі промислових методів виміру температури.

3.8. Варіанти контрольних завдань, Тема 1

Таблиця 1 – Варіанти завдань для виконання лабораторних робіт Темі 1

Но- мер ва- ріа- нту	Матеріал ко- жуха	Дов- жина ко- жуха, [мм]	Зовні- шній діа- метр ко- жуха, [мм]	Внут- рішній діа- метр ко- жуха, [мм]	Мате- ріал дроту датчика	Діа- метр дроту дат- чика, [мм]	Діапазон вимірю- вання, [°C]
1.	Латунь	50	40	30	Мідь	0,1	0 ... +150
2.	Сталь V-12	120	60	55	Платина	0,01	-100 ... +600
3.	Сталь 20	250	10	6	Мідь	0,05	0 ... +50
4.	Сталь лего- вана конс- трукційна	400	15	12	Мідь	0,08	-50 ... +100
5.	Залізо	1500	20	17	Платина	0,1	-260 ... +800
6.	Латунь	100	25	23	Мідь	0,12	-25 ... +25
7.	Сталь 20	300	35	30	Платина	0,08	-150 ... +500
8.	Сталь 20	450	30	28	Платина	0,05	-50 ... +50
9.	Латунь	600	10	8	Платина	0,06	0 ... +90
10.	Сталь V-12	100	15	12	Мідь	0,09	0 ... +130
11.	Латунь	900	45	40	Платина	0,03	-200 ... +500
12.	Сталь лего- вана конс- трукційна	1500	30	25	Мідь	0,1	-50 ... +120
13.	Залізо	950	20	15	Мідь	0,1	0 ... +25
14.	Латунь	1050	15	13	Платина	0,06	0 ... +600
15.	Залізо	720	25	22	Платина	0,01	-200 ... +1200
16.	Сталь V-12	640	40	38	Платина	0,03	-200 ... +1000
17.	Сталь V-12	500	55	50	Мідь	0,08	-10 ... +90
18.	Сталь 20	200	30	28	Мідь	0,12	-40 ... +150
19.	Залізо	280	40	35	Платина	0,09	-260 ... 0
20.	Латунь	360	10	6	Мідь	0,15	-50 ... +10
21.	Сталь лего- вана конс- трукційна	820	50	46	Платина	0,02	-200 ... -10
22.	Сталь 20	180	10	8	Мідь	0,11	+20 ... +60

23.	Сталь V-12	930	50	49	Мідь	0,1	-20 ... +90
24.	Залізо	50	25	23	Мідь	0,06	-40 ... +40
25.	Залізо	600	15	12	Платина	0,04	-150 ... +950
26.	Латунь	520	35	30	Мідь	0,08	0 ... +100
27.	Сталь V-12	250	40	36	Платина	0,01	0 ... +900
28.	Сталь V-12	300	35	29	Платина	0,08	-200 ... +400
29.	Сталь лего- вана кон- струкційна	400	20	14	Платина	0,5	+500 ... +1000
30.	Латунь	800	15	10	Мідь	0,25	+10 ... +80

4. ТЕМА 2. Дослідження властивостей коригуючих зв'язків АСР

4.1. Теоретичні основи

Проблема забезпечення необхідних властивостей лінійних автоматичних систем дуже складна. У ній можуть бути виділені насамперед наступні локальні задачі:

- забезпечення стійкості системи (стабілізація);
- підвищення запасу стійкості системи (демпфірування);
- підвищення точності регулювання в сталих режимах (зменшення або усунення статичної помилки відтворення завдання, зменшення або усунення впливу постійних збурюючих впливів);
- поліпшення перехідних процесів (збільшення швидкодії, максимальне зменшення динамічних помилок відтворення завдання і впливу збурень).

Якість регулювання системи в першу чергу визначається параметрами настроювання регуляторів. Однак у ряді випадків забезпечення стійкості системи або необхідного запасу стійкості не представляється можливим досягти тільки зміною цих параметрів.

Це пов'язано з тим, що необхідні значення настроювальних параметрів неможливо практично реалізувати при даній структурі системи.

З точки зору вимог до точності АСР в сталих режимах, для збільшення порядку астатизму або коефіцієнта передачі системи при збереженні стійкості та визначеної якості перехідних процесів, може знадобитися корекція динамічних властивостей АСР.

У цьому випадку необхідно застосовувати спеціальні пристрої, що корегують динамічні властивості системи таким чином, щоб забезпечувалася необхідна якість її функціонування. Існують різні методи підключення коригувальних пристроїв у систему регулювання. Розглянемо найбільш поширені з них [7].

Послідовний коригувальний пристрій – підключають безпосередньо після датчика неузгодженості або після попереднього підсилювача (рис. 5).

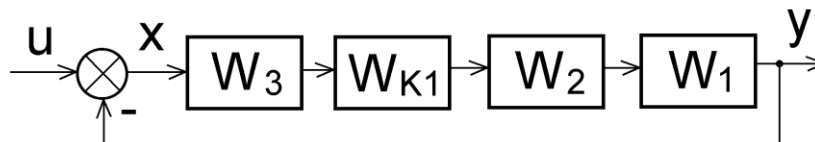


Рисунок 5 – Послідовне підключення коригувального пристрою:

W_1 – передавальна функція об'єкта керування;

W_2 – передавальна функція виконавчого елемента;

W_3 – передавальна функція попереднього підсилювача;

W_{K1} – передавальна функція коригувального пристрою.

Передавальна функція коригувального пристрою позначена як W_{K1} . Найчастіше застосовується підключення коригувального пристрою після попереднього підсилювача. Справа в тому, що рівень сигналу неузгодженості звичайно дуже малий і коригувальний пристрій знижує його ще більше. Тому при першому варіанті включення послідовного коригувального пристрою (після датчика неузгодженості) треба мати попередній підсилювач значно більшої чутливості, ніж при другому варіанті (після попереднього підсилювача).

Паралельно-зустрічний коригувальний пристрій – його підключення показано на рис. 6.

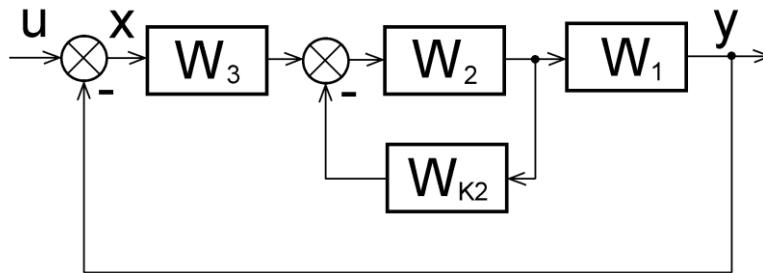


Рисунок 6 – Паралельно-зустрічне підключення коригувального пристрою

В даному випадку коригувальний пристрій є зворотним зв'язком, як правило від'ємним, якій охоплює один з елементів прямого ланцюга системи. Звичайно цей елемент є або виконавчим елементом, або вихідним каскадом підсилювача (підсилювач потужності). Його передавальну функцію позначимо W_{K2} .

Передавальна функція ділянки ланцюгу з паралельно-зустрічним коригувальним пристроєм:

$$W_{E2} = \frac{W_2}{1 + W_2 \cdot W_{K2}}.$$

Звичайно в достатньо широкому й істотному для якості системи діапазоні частот справедлива нерівність:

$$|W_2(j\omega) \cdot W_{K2}(j\omega)| \gg 1. \quad (12)$$

Тоді для цього діапазону частот справедливо:

$$W_{E2} \approx \frac{1}{W_{K2}}. \quad (13)$$

Таким чином, при задоволенні нерівності (12) властивості ділянки ланцюга з паралельно-зустрічним коригувальним пристроєм визначаються тільки лише властивостями цього коригувального пристрою.

Зазначена обставина є великою перевагою паралельно-зустрічного коригувального пристрою. При задоволенні нерівності (12) властивості ділянки W_2 прямого ланцюга, охопленого паралельно-зустрічним коригувальним пристроєм, і їхні зміни в процесі дії системи не

впливають на властивості системи. Несуттєві нелінійності цієї ділянки і зміни його параметрів (коефіцієнтів передатної функції W_2) не позначаються на динамічних властивостях системи. Це справедливо тільки при незмінних параметрах самого паралельно-зустрічного пристрою.

Достоїнства даного коригувального пристрою також у тім, що його вхід підключено до виходу виконавчого елемента чи підсилювача потужності, тобто до виходу потужного елемента з високим рівнем сигналу. Тому в якості паралельно-зустрічних коригувальних пристроїв можуть бути використані навіть досить потужні елементи.

Варто зауважити, що вплив місцевих зворотних зв'язків, що реалізують паралельно-зустрічні коригувальні пристрої, дуже різноманітний. Коригувальні зворотні зв'язки поділяються на жорсткі і гнучкі.

Жорсткий зворотний зв'язок діє на систему як у перехідному, так і в сталому режимі, тобто $W_{ж}(0) \neq 0$, і реалізується він безінерційною або інерційною ланкою.

Гнучкий зворотний зв'язок діє лише в перехідних режимах. Реалізується він ланкою що диференціює, з передатною функцією

$$W_0(s) = k_0 \cdot s,$$

або ланкою, що інерційно диференціює (реальна диференційна ланка)

$$W_0(s) = \frac{k_0 \cdot s}{T_0 \cdot s + 1}.$$

Паралельний коригувальний пристрій – це третій варіант включення пристрою в АСР (рис. 7).

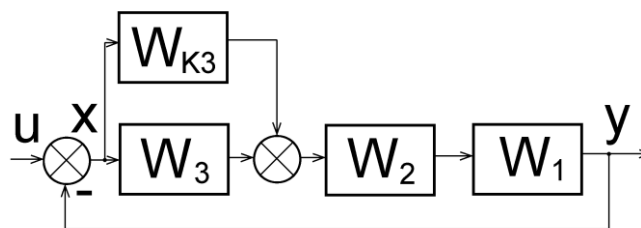


Рисунок 7 – Паралельне підключення коригувального пристрою

Включений у такий спосіб коригувальний пристрій будемо називати прямим паралельним і його передатну функцію будемо позначати $W_{к3}$.

Іноді прямий паралельний коригувальний пристрій виявляється дуже зручним, тому що при меншій складності забезпечує потрібне перетворення сигналу керування.

Синтезують коригувальні пристрої на підставі деякого комплексу вимог до властивостей системи. Спочатку визначають необхідне значення передатної функції $W_{к1}$ послідовного коригувального пристрою. Потім з'ясовують, при яких значеннях передавальних функцій $W_{к2}$

паралельно-зустрічного коригувального пристрою і W_{K3} прямого паралельного коригувального пристрою буде отриманий той же ефект. Після чого вже можна вирішувати, якій коригувальний пристрій доцільніше створювати.

Складемо формули для такого розрахунку.

По кожній зі структурних схем (рис. 5, 6, 7) складемо передавальні функції розімкнутого ланцюга і дорівняємо ці вираження один до одного. Одержуємо

$$W \cdot W_{K1} = \frac{W}{1 + W_2 \cdot W_{K2}} = W \cdot \left(1 + \frac{W_{K3}}{W_3}\right), \quad (14)$$

де $W = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3$.

З (14) визначають формули переходу від одного виду коригувального пристрою до іншого.

$$\left. \begin{aligned} W_{K1} &= \frac{1}{1 + W_2 \cdot W_{K2}} = 1 + \frac{W_{K3}}{W_3}; \\ W_{K2} &= \frac{(1 - W_{K1})}{W_2 \cdot W_{K1}} = -\frac{W_{K3}}{W_2 \cdot (W_3 + W_{K3})}; \\ W_{K3} &= W_3 \cdot (W_{K1} - 1) = -\frac{W_2 \cdot W_3 \cdot W_{K2}}{1 + W_2 \cdot W_{K2}}. \end{aligned} \right\}$$

Якщо значення передатної функції W_{K2} виявляється негативним, то паралельно-зустрічний коригувальний пристрій повинний включатися у виді позитивного зворотного зв'язку. При негативному значенні передатної функції W_{K3} вихідний сигнал прямого паралельного коригувального пристрою повинний відніматися з вихідного сигналу ділянки W_3 .

В даний час коригувальні пристрої є основним способом підвищення якості лінійних безупинних систем регулювання по відхиленню. Іноді в системі одночасно використовують два коригувальних пристрої: послідовний і паралельно-зустрічний, або паралельно-зустрічний і прямий паралельний. Таким чином, функції, що повинен виконувати коригувальний пристрій, розподіляються між двома коригувальними пристроями. Ці пристрої можуть бути виконані з більш простих елементів.

Розглянемо один з прикладів практичного застосування коригувального пристрою.

Виконавчий механізм (ВМ) – є невід'ємною частиною АСР. Він перетворює енергію керування, що надходить від регулятора, у механічну енергію переміщення регулюючого органу. При цьому, динамічні властивості АСР в значній мірі залежать від динаміки ВМ. Якщо ВМ має суттєву інерційність, це може викликати появу перерегулювання в роботі АСР. У момент часу, коли сигнал завдання на вході регулятора дорівнює сигналу зворотного зв'язку, регулятор мусить відключатися. Однак ВМ не може раптово зупинитися і продовжує рух. На вхід технологічного об'єкту керування (ТОК) поступає сигнал, який визначається лише неідеальністю ВМ, тому є «паразитним». Це призводить до того, що на виході ТОК змінюється сигнал. Для знищення цього сигналу необхідно включення АСР в роботу. Подолати це явище можна за допомогою паралельно-зустрічного коригувального пристрою, якій здійснює допоміжний зворотній зв'язок за положенням штока чи вихідного валу ВМ. Такі зв'язки дозволяють зменшити інерційний вибіг ВМ, що покращує роботу системи в цілому [8]. На рис. 8 представлена структурна схема АСР при охопленні ВМ зворотнім зв'язком.

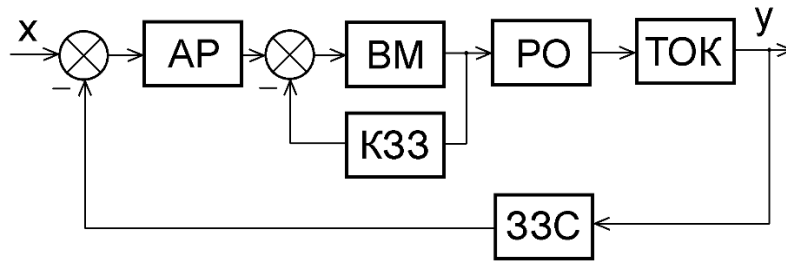


Рисунок 8 – Структурна схема АСР при охопленні виконавчого механізму зворотнім зв'язком за положенням штока (вихідного валу)

У системі задіяні такі блоки: АР – автоматичний регулятор; ВМ – виконавчий механізм; РО – регулюючий орган; ТОК – технологічний об'єкт керування; КЗЗ – коригувальний зворотній зв'язок; ЗЗС – зворотній зв'язок системи.

Лабораторна робота 3

4.2. Завдання до лабораторної роботи 3

1. За одержаним варіантом завдання (таблиця 2) розробити структурну схему одноконтурної АСР без коригувального зворотного зв'язку.
2. Розрахувати еквівалентну передавальну функцію АСР без коригувального зворотного зв'язку.
3. Побудувати перехідний процес для розробленої АСР без коригувального зворотного зв'язку.

4.3. Приклад виконання лабораторної роботи 3

1). Будемо вважати, що елементи АСР (рис. 8) мають такі передавальні функції:

- Автоматичний ПІ-регулятор

$$W_{AP}(s) = 0.5 + \frac{1}{30 \cdot s} = \frac{15 \cdot s + 1}{30 \cdot s}.$$

- Виконавчий механізм

$$W_{BM}(s) = \frac{0.05}{40 \cdot s + 1}.$$

- Регулюючий орган

$$W_{PO}(s) = 0.8.$$

- Технологічний об'єкт керування

$$W_{ТОК}(s) = \frac{5}{120 \cdot s + 1}.$$

- Коригувальний зворотній зв'язок

$$W_{КЗЗ}(s) = 5.$$

- Зворотній зв'язок системи

$$W_{ЗЗС}(s) = 0.98.$$

- 2). Розрахуємо передавальну функцію одноконтурної АСР без коригувального зворотного зв'язку.

$$W_C(s) = \frac{W_{АП}(s) \cdot W_{БМ}(s) \cdot W_{ПО}(s) \cdot W_{ТОК}(s)}{1 + W_{АП}(s) \cdot W_{БМ}(s) \cdot W_{ПО}(s) \cdot W_{ТОК}(s) \cdot W_{ЗЗС}(s)}. \quad (15)$$

Підставивши значення передавальних функцій окремих елементів АСР, отримаємо таку передавальну функцію:

$$W_C(s) = 50 \cdot \frac{15 \cdot s + 1}{0.36 \cdot 10^8 \cdot s^3 + 0.12 \cdot 10^7 \cdot s^2 + 8235 \cdot s + 49}. \quad (16)$$

Функція перехідного процесу має вигляд:

$$y_C(t) = -0.05 \cdot e^{-0.027 \cdot t} - 0.97 \cdot e^{-0.003 \cdot t} \cos(0.006 \cdot t) - 0.74 \cdot e^{-0.003 \cdot t} \sin(0.006 \cdot t) + 1.02.$$

- 3). На рис. 9 приведена крива перехідного процесу АСР без коригувального зворотного зв'язку.

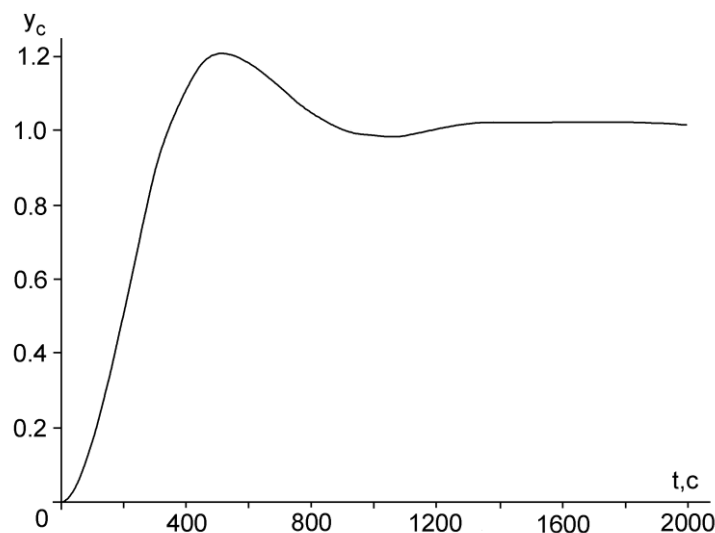


Рисунок 9 – Крива перехідного процесу одноконтурної АСР без коригувального зворотного зв'язку

Лабораторна робота 4

4.4. Завдання до лабораторної роботи 4

1. Розробити структурну схему одноконтурної АСР, з підключенням коригувального зворотного зв'язку.
2. Розрахувати еквівалентну передавальну функцію АСР з коригувальним зворотнім зв'язком.
3. Побудувати перехідний процес для АСР з коригувальним зворотнім зв'язком.

4.5. Приклад виконання лабораторної роботи 4

- 1). Розрахуємо передавальну функцію системи (рис. 8) при охоплені ВМ коригувальним зворотним зв'язком.

Спочатку розрахуємо передавальну функцію ВМ при охоплені його коригувальним зворотним зв'язком.

$$W_{BMK}(s) = \frac{W_{BM}(s)}{1 + W_{BM}(s) \cdot W_{ЗЗК}(s)}.$$

- 2). Тепер підставимо одержане вираження у передавальну функцію системи (15) замість передавальної функції для ВМ. Після цього передавальна функція системи набуде такого вигляду:

$$W_C(s) = \frac{W_{AP}(s) \cdot W_{BMK}(s) \cdot W_{PO}(s) \cdot W_{ТОК}(s)}{1 + W_{AP}(s) \cdot W_{BMK}(s) \cdot W_{PO}(s) \cdot W_{ТОК}(s) \cdot W_{ЗЗК}(s)}.$$

Підставивши конкретні значення для передавальних функцій окремих елементів і зробив відповідні перетворення, отримуємо передавальну функцію такого вигляду:

$$W_{CK}(s) = 50 \cdot \frac{15 \cdot s + 1}{0.36 \cdot 10^8 \cdot s^3 + 0.14 \cdot 10^7 \cdot s^2 + 10110 \cdot s + 49}. \quad (17)$$

Функція перехідного процесу має вигляд:

$$y_{CK}(t) = -0.03 \cdot e^{-0.032t} - 0.99 \cdot e^{-0.004 \cdot t} \cos(0.005 \cdot t) - 0.85 \cdot e^{-0.004 \cdot t} \sin(0.005 \cdot t) + 1.02.$$

- 3). На рис. 10 приведена крива перехідного процесу АСР при охопленні ВМ коригувальним зворотним зв'язком.

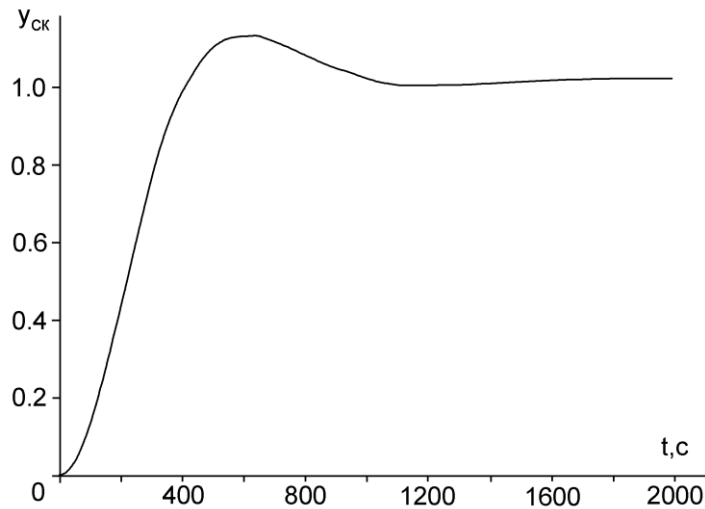


Рисунок 10 – Крива перехідного процесу АСР при охопленні ВМ коригувальним зворотним зв'язком

Лабораторна робота 5

4.6. Завдання до лабораторної роботи 5

1. Побудувати перехідні процеси для АСР без коригувального зворотного зв'язку та з коригувальним зворотнім зв'язком.
2. Порівняти перехідні процеси АСР без коригувального зворотного зв'язку, та із коригувальним зворотнім зв'язком.
3. Зробити висновки щодо впливу коригувального зворотного зв'язку на якість роботи АСР.

4.7. Приклад виконання лабораторної роботи 5

- 1). На рис. 11 приведені криві перехідних процесів АСР без коригувального пристрою, та з охопленням ВМ коригувальним зворотним зв'язком.

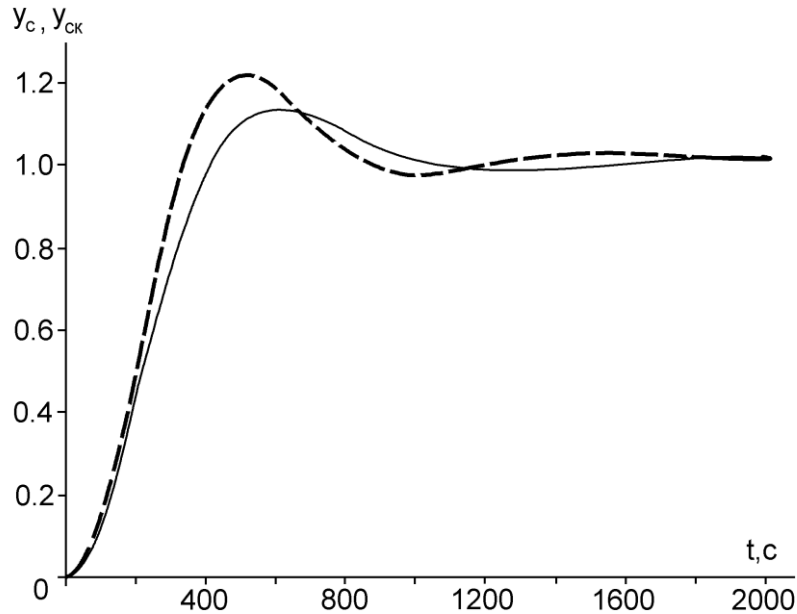


Рисунок 11 – Криви перехідних процесів АСР: пунктирна лінія – без коригувального зворотного зв'язку; суцільна лінія – при охопленні ВМ коригувальним зворотним зв'язком.

2). Порівняв передавальні функції одноконтурної АСР без коригувального зворотного зв'язку (16), та системи з охопленням ВМ коригувальним зворотним зв'язком, можна зробити такі висновки:

- Структура системи після введення коригувального зворотного зв'язку не змінилась.
- Збільшилось відношення постійної часу першого порядку до квадратного кореню з постійної часу другого порядку, що засвідчує зменшення коливальності системи. У свою чергу це має призводити до зменшення перерегулювання в системі.

3). Наведені дані підтверджують, що введення коригувального зворотного зв'язку покращують характеристики системи.

4.8. Методичні вказівки

При проведенні розрахунків бажано користуватись пакетами прикладних програм для виконання математичних розрахунків на комп'ютері. До їх складу входять Maple, MathCAD і др. Відповідні функції, які реалізовані в даних пакетах, дозволяють легко робити зворотні перетворення Лапласа, переходячи від передавальної функції до функції часу, а також будувати графіки перехідних процесів.

Описання деяких функцій, необхідних для розрахунків даного завдання у пакеті прикладних програм Maple, наведено у Додатку 2.

Опис програм для розрахунків даного завдання у пакеті прикладних програм MatLab, наведено у Додатку 3.

4.9. Контрольні запитання

1. Структурні схеми АСК.
2. Обчислення передавальних функцій одноконтурних АСК.
3. Обчислення передавальних функцій багатоконтурних АСК.
4. Мета використання коригувальних пристроїв.
5. Види підключення коригувальних пристроїв.
6. Види ланок, які використовуються в якості коригувальних пристроїв.

4.10. Варіанти контрольних завдань, Тема 2

В таблиці 2 приведені варіанти початкових даних для контрольних завдань студентів. При цьому незалежно від варіанта завдання необхідно брати такі дані:

- Виконавчий механізм

$$W_{BM}(s) = \frac{1}{30 \cdot s + 1}.$$

- Регулюючий орган

$$W_{PO}(s) = 0.8.$$

Таблиця 2 – Варіанти завдань для виконання лабораторних робіт Теми 2

Варіант завдання	Передавальні функції елементів системи			
	Регулятор	Технологічний об'єкт керування	Зворотний зв'язок системи	Коригувальний зворотний зв'язок ВМ за положенням штока.
1.	$5 + \frac{0.5}{s}$	$\frac{0.3 \cdot (s + 1)}{12 \cdot s + 1}$	0.8	$\frac{2 \cdot s}{5 \cdot s + 1}$
2.	2.8	$\frac{1}{3 \cdot s^2 + 8 \cdot s + 1}$	0.98	2
3.	$3 + \frac{1}{10 \cdot s} + 0.5 \cdot s$	$\frac{2}{200 \cdot s + 1}$	1.08	0.5
4.	1.5	$\frac{2 \cdot (3 \cdot s + 1)}{(12 \cdot s + 1) \cdot (2 \cdot s + 1)}$	$\frac{5}{10 \cdot s + 1}$	$\frac{2}{4 \cdot s + 1}$

5.	2.1	$\frac{5 \cdot e^{-8 \cdot s}}{12 \cdot s^2 + 5 \cdot s + 1}$	$\frac{1}{0.9 \cdot s + 1}$	2
6.	$0.3 + \frac{1}{40 \cdot s}$	$\frac{10 \cdot e^{-12 \cdot s}}{30 \cdot s + 1}$	$\frac{2}{4 \cdot s + 1}$	5
7.	4.6	$\frac{5 \cdot (s + 1)}{12 \cdot s^2 + 14 \cdot s + 1}$	$\frac{5}{10 \cdot s + 1}$	$\frac{1}{0.9 \cdot s + 1}$
8.	1.2	$\frac{2 \cdot (3 \cdot s + 1)}{(12 \cdot s + 1) \cdot (2 \cdot s + 1)}$	2	$\frac{5}{10 \cdot s + 1}$
9.	$3 + \frac{1}{10 \cdot s} + 0.5 \cdot s$	$\frac{6 \cdot e^{-7 \cdot s}}{35 \cdot s + 1}$	5	$\frac{2}{4 \cdot s + 1}$
10.	0.9	$\frac{0.48}{35 \cdot s^2 + 24 \cdot s + 1}$	$\frac{5}{10 \cdot s + 1}$	2
11.	$2 + \frac{1}{50 \cdot s}$	$\frac{10 \cdot e^{-12 \cdot s}}{30 \cdot s + 1}$	$\frac{1}{0.9 \cdot s + 1}$	5
12.	1.4	$\frac{5 \cdot e^{-8 \cdot s}}{12 \cdot s^2 + 5 \cdot s + 1}$	$\frac{2}{4 \cdot s + 1}$	$\frac{5}{10 \cdot s + 1}$
13.	0.05	$\frac{5 \cdot (s + 1)}{12 \cdot s^2 + 14 \cdot s + 1}$	2	$\frac{2}{4 \cdot s + 1}$
14.	$5 + \frac{0.5}{s}$	$\frac{10 \cdot e^{-12 \cdot s}}{30 \cdot s + 1}$	$\frac{5}{10 \cdot s + 1}$	$\frac{1}{0.9 \cdot s + 1}$
15.	$3 + \frac{1}{10 \cdot s} + 0.5 \cdot s$	$\frac{2 \cdot (3 \cdot s + 1)}{(12 \cdot s + 1) \cdot (2 \cdot s + 1)}$	0.8	2
16.	$1 + \frac{1}{15 \cdot s}$	$\frac{6 \cdot e^{-7 \cdot s}}{35 \cdot s + 1}$	$\frac{2}{4 \cdot s + 1}$	5
17.	2.8	$\frac{0.48}{35 \cdot s^2 + 24 \cdot s + 1}$	$\frac{1}{0.9 \cdot s + 1}$	0.8
18.	$0.5 + \frac{0.8}{s}$	$\frac{10 \cdot e^{-12 \cdot s}}{30 \cdot s + 1}$	$\frac{5}{10 \cdot s + 1}$	0.8
19.	5.1	$\frac{5 \cdot e^{-8 \cdot s}}{12 \cdot s^2 + 5 \cdot s + 1}$	0.8	$\frac{5}{10 \cdot s + 1}$
20.	$4 + \frac{1}{50 \cdot s} + s$	$\frac{6 \cdot e^{-7 \cdot s}}{35 \cdot s + 1}$	2	5
21.	3	$\frac{0.48}{35 \cdot s^2 + 24 \cdot s + 1}$	$\frac{1}{0.9 \cdot s + 1}$	2
22.	$0.8 + \frac{0.01}{s} + 0.2 \cdot s$	$\frac{5 \cdot (s + 1)}{12 \cdot s^2 + 14 \cdot s + 1}$	0.8	$\frac{2}{4 \cdot s + 1}$

23.	8.4	$\frac{2 \cdot (3 \cdot s + 1)}{(12 \cdot s + 1) \cdot (2 \cdot s + 1)}$	$\frac{5}{10 \cdot s + 1}$	0.8
24.	$1.5 + \frac{1}{60 \cdot s}$	$\frac{10 \cdot e^{-12 \cdot s}}{30 \cdot s + 1}$	2	$\frac{1}{0.9 \cdot s + 1}$
25.	$0.5 + \frac{1}{15 \cdot s} + 1.5 \cdot s$	$\frac{5 \cdot (s + 1)}{12 \cdot s^2 + 14 \cdot s + 1}$	0.8	2
26.	2.8	$\frac{0.48}{35 \cdot s^2 + 24 \cdot s + 1}$	$\frac{2}{4 \cdot s + 1}$	0.8
27.	0.95	$\frac{5 \cdot e^{-8 \cdot s}}{12 \cdot s^2 + 5 \cdot s + 1}$	5	$\frac{2}{4 \cdot s + 1}$
28.	2.2	$\frac{(0.5 \cdot s + 1) \cdot e^{-8 \cdot s}}{(2 \cdot s + 1) \cdot (6 \cdot s + 1)}$	2	$\frac{5}{10 \cdot s + 1}$
29.	$1 + \frac{1}{12 \cdot s} + s$	$\frac{2}{5 \cdot s + 1}$	$\frac{1}{0.9 \cdot s + 1}$	0.8
30.	$3 + \frac{1}{65 \cdot s} + 2 \cdot s$	$\frac{s + 1}{8 \cdot s + 1}$	$\frac{5}{10 \cdot s + 1}$	2

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств. – М.: Машиностроение, 1983. – 424 с.
2. Фарзани Н.Г., Илясов Л.В., Азим-Заде А.Ю. Технологические измерения и приборы. – М.: Высш. шк., 1989. – 456 с.
3. Полоцкий Л.М., Лапшенков Г.И. Основы автоматики и автоматизации технологических процессов в химической промышленности. Руководство к лабораторным работам. /Под ред. Н.И. Гальперина. – М.: Химия, 1973. – 320 с.
4. Дианов В.Г. Технологические измерения и контрольно-измерительные приборы химических производств. – М.: Химия, 1973. – 328 с.
5. Стенцель Й.І. Математичне моделювання технологічних об'єктів керування. – К.: ІСДО, 1993. – 328 с.
6. Жданов Л.С., Жданов Г.Л. Физика. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1987. – 512 с.
7. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов в 2-х ч. Ч 1. /Н.А. Бабаков, А.А. Воронов, А.А. Воронова и др.; Под ред. А.А. Воронова. – М.: Высш. шк., 1986. – 367 с.
8. Ключев А.С., Минаев. Настройка систем контроля и автоматического регулирования. – Л.: Стройиздат, 1980. – 280 с.
9. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
10. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высш. шк., 1984. – 247 с.
11. Манзон Б.М. Maple V Power Edition. – М.: Информационно-издательский дом «Филинь», 1998. – 240 с.

Додаток 1

Властивості матеріалів

Таблиця Д1 – Властивості матеріалу чутливих елементів термоперетворювачів опору [9].

Матеріал	Густина, $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right]$	Питома теплоємність, $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}\right]$	Коефіцієнт теплопровідності, $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}\right]$	Питомий електричний опір, [Ом · м]	Температурний коефіцієнт, [K ⁻¹]
Мідь	8940	200	390	$0.017 \cdot 10^{-6}$	$3.9 \cdot 10^{-3}$
Платина	21400	113	430	$0.186 \cdot 10^{-6}$	$4.28 \cdot 10^{-3}$

Таблиця Д2 – Властивості матеріалу захисного кожуха для чутливих елементів термоперетворювачів опору [10].

Матеріал	Густина, $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right]$	Питома теплоємність, $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}\right]$	Коефіцієнт теплопровідності, $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}\right]$
Залізо	7880	440	74.4
Сталь V-12	7900	470	45
Сталь 20	7850	460	50
Сталь легована конструкційна	7780	480	38
Латунь	8600	376	95

Додаток 2

Застосування пакету Maple

Для застосування функції, яка реалізує зворотне перетворення Лапласа, необхідно підключати додатково спеціалізованого пакету інтегральних перетворень `inttrans`. Це робиться за допомогою оператора:

$$\text{with(inttrans);}$$

З цього пакету застосовується функція зворотного перетворення Лапласа:

$$y := \text{invlaplace}(W(s)/s, s, t);$$

де $W(s)$ – передавальна функція системи,

s – оператор Лапласа.

Для побудови графіка перехідного процесу системи застосовується команда:

$$\text{plot}(y, t = 0..60);$$

За допомогою цієї команди буде побудований графік перехідного процесу, заданий функцією y . Діапазон зміни часу завдано від 0 до 60 секунд.

Більш докладно про математичний пакет Maple можна подивитись у літературі, наприклад [11], або у довідці до цього пакету.

Додаток 3

Застосування пакету MatLab

Приклади програм, що реалізують розрахункові операції лабораторних робіт.

1 лабораторна робота.

```
% РОЗРАХУНОК СТАТИЧНОЇ (ГРАДУЮВАЛЬНОЇ) ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКА
%
% Початкові дані
% Діаметр дроту термометра опору
d=0.5*10^(-3);
% Питомий електричний опір термометра опору
ro=0.017*10^(-6);
% Кожух
% Довжина, внутрішній діаметр, зовнішній діаметр
l_k=120*10^(-3); D_in=2.5*10^(-3); D_out=4*10^(-3);
% Довжина термометру опору
l=4*l_k;
% Опір датчика при початковій температурі
R_0=ro*4*l/(pi*d^2);
% Температурний коефіцієнт міді
alfa=3.9*10^(-3);
% Початкова температура
T_begin=293;
% Кінцева температура
T_end=423;
% Градувальна характеристика датчика
T=T_begin:1:T_end;
R_t=R_0*(1+alfa*(T-T_begin));

% Друк графіка
pic = figure;
hPlot = plot(T,R_t);
set(hPlot, 'LineWidth', 3);
title('ГРАДУЮВАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДАТЧИКА');
xlabel('Температура [K]'),ylabel('Опір [Ом]')
print(pic,'-dtiff','-r600','Figures\Calibration_characteristic_of_the_sensor.tiff');
```

```
% РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКА БЕЗ ЗАХИСНОГО КО-
ЖУХА
%
% Початкові дані
% Діаметр дроту термометра опору
d=0.5*10^(-3);
% Кожух
% Довжина, внутрішній діаметр, зовнішній діаметр
l_k=120*10^(-3); D_in=2.5*10^(-3); D_out=4*10^(-3);
% Довжина термометру опору
l=4*l_k;
```

```

% Об'єм мідного дроту термометра опору
V_d=pi*d^2/4*1;
% Густина міді
gamma=8940;
% Питома теплоємність міді
c_d=200;
% Площа поверхні датчика
F_d=pi*d*1;
% Коефіцієнт теплопровідності міді
lambda=390;
% Коефіцієнт тепловіддачі
beta=0.76*lambda*(c_d/lambda)^0.8;
% Постійна часу датчика
teta=V_d*gamma*c_d/(beta*F_d);
% Температурний коефіцієнт міді
alfa=3.9*10^(-3);
% Початкова температура
T_begin=293;

% Передавальна функція термометра опору без захисного кожуха
num=[T_begin*alfa]; den=[teta 1];
W_sensor=tf(num,den);
% Записуємо передавальну функцію на диск
save('Data\W_sensor.mat','W_sensor');

% Розрахунок реакції датчика на східчає збурення
[R_t,T]=step(W_sensor);
% Друк графіка
pic = figure;
hPlot = plot(T,R_t);
set(hPlot, 'LineWidth', 3);
title('ДИНАМІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДАТЧИКА БЕЗ ЗАХИСНОГО КОЖУХА');
ylabel('Відносна температура'),xlabel('Час [c]')
print(pic,'-dtiff','-r600','Figures\Dynamic_characteristic_of_the_sensor.tiff');

```

2 лабораторна робота.

```

% РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКА У ЗАХИСНОМУ КО-
ЖУСІ
%
% Початкові дані
% Діаметр дроту термометра опору
d=0.5*10^(-3);
% Кожух
% Довжина, внутрішній діаметр, зовнішній діаметр
l_k=120*10^(-3); D_in=2.5*10^(-3); D_out=4*10^(-3);
% Довжина термометру опору
l=4*l_k;
% Об'єм мідного дроту термометра опору
V_d=pi*d^2/4*1;

```

```

% Густина міді
gamma_d=8940;
% Питома теплоємність міді
c_d=200;
% Площа поверхні датчика
F_d=pi*d*I;
% Коефіцієнт теплопровідності міді
lambda_d=390;
% Коефіцієнт тепловіддачі
beta_d=0.08*lambda_d*(c_d/lambda_d)^0.8;
% Постійна часу датчика
teta=V_d*gamma_d*c_d/(beta_d*F_d);
% Температурний коефіцієнт міді
alfa_d=3.9*10^(-3);
% Початкова температура
T_begin=293;
% Передавальна функція датчика
num=[T_begin*alfa_d]; den=[teta 1];
W_d=tf(num,den);

% Розрахунок параметрів кожуха
% Розрахунок об'єму матеріалу захисного кожуха
V_k=pi*(D_out^2-D_in^2)/4*I_k;
% Питома теплоємність кожуха
c_k=480;
% Густина матеріалу кожуха
gamma_k=7780;
% Площа поверхні теплообміну кожуха
F_k=pi*D_out*I_k;
% Коефіцієнт теплопровідності кожуха
lambda_k=38;
% Коефіцієнт тепловіддачі кожуха
beta_k=0.76*lambda_k*(c_k/lambda_k)^0.8;
% Постійна часу кожуха
fi=V_k*gamma_k*c_k/(beta_k*F_k);
% Передавальна функція кожуха
num=[1]; den=[fi 1];
W_k=tf(num,den);

% Передавальна функція термометра опору у захисному кожусі
W_d_k=series(W_d,W_k);
% Записуємо передавальну функцію на диск
save('Data\W_d_k.mat','W_d_k');

% Розрахунок реакції датчика на східчасте збурення
[R_t,T]=step(W_d_k);
% Друк графіка
pic = figure;
hPlot = plot(T,R_t);
set(hPlot, 'LineWidth', 3);
title('ДИНАМІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДАТЧИКА У ЗАХИСНОМУ КОЖУСІ');
ylabel('Відносна температура'),xlabel('Час [c]')

```

```
print(pic,'-dtiff','-r600','Figures\Dynamic_characteristic_of_the_sensor_in_the_protective_housing.tiff');
```

```
% ПОРІВНЯННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКА У ЗАХИСНОМУ КОЖУСІ
% ТА БЕЗ ЗАХИСНОГО КОЖУХА
%
% Завантажуємо файли для порівняння з файлу
%
load('Data\W_sensor.mat');
load('Data\W_d_k.mat');

% Розрахунок реакції датчика на східчасте збурення
[R_sensor,T1]=step(W_sensor);
[R_d_k,T2]=step(W_d_k);

% Друк графіка
pic = figure;
hPlot = plot(T1,R_sensor,'--',T2,R_d_k);
set(hPlot, 'LineWidth', 2);
title('ПОРІВНЯННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКА БЕЗ КОЖУХА ТА В КОЖУСІ');
ylabel('Відносна температура'),xlabel('Час [с]'), grid
legend('Без кожуха','У кожусі');
print(pic,'-dtiff','-r600','Figures\Comparison_of_dynamic_characteristics.tiff');
```

3 лабораторна робота.

```
% ОДНОКОНТУРНА СИСТЕМА БЕЗ КОРИГУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ
%
% ПІ-регулятор
num1=[15 1]; den1=[30 0]; sys1=tf(num1,den1);
% Виконавчий механізм
num2=[0.05]; den2=[40 1]; sys2=tf(num2,den2);
% Регулюючий орган
sys3=[0.8];
% Технологічний об'єкт керування
num4=[5]; den4=[120 1]; sys4=tf(num4,den4);
% Зворотній зв'язок системи
sys5=[0.98];

% Еквівалентна передавальна функція системи у прямому ланцюзі
num_sys=series(sys1,series(sys2,series(sys3,sys4)));

% Передавальна функція системи з від'ємним зворотним зв'язком
sys=feedback(num_sys,sys5);
% Записуємо передавальну функцію на диск
save('Data\sys.mat','sys');
```

```
% Розрахунок реакції системи на східчасте збурення
[y0,T]=step(sys);

pic = figure;
plot(T,y0)
title('Реакція системи зі зворотним зв'язком на східчасте збурення')
xlabel('Час [с]'),ylabel('Відносне переміщення')
print(pic,'-dtiff','-r600','Figures\Reaction_of_a_FS_without_cor.tiff');
```

4 лабораторна робота.

ОДНОКОНТУРНА СИСТЕМА З КОРИГУВАЛЬДНИМ ПРИСТРОЄМ

```
%
% ПІ-регулятор
num1=[15 1]; den1=[30 0]; sys1=tf(num1,den1);
% Виконавчий механізм
num2=[0.05]; den2=[40 1]; sys2=tf(num2,den2);
% Регулюючий орган
sys3=[0.8];
% Технологічний об'єкт керування
num4=[5]; den4=[120 1]; sys4=tf(num4,den4);
% Зворотній зв'язок системи
sys5=[0.98];
% Коригувальний зворотній зв'язок
sys6=[5];

% Передавальна функція виконавчого механізму, що охоплений
% коригувальдним зворотним зв'язком
sys2_6=feedback(sys2,sys6);

% Еквівалентна передавальна функція системи у прямому ланцюзі
num_sys=series(sys1,series(sys2_6,series(sys3,sys4)));

% Передавальна функція системи з від'ємним зворотним зв'язком
sys_corrective=feedback(num_sys,sys5);
% Записуємо передавальну функцію на диск
save('Data\sys_corrective.mat','sys_corrective');

% Розрахунок реакції системи на східчасте збурення
[y0,T]=step(sys_corrective);

pic = figure;
plot(T,y0)
title('Реакція системи зі зворотним зв'язком та корекцією на східчасте збурення')
xlabel('Час [с]'),ylabel('Відносне переміщення')
print(pic,'-dtiff','-r600','Figures\Reaction_of_a_FS_with_cor.tiff');
```

5 лабораторна робота.

```
% ПОРІВНЯННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ АСР
% ПРИ ОХОПЛЕНІ ВМ КОРИГУВАЛЬНИМ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ ТА БЕЗ НЬОГО
%
% Завантажуємо файли для порівняння з файлу
%
load('Data\sys.mat');
load('Data\sys_corrective.mat');

% Розрахунок реакції датчика на східчасте збурення
[R_sys,T1]=step(sys);
[R_corrective,T2]=step(sys_corrective);

% Друк графіка
pic = figure;
hPlot = plot(T1,R_sys,'--',T2,R_corrective);
set(hPlot, 'LineWidth', 2);
title('ПОРІВНЯННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСР З КОРЕКЦІЄЮ ТА БЕЗ КО-
РЕКЦІЇ');
ylabel('Відносне переміщення'),xlabel('Час [с]'), grid
legend('Без корекції','З корекцією ВМ');
print(pic,'-dtiff','-r600','Figures\Comparison_of_ACS_with_and_without_correction.tiff');
```

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання контрольної роботи з дисципліни
“ОСНОВИ АВТОМАТИКИ Й АВТОМАТИЗАЦІЇ”
(для студентів 5 курсу заочної форми навчання зі спеціальності 7.092501
“Автоматизоване управління технологічними процесами”)

Факультет механічний
Кафедра автоматизації технологічних процесів

Укладач:
Петро Йосипович ЄЛІСЄВ

Редактор: П.Й. Єлісєв
Технічний редактор: П.Й. Єлісєв
Оригінал-макет: П.Й. Єлісєв

Підписано до друку ____ . ____ . 2005 р.

Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Папір типограф. Гарнітура Times.

Друк офсетний. Умовн. друк. арк. ____ . Обл.-видавн. арк. ____ .
Тираж ____ прим. Вид. № ____ . Замов. № ____ . Ціна договірна.

Поліграфцентр Северодонецького технологічного інституту
Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля

Адреса редакції: 93400, м. Северодонецьк, Луганської обл., пр. Радянський, 59-А,

Телефон: 8 (06452) 4-40-48
E-mail: sti@sti.lg.ua http: www.sti.lg.ua