

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
**ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ, САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ**  
**ТА ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ**

з дисципліни

**«АВТОМАТИКА І КВП»**

(для студентів усіх форм навчання  
спеціальності 7.06010107 – Теплогазопостачання і вентиляція)

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2016**

Методичні вказівки до практичних занять, самостійної роботи та виконання контрольної роботи з дисципліни «Автоматика і КВП» (для студентів усіх форм навчання спеціальності 7.06010107 – Теплогазопостачання і вентиляція) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : С. М. Нубарян. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. – 65 с.

Укладач канд. техн. наук, доц. С. М. Нубарян

Рецензент: канд. техн. наук, проф. В. С. Сідак

Рекомендовано кафедрою експлуатації газових і теплових систем,  
протокол № 3 від 24.03.2011 р.

## ЗМІСТ

	<b>Стор.</b>
Вступ .....	4
1 Загальні вказівки .....	5
2 Методичні вказівки до практичних занять .....	6
2.1 Теплотехнічні вимірювання та прилади .....	6
2.1.1 Вимірювальні прилади .....	9
2.1.2 Вимірювання температур .....	10
2.1.3 Вимірювання тиску та його перепадів .....	18
2.1.4 Вимірювання рівнів та складу середовищ .....	26
2.2 Теорія автоматичного управління .....	32
2.2.1 Основи теорії автоматичного управління .....	32
2.2.2 Промислові регулятори .....	40
3 Методика самостійного вивчення курсу за темами .....	45
3.1 Теплотехнічні вимірювання та прилади .....	45
3.1.1 Загальні відомості про вимірювання і засоби вимірювання .....	45
3.1.2 Вимірювання температур .....	46
3.1.3 Вимірювання тиску і перепадів тиску .....	48
3.1.4 Вимірювання витрат різних середовищ і кількості тепла .....	49
3.1.5 Вимірювання рівня середовищ .....	51
3.2 Теорія автоматичного управління .....	52
3.2.1 Загальні відомості, поняття про автоматичне управління .....	52
3.2.2 Об'єкт автоматичного управління .....	53
3.2.3 Системи автоматичного управління .....	54
3.2.4 Операційний метод в автоматичності .....	55
3.2.5 Динамічні характеристики типових елементів САУ .....	56
3.2.6 З'єднання ланок і перетворення структурних схем .....	57
3.2.7 Дослідження лінійних САУ .....	58
3.3 Промислові регулятори .....	59
3.4 Основні відомості про нелінійні САУ .....	60
4 Методика виконання контрольної роботи .....	61
Список рекомендованих джерел .....	65

## ВСТУП

Мета цих методичних вказівок – ознайомлення студентів із способами виміру технологічних параметрів, придбання навичок із практичного їх застосування на виробництві, об'єктах теплогазопостачання і комунального господарства, а також уміння побудови типових систем автоматичного регулювання для різних об'єктів.

Виміри являють собою велике значення як єдиний засіб контролю технологічних процесів у системах теплогазопостачання і енергетики в цілому. Правильно організовані виміри забезпечують надійність, економічність і зручність ведення виробничих процесів, а також дають можливість їхньої широкої автоматизації. Крім того, без застосування контрольно-вимірювальних приладів відсутня можливість здійснення безпечного і безаварійного ведення виробничих процесів і роботи установок.

На сьогоднішній день народне господарство країни забезпечене величезним арсеналом засобів виміру як вітчизняного, так і закордонного виробництва – від найпростіших первинних перетворювачів і приладів до складних автоматичних приладів і систем, що дозволяють проводити контроль технологічних установок і складних виробництв і застосуванням засобів інформаційно-обчислювальної техніки.

Велика розмаїтість засобів виміру вимагає правильного їхнього вибору з врахуванням їх метрологічних характеристик і надійності. У цьому зв'язку одним з важливих питань є питання їхнього метрологічного забезпечення. Крім цього, необхідно враховувати економічну сторону питання, а також уніфікацію засобів виміру і умови їхньої експлуатації.

Вивчення студентами дисципліни «Контрольно-вимірювальні прилади і автоматика» дає можливість правильного вибору засобів контролю, а також отримати певні навички по розрахунку і проектуванню елементарних систем автоматичного керування технологічними процесами і різноманітним устаткуванням.

## 1 Загальні вказівки

Дані методичні вказівки розроблені відповідно до програми навчальної дисципліни «Автоматика і контрольно-вимірювальні прилади», що призначена для підготовки відповідних фахівців з рівнем кваліфікації «бакалавр» та «спеціаліст».

Загальна структура робочої програми навчальної дисципліни «Автоматика і контрольно-вимірювальні прилади» для студентів усіх форм навчання наведена в таблиці 1.1.

**Таблиця 1.1 – Структура робочої програми навчальної дисципліни**

Спеціальність, спеціалізація, шифр, аббревіатура	Всього, кредит / годин	Семестри	Години								Екзамен (семестр)	Залік (семестр)
			Аудиторні	у тому числі			Самостійна робота	у тому числі				
				Лекції	Практичні, семінари	Лабораторні		Контр. роб.	КП / КР	РГР		
7.092 108 ТГВ (7.06010107) <b>денне навчання</b>	3,0/108	8	45	30	15	-	63	-	-	-	8	-
7.092 108 ТГВ (7.06010107) <b>заочне навчання</b>	3,0/108	9	20	10	10	-	88	10	-	-	9	-

Навчальна дисципліна складається з двох змістовних модулів, розподіл часу між якими для різних форм навчання наведений у таблиці 1.2.

**Таблиця 1.2 – Розподіл часу для денної та заочної форм навчання**

Модулі та змістові модулі	Всього, кредит / год	Форми навчальної роботи							
		Денне навчання				Заочне навчання			
		Лек.	Сем., Пр.	Лаб.	СРС	Лек.	Сем., Пр.	Лаб.	СРС
<b>Модуль 1.</b> «Автоматика і контрольно-вимірювальні прилади»	3,0/108	30	15	-	63	10	10	-	88
<b>ЗМ 1.</b> «Теплотехнічні вимірювання та прилади»		14	8	-	35	4	5	-	28
<b>ЗМ 2.</b> «Теорія автоматичного керування»		16	7	-	28	6	5	-	60

План практичних занять з дисципліни для денної і заочної форм навчання наведено у таблиці 1.3.

**Таблиця 1.3 – План практичних занять**

Зміст		Кількість годин	
		Денне навчання	Заочне навчання
<b>ЗМ 1 «Теплотехнічні вимірювання та прилади»</b>			
1.1	Вимірювання температур	2	2
1.2	Вимірювання тиску та його перепадів	2	1
1.3	Вимірювання рівнів та складу середовищ	1	
1.4	Поточний контроль зі ЗМ 1 (тестування)	1	-
<b>ЗМ 2 «Теорія автоматичного керування»</b>			
2.1	Основи теорії автоматичного керування	6	5
2.2	Промислові регулятори	2	2
2.3	Поточний контроль зі ЗМ 1.2 (тестування)	1	-
<b>ВСЬОГО:</b>		15	10

При вивченні дисципліни «Автоматика і контрольно-вимірювальні прилади», програмою курсу передбачена самостійна робота студентів, в ході якої вони повинні вивчити ряд теоретичних питань для підготовки до здачі іспиту і проходженню тестування, а також і виконання індивідуального завдання (для заочної форми навчання). Розподіл часу для самостійної роботи студентів наведено у таблиці 1.4.

**Таблиця 1.4 – Самостійна робота студентів**

Форми самостійної роботи		Кількість годин	
		Денне навчання	Заочне навчання
1.	Вивчення окремих теоретичних питань та підготовка до тестування	25	-
2.	Вивчення теоретичних питань та підготовка до іспиту	38	78
3.	Виконання контрольної роботи	-	10

## **2 Методичні вказівки до практичних занять**

### **2.1 Теплотехнічні вимірювання та прилади**

Вимірювальний прилад – пристрій, призначений для об'єктивного відображення якісних і кількісних значень різних фізико-хімічних величин. Показання приладів можуть відображатися в аналоговому або цифровому виді.

Аналоговий вимірювальний прилад (АВП) відображає показання на градуьованій шкалі, на якій отримані показання змінюються пропорційно вимірюваній величині.

Існує два способи одержання показань за допомогою АВП:

- безпосередньо за шкалою, коли шкала градуьована в одиницях виміру вимірюваній величині  $X$ , а межа шкали  $X_{ш}$  відповідає межі виміру  $X_{в}$ ;

- з використанням проміжних обчислень, коли для одержання результату виміру необхідно показання шкали помножити на постійний нормувальний коефіцієнт  $K$ . Наприклад, лінійка шкали градуьована в дюймах з межею шкали 10", а виміри здійснюються в сантиметрах, з межею виміру 25 см, тоді

$$X = K \cdot X_{в},$$

де  $X$  – результат виміру в см;

$X_{в}$  – обмірюване показання приладу в дюймах;

$K$  – коефіцієнт, рівний 2,54.

У цифровому вимірювальному приладі (ЦВП) результат представляється у цифровому вигляді на екрані (індикатора, дисплея). ЦВП вимірює електричний сигнал, поданий на вхід приладу, і перетворює його в мікропроцесорі в цифрову послідовність. Якщо вимірювана величина неелектричного характеру (тиск, температура, витрата газу і т.п.), то необхідно використовувати первинний перетворювач (датчик).

Первинний вимірювальний перетворювач (ПВП) перетворює вимірювану величину в електричний сигнал, що змінюється пропорційно вимірюваній величині. Електричний сигнал подається з ПВП на вторинний вимірювальний прилад (ВВП). ВВП може бути як цифровий, так і аналоговий.

Завдяки передачі сигналу електричної величини, вторинний вимірюваний прилад може перебувати на великій відстані від первинного вимірювального перетворювача і місця виміру. Це дає можливість розмістити вимірювальні прилади на пульті керування.

Вимірювальний прилад може показувати значення вимірюваної величини у цей момент, а може реєструвати показання за певний проміжок часу з можливістю наступного аналізу відбиваючих змін вимірюваної величини. Найпростішим варіантом вимірювального приладу, що реєструє, є самописний вимірювальний прилад або самопис. У даних приладах до вказівної стрілки кріпиться перо із чорнильницею, що фіксує зміни вимірюваної величини на діаграмному папері, що приводиться в рух спеціальним механізмом.

У багатьох сучасних вимірювальних приладах фіксування і запис вимірюваної величини відбувається на базі персонального комп'ютера (ПК), з відображенням на екрані в цифровому або аналоговому вигляді. ПК дозволяє вимірювати і фіксувати одночасно безліч параметрів контрольованого об'єкта, що приходять від ПВП у вигляді уніфікованих електричних сигналів.

Всі вимірювальні прилади характеризуються класом точності  $\gamma$ . Клас точності показує, на яку максимальну величину у відсотках можуть відрізнятись показання приладу від дійсного значення вимірюваної величини.

Існують прилади з більш високим класом точності та більш низьким. Технічні вимірювальні прилади мають клас точності 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4... Вони відрізняються підвищеною міцністю, надійністю і ресурсом роботи. Лабораторні вимірювальні прилади мають підвищений клас точності 0,01; 0,02; 0,05. Вони більш вимогливі в обігу внаслідок підвищеної чутливості.

За допомогою приладів з високим класом точності можна зробити перевірку приладів з низьким класом точності і визначити, чи відповідає зазначений на приладі клас точності його дійсному класу. Якщо показання приладу не відхиляються від показань більш точного на величину більш його класу, виходить, що він відповідає заявленому класу. Ця процедура називається перевіркою (повіркою) приладу.



## 2.1.1 Вимірювальні прилади

*Мета проведення заняття* – ознайомитися з цифровими та аналоговими приладами, освоїти методику одержання показань за допомогою різних приладів і навчитися надавати результати вимірів.

*Завдання до практичних занять.*

1. Ознайомитися з виданими викладачем приладами.
2. У відношенні кожного визначити чи є даний вимірювальний прилад цифровим або аналоговим, яку величину він вимірює, чи відповідає межа шкали межі вимірів і якщо ні, то обчислити нормований коефіцієнт  $K$  по формулі:

$$K = \frac{P_B}{P_{ш}},$$

де  $K$  – нормований коефіцієнт;

$P_B$  – межа виміру;

$P_{ш}$  – межа шкали.

3. Визначити по приладу клас його точності.
4. Обчислити максимальну погрішність за шкалою:

$$\Delta_{ш} = \frac{P_{ш} \cdot \gamma}{100}.$$

5. Обчислити максимальну погрішність за виміром:

$$\Delta_B = \frac{P_B \cdot \gamma}{100}.$$

6. Результати занести в таблицю 2.1.

**Таблиця 2.1**

1. Найменування приладу	термометр	манометр	...	лічильник газу
2. Тип приладу і заводський номер				
3. Вимірювана величина				
4. Межа шкали				
5. Межа виміру				
6. Нормувальний коефіцієнт				
7. Клас точності				
8. Максимальна погрішність за шкалою				
9. Максимальна погрішність за виміром				

### ***Контрольні запитання***

1. Що таке вимірювальний прилад? Які бувають вимірювальні прилади?
2. Як виконуються виміри за допомогою аналогового вимірювального приладу?
3. У чому відмінність аналогового вимірювального приладу від цифрового?
4. Для чого служить первинний вимірювальний перетворювач?
5. Що таке клас точності виміру. Які існують класи точності?
6. Область застосування приладів, що реєструють.

### **2.1.2 Вимірювання температур**

*Мета проведення заняття* – ознайомлення з різними типами термометрів, використовуваних при вимірюванні температури, освоєння методики їх вибору і визначення погрішності вимірювання температури.

#### Термометри розширення

До термометрів розширення відносяться скляні термометри з рідинним наповненням, металеві (дилатометричні і біметалічні), а також манометричні з газовим або паровим заповненням. Ці термометри працюють на принципах температурного розширення і зміни тиску робочої речовини.

Дія *скляних* термометрів заснована на тепловому розширенні робочої рідини в робочому об'ємі термометра, що складається з резервуару і капіляра. Для рідинних термометрів розрахунок шкали здійснюється по наступній формулі:

$$t = t_1 + \frac{V - V_1}{V_2 - V_1} (t_2 - t_1), \quad (2.1)$$

де  $t$  – зміряна температура;

$V$  – об'єм рідини при даній температурі;

$t_1, t_2$  – температура танення льоду і кипіння води, відповідно;

$V_1, V_2$  – об'єми рідини при температурах  $t_1$  і  $t_2$ .

Допустимі погрішності для скляних термометрів залежно від інтервалів вимірюваних температур і ціни ділення наведені у таблиці 2.2.

**Таблиця 2.2 – Допустимі погрішності скляних термометрів**

Температурні інтервали		Допустима погрішність при ціні ділення °С				
від	до	0,1 і 0,2	0,5	1	2	5 і 10
- 30	0	-	± 1	± 1	± 2	-
+ 1	+ 100	± 0,2	± 1	± 1	± 2	-
+ 101	+ 200	-	± 1	± 2	± 3	± 5
+ 201	+ 300	-	± 2	± 3	± 4	± 5 ± 10
+ 301	+ 400	-	-	± 4	± 5	± 5 ± 10
+ 401	+ 500	-	-	± 5	± 5	± 10

При використанні скляних рідинних термометрів, особливо для точних (лабораторних) вимірювань температури, необхідно враховувати процес старіння скла, який викликає зсув нульової відмітки термометра, на яку необхідно вводити поправку.

Поправка до вимірювань термометрів на зсув нульової відмітки визначається відповідно до наступного виразу:

$$\Delta t = t_0 - t_0', \quad (2.2)$$

де  $t_0$  – паспортне положення нульової відмітки;

$t_0'$  – положення нульової відмітки, визначене експериментально.

Окрім поправок на зсув нульової відмітки при точному вимірюванні температур необхідно також вводити поправку на виступаючий стовп рідини термометра, коли останній не може бути занурений у вимірюване середовище до відлічуваної відмітки на шкалі.

Поправка на виступаючий стовп рідини в цьому випадку може бути розрахована по формулі:

$$\Delta t = n \cdot \alpha \cdot (t - t_1), \quad (2.3)$$

де  $\Delta t$  – поправка на виступаючий стовп термометричної рідини, °С;

$n$  – висота виступаючого стовпа в градусах шкали термометра;

$t$  – температура, що показується термометром, °С;

$t_1$  – температура виступаючої частини, вимірювана додатково, °С;

$\alpha$  – видимий коефіцієнт розширення рідини у склі, град<sup>-1</sup>.

Характеристики рідинних скляних термометрів наведені у таблиці 2.3.

**Таблиця 2.3 – Характеристики рідинних скляних термометрів**

Рідина	Межі вимірювання, °С		Коефіцієнт об'ємного теплового розширення, К <sup>-1</sup>	
	ніжній	верхній	дійсний	видимий
Ртуть	- 35	750	0,00018	0,00016
Гас	- 60	300	0,00095	0,00093
Етиловий спирт	- 80	70	0,00105	0,00103
Толуол	- 90	200	0,00109	0,00107
Петролейний ефір	- 120	25	0,00152	0,00150
Пентан	- 200	20	0,00092	0,00090

У дилатометричних і біметалічних термометрах у якості робочого тіла використовуються тверді матеріали (в основному метали). Їх принцип дії заснований на зміні розмірів твердого тіла залежно від зміни температури в обмеженому температурному діапазоні, у якому зберігається лінійна залежність подовження робочого тіла від температури. Залежність зміни довжини твердого тіла від температури може бути виражена формулою:

$$L_t = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t), \quad (2.4)$$

де  $L_t, L_0$  – довжина тіла при робочій і початковій температурах, відповідно;

$\alpha$  – середній коефіцієнт лінійного розширення твердого тіла, °С<sup>-1</sup>.

Коефіцієнти лінійного розширення металів, вживаних в даних термометрах, наведені у таблиці 2.4.

**Таблиця 2.4 – Коефіцієнти лінійного розширення деяких металів**

Матеріал	$\alpha \cdot 10^{-4}, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Інтервал температур
Алюміній (90 %)	0,238-0,310	0-500
Латунь	0,183-0,236	0-400
Мідь червона	0,253	0-150
Хромомолібденова трубка	0,123	0-100
Сталь нікелева (Ni 20-22 %)	0,200	0-500
Інвар	0,009	0-200

Дилатометричні термометри мають ряд достоїнств (простота пристрою, висока чутливість), проте для безпосереднього вимірювання температури використовуються рідко. В основному вони застосовуються як первинні

вимірювальні перетворювачі у системах автоматичного регулювання температури.

В біметалічних термометрах у якості чутливого елемента використовується пластина з двох смуг різних металів, зварених по всій довжині. Оскільки коефіцієнт лінійного термічного розширення для цих металів різний, то при нагріванні пластини відбувається її вигин у напрямі металу з меншим коефіцієнтом розширення. При цьому вигин пластини може бути перетворений в переміщення вказівної стрілки або в переміщення електричних контактів. Найбільш часто вживаними металами в біметалічних термометрах є інвар-сталь або інвар-латунь. При високих температурах в біметалічній пластині в результаті вигину може виникнути напруга, що перевищує межу пружності металу, тому в цих термометрах передбачаються відповідні обмежувачі.

*Завдання до практичних занять.*

1. Ознайомитися з різними типами термометрів (скляні, металеві і манометричні).
2. Визначити їх метрологічні характеристики по відповідних позначеннях.
3. Використовуючи рівняння шкали (2.1) скляного термометра, визначити висоту підйому стовпа рідини для вимірюваної температури при відомих діаметрах капіляра і об'ємі рідини  $V_1$  і  $V_2$ . Результати розрахунків занести у таблицю 2.5.

**Таблиця 2.5**

Вимірювана температура, $^{\circ}\text{C}$	Діаметр капіляра, мм ( $V_1 = 0,01$ ; $V_2 = 0,02$ , мл)			Діаметр капіляра, мм ( $V_1 = 0,005$ ; $V_2 = 0,01$ , мл)		
	0,3	0,4	0,5	0,3	0,4	0,5
50						
150						
250						

4. Використовуючи дані таблиці 2.2 і таблиці 2.3, а також вираз (2.3), визначити погрішність ртутного термометра для зміряної температури  $250^{\circ}\text{C}$  за різних умов вимірювання. Результати розрахунків занести в таблицю 2.6.

**Таблиця 2.6**

Виступаюча частина стовпа рідини термометра, °С	Ціна ділення, °С ( $t_{зовн} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$ )			Ціна ділення, °С ( $t_{зовн} = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$ )		
	0,5	1,0	2,0	0,5	1,0	2,0
100						
150						
200						

### Термоелектричні термометри

До термоелектричних термометрів відносяться металеві і неметалічні термометри опору, а також термопари. Термоелектричні термометри призначені для вимірювання температури тільки спільно з вторинними приладами (мілівольтметри, потенціометри – для термопар, логометри, омметри і електронні мости – для термометрів опору). До достоїнств електричних термометрів можна віднести наступне:

- високий ступінь точності вимірювання температури;
- можливість градуювання шкали приладу на будь-який допустимий вимірюваний температурний інтервал;
- можливість централізації контролю температури шляхом під'єднання декількох термометрів опору до одного вимірювального приладу;
- можливість автоматичного запису і дистанційної передачі сигналу вимірюваної температури.

Принцип дії *термометрів опору* заснований на властивості речовин змінювати свій електричний опір при зміні температури. В даний час застосовуються термометри опору з чистих металів (платина, мідь), які називають металевими, і оксидів металів, які називають напівпровідниковими.

Рівняння шкали металевих термометрів опору в діапазоні вимірюваних температур лінійно і має наступний вигляд:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t), \quad (2.5)$$

де  $R_t$  і  $R_0$  – опір термометра при робочій температурі і  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;

$\alpha$  – температурний коефіцієнт опору (ТКО).

Температурний коефіцієнт металів визначається для інтервалу температур  $0\text{-}100 \text{ } ^\circ\text{C}$  відповідно до виразу:

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{R_{100} - R_0}{100}. \quad (2.6)$$

Для напівпровідникових термометрів, що випускаються, в діапазоні температур від мінус 100 °С до 300 °С, залежність їх опору від температури визначається по наступній формулі:

$$R_t = A \cdot T^b \cdot e^{B/T}, \quad (2.7)$$

де  $T$  – абсолютна температура, К;

$A$ ,  $B$  і  $b$  – постійні коефіцієнти, визначувані властивостями матеріалу;

$e$  – підстава натурального логарифма.

При використанні терморезисторів в температурних інтервалах не більше 25 °С, формула (2.7) спрощується і матиме вигляд:

$$R_t = A \cdot e^{B/T}. \quad (2.8)$$

Для уніфікації металевих термометрів опору існує декілька типів їх градувань, які визначаються значенням  $R_0$ , що входить в рівняння (2,5) і (2,6), і металом термометра опору. Градування металевих термометрів опору наведено в таблиці 2.7.

**Таблиця 2.7 – Значення  $R_0$  для різних градувань термометрів опору**

Метал	Позначення термометра	Гр. 20, Ом	Гр. 21, Ом	Гр. 22, Ом	Гр. 23, Ом	Гр. 24, Ом
Платина	ТСП	10	46,0	100,0	-	-
Мідь	ТСМ	-	-	-	53,0	100,0

В основі вимірювання температур за допомогою *термопар* лежить фізичне явище виникнення електричного струму в ланцюзі, складеному з різних двох провідників. Залежно від температури в місцях приєднання провідників, на їх кінцях виникає різниця потенціалів (термо-едс), яка може бути визначена відповідно до виразу:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0), \quad \dots\dots(2.9)$$

де  $e_{AB}(t)$  – термо-едс між провідниками А і В в точці вимірювання;

$e_{AB}(t_0)$  – термо-едс між провідниками А і В при 0 °С.

При вимірюванні температур за допомогою термопар значення  $t_0$  може відрізнятися від нуля, але обов'язковою умовою має бути  $t_0 = \text{const}$ .

Для визначення термо-едс для термопар, що складаються з різних металів, використовують відомі термо-едс, визначуваних металів по відношенню до платини, які наведені в таблиці 2.8. При цьому використовується співвідношення, що отримується із закону Вольта:

$$E_{m1, m2}(t, t_0) = E_{m1, Pt}(t, t_0) - E_{m2, Pt}(t, t_0), \quad (2.10)$$

де  $E_{m1, m2}(t, t_0)$  – термо-едс для визначуваних двох металів;

$E_{m1, Pt}(t, t_0)$  – термо-едс окремого металу з платиною.

**Таблиця 2.8 – Термо-едс металів і сплавів з чистою платиною при  $t = 100^\circ\text{C}$  і  $t_0 = 0^\circ\text{C}$**

Найменування металу (сплаву)	Позначення (склад)	Термо-едс, мВ	Температура застосування, $^\circ\text{C}$		Температура плавлення, $^\circ\text{C}$
			Тривале	Короткочасне	
Алюміній	Al	+0,40	-	-	658
Алюмель	95%Ni + 5%(Al, Si, Mg)	-1,02 ÷ -1,38	1000	1250	1450
Вольфрам	W	+0,79	2000	2500	3367
Залізо чисте	Fe	+1,8	600	800	1528
Залізо виріб	Fe	+1,87	600	800	1400
Золото	Au	+0,8	-	-	1063
Константан	60%Cu + 40%Ni	-3,5	600	800	1220-1280
Копель	56%Cu + 44%Ni	-4,0	600	800	1250
Кобальт	Co	-1,68 ÷ -1,76	-	-	1478
Молібден	Mo	+1,31	2000	2500	3000
Мідь чиста	Cu	+0,76	350	500	1083
Мідь провідникова	Cu	+0,75	350	500	-
Манганін	84%Cu + 13%Mn + 2%Ni + 1%Fe	+0,8	-	-	910
Ніхром	80%Ni + 20%Cr	+1,5 ÷ +2,5	1000	1100	1500
Нікель	Ni	-1,5 ÷ -1,54	1000	1100	1455
Платина	Pt	±0,00	1300	1600	1779
Платинородій	90%Pt + 10%Rh	+0,64	1300	1600	-
Платинородій	90%Pt + 10%Ir	+1,3	1000	1200	-
Ртуть	Hg	+0,04	-	-	-38,7
Сурма	Sb	+4,86	-	-	630,5
Свинець	Pb	+0,44	-	-	327
Срібло	Ag	+0,72	600	700	960,5
Хромель	90%Ni + 10%Cr	+2,71 ÷ +3,13	1000	1250	1450
Цинк	Zn	+0,7	-	-	419,5

**Приклад.** Підібрати термопару з неблагородних металів для тривалого вимірювання температури газів з температурою до  $700^\circ\text{C}$ , що відходять з турбіни, а також визначити



значення термо-едс. при температурі вільних кінців вибраної термопари  $t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , при допущенні лінійності градувальної характеристики.

За даними таблиці 2.8 термоелектроди з неблагородних металів, що тривало витримують задану робочу температуру, є: алюмель, ніхром, нікель і хромель. Як позитивний електрод вибираємо хромель ( $E_{ХП} = 2,71 \text{ мВ}$ ), а як негативний – нікель ( $E_{НП} = -1,5 \text{ мВ}$ ). По рівнянню (2.10) термо-едс. хромель-нікелевої термопари при  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  складе:

$$E_{ХН}(100, 0) = E_{ХП}(100, 0) - E_{НП}(100, 0) = 2,71 - (-1,5) = 4,21 \text{ (мВ) градувальна залежність.}$$

Зважаючи на допущення про лінійність характеристики термопари, визначаємо її термо-едс. при робочій температурі  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  і температурі вільних кінців  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$E_{ХН}(700, 0) = 29,47 \text{ (мВ).}$$

Вводячи поправку на температуру вільних кінців вибраної термопари, визначимо методом інтерполяції її термо-едс при  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$E_{ХН}(25, 0) = \frac{4,21}{100 - 0} \cdot 25 = 1,06 \text{ (мВ).}$$

Отже, в робочих умовах термо-едс вибраної термопари складе:

$$E_{ХН}(700, 25) = E_{ХН}(700, 0) - E_{ХН}(25, 0) = 29,47 - 1,06 = 28,41 \text{ (мВ).}$$

### *Завдання до практичних занять.*

1. Ознайомитися з різними типами промислових термоелектричних термометрів (термометри опору, термопари).

2. Визначити їх характеристики по відповідних позначеннях.

3. Виходячи з допущення лінійності шкали металевих термометрів опору, а також рівнянь (2.5) і (2.6), визначити значення опору платинового термометра Гр. 21 і мідного термометра Гр. 24 при температурі  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , якщо їх опір при температурі  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  складає відповідно  $63,99 \text{ Ом}$  і  $142,6 \text{ Ом}$ .

4. Визначити по графіках шкал для вищезгаданих термометрів яким з них доцільно вимірювати температуру, що дорівнює  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

5. По заданим викладачем різним матеріалам для електродів розрахувати термо-едс відповідних термопар для ряду вимірюваних температур з урахуванням поправки на температуру вільних кінців, яка дорівнює  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

6. Визначити погрішність шкали термопари залежно від зміни температури її вільних кінців.

7. Результати розрахунків оформити в табличному вигляді, при необхідності відобразити їх графічно.

### ***Контрольні запитання***

1. Які термометри працюють на принципі розширення робочої речовини? Приведіть приклади.

2. Які термометри відносяться до термоелектричних? Опишіть принцип їх дії.

3. Що позначає градування промислових термометрів опору? Які градування для них використовуються?

4. Яким чином підбирають електроди для термопар?

5. Яким чином впливає температура вільних кінців термопар на вимірювання температури?

### **2.1.3 Вимірювання тиску та його перепадів**

Тиск є одним з найважливіших фізичних параметрів, і його вимірювання необхідне як в розрахункових цілях, наприклад для визначення витрати, кількості і теплової енергії середовища, так і в технологічних цілях, наприклад для контролю і прогнозування безпечних і ефективних гідравлічних режимів напірних трубопроводів, резервуарів і іншого устаткування. Для цих цілей застосовується велика різноманітність засобів вимірювання тиску і його перепадів, що розрізняються за принципом дії, конструкцією і точністю.

Розрізняють декілька типів тиску. Тиск, вимірюваний щодо вакууму, називають тиском *абсолютним* (ТА). *Барометричний тиск* (ТБ) – це абсолютний тиск земної атмосфери. Він залежить від конкретних умов вимірювання: температури повітря і висоти над рівнем моря. Тиск, який більше або менше атмосферного, але вимірюється щодо атмосферного,

називають відповідно *надмірним* (ТН) або тиском розрідження, *вакуумметричним* (ТВ). Очевидно, що  $T_A = T_B + T_H$  або  $T_A = T_B - T_V$ . Різниця тиску середовищ в двох різних процесах або двох точках одного процесу, при якому жоден з тисків не є атмосферним, називають *диференціальним тиском* (ТД) або перепадом тиску.

В даний час при вимірюванні тиску часто користуються як системними, так і позасистемними одиницями тиску. Співвідношення між вживаними одиницями тиску наведені в таблиці 2.9.

**Таблиця 2.9 – Співвідношення між одиницями тиску**

Одиниці	Па	кгс/м <sup>2</sup>	кгс/см <sup>2</sup>	мм вод. ст.	мм рт.ст.	атм	бар
Па	1	0,10197	$1,0197 \cdot 10^{-5}$	0,101197	$7,50 \times 10^{-3}$	$0,987 \times 10^{-5}$	$10^{-5}$
кгс/м <sup>2</sup>	9,8066	1	$10^{-4}$	1	$73,56 \times 10^{-3}$	$9,678 \times 10^{-5}$	$9,8 \times 10^{-5}$
кгс/см <sup>2</sup>	$98,06 \times 10^{-3}$	$10^4$	1	$10^4$	735,56	0,96784	0,98066
мм вод. ст.	9,8066	1	$10^{-4}$	1	$73,56 \times 10^{-3}$	$9,678 \times 10^{-5}$	$9,806 \times 10^{-5}$
мм рт. ст.	133,322	13,595	$13,595 \cdot 10^{-4}$	13,595	1	$1,3158 \times 10^{-3}$	$1,333 \times 10^{-3}$
атм	$1,0133 \times 10^{-5}$	10332	1,0332	10332	760	1	1,01325
бар	$10^5$	10197,2	1,0197	10197,2	750,06	0,98692	1

Для приблизних оцінок і розрахунків тиску з відносною погрішністю не більше 0,5 % використовуються наступні співвідношення:

$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 104 \text{ кгс/м}^2 = 0,97 \text{ атм} = 0,98 \times 10^3 \text{ Мбар} = 0,98 \text{ бар} = 10^4 \text{ мм вод. ст.} = 10 \text{ м вод. ст.} = 735 \text{ мм рт. ст.} = 0,98 \times 10^5 \text{ Па} = 98 \text{ кПа} = 0,098 \text{ МПа.}$

При оцінці величини тиску з точністю 2 % допускається, що  $1 \text{ ат} = 1 \text{ бар} = 0,1 \text{ МПа.}$

Для прямого вимірювання тиску рідкого або газоподібного середовища застосовуються *манометри*. Якщо відображення значення тиску на первинному приладі не проводиться, але він дозволяє отримувати і дистанційно передавати відповідний вимірюваному тиску сигнал, то такий прилад називають *вимірювальним перетворювачем тиску* або *датчиком тиску*. Проте можливо і об'єднання цих двох властивостей в одному приладі, який називається манометром-датчиком.

Манометри класифікують за принципом дії і конструкції, по вигляду вимірюваного тиску, по застосуванню і призначенню, за типом відображення даних і іншими ознаками. На рисунку 2.1 наведена схема класифікації приладів для вимірювання різних типів тиску.

На практиці для вимірювання різного типу тиску у якості вимірників прямої дії в основному використовуються деформаційні прилади з пружними чутливими елементами і рідинні.

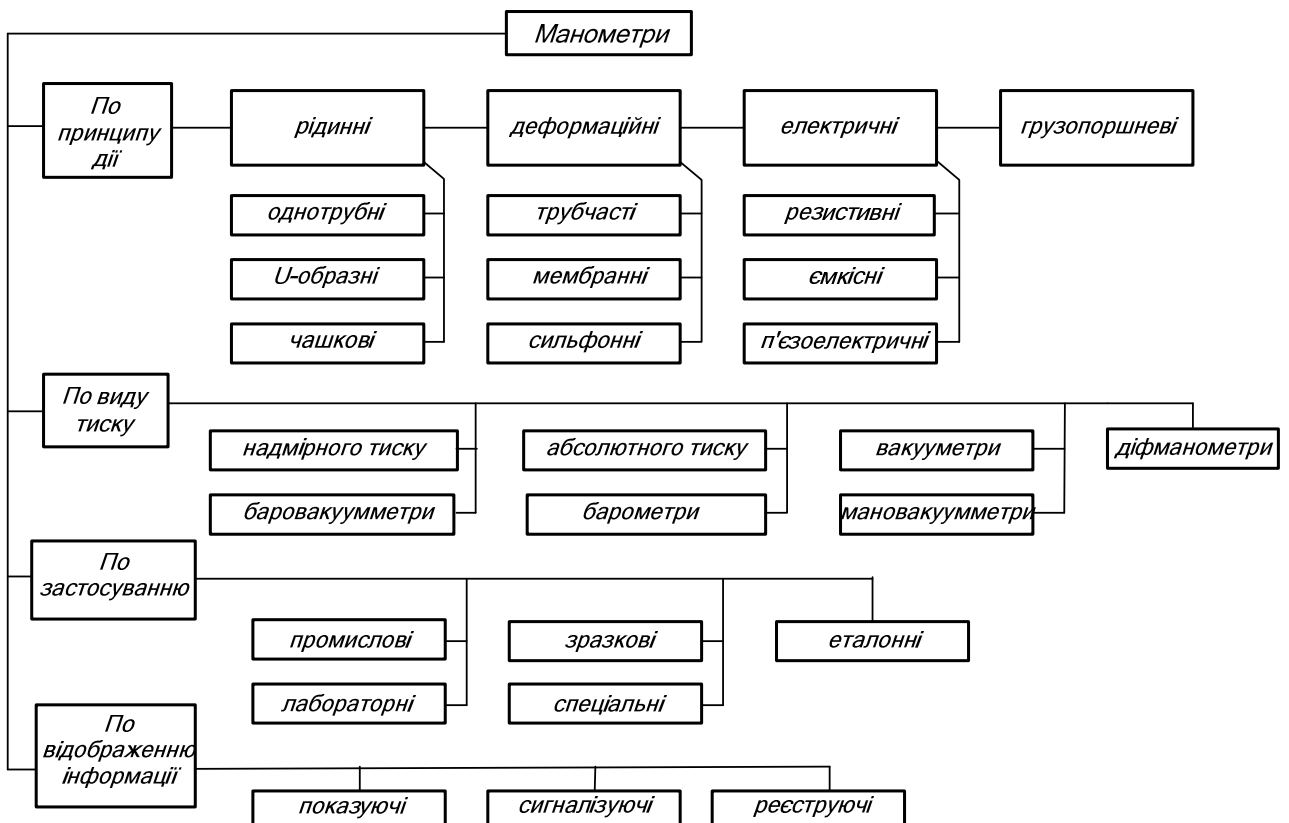


Рисунок 2.1 – Класифікація приладів вимірювання тиску

У рідинних манометрах у якості робочої рідини можуть використовуватися ртуть, вода або спирт, що визначається величиною вимірюваного тиску або необхідною точністю. Ці прилади характеризуються простотою конструкції, достатньою точністю і дешевизною. У них вимірюваний тиск визначається висотою підйому стовпа робочої рідини і визначається відповідно до рівняння:

$$p = \rho \cdot g \cdot h, \quad (2.11)$$

де  $p$  – вимірюваний тиск, Па;

$h$  – різниця рівнів (рівень підйому) робочої рідини, м;

$\rho$  – щільність робочої рідини кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Точність вимірювання даних приладів залежить від ціни ділення шкали, величини вимірюваного тиску (при невеликому вимірюваному тиску точність вимірювання істотно знижується) і практично не залежить від щільності.

Для точних вимірювань, за допомогою рідинних приладів необхідно враховувати погрішності, обумовлені впливом температури і прискоренням сили тяжіння. При вимірюванні тиску або розрідження рідинними приладами за міру тиску приймають висоту стовпа рідини  $h_n$ , виражену в міліметрах водяного стовпа або міліметрах ртутного стовпа, при цьому стовп рідини відносять відповідно до 4 °С для води або до 0 °С для ртуті і нормальному прискоренню сили тяжіння (9,8066 м/с<sup>2</sup>). Насправді ж висота стовпа рідини по манометру відлічується при деяких робочих значеннях температури і прискорення сили тяжіння. Тому необхідно безпосередній відлік по манометру коректувати, тобто приводити його до нормальних умов. При цьому довжину шкали рідинного приладу зазвичай приводять до 20 °С, оскільки ділення шкали наносяться і вивіряються при цій температурі. В цьому випадку рівняння шкали приладу визначиться відповідно до виразу:

$$h_n = h_t \cdot \frac{g_\varphi}{g} \cdot \{1 - [\beta \cdot (t - t_0) - \alpha \cdot (t - 20)]\}. \quad (2.12)$$

де  $\alpha$  – лінійний коефіцієнт розширення матеріалу шкали, град<sup>-1</sup>;

$\beta$  – коефіцієнт розширення робочої рідини при 20 °С, град<sup>-1</sup>;

$t, t_0$  – робоча і нормальна температура для робочої рідини, °С;

$g$  – прискорення вільного падіння в місці вимірювання, м/с<sup>2</sup>;

$h_t$  – висота стовпа робочої рідини при робочій температурі, °С.

У приладах тиску деформаційного типу використовують пружні чутливі елементи (ПЧЕ). Ці прилади розраховані на вимірювання тиску в межах від 50 Па до 1000 МПа. У якості пружних чутливих елементів в цих приладах використовують різні мембрани, мембранні коробки, сільфони і трубчасті пружини, які також застосовуються в дифманометрах.

Однією з основних характеристик пружного чутливого елементу є залежність переміщення його робочої точки  $\lambda$  від навантаження  $p$ , що діє (тиск або різниці тиску). Статична характеристика ПЧЕ  $\lambda = f(p)$  залежно від його конструкції і способу навантаження може бути лінійною або нелінійною. Зазвичай вважають за кращий ПЧЕ з лінійною статичною характеристикою, а у разі нелінійної характеристики для отримання рівномірної шкали приладу застосовуються різні випрямляючі пристрої.

При лінійній статичній характеристиці ПЧЕ жорсткість його дорівнює відношенню сили тиску до відповідного переміщення:

$$k = \frac{p}{\lambda} \quad (\text{Па/м}). \quad (2.13)$$

Чутливість пружного елементу є величиною, зворотною жорсткості:

$$S = \frac{\lambda}{p} \quad (\text{м/Па}). \quad (2.14)$$

Переміщення робочої точки (ділянки) ПЧЕ під дією тиску або різниці тисків визначається впливом зосередженої сили тиску, яка визначається по наступних виразах:

$$q = p \cdot F_{\text{эф}} \quad \text{або} \quad q = \Delta p \cdot F_{\text{эф}}, \quad (2.15)$$

де  $q$  – сила тиску на ПЧЕ, Н;

$\Delta p$  – перепад (різниця) тисків, Па;

$F_{\text{эф}}$  – ефективна площа ПЧЕ, м<sup>2</sup>.

Серед мембран, використовуваних у якості ПЧЕ, в приладах тиску використовують плоскі або гофровані металеві мембрани, а також неметалічні (гумові) з жорстким металевим центром, рівним 80 % робочого діаметру

мембрани, який представляє ефективну площу мембрани. Гофровані ж мембрани часто об'єднують в гофровані коробки для підвищення чутливості приладів тиску.

*Сильфони* застосовуються в приладах тиску (напоромірах, тягомірах і манометрах для вимірювання невеликого тиску 40000 Па) при вимірюванні вакуумметричного тиску – до 0,1 МПа, абсолютного тиску – 2,5 МПа, надмірного тиску – до 60 МПа, різниці тиску – до 0,25 МПа. Сильфони є тонкостінною трубкою з поперечним гофруванням і витримують тиск на стискування в 1,5-2 рази більше, ніж на розтягування при дії тиску зсередини.

Жорсткість сильфона визначається його геометричними розмірами, пружними властивостями матеріалу трубки, радіусом закруглення гофра  $R$  і ущільненням гофра. У випадках, коли потрібно збільшити жорсткість сильфона, він забезпечується циліндровою гвинтовою пружиною.

Ефективна площа сильфона з достатньою точністю може бути розрахована по наступній емпіричній формулі:

$$F_{\text{эф}} = \pi \cdot \left( \frac{R_H + R_B}{2} \right)^2, \quad (2.16)$$

де  $R_H$  і  $R_B$  – зовнішній і внутрішній радіуси сильфона.

Статична характеристика сильфонов лінійна тільки для невеликих переміщень і володіє високою стабільністю і чутливістю. У зв'язку з цим сильфони в приладах тиску використовуються в режимі невеликих деформацій.

*Трубчасті пружини* є зігнутою по дузі трубкою з центральним кутом  $\gamma$ , рівним  $200-250^\circ$  еліптичного або плоскоовального перетину. Вони називаються пружиною Бурдона. Один кінець такої пружини закріплений нерухомо, а інший, вільний, закритий пробкою і запаяний. Вільний кінець пружини сполучений з механізмом показуючого приладу або з іншим перетворювачем. Саме така форма перетину трубчастих пружин дозволяє переміщатися її вільному кінцю при підведенні усередину її тиску. Схема пружини Бурдона наведена на рисунку 2.2.

Тонкостінні пружини Бурдона застосовуються для вимірювання надмірного і абсолютного тиску до 6 МПа, а вакуумметричного – до 0,1 МПа. Для вимірювання більш великого тиску в діапазоні до 20-160 МПа застосовуються товстостінні пружини овального перетину.

Трубчаста пружина тим чутливіше, чим більше радіус її кривизни  $R_k$  і чим менше товщина металу. Чутливість трубчастих пружин з різними перетинами, залежить від співвідношення осей поперечного перетину  $a/b$ .

Повне переміщення  $\lambda$  вільного кінця пружини Бурдона визначається відповідно до виразу:

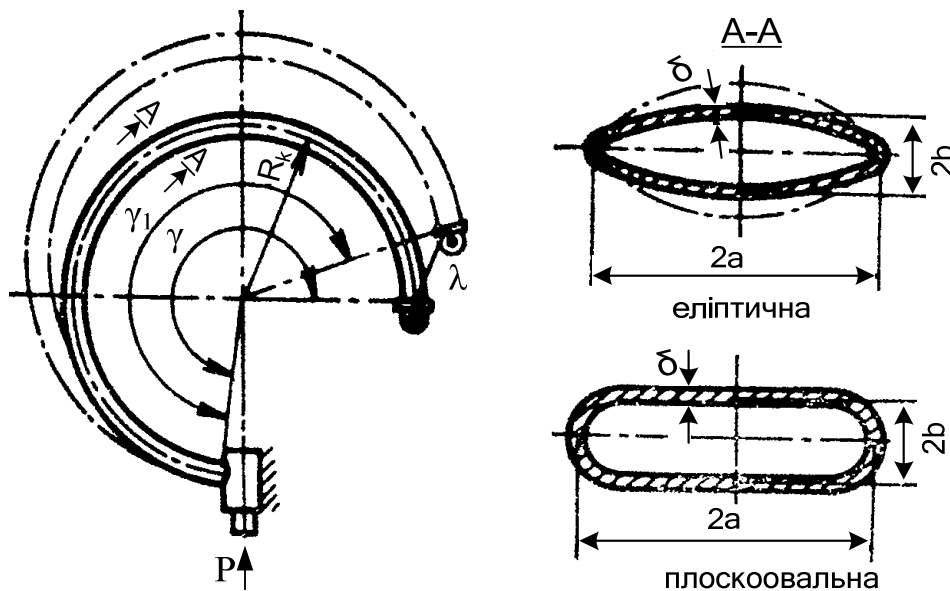


Рисунок 2.2 – Трубчаста пружина Бурдона різних перетинів

$$\lambda = p \cdot \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{R_k^2}{b \cdot \delta} \cdot \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \cdot \frac{\alpha}{\beta + \chi^2} \cdot C = \frac{p}{K_p}, \quad (2.17)$$

де  $K_p$  – жорсткість пружини Бурдона по тиску;

$E$  – модуль пружності матеріалу пружини;

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона;

$\delta$  – товщина стінки пружини;

$\alpha$  і  $\beta$  – коефіцієнти, залежні від співвідношення  $a/b$ , (див. табл. 2.10);

$$C = \sqrt{(1 - \cos \gamma)^2 + (\gamma - \sin \gamma)^2};$$

$$\chi = \frac{R_k \cdot \delta}{a^2} - \text{«головний параметр» пружини Бурдона.}$$



**Таблиця 2.10 – Значення коефіцієнтів для розрахунку трубчастих пружин Бурдона**

Форма перетину	$a/b$	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10
Еліптична	$\alpha$	0,750	0,636	0,566	0,493	0,452	0,430	0,416	0,400	0,390
	$\beta$	0,083	0,062	0,053	0,045	0,044	0,043	0,042	0,042	0,042
Плоскооціальна	$\alpha$	0,637	0,594	0,548	0,480	0,437	0,408	0,388	0,360	0,343
	$\beta$	0,096	0,110	0,115	0,121	0,121	0,121	0,121	0,119	0,118

*Завдання до практичних занять.*

1. Ознайомитися з виданими різними типами промислових вимірників тиску (перепаду тиску).

2. Визначити їх метрологічні характеристики по відповідних на них позначеннях.

3. Визначити відносну помилку вимірювання U-образного манометра при вимірюванні тиску 5,0 і 0,5 кПа, якщо ціна ділення його шкали складає 1 мм.

4. Визначити висоту підйому стовпа рідини в рідинному манометрі при тиску, рівному 2,0 кПа, у випадку використанні робочої рідини води і ртуті.

5. За отриманими початковими даними визначити погрішність рідинного манометра залежно від температури.

6. Перевести за завданням викладача значення тиску з несистемних одиниць в системні.

7. За виданим завданням розрахувати трубчасту пружину Бурдона.

8. Для заданого матеріалу металевої мембрани і її ефективної площі побудувати графік залежності її переміщення від тиску в діапазоні пружних деформацій.

### ***Контрольні запитання***

1. Пояснить фізичну суть тиску. Які види тиску вам відомі?

2. У яких одиницях вимірюється тиск? Взаємозв'язок між цими одиницями.

3. Проведіть класифікацію засобів вимірювання тиску.

4. Перерахуйте відомі вам рідинні прилади для вимірювання тиску.

5. Які типи пружних чутливих елементів використовуються в приладах тиску?
6. Перерахуйте основні характеристики пружних чутливих елементів.
6. Для чого призначаються диференціальні манометри? Які їх типи Вам відомі?
7. Покажіть схемний конструкцію манометра з трубчастою пружиною.
8. Чим відрізняються перетворювачі тиску від вимірників? Які сучасні перетворювачі тиску Вам відомі?

#### **2.1.4 Вимірювання рівнів та складу середовищ**

Прилади для вимірювання рівня знаходять широке застосування при автоматизації технологічних процесів в різних галузях промисловості, а також в комунальному господарстві. Вони мають різні принципи дії, конструктивне виконання і умови експлуатації, що необхідно враховувати при їх виборі для автоматизації конкретного технологічного процесу або об'єкту. Вимірювання рівня проводять як для рідких, так і сипких середовищ.

Вимірювання і контроль рівня необхідне в тих випадках, коли підтримка його на заданому значенні пов'язана з безпекою роботи технологічного устаткування, наприклад, рівень води в барабані парового котла, а також для визначення кількості вимірюваних середовищ в різних резервуарах і баках.

Технічні засоби, вживані для вимірювання рівня, називаються рівнемірами. Прилади, призначені для сигналізації граничних рівнів рідини, називаються сигналізаторами рівня.

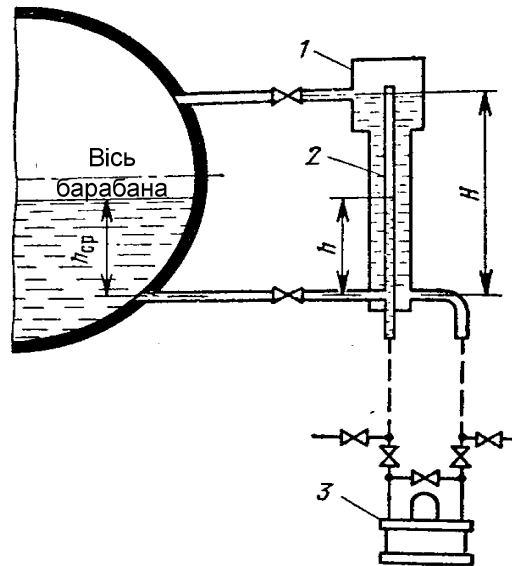
Залежно від вимог, що пред'являються до об'єктів вимірювання, застосовуються різні методи вимірювання рівня. Якщо немає необхідності дистанційної передачі свідчень рівнемірів, то для вимірювання рівня рідини зазвичай достатнє застосування вказівних стекол, яке засноване на принципі сполучених судин або показуючих дифманометров - рівнемірів.

Для дистанційного вимірювання рівня рідин, що знаходяться під атмосферним, вакуумметричним або надмірним тиском застосовують метод вимірювання по різниці тиску за допомогою дифманометров, а також методів контролю за допомогою поплавця (буйка), ультразвукових, ємкісних і так далі. При цьому багато хто з цих рівнемірів комплектується перетворювачами різного типу і вторинними показуючими приладами.

Усі існуючі рівнеміри можуть бути використані при вимірюваннях рівня рідких середовищ, а для вимірювання рівня сипких – тільки акустичні.

Найбільш простими приладами для вимірювання рівня рідин в резервуарах є *поплавковий* і *буйковий* рівнеміри, у основу роботи яких закладено визначення положення плаваючого поплавця (буйка) на поверхні рідини. Проте дані вимірники не можуть бути використані, якщо рідина знаходиться під тиском або розряджена. Погрішність цих приладів в основному залежить від зміни щільності вимірюваного середовища і точності вимірювальних перетворювачів.

Для вимірювання рівня рідин в баках, апаратах і резервуарах, що знаходяться під атмосферним, надмірним і вакуумметричним тиском, часто застосовується метод вимірювання, заснований на визначенні різниці тиску. При цьому як вимірювальні прилади застосовують різні типи дифманометрів з розділовими і зрівняльними судинами. Так, наприклад, для вимірювання рівня води в барабані парового котла різниця тиску, що створюється зрівняльною двокамерною судиною і вимірювана дифманометром (див. рис. 2.3), визначиться по виразу:



**Рисунок 2.3 - Вимірювання рівня в барабані котла**

1 – зрівняльна судина; 2 – внутрішня трубка судини; 3 – дифманометра

$$\Delta p = (H - h) \cdot (\rho' - \rho'') \cdot g, \quad (\text{Па}), \quad (2.18)$$

де  $H$  и  $h$  – висота стовпа води в судині і трубці відповідно, м;

$\rho'$  и  $\rho''$  – щільність води і пари в стані насичення при робочому тиску,  $\text{кг/м}^3$ .

З цього рівняння виходить, що при верхньому рівні води в барабані котла  $h = H$  при будь-якому робочому тиску,  $\Delta P_n = 0$ , а при нижньому рівні, коли  $h = 0$  –  $\Delta p_n = H \cdot (\rho' - \rho'') \cdot g$ . Для отримання нижнього перепаду тиску в мм вод. ст. користуються наступним співвідношенням:

$$\Delta p_n = 0,102 \cdot H \cdot (\rho' - \rho'') \cdot g. \quad (2.19)$$

Для градуювання шкали вторинного приладу по проміжних точках шкали дифманометра  $N_x$ , лежачих усередині вимірюваного діапазону рівнів користуються наступним виразом:

$$\Delta p_x = 0,5 \cdot \Delta p_n \cdot \left(1 - \frac{\pm N_x}{|N|}\right), \quad (2.20)$$

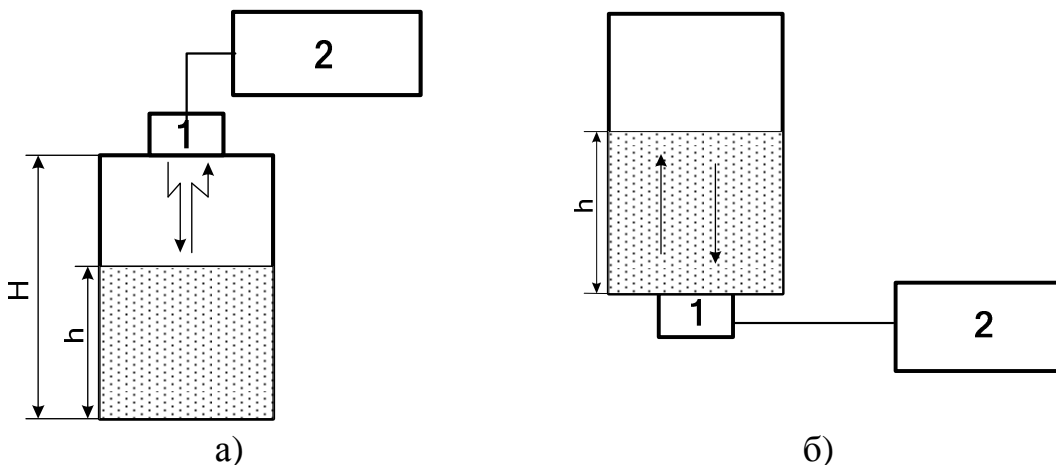
де  $N$  – межа вимірювання дифманометра, мм.

У принцип роботи акустичних і ультразвукових рівнемірів закладений метод, заснований на використанні ефекту віддзеркалення звукових коливань від межі розділу двох середовищ з різними акустичними опорами.

У акустичних рівнемірах використовується метод локації рівня рідини через газове середовище. Гідністю цього методу є те, що акустична енергія, послана в об'єкт для вимірювання рівня, розповсюджується через газове (повітряне) середовище. Це забезпечує універсальність по відношенню до різних середовищ, рівень яких необхідно зміряти, а також високу надійність первинних перетворювачів, що не контактують з вимірюваним середовищем.

У ультразвукових рівнемірах використовується метод, заснований на віддзеркаленні ультразвукових коливань від межі розділу середовищ.

Залежно від використовуваного параметра звукової хвилі розрізняють частотний, фазовий і імпульсний способи вимірювання рівня, а також їх комбінації. На рисунку 2.4 приведені загальні схеми вимірювання рівня за допомогою акустичних рівнемірів.



**Рисунок 2.4 – Вимірювання рівнів акустичними рівнемірами**

а – акустичний рівнемір; б – ультразвуковий рівнемір  
1 – приймально-передавальний перетворювач; 2 – схема вимірювання

У акустичних рівнемірах мірою рівня є час розповсюдження звукових коливань  $t$  від джерела випромінювання до межі розділу середовищ і назад до приймача, яке визначається відповідно до виразу:

$$t = \frac{2 \cdot (H - h)}{a}, \quad (2.21)$$

де  $(H-h)$  – висота повітряного стовпа;

$H$  – відстань від джерела випромінювання до нульового рівня;

$h$  – рівень вимірюваного середовища;

$a$  – швидкість звуку в повітрі (газі).

У типовій схемі ультразвукового рівнеміра використовується імпульсний спосіб вимірювання рівня по віддзеркаленню ультразвукових коливань від межі розділу середовищ з боку рідини. Мірою рівня рідини  $h$  в цьому випадку є також час проходження ультразвукових коливань  $t$  від випромінювача до межі розділу середовищ (рідина - газ) і назад до приймача. Час проходження ультразвукових коливань  $t$  визначається по виразу:

$$t = \frac{2 \cdot h}{a}, \quad (2.22)$$

де  $a$  – швидкість розповсюдження звуку у рідині.

*Завдання до практичних занять.*

1. Ознайомитися з принципом дії різних рівнемірів.
2. Визначити відносні погрішності поплавкового рівнеміра при заданому його внутрішньому об'ємі залежно від зміни щільності вимірюваної рідини і помилці його виготовлення по вазі.
3. Провести розрахунок шкали вторинного приладу дифманометра, що працює із зрівняльною двокамерною судиною для вимірювання рівня води в барабані парового котла при заданому робочому тиску і діапазоном шкали вторинного приладу  $N = \pm 500$  мм. Результати розрахунків занести в таблицю. Для заданого робочого тиску за довідковими даними заздалегідь визначити температуру, а також щільність води і пари в стані насичення.

**Таблиця 2.11 – Результати розрахунку шкали рівнеміра на базі дифманометра**

$P_{роб}$ , МПа	5,0										
$N_x$ , мм	500	400	300	200	100	0	-100	-200	-300	-400	-500
$\Delta p_x$ , мм вод. ст											
$P_{роб}$ , МПа	10,0										
$N_x$ , мм	500	400	300	200	100	0	-100	-200	-300	-400	-500
$\Delta p_x$ , мм вод. ст											

4. Для заданих різних рідин визначити зміну свідчень ультразвукового рівнеміра.

5. Визначити точність свідчень ультразвукового рівнеміра залежно від зміни щільності рідини.

6. Розрахувати рівень води в резервуарі, що заввишки 2 м, якщо час проходження сигналу акустичного рівнеміра складає 3 мс, а швидкість звуку в повітрі складає 340 м/с.

### ***Контрольні запитання***

1. У яких технологічних об'єктах вимірювання рівня є одним з основних вимірювань?

2. Якого типу рівнеміри використовуються в промисловості?

3. Покажіть схему поплавкового рівнеміра рідини. Які у нього переваги і недоліки?

4. Чим відрізняються акустичні і ультразвукові рівнеміри? Покажіть їх структурні схеми і поясните принцип роботи.

5. Для чого використовуються зрівняльні судини при вимірюванні рівня рідин за допомогою дифманометрів - рівнемерів?

6. Покажіть різні варіанти схем підключення дифманометрів - рівнемерів при вимірюванні рівня в барабані парових котлів.

7. Чим відрізняються схеми вимірювання рівнів рідини в ємностях з надмірним або вакуумметричним тиском і без нього?

8. Який тип рівнемерів може бути використаний для вимірювання рівня сипких тіл?

## 2.2 Теорія автоматичного управління

### 2.2.1 Основи теорії автоматичного управління

В даний час практично всі області техніки і промисловості використовують пристрої автоматики від простих регуляторів до складних систем управління. Розвиток автоматики, а також постійна розробка нових пристроїв, що управляють, для різних об'єктів вимагають єдиних підходів, пов'язаних з автоматизацією (стійкість, якість, швидкість регулювання та ін.). Це стало передумовою створення теорії автоматичного управління (ТАУ), яка дозволяє математично описувати об'єкти управління і вивчати системи управління ними.

*Об'єкт управління* зазвичай характеризується наступними властивостями: стійкістю, акумулюючою здатністю, інерційністю, наявністю запізнювання, астатизмом і т.д.

Повний математичний опис об'єктів управління складається з рівнянь статички і динаміки. Причому багато об'єктів управління можуть бути описані практично однаковими рівняннями динаміки. Це дозволяє використовувати структурні типові ланки при дослідженні систем управління. В основному рівняння динаміки, що описують об'єкти ТГВ, мають наступний вигляд:

$$T \frac{dy}{dt} + K_C y = K_0 u \quad (2.23)$$

де  $T$  – постійна часу;

$K_C$  – коефіцієнт самовирівнювання;

$K_0$  – коефіцієнт передачі;

$y$  – керований параметр;

$u$  – дія, що управляє.

Причому, якщо  $K_C = 0$  – об'єкт астатичний; при  $K_C > 0$  – об'єкт статичний з самовирівнюванням; при  $K_C < 0$  – об'єкт нестійкий.

Сукупність об'єкту управління і технічних пристроїв, призначених для управління, називається *системою автоматичного управління* (САУ). Основне завдання САУ полягає в тому, щоб на основі інформації про об'єкт виробити



управляючи дії, що дозволяють підтримувати об'єкт в стабільному стані або перевести його в новий стабільний стан.

Системи автоматичного управління є комплексом взаємодіючих технічних пристроїв і елементів, пов'язаних з об'єктом управління, в основу яких закладені різні фізичні принципи роботи.

При дослідженні процесів, що протікають в системах управління, користуються схемами, що ідеалізуються, які точно описуються математично і приблизно характеризують реальні ланки систем в заданому діапазоні зміни сигналів.

Залежно від характеристик різних ланок САУ незалежно від їх призначення і фізичного принципу дії, можна виділити ряд типових ланок, що описуються звичайними лінійними диференціальними рівняннями першого і другого порядків.

Серед типових ланок САУ розрізняють прості і комбіновані, а також особливі ланки. Характеристики типових ланок САУ наведені в таблиці 2.12.

**Таблиця 2.12 – Типові ланки САУ**

Тип ланки	Рівняння ланки	Приклади реалізації
1	2	3
Підсилювальна (пропорційна)	$y = k \cdot x$	механічна передача, редуктор, пневматичний або гідравлічний клапани підсилювач, пружні елементи
Інтегруюча	$y = k \int_0^t x(t) dt + y_0 ; (T \frac{dy}{dt} = kx)$	вал електродвигуна, гідравлічний резервуар, гідравлічний підсилювач і т.д.
Диференціююча	$y = k dx / dt$	демпфуючі пристрої, електричний тахогенератор, електричні ланцюги з реактивними елементами
Аперіодична	$T \frac{dy}{dt} + y = kx$	теплові прилади, печі, газгольдери, гідравлічні резервуари, температурні датчики і так далі
Аперіодична другого порядку	$T_2^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} + y = kx$	теплообмінники типу «труба у трубі», котельні агрегати, товстостінні печі і т.д.
Колювальна	$T^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + 2 \cdot \xi \cdot T \frac{dy}{dt} + y = kx,$	пружна механічна система з істотним впливом маси, поплавковий дифманометр, мембранний пневмоклапан і т.д.

Продовження таблиці 2.12

1	2	3
Із запізнюванням	$y(t) = x(t - \tau)$ ,	конвеєрні установки, трубопровідні системи без урахування втрат на тертя та ін.
Форсуюча	$y = k(x + Tdx/dt)$ .	безінерційні об'єкти
Інерційно- диференціююча	$y + Tdy/dt = kdx/dt$ .	демпфуючі пристрої, що працюють спільно з пружними елементами
Інерційно-форсуюча	$y + T_2dy/dt = k(x + T_1dx/dt)$	будь-які об'єкти
$T$ – постійна часу; $k$ – коефіцієнт передачі; $\tau$ – час запізнювання; $\xi$ – ступінь загасання.		

У загальному випадку, лінійні САУ можуть бути описані лінійними диференціальними рівняннями з постійними коефіцієнтами:

$$a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y = b_0 \frac{d^m x}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{dx}{dt} + b_m x, \quad (2.24)$$

де  $n$  – порядок САУ;

$a_i, b_j, m$  – параметри системи.

Проте при дослідженнях і розрахунках САУ в теорії автоматичного управління використовується операційне числення, яке дозволяє досить просто отримати вирішення рівняння (2.24) шляхом переходу від операцій диференціювання і інтегрування функцій на операції нижчого рангу, використовуючи перетворення Фур'є і Лапласа. Після перетворення Лапласа (переходу від функції часової змінної до функції комплексної змінної) вираз (2.24) може бути записаний в наступному вигляді:

$$y(p)(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n) = x(p)(b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m), \quad (2.25)$$

де  $p$  – символ диференціювання оригіналу функції.

Використовуючи перетворення Лапласа, отримують передавальні функції  $W(p)$  САУ і типових ланок за нульових початкових умов, які використовуються при проектуванні і дослідження систем управління. У таблиці 2.13 наведені передавальні функції основних типових ланок САУ.

**Таблиця 2.13 – Передавальні функції типових ланок САУ**

Тип ланки	Передавальна функція
Підсилювальна (пропорційна)	$W(p) = K$
Інтегруюча	$W(p) = \frac{K}{p}$
Диференціююча	$W(p) = K \cdot p$
Аперіодична	$W(p) = \frac{K}{T \cdot p + 1}$
Аперіодична другого порядку	$W(p) = \frac{K}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}$
Колювальна	$W(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 2\zeta T p + 1}$
Із запізнюванням	$W(p) = e^{-p\tau}$ ,
Форсуюча	$W(p) = K(1 + T \cdot p)$
Інерційно-диференціююча	$W(p) = \frac{K \cdot p}{T \cdot p + 1}$
Інерційно-форсуюча	$W(p) = \frac{K(T_1 p + 1)}{T_2 \cdot p + 1}$

При проектуванні САУ часто виникає завдання перетворення структурних схем систем управління з метою спрощення їх розрахунку. Виходячи з припущення, що передавальні функції окремих ланок не залежать від їх з'єднання, то будь-яка лінійна САУ може бути представлена окремою ланкою з еквівалентною передавальною функцією ( $W_E(p)$ ). При цьому розрізняють три види з'єднання структурних ланок: послідовне; паралельне згідне і паралельне зустрічне (із зворотним зв'язком).

Послідовне з'єднання  $n$  ланок з передавальними функціями може бути замінене однією ланкою з еквівалентною передавальною функцією:

$$W_E(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p). \quad (2.26)$$

При паралельному згідному з'єднанні ланок, коли на вхід всіх ланок подається один і той же сигнал, а вихідні їх сигнали підсумовуються, то еквівалентна передавальна функція такого з'єднання матиме вигляд:

$$W_E(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p). \quad (2.27)$$

Паралельним зустрічним включенням ланок є їх з'єднання по схемі із зворотним зв'язком, еквівалентна передавальна функція якого має вигляд:

$$W_E(p) = \frac{W_1(p)}{1 \pm W_1(p) \cdot W_2(p)} \quad (2.28)$$

де  $W_1(p)$  – передавальна функція ланки прямого зв'язку;

$W_2(p)$  – передавальна функція ланки зворотного зв'язку.

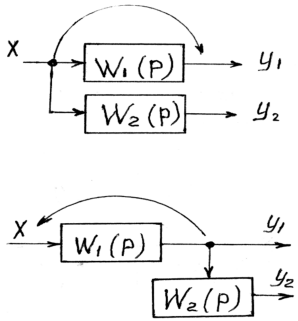
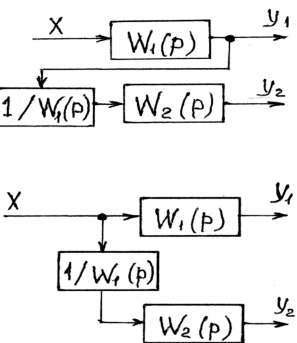
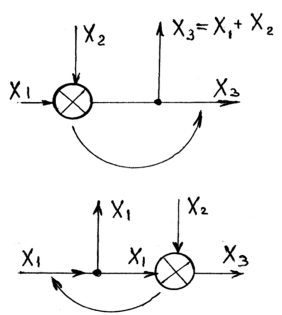
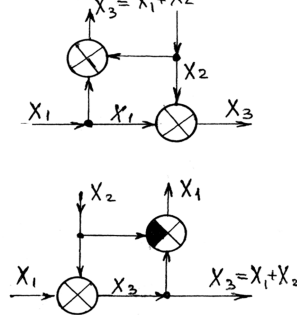
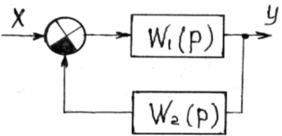
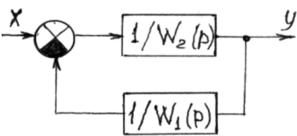
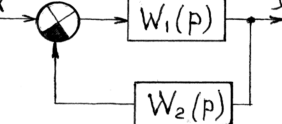
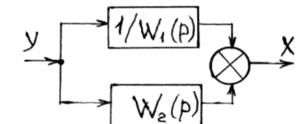
При цьому знак «+» в знаменнику еквівалентної передавальної функції відповідає негативному зворотному зв'язку, а знак «-» – позитивному зворотному зв'язку.

Багато реальних САУ мають зв'язки, що перехрещуються, між ланками, тобто коли відсутнє чисто послідовне і паралельне з'єднання. В цьому випадку необхідне перетворення структурних схем по правилах, що наведені в таблиці 2.14. Перетворення структурних схем засноване на переміщенні ланок і вузлів, при цьому основоположним є дотримання умов еквівалентності рівнянь алгебри, що описують дані схеми.

**Таблиця 2.14 – Основні правила перетворення структурних схем**

Вид перетворення схеми	Початкова схема	Перетворена схема
1	2	3
1. Переміщення ланки через вузол галуження передачі сигналу  То ж, проти напрямку передачі сигналу		
2. Переміщення ланки через вузол підсумовування по напрямку передачі сигналу  То ж, проти напрямку передачі сигналу		

Продовження таблиці 2.14

1	2	3
<p>3. Переміщення гілки через ланку по напрямку передачі сигналу</p> <p>То же, против направления передачи сигнала</p>		
<p>4. Переміщення вузла, що підсумовує, через вузол розгалуження по напрямку сигналу.</p> <p>То ж, проти напрямку передачі сигналу</p>		
<p>5. Еквівалентність паралельних зустрічних з'єднань</p>		
<p>6. Еквівалентність зустрічних і приголосних паралельних з'єднань</p>		

Після отримання еквівалентної передавальної функції системи, проводять її дослідження на якість управління, при якому визначається стійкість САУ і якість перехідних процесів, що протікають в системі після прикладання зовнішніх дій.

Стійкість – найбільш важливий і обов'язковий показник якості систем управління, який на практиці визначається шляхом розрахунку критеріїв стійкості. Серед критеріїв стійкості розрізняють алгебраїчні (Гурвіца, Рауса і ін.) і частотні (Михайлова, Найквіста). Найбільш простим критерієм стійкості є критерій Гурвіца, який отримують шляхом складання визначників з коефіцієнтів характеристичного рівняння САУ. Так для характеристичного рівняння САУ, визначники Гурвіца мають наступний вигляд:

$$\Delta_1 = a_1;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 \cdot a_2 - a_0 \cdot a_3;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 + a_0 \cdot a_1 \cdot a_5 - a_0 \cdot a_3^2 - a_1^2 \cdot a_4;$$

.....

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-3} & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-4} & a_{n-2} & a_n \end{vmatrix}$$

$$\Delta_n = a_n \cdot \Delta_{n-1}$$

Відповідно до критерію стійкості Гурвіца для стійкості лінійної САУ необхідно і достатньо, щоб в її характеристичному рівнянні при  $a_0 > 0$  всі діагональні мінори, що отримується з головного визначника Гурвіца, були позитивними.

Стійкість САУ – необхідна умова її працездатності, але вона не вичерпує всіх вимог, які висуваються до систем управління. Комплекс вимог, що визначає поведінку системи в сталому і перехідному режимах при заданій дії, об'єднують в поняття якості процесу управління. Щоб характер зміни керованої величини задовольняв необхідній якості, необхідно підібрати (налаштувати) параметри САУ, забезпечуючи точне і швидке відпрацювання управляючої дії.

При дії на вхід системи ступінчастої одиничної дії всі змінні стійкої системи, зробивши перехідний процес, приходять в новий сталий стан. По характеру поведінки перехідного процесу в часі можна судити про якість досліджуваної САУ.

Можливі криві перехідних процесів зображені на рисунку 2.5.

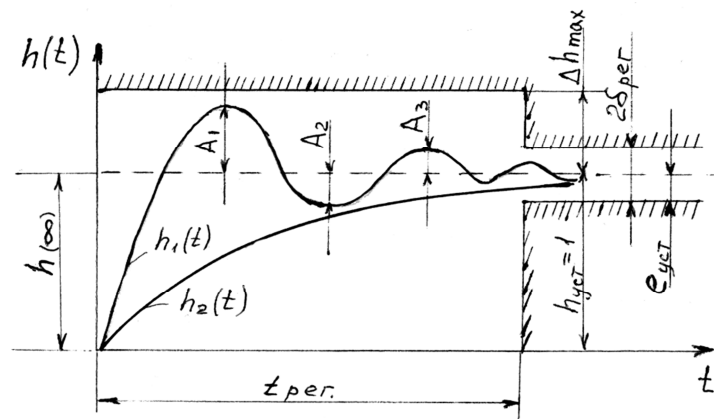


Рисунок 2.5 – Криві перехідних процесів САУ

Крива  $h_1(t)$  відповідає процесам з *перерегулюванням* (коливальні процеси), а перехідні процеси типу  $h_2(t)$  є аперіодичними і називаються *процесами без перерегулювання*.

Для оцінки перехідного процесу, окрім виду кривої, вводять кількісні показники, що є визначальними параметрами перехідного процесу, які повинні задовольняти необхідним значенням. До таких параметрів відносяться:

1. *Статична точність системи*

$$e_{уст} = |h_{уст} - h_{(\infty)}|.$$

2.  $t_{рег}$  – час регулювання, що визначає швидкодію системи, яка визначається із співвідношення:

$$|h(t) - h_{уст}| \leq 2\delta_{рег} \quad \text{при } t \geq t_{рег}, \quad (2.29)$$

де  $2\delta_{рег}$  – задана точність системи ( $2\delta_{рег} \approx 5\%$ ).

3. *Динамічна помилка* (перерегулювання), що характеризує плавність протікання процесу, визначається по виразу:

$$\sigma = \frac{A_1 - h_{уст}}{h_{уст}} \% \leq \Delta h_{\max}. \quad (2.30)$$

4.  $N$  – кількість перерегулювань, що показує, скільки разів перехідний процес за час регулювання перевищує величину  $2\delta_{рез}$  (для якісних САУ  $N \leq 2$ ).

5. Ступінь загасання (для коливальних процесів), визначається по виразу:

$$\xi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} \geq \xi_{треб}. \quad (2.31)$$

Зазвичай необхідне значення ступеня загасання  $\xi_{треб} \geq 0,9$ .

Оцінка якості управління по кривих перехідних процесів відноситься до *прямих методів*, застосування яких ефективно у випадку, якщо знайдений аналітичний вираз перехідного процесу і по ньому побудований графік  $h(t)$ , а також за наявності експериментальних кривих. Інакше для дослідження якості процесів управління застосовуються інтегральні оцінки якості, які відносяться до *непрямих методів*.

## 2.2.2 Промислові регулятори

Динамічні характеристики об'єктів можуть бути представлені деякими типовими залежностями. Це дозволяє різноманітність законів регулювання звести до декількох типових (стандартних) законів, які в основному використовуються на практиці. В цьому випадку завдання синтезу САУ зводиться до вибору відповідного регулятора з типовим законом регулювання і визначення оптимальних параметрів його налаштування.

У практиці автоматизації виробничих об'єктів в більшості випадків застосовуються регулятори з наступними законами регулювання.

*Пропорційні регулятори* (П-регулятори). Дані регулятори переміщують регулюючий орган пропорційно відхиленню регульованої величини від заданого значення:

$$U(t) = K \cdot e(t), \quad (2.32)$$

де  $K$  – коефіцієнт передачі П-регулятора;

$e(t)$  – відхилення керованої величини.



Пропорційні регулятори дозволяють стійко регулювати практично всі промислові об'єкти. Проте при різних навантаженнях керованого об'єкту П-регулятори підтримують керований параметр на різних значеннях. Це пов'язано з тим, що переміщення регулюючого органу в положення, відповідне навантаженню, що змінилося, може бути проведене тільки за рахунок зміни керованої величини. Дане явище називається *залишковою нерівномірністю* або *статизмом*.

*Інтегральні регулятори* (І-регулятори). Ці регулятори переміщують регулюючий орган пропорційно інтегралу відхилення керованої величини і описуються наступним рівнянням:

$$U(t) = k_{ин} \int e(t) dt . \quad (2.33)$$

Даний закон може бути записаний інакше:

$$U'(t) = k_{ин} e(t) , \quad (2.34)$$

тобто швидкість переміщення регулюючого органу пропорційна відхиленню керованої величини від заданого значення. Коефіцієнт передачі І-регулятора чисельно дорівнює відношенню швидкості переміщення регулюючого органу до відхилення керованої величини на одиницю її вимірювання. І-регулятор подібний до інтегруючої ланки і може стійко працювати тільки з об'єктами, що мають самовирівнювання.

*Пропорційно-інтегральні регулятори* (ПІ-регулятори). Ці регулятори називають також *ізодромними* регуляторами. ПІ-регулятори переміщують регулюючий орган пропорційно сумі відхилення і інтеграла від відхилення керованої величини:

$$U(t) = K \left[ e(t) + \frac{1}{T_u} \int e(t) dt \right] . \quad (2.35)$$

Цей закон управління може бути також представлений у вигляді:

$$U'(t) = K \left[ e'(t) + \frac{1}{T_u} e(t) \right] , \quad (2.36)$$

тобто швидкість переміщення регулюючого органу пропорційна відхиленню і швидкості відхилення керованої величини від заданого значення. Постійна часу інтегрування  $T_u$  характеризує ступінь введення інтеграла в закон регулювання і називається *часом ізодрома*. Рівняння ПІ-регулятора відповідає паралельному включенню пропорційної і інтегруючої ланок. При збільшенні  $T_u$  характеристика ПІ-регулятора наближається до П-регулятора, а у випадку  $K \rightarrow 0$  і  $T_u \rightarrow 0$  при  $K/T_u = \text{const}$ , характеристика ПІ-регулятора наближається до І-регулятора з коефіцієнтом передачі  $K/T_u$ .

Передавальна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$W_{\text{пи}}(p) = K \left( 1 + \frac{1}{T_u p} \right). \quad (2.37)$$

Ці регулятори дозволяють стійко і без статичної помилки регулювати велику кількість об'єктів.

*Пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори* (ПІД-регулятори) переміщують регулюючий орган пропорційно відхиленню, інтегралу і швидкості зміни керованої величини:

$$U(t) = K \left[ e(t) + \frac{1}{T_u} \int e(t) dt + T_d e'(t) \right]. \quad (2.38)$$

Постійна часу  $T_d$  називається *часом випередження* і характеризує ступінь введення в закон управління похідної від відхилення керованої величини. У динамічному відношенні цей регулятор відповідає паралельному включенню пропорційної, інтегруючої і ідеальної диференціюючої ланок.

Передавальна функція ПІД-регулятора має вигляд:

$$W_{\text{пид}}(p) = K \left( 1 + \frac{1}{T_u p} + T_d p \right). \quad (2.39)$$

Застосовуються ПІД-регулятори на об'єктах, де можливі несподівані, але відомі обурення керованого параметра.

Значення оптимальних параметрів налаштування типових регуляторів для об'єктів з самовирівнюванням наведені у таблиці 2.15.

**Таблиця 2.15 – Параметри налаштування промислових регуляторів**

Тип регулятора	Тип перехідного процесу		
	Аперіодичний з $\min t_{рег}$	З 20 % перерегулюванням	З міні квадратичною площею
I-	$T_s = 4,5 \cdot K_0 \cdot T_0$	$T_s = 1,7 \cdot K_0 \cdot T_0$	$T_s = 1,7 \cdot \tau \cdot K_0 \cdot T_0$
II-	$K_p = \frac{0,3}{K_0 \cdot \tau / T_0}$	$K_p = \frac{0,7}{K_0 \cdot \tau / T_0}$	$K_p = \frac{0,9}{K_0 \cdot \tau / T_0}$
III-	$T_u = 0,8\tau + 0,5T_0$ $K_p = \frac{0,95}{K_0 \cdot \tau / T_0}$	$T_u = \tau + 0,3T_0$ $K_p = \frac{1,2}{K_0 \cdot \tau / T_0}$	$T_u = \tau + 0,35T_0$ $K_p = \frac{1,4}{K_0 \cdot \tau / T_0}$
ПІД-	$T_u = 2,4\tau$ $T_d = 0,4\tau$	$T_u = 2,0\tau$ $T_d = 0,4\tau$	$T_u = 1,3\tau$ $T_d = 0,5\tau$

**Позначення:**  
 $T_s$  – коефіцієнт передачі І-регулятора;  $K_p$  – коефіцієнт посилення регуляторів;  $T_u$  – час ізодрома;  $T_d$  – час випередження;  $K_0, T_0$  – коефіцієнт посилення і постійна часу об'єкту, відповідно;  $\tau$  – час запізнювання об'єкту.

*Завдання до практичних занять.*

1. Розрахувати постійну часу і коефіцієнт самовирівнювання циліндрового гідравлічного резервуару з відомою площею днища і номінальною пропускною спроможністю вентиля, що управляє, при підтримці в нім заданого номінального рівня рідини.

2. Отримати рівняння динаміки теплового і газодинамічного об'єктів, якщо рівняння статички для них мають наступний вигляд:

$$\text{тепловий об'єкт} - Q = c \cdot m \cdot \Delta\theta;$$

$$\text{газодинамічний об'єкт} - \frac{V}{RT} \cdot \frac{dP}{dt} = G_1 - G_2.$$

3. Отримати в загальному вигляді передавальні функції САУ для різних заданих типів об'єктів управління і регуляторів.

4. Для заданих структурних різних схем САУ набути значень еквівалентних передавальних функцій, використовуючи правила перетворення структурних схем.

5. Використовуючи критерій стійкості Гурвіца, визначити граничне значення налаштування коефіцієнта посилення ПІ-регулятора, якщо відомі параметри об'єкту управління і оптимальне налаштування часу ізодрома.

6. Отримати по графіку перехідного процесу час регулювання інерційного об'єкту із заданими параметрами за допомогою ПІ-регулятора, якщо у нього оптимальні налаштування, виходячи з умови мінімуму часу регулювання.

### **Контрольні запитання**

1. Які характеристики об'єкту управління Вам відомі?
2. Що таке зворотний зв'язок? Які типи зворотних зв'язків існують?
3. Запишіть рівняння простих типових ланок САУ.
4. Наведіть приклади комбінованих ланок САУ першого порядку.
5. Для чого використовується операційне числення в автоматичі?
6. Складіть диференціальне рівняння САУ за нульових початкових умов, якщо в області зображення воно має вигляд  $Y(p)(p^2 + 2p - 3) = \frac{1}{p - 2}$ .

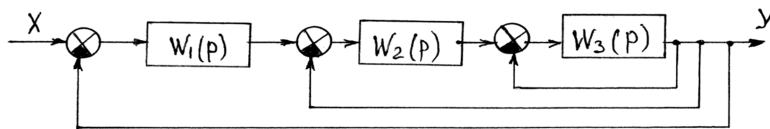
7. Що таке передавальна функція ланки або САУ?

8. Які типи з'єднань ланок Вам відомі?

9. Запишіть рівняння ланки з передавальною функцією  $W(p) = \frac{K}{Tp + 1}$ ,

яка охоплена негативним одиничним зворотним зв'язком.

10. Отримаєте рівняння еквівалентної передавальної функції для САУ, що наведена на схемі.



11. Сформулюйте алгебраїчний критерій стійкості Гурвіца.

12. Перерахуйте показники якості перехідного процесу.

13. Скільки параметрів налаштування у ізодромного регулятора?

14. Які стандартні промислові регулятори Вам відомі?

15. Як з ПІД-регулятора отримати П-, ПІ-регулятори?

### **3 Методика самостійного вивчення курсу за темами**

#### **3.1 Теплотехнічні вимірювання та прилади**

##### **3.1.1 Загальні відомості про вимірювання і засоби вимірювання**

Метою цієї теми є ознайомлення з основними методами і принципами вимірювань, класифікацією засобів вимірювання, їх технічними і метрологічними характеристиками, принципами уніфікації, а також з системою організації державних перевірок засобів вимірювання.

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.** При вивченні даної теми необхідно засвоїти поняття про прямі і непрямі вимірювання, а також про основні методи вимірювань, використовуваних в сучасних засобах контролю. При здійсненні вимірювань прийнято використовувати різні засоби вимірювань, такі як заходи, прилади, пристрої і перетворювачі, на суть яких необхідно звернути увагу. Разом з цим студенти повинні отримати поняття про класифікацію засобів вимірювання і їх технічні характеристики. Перед вивченням метрологічних характеристик засобів вимірювання необхідно освоїти види погрешностей, а також повторити елементи теорії вірогідності і математичної статистики. Сучасні засоби вимірювання практично всі уніфіковано і реалізовано в Державній системі промислових приладів і засобів автоматизації (ДСП), у зв'язку з цим необхідно ознайомитися з основними гілками і принципами побудови системи ДСП. Важливим аспектом для фахівця, що експлуатує приладовий парк і засоби вимірювань систем ТГВ, є знання категорій використовуваних приладів і організації їх перевірок метрологічними службами.

##### ***Контрольні запитання***

1. Що таке пряме і непряме вимірювання?
2. Які існують основні методи вимірювань, в чому полягає їх суть?
3. По яких ознаках здійснюється класифікація засобів вимірювання?

Зобразите схему класифікації засобів вимірювання.

4. Приведіть основні технічні характеристики засобів вимірювання. Поясніть їх сенс.
5. Які типи погрішностей мають засоби вимірювання?
6. Як оцінюють погрішності вимірювання? Види оцінок і їх розрахунок.
7. Що таке клас точності засобів вимірювання? Які існують класи точності?
8. Яким чином оцінити і врахувати погрішності при технічних вимірюваннях?
9. Які існують види засобів вимірювання? Організація їх перевірки.
10. Які принципи закладені в основу системи ДСП? Назвіть три її гілки.

### **3.1.2 Вимірювання температур**

Температура є одним з найважливіших технологічних параметрів і має принципові особливості, що зумовило необхідність застосування різних методів її вимірювання. Відомо, що температура характеризує ступінь нагріву речовини і визначається як параметр його теплового стану. При цьому поняття «температура» є статистичним і стосується до речовини, що складається з достатнього числа молекул, середня кінетична енергія яких і визначає температуру. Поняття «температура» стосовно однієї молекули неможливо. Застосування статистичного підходу для визначення температури для значно розрідженої матерії також непридатне, тому в цьому випадку температура визначається потужністю потоків променистої енергії, що проходить через вимірювану речовину. Таким чином, з розвитком науки поняття температури розширюється. Температура вимірюється за допомогою пристроїв, званих термометрами, в основу яких покладені різні термометричні властивості «робочого тіла» термометра від вимірювання температури.

У зв'язку з цим, метою теми є ознайомлення з фізичними принципами і технічними засобами вимірювання температури.

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.** Вивчення теми слід починати з основних понять про температуру і існуючі температурні шкали. Після цього необхідно

засвоїти принципи роботи, типи і температурні діапазони термометрів, заснованих на розширенні і зміні тиску робочої речовини. Слід звернути належну увагу при вивченні теми на електроконтактні, біметалічні і ділатометричні термометри, широко використовувані при автоматизації. Вимоги високої точності, надійності і можливості централізованого контролю температури, що диктуються сучасними галузями промисловості, є основною передумовою повсюдного використання термоелектричних термометрів і термометрів опору. Електричні перетворювачі температури не можуть бути використані без вторинних приладів, отже, вивчення типів вторинних приладів і принципів їх роботи є важливою умовою освоєння вказаних засобів вимірювання температури.

На закінчення теми необхідно отримати поняття про способи вимірювання температури контактними методами на технологічних об'єктах для зменшення погрішності вимірювання і заходах, що проводяться для цього.

### ***Контрольні запитання***

1. Назвіть використовувані температурні шкали і основні реперні точки.
2. Які термометри розширення Вам відомі?
3. Опишіть конструкцію і принцип роботи газового термометра.
4. Запишіть основне рівняння термопар. Як визначити термо-едс для різних матеріалів?
5. Які матеріали використовуються в термопарах і термометрах опору?
6. Назвіть вторинні прилади для термопар і термометрів опору. Які принципи їх роботи?
7. Зобразить спрощену схему автоматичного потенціометра і урівноваженого моста.
8. Як працює неурівноважений міст? Запишіть його рівняння.
9. Як встановлюються термоприймачи для вимірювання температури потоків газів, рідин і пари?
10. Яким чином можна понизити погрішність вимірювання температури?

### 3.1.3 Вимірювання тиску і перепадів тиску

Широке використання засобів контролю тиску, розрядження і різниці тиску на різних об'єктах викликає необхідність застосування великої різноманітності приладів тиску, що відрізняються за принципом дії. При цьому вимірюватися може абсолютний, надмірний і вакуумметричний тиск. При контролі технологічних об'єктів в більшості випадків доводиться стикатися з вимірюванням надмірного і вакуумметричного тиску. Вивченню засобів і принципів вимірювання тиску присвячується ця тема.

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.** Вивчення засобів вимірювання тиску слід проводити в наступному порядку: рідинні прилади тиску; прилади тиску з пружними чутливими елементами; електричні прилади тиску; диференціальні манометри. При ознайомленні з приладами вимірювання тиску, необхідно звернути увагу на сферу їх застосування, а також на одиниці вимірювання тиску і співвідношення між ними. Для вимірників тиску з пружними чутливими елементами, слід засвоїти типи чутливих елементів, принципи їх дії, конструкцію і особливості, а також принципи компенсації в безшкальних приладах тиску. Потрібно детально ознайомитися з електроконтактними манометрами і реле тиску, які використовуються у якості простих регуляторів тиску. Важливим питанням даної теми є освоєння диференціальних манометрів, їх типів і принципів роботи, оскільки вони є невід'ємною частиною засобів вимірювання витрат рідких і газоподібних середовищ за допомогою звуваючих пристроїв.

На завершення теми студенти мають вивчити практичну методику вимірювання тиску, де варто звернути увагу на способи підключення манометрів до об'єктів і на спеціальні пристрої, які при цьому використовуються.

#### ***Контрольні запитання***

1. У яких одиницях вимірюється тиск? Вкажіть взаємозв'язок між ними.
2. Як влаштований і працює мікроманометр типу ММН?
3. Які поправки слід вводити до показників рідинних приладів тиску?

Запишіть формули розрахунку поправок.



4. Перерахуйте типи пружних чутливих елементів, використовуваних в приладах тиску.
5. Зобразите схему конструкції манометра з трубкою Бурдона.
6. Які основні характеристики мають пружні чутливі елементи?
7. Якого типу диференціальні манометри використовуються в промисловості?
8. Приведіть формули розрахунку поплавкового дифманометра.
9. Перерахуйте достоїнства і недоліки диференціальних манометрів з рідинним наповненням і з пружними чутливими елементами.
10. Для чого використовуються рідинні і мембранні роздільники?

### **3.1.4 Вимірювання витрат різних середовищ і кількості тепла**

Вимірювання кількості матеріальних і енергетичних потоків в різних галузях промисловості пов'язане з технологічними процесами і необхідністю їх обліку. Кількість речовини, що проходить через певний перетин трубопроводу в одиницю часу називають витратою, а прилади, що вимірюють витрату, – витратомірами. Прилади, що інтегрують витрату за деякий проміжок часу називають лічильниками. Залежно від того, в яких одиницях об'єму або маси вимірюється витрата речовини, слід розрізняти об'ємну або масову витрату. При вимірюванні об'ємної витрати речовини, особливо газів і пари, її необхідно приводити до нормальних умов, щоб отримати зіставні результати вимірювання. На основі витратомірів речовини будуються лічильники кількості тепла, які знаходять широке застосування в промисловості і комунальному господарстві. Принципи вимірювання, закладені в витратоміри для різних потоків речовини практично однакові, проте, існують різні типи витратомірів. Тому вивчення їх, є основним завданням даної теми.

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.** У основних розділах цієї теми розглядаються методи вимірювання витрати різними приладами. Зокрема по змінному перепаду тиску, метод вимірювання напірними трубками, метод вимірювання

кількості тепла. Крім того, при вивченні теми необхідно детально ознайомитися з витратомірами постійного перепаду тиску, а також з лічильниками тепла і кількості речовини. Вимірювання витрати речовини по методу змінного перепаду тиску отримало найбільш широке розповсюдження і засновано на застосуванні звужуючих пристроїв. Тому необхідно звернути особливу увагу на вивчення різних типів звужуючих пристроїв і їх розрахунок.

Важливим аспектом є розуміння, до якого типу масовому або об'ємному витратоміру відноситься той або інший тип вимірника, і в яких випадках доцільно його використовувати.

На завершення теми необхідно ознайомитися з основними вимогами до місця і способу встановлення засобів вимірювання витрати, пов'язаних з підвищенням точності вимірювання.

### ***Контрольні запитання***

1. Які типи звужуючих пристроїв застосовують при вимірюванні витрати?
2. Запишіть рівняння витрати для сухого однокомпонентного газу, приведене до нормальних умов, при вимірюванні методом змінного перепаду тиску.
3. Які витратоміри працюють по методу постійного перепаду тиску?
4. Зобразить конструкцію трубки Піто.
5. Які параметри середовища впливають на точність вимірювання витрати?
6. Зобразить схему тепломіра і поясните принцип його роботи.
7. До якого типу відносяться тахометричні витратоміри?
8. Які вимоги пред'являють до місця установки звужуючих пристроїв?
9. Покажіть, як з'єднуються звужуючий пристрій і вимірник перепаду тиску при вимірюванні витрати пари.

### 3.1.5 Вимірювання рівня середовищ

Для більшості технологічних установок і апаратів вимірювання рівня рідин або сипких тіл грає важливу роль при автоматизації технологічних процесів. Вимірювання рівня часто диктується необхідністю підтримання його постійним, сигналізацією відхилення від заданого значення, а також для визначення по рівню кількості речовини, що знаходиться в резервуарах, баках та інших пристроях. Прилади, що призначені для вимірювання рівня речовини, називаються рівнемірами. Застосування якого-небудь типу рівнеміра пов'язано з особливостями технологічного об'єкту, а також з техніко-економічною доцільністю застосування конкретного рівнеміра.

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.** Ознайомлення з рівнемірами слід почати з простих типів, таких як вказівні стекла, поплавкові і буйкові, манометри – рівнеміри. Особливу увагу необхідно звернути на методику вимірювання рівня за допомогою дифманометров, оскільки з їх допомогою зазвичай вимірюється рівень рідини, що має високу температуру і що знаходиться в замкнутих або резервуарах, що сполучаються з атмосферою. При вивченні ємкісних рівнемірів основну увагу слід приділити конструкції і принципу дії ємкісного перетворювача. Для акустичних і ультразвукових рівнемірів студентам треба освоїти принципи їх роботи і причини, що викликають помилки при вимірюванні. Вимірювання рівня сипких тіл значно відрізняється від вимірювання рівня рідин, тому необхідно розглядати рівнеміри з урахуванням їх специфіки.

#### ***Контрольні запитання***

1. У яких об'єктах вимірювання рівня є одним з основних вимірювань?
2. Чому не можна вимірювати рівень води в барабані парового котла манометром-рівнеміром?
3. Для чого використовують зрівняльні судини в дифманометрі-рівнемірі?
4. Запишіть рівняння ємкісного перетворювача рівня.

5. Яким чином вводиться компенсація зміни електричної ємкості для ємкісних рівнемірів в робочих умовах?
6. Чим відрізняються акустичні і ультразвукові рівнеміри?
7. Зобразите принципову схему ємкісного вимірника рівня.
8. На яких принципах заснована робота рівнемірів сипких тіл?

## **3.2 Теорія автоматичного управління**

### **3.2.1 Загальні відомості, поняття про автоматичне управління**

Теорія автоматичного управління вже давно сформувалася в самостійну дисципліну на основі вивчення принципів управління різними технічними пристроями і процесами. Основним завданням даного розділу є ознайомлення із загальними принципами побудови схем автоматичного управління, процесами, що проходять в цих системах і методами їх дослідження.

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.** Ця тема присвячена ознайомленню з історією зародження автоматики, з основними напрямками її розвитку, а також поняттями і визначеннями, необхідними для вивчення цього розділу. Як основні поняття автоматики необхідно розглянути: суть управління, інформацію, її роль і методи визначення кількості інформації при управлінні. Нерідко в процесі управління властивий людський чинник, тому студенти мають чітко уявляти, як підрозділяються системи управління залежно від ступеня участі людини, знати відповідні визначення систем і уміти визначати рівень автоматизації для будь-якого об'єкту.

На прикінці цієї теми слід ознайомитися з системами теплогазопостачання і вентиляція як об'єктами автоматизації і класифікацією систем автоматизації.

### ***Контрольні запитання***

- 1 Які основні елементи процесу управління?
- 2 Чим відрізняється автоматичне регулювання від управління?
- 3 Що таке управляючий пристрій?

- 4 Як оцінити кількість отримуваної інформації?
- 5 Запишіть формулу щодо розрахунку ступеню автоматизації.
- 6 Назвіть основні керовані параметри об'єктів теплогазопостачання.
- 7 Які системи автоматизації Ви знаєте? Дайте їх класифікацію.

### **3.2.2 Об'єкт автоматичного управління**

Об'єкт автоматичного управління є визначальним для подальшої побудови системи його управління. Знання характеристик і параметрів стану об'єкту, дозволяє виробляти дії, що управляють, по тому або іншому закону управління, не порушуючи умов його стійкості, що забезпечують необхідну якість управління. Різноманіття об'єктів управління вимагає виявлення їх загальних властивостей, які можуть бути використані для дослідження систем автоматичного управління в цілому. Метою справжньої теми є навчання систематизації об'єктів по загальних ознаках їх функціонування.

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.** До вивчення будь-якого об'єкту слід підходити з позиції «чорного ящика» при цьому чітко виділяються змінні його стану і взаємозв'язок між ними. Тут необхідно розглянути вихідні змінні об'єкту, вхідні дії і їх класифікацію. При вивченні основних характеристик і властивостей об'єктів управління потрібно звернути особливу увагу на розуміння типів стійкості, акумулюючу здібність об'єкту, запізнювання, статичні і астатичні властивості, а також способів отримання його статичних і динамічних характеристик. Процеси, що протікають в різних об'єктах, незалежно від їх фізичної суті, можуть бути описані загальними диференціальними рівняннями. Тому важливим питанням цієї теми є освоєння методів побудови математичних моделей об'єктів управління і вивчення моделей простих типових об'єктів. Наприкінці необхідно ознайомитися з поняттями спостережності і керованості об'єкту.

### ***Контрольні запитання***

1. Якими змінними стану характеризується об'єкт управління?
2. Як класифікуються вхідні сигнали?
3. Який об'єкт називають однозв'язним? Багатозв'язним?
4. Що таке статична характеристика об'єкту управління?
5. Як отримати динамічні характеристики об'єкту?
6. Який об'єкт називається астатичним?
7. Як оцінити керованість об'єкту?
8. Отримати математичну модель ємкісного статичного об'єкту (на прикладі гідравлічного резервуару).
9. Який об'єкт є стійким?

### **3.2.3 Системи автоматичного управління**

Сукупність об'єкту управління і пристрою, що управляє, прийнято називати системою автоматичного управління (САУ). У свою чергу елементи САУ називаються ланками, описувані диференціальними рівняннями, на підставі яких визначається динаміка і статика САУ в цілому.

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.** Вивчення цієї теми необхідно почати з розгляду принципів управління, що реалізуються в розімкнених, замкнутих і комбінованих САУ. Тут же доцільно засвоїти поняття зворотного зв'язку і його різновидів. Велика різноманітність використовуваних в техніці САУ вимагає використання різних ознак їх класифікацій, з якими треба ознайомитися в даній темі. Окремі технічні пристрої, що входять в САУ, часто описуються складними рівняннями. Тому необхідно знати, що для спрощення опису САУ останні можуть бути представлені у вигляді елементарних типових динамічних ланок із загальними математичними залежностями. На підставі типових ланок і зв'язків між ними студенти повинні вміти складати функціональні і структурні схеми САУ, а також складати диференціальні рівняння САУ.

### ***Контрольні запитання***

1. Охарактеризуйте основні принципи управління.
2. Які типи зворотних зв'язків існують?
3. По яких ознаках класифікуються САУ?
4. Назвіть відмінність структурних і функціональних схем.
5. Запишіть рівняння основних типових ланок.
6. Складіть рівняння САУ, якщо об'єкт і пристрій, що управляє, описуються аперіодичними ланками першого порядку.
7. Наведіть приклади комбінованих ланок САУ.

### **3.2.4 Операційний метод в автоматичі**

При дослідженнях і розрахунках САУ широко використовується математичний апарат операційного числення, що дозволяє істотно полегшити дослідження систем. Операційне числення, що розглядається в цій темі, ґрунтується на перетвореннях Фур'є і Лапласа, які дозволяють операції диференціювання і інтегрування замінювати операціями нижчого рангу.

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.** Вивчення цієї теми слід почати з повторення відповідних розділів математичного аналізу: перетворення Фур'є для періодичної функції часу, пряме і зворотне перетворення Фур'є для періодичної функції і перехід від перетворення Фур'є до перетворення Лапласа. Вивчивши перетворення Лапласа і його властивості, необхідно розглянути зображення деяких елементарних функцій часу і зворотний перехід до оригіналів. Завершальним етапом цієї теми є освоєння студентами методів вирішення звичайних диференціальних рівнянь з використанням операційного числення.

### ***Контрольні запитання***

1. У чому полягає сенс операційного числення, використовуваного в автоматичі?

2. Запишіть перетворення Лапласа для оригіналу функції, що має вид одиничного стрибка, а також для показової функції часу.

3. Які основні властивості перетворення Лапласа?

4. Опишіть, як практично перейти від зображення до оригіналу, при вирішенні диференціальних рівнянь.

### **3.2.5 Динамічні характеристики типових елементів САУ**

Динамічні характеристики САУ і її елементів встановлюють залежність реакції системи або її ланок від дії вхідного сигналу певного вигляду. Знання динамічних характеристик дозволяє проводити дослідження САУ на стійкість і якість управління. Дослідження динамічних характеристик в автоматичній базуються на застосуванні операційного числення до диференціальних рівнянь, що описують поведінку як САУ, так і її елементів. У цій темі розглядаються динамічні характеристики лінійних САУ.

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.** При вивченні динамічних характеристик лінійних САУ і її ланок необхідно керуватися застосовністю до них принципу суперпозиції, відповідно до якого сумарна реакція системи або ланки на сумарний вхідний сигнал дорівнює сумі реакцій від кожного окремого сигналу. У автоматичній в якості стандартних вхідних сигналів використовують одиничний стрибок, одиничний імпульс і гармонійний сигнал, реакціями на які визначаються динамічні характеристики САУ. Освоєння студентами головних понять динамічних характеристик, способів їх отримання і визначення для типових ланок САУ, є основною метою даної теми. Розглядаючи типові ланки незалежно від їх призначення і фізичного принципу дії, їх слід підрозділяти на групи: прості ланки (пропорційні, інтегруючі, диференціюючі і із запізнюванням); ланки першого порядку; ланки другого порядку і коливальні.

Вивчаючи динамічні характеристики ланок, слід мати на увазі, що самі типові ланки ідеалізуються, що необхідно для точного їх опису диференціальними рівняннями. При цьому необхідно обумовлювати діапазон робочих частот.



Вихід за межі цього діапазону може привести до необхідності обліку додаткових параметрів і ускладнення математичного опису ланки.

### ***Контрольні запитання***

1. Як отримують динамічні характеристики ланки?
2. Що таке передавальна, вагова і перехідна функції?
3. Що називається частотною характеристикою ланки? Назвіть різновиди частотних характеристик.
4. Як отримати логарифмічні характеристики ланки?
5. Назвіть основні типові ланки першого порядку лінійних САУ.
6. Яка відмінність коливальної ланки від аперіодичної ланки другого порядку?
7. Наведіть приклади об'єктів систем ТГВ, що описуються простими типовими лінійними ланками першого порядку.
8. Покажіть взаємозв'язок між динамічними характеристиками.

### **3.2.6 З'єднання ланок і перетворення структурних схем**

Різні структурні схеми САУ можуть володіти однаковими передавальними функціями, тобто бути динамічно еквівалентними. Виходячи з того, що ланки САУ передають сигнал в одному напрямі, а їх передавальні функції не залежать від з'єднання, структурні схеми можна перетворювати з складних в простіші із збереженням динамічних характеристик системи, використовуючи встановлені загальні правила. Метою цієї теми є придбання студентами практичних навиків перетворення структурних схем САУ.

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.** Розгляд матеріалу необхідно починати з видів з'єднань ланок і елементів, що включаються в структурні схеми (вузли, ланки, лінії зв'язку). Для кожного виду з'єднань потрібно освоїти отримання еквівалентних передавальних функцій, на основі рівнянь алгебри, що описують проходження сигналів через елементи структурних схем. Вивчаючи правила

перетворення структурних схем, слід розглянути два види переміщення: вузла, що підсумовує, через вузол галуження; ланки через вузли галуження і підсумовування, при цьому враховуючи напрям проходження сигналів.

### ***Контрольні питання.***

1. Якого типу з'єднання ланок Вам відомі?
2. Запишіть еквівалентні передавальні функції для послідовного і паралельного включення ланок.
3. Запишіть рівняння ланки з негативним зворотним зв'язком.
4. Покажіть на структурній схемі еквівалентність зустрічних і узгоджених паралельних включень двох ланок.
5. Зобразите структурні еквівалентні схеми при переміщенні ланки через вузол (суматор) по напрямку і проти галуження.

### **3.2.7 Дослідження лінійних САУ**

Знання статичних і динамічних характеристик САУ дозволяє досліджувати їх на стійкість і якість регулювання. Стійкість САУ – необхідна, але недостатня умова раціональності її застосування. Тому, при дослідженні систем, необхідно висувати комплекс вимог, що визначає як її стійкість, так і поведінку системи в сталому і перехідному процесах відробітку заданої дії, який носить поняття якості системи. Вимоги цього комплексу висуваються практикою і мають бути розглянуті в цій темі.

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.** Визначення стійкості САУ засноване на аналізі характеристичних рівнянь систем управління, що отримуються з передавальних функцій. Умовою стійкості є негативність речових частин усіх корнів характеристичного рівняння, проте пряме відшукування корнів часто буває незручним або неможливим. У зв'язку з цим студенти повинні ознайомитися з деякими існуючими критеріями, що дозволяють судити про коріння характеристичного рівняння без знаходження їх значень. Тут необхідно

пам'ятати, що всі критерії стійкості математично еквівалентні, а застосування того або іншого критерію залежить від характеру завдання і наявності технічних засобів для дослідження. Вивчаючи стійкість САУ, слід розглянути критерії Гурвіца, Рауса, Михайлова і Найквіста, а також освоїти поняття запасів стійкості. При дослідженні якості управління потрібно засвоїти існуючі показники якості, типи і випадки застосування інтегральних оцінок якості і вимоги, що висуваються до САУ.

### ***Контрольні запитання***

1. Як з передавальної функції отримати характеристичне рівняння САУ?
2. При якому значенні коріння характеристичного рівняння система управління нестійка? Знаходиться на межі стійкості.
3. Які алгебраїчні і частотні стійкості Вам відомі? Сформулюйте їх.
4. У чому відмінність критерію Найквіста від критерію Михайлова?
5. Що таке запас стійкості по фазі і амплітуді?
6. Перерахуйте показники якості перехідного процесу.
7. Що називають динамічною помилкою, часом регулювання?
8. Які вимоги висуваються до якості управління?
9. Назвіть інтегральні оцінки якості. Для якого типу перехідних процесів застосовуються ті або інші оцінки якості?
10. Запишіть вирази, що визначають інтегральні оцінки якості.

### **3.3 Промислові регулятори**

Динамічні характеристики об'єктів зазвичай можуть бути описані деякими типовими залежностями. Це дозволяє всю можливу різноманітність законів регулювання звести до декількох типових законів, що реалізуються стандартними промисловими регуляторами. Це дозволяє всю можливу різноманітність законів регулювання звести до декількох типових законів, що реалізуються стандартними промисловими регуляторами. Таким чином,

справжня тема присвячена ознайомленню з типовими законами регулюванню і параметрів налаштування регуляторів, що забезпечують необхідну якість управління технологічними об'єктами.

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.** Спочатку слід освоїти стандартні закони управління (П-; І-; ПІ- і ПІД ), виділити в них ті параметри, які у промислових регуляторів використовуються як налаштовувальні. Далі студенти мають освоїти основні методи дослідження САУ із стандартними промисловими регуляторами. Серед цих методів необхідно розглянути визначення стійкості систем управління з типовими регуляторами аналітичним і графоаналітичним способом, а також розрахунок оптимальних параметрів налаштування на вимогу мінімальності тієї або іншої інтегральної оцінки якості системи.

### ***Контрольні запитання***

1. Які стандартні промислові регулятори Вам відомі?
2. Назвіть параметри налаштування ізодромного регулятора.
3. Як з ПІД-закону регулювання, отримати закон, використовуваний в пропорційному регуляторі?
4. Що таке коефіцієнт передачі І-регулятора?
5. Як за допомогою АФХ досліджувати стійкість системи управління графо- аналітичним способом?
6. Опишіть алгоритм дослідження САУ на якість регулювання.

## **3.4 Основні відомості про нелінійні САУ**

Метою справжньої теми є ознайомлення учнів з широким класом САУ лінійних систем, що не розглядаються в теорії. Ці системи часто можуть бути описані за допомогою лінійних рівнянь особливого вигляду, або шляхом виділення в описі системи лінійної і нелінійної частин.

Вивченню цих систем присвячені спеціальні розділи теорії автоматичного управління, які в програму цього курсу не включені.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ. При проходженні цієї теми студентам слід отримати основні поняття про імпульсні і цифрові системи управління, системи екстремального і оптимального управління, релейні системи, самоналагоджувальні системи. Тут необхідно звернути увагу на призначення конкретних систем, загальний принцип дії і практичне їх застосування.

### ***Контрольні запитання.***

1. Які типи модуляції сигналів використовуються в імпульсних САУ?
2. Зобразите схему САУ з ЦВМ в контурі управління.
3. Назвіть основні типи нелінійності в нелінійних САУ.
4. Що таке екстремальна система управління?
5. Яким чином здійснюється ідентифікація об'єкту в СНС?
6. Які принципи дії закладені в самонавчальні САУ?

## **4 Методика виконання контрольної роботи**

У процесі індивідуальної роботи студенти виконують контрольну роботу, за допомогою якої вони закріплюють одержані теоретичні і практичні знання щодо вирішення задач з засвоєння різноманітних контрольних-вимірювальних засобів, розрахунку та дослідженню автоматичних систем керування і регуляторів, опановують навички роботи з науково-технічною та довідковою літературою.

Контрольна робота складається з двох частин:

1. Контрольно-вимірювальні прилади для об'єктів ТГВ.
2. Розрахунок заданої САУ і її дослідження на якість управління.

При виконанні першої частини контрольної роботи студенти за індивідуальним завданням розглядають конструкцію приладів, їх метрологічні характеристики, принцип дії, а також умови експлуатації.

При виконанні другої частини контрольної роботи студенти для заданого об'єкту і регулятора повинні розрахувати необхідну САУ і на основі отриманих передавальних функцій системи визначити її стійкість і якість управління по побудованому графіку перехідного процесу.

Контрольна робота виконується на листах формату А4 об'ємом не більше 10-15 стор. Допускається виконання роботи в окремому зошиті.

Початкові дані для контрольної роботи визначаються варіантами відповідно до номерів залікових книжок і наведені в таблиці 4.1 і таблиці 4.2.

**Таблиця 4.1 – Початкові дані по контрольно-вимірювальним приладам**

Остання цифра у № залікової книжки (№ варіанту)	Зміст завдання
0	Вимірювання температур гою термометрами розширення.
1	Вимірювання температур електричними термометрами.
2	Манометри з рідинним наповненням.
3	Прилади тиску з пружними чутливими елементами.
4	Вимірювання рівнів диференціальними манометрами.
5	Вимірювання рівнів акустичними приладами.
6	Ємкісні рівнеміри.
7	Вимірювання витрат за допомогою звужуючих пристроїв.
8	Лічильники рідких і газоподібних середовищ.
9	Теплові лічильники.

**Таблиця 4.2 – Початкові дані для розрахунку САУ**

Остання цифра в № залікової книжки	Рівняння об'єкту управління	Значення параметрів об'єкту управління				Тип регулятора	Бажаний тип перехідного процесу
		$K$	$T_1$	$T_2$	$\tau$		
0	$T \frac{dy}{dt} + y = kx$	1	10	-	1	I-	3 min квадрат. площею
1	$T_2^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} + y = kx$	1	10	10	0,5	III-	Аперіодичний з min $t_{рег}$
2	$T \frac{dy}{dt} + y = kx$	1,5	5	-	0,3	III-	3 min квадрат. площею
3	$T_2^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} + y = kx$	0,9	5	10	0,1	I-	3 min квадрат. площею
4	$T \frac{dy}{dt} + y = kx$	1	2	-	0,2	ПІД-	Аперіодичний з min $t_{рег}$
5	$T_2^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} + y = kx$	1	1	5	0,08	III-	Аперіодичний з min $t_{рег}$
6	$T \frac{dy}{dt} + y = kx$	1,2	15	-	1,5	П-	3 min квадрат. площею
7	$T_2^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} + y = kx$	1	5	10	0,5	I-	3 min квадрат. площею
8	$T \frac{dy}{dt} + y = kx$	0,8	1	-	0,1	III-	Аперіодичний з min $t_{рег}$
9	$T_2^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} + y = kx$	1	2	5	0,05	ПІД-	Аперіодичний з min $t_{рег}$

При розрахунку САУ необхідно отримати її еквівалентну передавальну функцію. Використовувати при цьому передавальні функції відповідних ланок САУ (2.37), (2.39) і таблицю 2.13. Параметри налаштування регуляторів прийняти оптимальними (див. таблицю 2.15).

Визначити стійкість САУ, застосовуючи для розрахунку критерій Гурвіца.

Отримати криві перехідних процесів як результат дії на вхід ланки з еквівалентною передавальною функцією ступінчастого одиничного обурення  $U(t)$ .

Розрахунок перехідних процесів проводиться на підставі вирішення диференціальних рівнянь для системи регулювання в перетвореннях Лапласа  $Y(p)$  і подальшим переходом в область оригіналів  $Y(t)$ .

Перетворення Лапласа деяких функцій наведені нижче:

1. $1(t) \xrightarrow{\cdot} \frac{1}{p}$	5. $1 - e^{-\lambda t} \xrightarrow{\cdot} \frac{\lambda}{p(p + \lambda)}$
2. $t \xrightarrow{\cdot} \frac{1}{p^2}$	6. $\frac{t^n}{n!} e^{\lambda t} \xrightarrow{\cdot} \frac{1}{(p - \lambda)^{n+1}}$
3. $\frac{t^n}{n!} \xrightarrow{\cdot} \frac{1}{p^{n+1}}$	7. $\cos \omega t \xrightarrow{\cdot} \frac{p}{p^2 + \omega^2}$
4. $e^{\lambda t} \xrightarrow{\cdot} \frac{1}{p - \lambda}$	8. $1_0(t - \tau) \xrightarrow{\cdot} \frac{1}{p} e^{-p\tau}$

Знаходження вирішення  $Y(t)$  в області оригіналів полягає в представленні рівняння  $Y(p)$  у вигляді суми елементарних дробів, які по формулах переходу 1-8, приведеним вище, переводяться в область оригіналів.

Розкладання виразу  $Y(p)$  на елементарні дроби ведеться по наступній формулі:

$$\frac{k(p)}{D(p)} = \frac{c_1}{p - \lambda_1} + \frac{c_2}{p - \lambda_2} + \dots + \frac{c_n}{p - \lambda_n}, \quad (4.1)$$

де  $D(p)$  – характеристичне рівняння системи регулювання;

$\lambda_i$  – коріння рівняння  $D(p) = 0$ ,  $i = 1, n$ ;

$$c_i = \frac{k(\lambda_i)}{D'(\lambda_i)} - \text{коефіцієнти розкладання, } i = 1, n;$$

$$D' = \frac{dD(p)}{dp} \text{ при } p = \lambda_1; p = \lambda_2 \dots; p = \lambda_n.$$

### Приклад

Побудувати графік функції в області оригіналів, якщо в області зображень вона має вигляд:  $Y(p) = \frac{6p^2 - p + 1}{p^3 - p}$ .

### Рішення

Поліном чисельника заданої функції рівний  $k(p) = 6p^2 - p + 1$ ; характеристичне рівняння –  $D(p) = p^3 - p$ , а його похідна –  $D'(p) = 3p^2 - 1$ .

Визначаємо коріння  $\lambda_i$  рівняння  $D(p) = 0$ ;

$$D(p) = (p-1)(p+1)p = 0;$$

$$\lambda_1 = 1; \lambda_2 = -1; \lambda_3 = 0.$$

Представимо початкову функцію у вигляді суми елементарних дробів відповідно до рівняння (4.1):

$$\frac{k(p)}{D(p)} = \frac{6p^2 - p + 1}{(p-1)(p+1)p} = \frac{c_1}{p-1} + \frac{c_2}{p+1} + \frac{c_3}{p}.$$

Визначаємо коефіцієнти розкладання  $c_i$ :

$$c_1 = \frac{k(\lambda_1)}{D'(\lambda_1)} = \frac{k(1)}{D'(1)} = \frac{6 \cdot 1^2 - 1 + 1}{3 \cdot 1^2 - 1} = 3;$$

$$c_2 = \frac{k(\lambda_2)}{D'(\lambda_2)} = \frac{k(-1)}{D'(-1)} = \frac{6 \cdot (-1)^2 + 1 + 1}{3(-1)^2 - 1} = 4;$$

$$c_3 = \frac{k(\lambda_3)}{D'(\lambda_3)} = \frac{k(0)}{D'(0)} = \frac{1}{-1} = -1.$$

Таким чином

$$\frac{k(p)}{D(p)} = \frac{3}{p-1} + \frac{4}{p+1} - \frac{1}{p}.$$

$$\text{Звідси: } Y(t) = 3e^t + 4e^{-t} - 1.$$

Далі по заданих значеннях  $t$  будується графік перехідного процесу  $Y(t)$ .

Для оцінки перехідного процесу, окрім виду кривої (див. рис. 2.5), визначають такі кількісні величини, як точність САУ і час регулювання.



## Список рекомендованных джерел

1. Мухин О. А. Автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции / О. А. Мухин. – Минск : Высшая школа, 1986. – 304 с.
2. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування : підручник / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – Київ : Либідь, 1997. – 544 с.
3. Нубарян С. М. Контрольно-измерительные приборы в теплотехнических измерениях : курс лекций / С. М. Нубарян. – Харьков : ХНАГХ, 2006. – 280 с.
4. Нубарян С. М. Основы автоматического управления: курс лекций (для студентов специальности 7.092108 – ТГВ) / С. М. Нубарян. – Харьков : ХГАГХ, 2003. – 136 с.
5. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы / В. П. Преображенский. – Москва : Энергия, 1978. – 704 с.
6. Автоматика и автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции : учебник для вузов / А. А. Кашмаков [и др.]. – Москва : Стройиздат, 1986. – 479 с.
7. Емельянов А. И. Проектирование систем автоматизации технологических процессов : справочное пособие / А. И. Емельянов, О. В. Капник. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.

Навчальне видання

Методичні вказівки

до практичних занять, самостійної роботи  
та виконання контрольної роботи

з дисципліни

**«Автоматика і КВП»**

(для студентів усіх форм навчання  
спеціальності 7.06010107 – Теплогазопостачання і вентиляція).

Укладач **НУБАРЯН** Сергій Манукович

Відповідальний за випуск *І. І. Катцов*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *Г. О. Павлова*

План 2012, поз. 136М

---

Підп. до друку 17.09.2012 р.

Формат 60×84/16

Друк на ризографі

Ум. друк. арк. 2,3

Зам. №

Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: [rektorat@kname.edu.ua](mailto:rektorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4705 від 28.03.2014 р.