

**Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет**



КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

Конспект лекцій

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
освітньої програми «Мікро- та наносистемна техніка»
галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування
спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2023

УДК 681.5.08(07)

К64

До друку

Голова вченої ради факультету комп'ютерних та інформаційних технологій _____ І. С. Кондіус

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ

Директор бібліотеки _____ С. С. Бакуменко

Затверджено вченою радою факультету комп'ютерних та інформаційних технологій ЛНТУ, протокол № __ від «__» _____ 2023 року.

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ЛНТУ, протокол № __ від «__» _____ 2023 року

Завідувач кафедри АКІТ _____ Ю. С. Лапченко

Укладач: _____ В. Ю. Денисюк, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ЛНТУ.

Рецензент: _____ Р. Г. Редько, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри прикладної механіки та мехатроніки ЛНТУ.

Відповідальний за випуск: _____ Ю. С. Лапченко, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ЛНТУ.

К-64 **Контрольно-вимірювальні прилади [Текст] : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Мікро- та наносистемна техніка» галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка денної та заочної форм навчання / уклад. В.Ю. Денисюк. – Луцьк : ЛНТУ, 2023. – 212 с.**

Конспект лекцій містять теоретичний матеріал, необхідний для розкриття дисципліни. Лекційний матеріал сприяє оволодінню студентом теоретичного базису, розвитку навичок розрахунково-аналітичної роботи, розкриттю можливостей використання отриманих знань на практиці. Призначено для студентів спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка денної та заочної форми навчання.

В.Ю. Денисюк, 2023

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП	7
Тема 1 Загальні відомості про вимірювання та засоби вимірювання	8
1.1 Місце вимірювальної техніки в технологічному процесі.	8
1.2 Технологічні вимірювання.....	9
1.3 Різновиди засобів вимірювальної техніки	10
1.4 Аналогові і цифрові прилади	12
1.5 Вимірювальний канал	15
1.6 Вимірювальні системи	16
1.7 Вимірювальна установка	18
1.8 Вимірювальні пристрої	19
Тема 2 Характеристика та параметри засобів вимірювання	21
2.1 Призначення та особливості використання засобів вимірювання	21
2.2 Характеристики засобів вимірювання	22
2.3 Структури засобів вимірювання	24
2.4 Статичні характеристики вимірювальних пристроїв....	25
2.5 Динамічні характеристики вимірювальних пристроїв...	26
Тема 3 Системи дистанційної передачі, нормуючі перетворювачі	29
3.1 Загальні відомості про вимірювальні перетворення....	29
3.2 Класифікація та характеристики вимірювальних перетворювачів.....	31
3.3 Вимірювальні перетворювачі з уніфікованим вихідним сигналом.....	33
3.4 Аналогові системи передачі сигналів.....	35
3.5 Первинні перетворювачі неелектричних величин.....	39
3.6 Цифрові вимірювальні перетворювачі.....	46
Тема 4 Методи і прилади для вимірювання тиску	52
4.1 Загальні відомості та класифікація засобів вимірювання тиску.....	52
4.2 Рідинні та поршневі манометри.....	54
4.3 Пружні чутливі елементи деформаційних манометрів...	57
4.4 Деформаційні прилади для вимірювання тиску.....	58
4.5 Деформаційні вимірювальні перетворювачі тиску.....	60
4.6 Диференціальні манометри.....	65
Тема 5 Методи і прилади для вимірювання температури	67
5.1 Основні поняття про температуру. Температурні шкали.....	67
5.2 Класифікація засобів для вимірювання температури.....	70

	5.3 Термометри розширення.....	71
	5.4 Термоелектричні термометри.....	75
	5.5 Прилади для вимірювання термоелектрорушійної сили.....	81
	5.6 Електричні термометри опору.....	85
	5.7 Пірометри випромінювання.....	90
	5.8 Цифрові прилади для вимірювання температури.....	95
	5.9 Тепловізори.....	98
Тема 6	Методи і прилади для вимірювання кількості та витрат.....	100
	6.1 Загальні відомості про вимірювання витрат рідин і газів.....	100
	6.2 Вимірювання витрат за перепадом тиску.....	100
	6.3 Витратоміри постійного перепаду тиску.....	104
	6.4 Лічильники кількості витрат.....	105
	6.5 Ультразвукові витратоміри.....	107
Тема 7	Методи і прилади для вимірювання рівня	109
	7.1 Класифікація методів та приладів для вимірювання рівня.....	109
	7.2 Візуальні та поплавкові рівнеміри.....	109
	7.3 Вимірювання рівня сипких речовин.....	112
	7.4 Гідростатичні та буйкові рівнеміри.....	113
	7.5 Ємнісні рівнеміри та кондуктометричні сигналізатори рівня.....	115
	7.6 Акустичні рівнеміри.....	116
Тема 8	Методи і прилади для вимірювання геометричних розмірів	119
	8.1 Вимірювання лінійних та кутових розмірів.....	119
	8.2 Вимірювання товщини шару покриття.....	122
	8.3 Вимірювання відстаней між об'єктами.....	123
	8.4 Основні напрямки автоматизації контролю.....	125
	8.5 Пасивний і активний контроль.....	126
	8.6 Автоматичний контроль лінійних розмірів деталей.....	130
	8.7 Автоматичний контроль форми деталей.....	132
	8.8 Завантажувальні і транспортні пристрої контрольних автоматів.....	135
	8.9 Контрольні пристрої автоматичних ліній.....	137
	8.10 Автоматична сигналізація і захист.....	139
Тема 9	Методи та прилади для вимірювання фізичних властивостей та хімічного складу речовин	143
	9.1 Вимірювання маси та ваги.....	143
	9.2 Вимірювання об'єму речовин, дозатори.....	145
	9.3 Вимірювання густини речовин.....	147
	9.4 Вимірювання в'язкості речовин.....	149

	9.5 Промислові і лабораторні віскозиметри.....	151
Тема 10	Методи і прилади для вимірювання складу рідин.....	153
	10.1 Електропровідність розчинів електролітів.....	153
	10.2 Електрокондуктометричні аналізатори.....	154
	10.3 Принцип дії та класифікація оптичних аналізаторів речовин.....	156
	10.4 Потенціометричний метод аналізу.....	158
	10.5 Порівняльні та вимірювальні електроди.....	158
	10.6 Вимірювальні схеми рН-метрів	161
Тема 11	Методи і прилади для вимірювання складу газів.....	163
	11.1 Методи та засоби вимірювання складу газових середовищ.....	163
	11.2 Дифузійні аналізатори.....	164
	11.3 Магнітні аналізатори.....	166
	11.4 Сорбційні аналізатори.....	167
	11.5 Іонізаційні та полум'яно-іонізаційні газоаналізатори... ..	168
	11.6 Термохімічні та хемілюмінесцентні аналізатори.....	170
	11.7 Фотометричні аналізатори видимого випромінювання	172
	11.8 Оптико-акустичні аналізатори.....	173
Тема 12	Методи і прилади для вимірювання вологості	175
	12.1 Вологість газів.....	175
	12.2 Методи вимірювання вологості газів.....	175
	12.3 Психрометричний метод вимірювання вологості газів	177
	12.4 Випаровувальні аналізатори.....	178
	12.5 Конденсаційні аналізатори.....	180
	12.6 Вимірювання вологості твердих тіл і сипких речовин.....	181
Тема 13	Методи і прилади для хроматографічного та мас-спектрометричного аналізу	184
	13.1 Хроматографічні методи та засоби автоматичного аналізу.....	184
	13.2 Газові та рідинні автоматичні хроматографічні аналізатори.....	185
	13.3 Мас-спектрометри.....	188
Тема 14	Метрологічне забезпечення засобів вимірювань.....	190
	14.1 Повірка та калібрування засобів вимірювання.....	190
	14.2 Метрологічне забезпечення засобів вимірювання температури.....	191
	14.3 Метрологічне забезпечення засобів вимірювання тиску та витрат.....	194
	14.4 Випробувальні установки для повірки лічильників кількості рідин.....	196
	14.5 Метрологічне забезпечення засобів вимірювання концентрації та складу речовин.....	197

Тема 15 Автоматизовані системи контролю.....	201
15.1 Автоматизовані системи контролю та управління.....	201
15.2 Застосування комп'ютеризованих вимірювальних засобів у технологічних процесах та енергетичних системах.	202
15.3 Класифікація методів та засобів автоматичного контролю якості продукції.....	203
15.4 Структурні схеми автоматичних аналізаторів.....	204
15.5 Способи підключення аналізаторів до технологічних потоків.....	206
ЛІТЕРАТУРА.....	209

ВСТУП

Вимірювання, як один із способів пізнання природи, сприяє новим науково-технічним відкриттям та їх впровадженню у виробництво, забезпечує об'єктивний контроль за технологічними процесами, підвищує надійність та ефективність роботи обладнання. Особливо важливе значення відіграє контроль за технологічними процесами у вирішенні проблеми забезпечення якості продукції виробництва.

Сучасні автоматизовані системи управління технологічними процесами вимагають значної кількості вимірювань і застосування засобів вимірювань, що можуть забезпечити отримання сигналів вимірювальної інформації у формі, зручній для дистанційної передачі, збору, подальшого перетворення, оброблення та використання.

Для опису процесів та явищ, а також властивостей матеріальних тіл використовуються різні фізичні величини, кількість яких досягає десятків тисяч: електричні, магнітні, просторові і часові, механічні, акустичні, оптичні, хімічні, біологічні тощо. У технологічних виробничих процесах всі ці величини різняться не тільки якісно, але й кількісно і оцінюються різними числовими значеннями та потребують застосування відповідних методів та технічних засобів вимірювання.

Курс «Контрольно-вимірювальні прилади» охоплює загальнотехнічні вимірювання та прилади: методи та технічні засоби для вимірювання технологічних параметрів різної фізичної природи – температури, тиску й витрат, геометричних розмірів, складу та властивостей речовин. Приділена увага методам первинного перетворення фізичних величин, отримання та передачі сигналів вимірювальної інформації. Також розглянуто принципи побудови приладів для спеціальних вимірювань. Детально розглядаються питання автоматизації та комп'ютеризації процесів вимірювання і створення інформаційно-вимірювальних систем.

Даний конспект лекцій призначений для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійної програми «Мікрота наносистемна техніка» галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка денної та заочної форм навчання, а також може бути корисним студентам інших спеціальностей, які вивчають методи та засоби вимірювань фізичних величин.

ТЕМА 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИМІРЮВАННЯ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ

План

- 1.1 Місце вимірювальної техніки в технологічному процесі.
- 1.2 Технологічні вимірювання.
- 1.3 Різновиди засобів вимірювальної техніки.
- 1.4 Аналогові і цифрові прилади.
- 1.5 Вимірювальний канал.
- 1.6 Вимірювальні системи.
- 1.7 Вимірювальна уставка.
- 1.8 Вимірювальні пристрої.

1.1 Місце вимірювальної техніки в технологічному процесі

Сучасне виробництво характеризується технологічними процесами, які вимагають застосування ефективних засобів управління, включно з адаптивними та інтелектуальними системами, які можуть забезпечити оптимальний хід самого процесу в складних умовах під дією багатьох різноманітних зовнішніх чинників.

Отже, виникає необхідність у комплексній автоматизації виробничих процесів, впровадження якої неможливе без вимірювальної техніки. Неможливо автоматизувати процеси, показники яких не піддаються вимірюванню. Вимірювальні засоби використовуються для отримання та перетворення інформації і є обов'язковими елементами систем автоматизації.

Історія розвитку теорії та техніки вимірювань тісно пов'язана з загальним розвитком науки та промислового виробництва. Перші вимірювальні прилади – водяний термометр Г. Галілея (1597 р.) та ртутний барометр Е. Торрічеллі (1643 р.) появились на ранніх початках розвитку промислового виробництва.

Вимірювальна техніка, як окремий напрямок, почала свій розвиток з 40-х років XVIII ст. і характеризується послідовним переходом від показуючих – у середині і другій половині XIX ст.; аналогових самописних – кінець XIX – початок XX ст.; автоматичних та цифрових приладів – середина XX століття до інформаційно-вимірювальних та комп'ютеризованих вимірювальних систем.

Вимірювання виконуються за допомогою спеціальних технічних засобів, які поділяють на вимірювальні перетворювачі, прилади, системи, установки та комплекси.

Розширення номенклатури та якісних показників засобів вимірювальної техніки нерозривно пов'язано досягненням електроніки. Одним із сучасних напрямків розвитку вимірювальної техніки, що базується на досягненнях електроніки, є цифрові вимірювальні прилади з дискретною формою подачі інформації. Така форма подачі інформації виявилась зручною для перетворення, передачі, оброблення та зберігання інформації. Розвиток дискретних засобів вимірювальної техніки дозволило створити прилади,

похибка показів яких складає менше 0, 0001%, а швидкодія перетворювачів досягає декількох мільярдів вимірювань за секунду.

Широкі можливості відкрились перед вимірювальною технікою у зв'язку з появою мікропроцесорів та комп'ютерної техніки. Завдяки їм значно розширилась область застосування засобів вимірювальної техніки, покращились їх технічні характеристики, підвищились надійність й швидкодія, відкрились шляхи реалізації задач, які раніше не могли бути вирішені.

Безпосередньою задачею курсу «Контрольно-вимірювальні прилади» є:

- 1) вивчення та критичне співставлення методів вимірювання різних величин, що характеризують технологічні процеси;
- 2) розгляд основних конструктивних схем вимірювальних пристроїв та умов їх застосування з оцінкою можливої достовірності вимірювання;
- 3) аналіз перспектив розвитку методів та техніки вимірювань.

1.2 Технологічні вимірювання

Основні визначення, які використовуються в курсі:

Вимірювання – знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом з допомогою спеціальних технічних засобів. Абсолютні вимірювання основані на прямих вимірюваннях основних величин. Відносні вимірювання визначають відношення величини, яка вимірюється до однойменної величини, що приймається за одиницю або приймається за вихідну.

Контроль – перевірка відповідності між станом об'єкту та заданою нормою.

Принцип вимірювання – це фізичне явище або сукупність фізичних явищ, покладених в основу вимірювання. Прикладом може служити вимірювання температури з використанням термoeфекта та інші фізичні явища, які використано для експерименту і повинні бути вибрані з врахуванням отримання необхідної точності вимірювання.

Вимірювальний сигнал – сигнал, функціонально пов'язаний зі зміною фізичної величини з заданою точністю.

Вимірювальна інформація – це кількісні відомості про властивості матеріального об'єкта, явища або процесу, що отримуються за допомогою засобів вимірювання в результаті їх взаємодії з об'єктом.

Результати вимірювань – це продукт нашого пізнання і вони становлять приблизну оцінку значення вимірюваної величини. Результати вимірювань завжди залежать від використаного принципу чи методу вимірювань, а також від стану та точності засобу вимірювань, за допомогою якого їх отримують, та від кваліфікації експериментатора.

Єдність вимірювань – це стан вимірювань, коли результати вимірювань виражені у законодавчо прийнятих одиницях, а похибки вимірювань прийняті із заданою ймовірністю. Єдність вимірювань необхідна для порівняння результатів вимірювань фізичної величини, проведених у різних місцях, у різний час та з використанням різних методів і засобів вимірювання. Тобто,

результати вимірювань повинні бути однаковими скрізь і не залежати від методу та засобу, яким було проведене вимірювання.

Технологічними вимірюваннями прийнято називати галузь вимірювальної техніки, що поєднує засоби, методи та прийоми проведення вимірювань параметрів, які характеризують технологічні процеси.

Метод вимірювання – сукупність прийомів використання принципів та засобів вимірювання.

Крім розглянутої класифікації суттєвим є поділ за принципом дії, тобто залежно від фізичного принципу, який покладено в основу його побудови.

Всі вимірювання поділяються на чотири види: прямі, непрямі або опосередковані, сукупні та сумісні.

За прямого вимірювання фізична величина знаходиться безпосередньо з результатів експерименту. Наприклад, зважування на вазі за допомогою гир, вимірювання струму амперметром.

За опосередкованого вимірювання фізична величина знаходиться на основі прямого вимірювання ряду параметрів, які пов'язані відомою функціональною залежністю. Наприклад, вимірювання електричного опору на основі показів амперметра і вольтметра.

За сукупного вимірювання виконується одночасне вимірювання однойменних величин. У цьому випадку фізичні величини визначаються на основі розв'язання системи рівнянь.

Сумісні вимірювання аналогічні сукупним для неоднорідних величин.

На практиці використовуються наступні методи вимірювання: безпосередньої оцінки, порівняння з мірою, диференціальний, нульовий, заміщення, співпадіння.

Вимірювальне перетворення може класифікуватись за двома методами: прямого перетворення та перетворення за врівноваженням.

1.3 Різновиди засобів вимірювальної техніки

Вимірювання здійснюють із застосуванням призначених для цього спеціальних технічних засобів – засобів вимірювальної техніки (ЗВТ). Ці засоби взаємодіють з об'єктом, внаслідок чого на їх входах отримують сигнали, які містять інформацію про вимірювану величину. Згідно із ДСТУ 2681-94 до ЗВТ (рис. 1.1) належать *засоби вимірювань (ЗВ) та вимірювальні пристрої (ВП)*. Особливістю засобів вимірювань є те, що з їх допомогою безпосередньо одержують результат вимірювання. До ЗВ належать вимірювальні прилади, вимірювальні канали, вимірювальні системи та вимірювальні уставки. Вимірювальні пристрої (міри, вимірювальні перетворювачі, компаратори та обчислювальні компоненти) виконують лише одну з вимірювальних операцій і самостійно не забезпечують одержання результату вимірювання, а лише в сукупності з іншими пристроями чи засобами вимірювань.

Як вимірювальні прилади, так і вимірювальні перетворювачі класифікують за методом вимірювання на пристрої прямої дії та порівняння, а

за способом представлення величин на аналогові та цифрові.

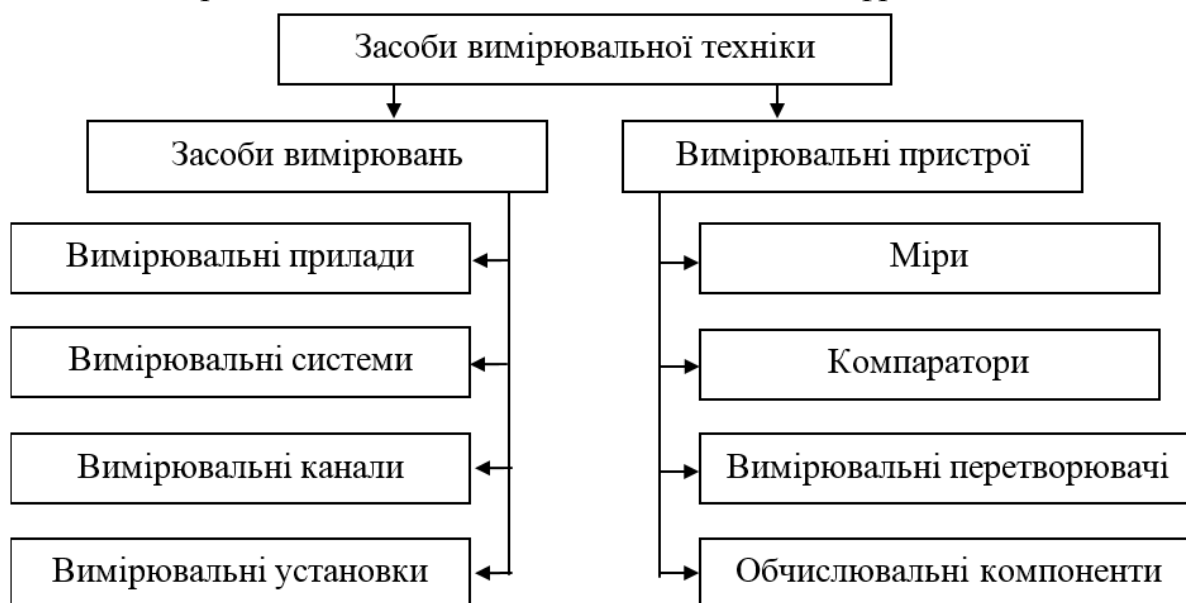


Рисунок 1.1 – Класифікація засобів вимірювальної техніки

Аналоговий вимірювальний прилад – це вимірювальний прилад, покази якого є неперервною функцією вимірювальної величини.

Цифровий вимірювальний прилад – це вимірювальний прилад, що автоматично виробляє дискретні сигнали вимірювальної інформації, покази якого представлені в цифровій формі.

За способом представлення показів вимірювальні прилади поділяють на показуючі, реєструючі, самопишучі та друкуючі.

Показуючий вимірювальний прилад – це вимірювальний прилад, що допускає тільки відлік показів. Показуючий прилад може бути аналоговим чи цифровим.

Реєструючий вимірювальний прилад – це вимірювальний прилад, у якому передбачена реєстрація показів.

Самописний вимірювальний прилад – це реєструючий вимірювальний прилад, у якому передбачений запис показів у формі діаграми. Самописні прилади зазвичай бувають аналоговими.

Друкуючий вимірювальний прилад – це реєструючий вимірювальний прилад, у якому передбачено друкування показів у цифровій формі. Друкуючі прилади зазвичай бувають цифровими.

Підсумовуючий вимірювальний прилад – це вимірювальний прилад, покази якого функціонально пов'язані із сумою двох чи декількох величин, що підводяться до нього за різними каналами.

Інтегруючий вимірювальний прилад – це вимірювальний прилад, у якому підведена величина піддається інтегруванню за часом чи за іншою незалежною змінною.

Крім того, прийнято розрізняти вимірювальні перетворювачі в залежності від розташування у вимірювальному ланцюгу, а саме первинні, вторинні, проміжні, порогові та передавальні.

Первинний вимірювальний перетворювач (чи датчик) – це вимірювальний перетворювач, до якого підведена вимірювальна величина.

Проміжний вимірювальний перетворювач – це вимірювальний перетворювач, що займає у вимірювальній ланці місце після першого.

Передавальний вимірювальний перетворювач – це вимірювальний перетворювач, який призначений для дистанційної передачі сигналу вимірювальної інформації.

Масштабний вимірювальний перетворювач – це вимірювальний перетворювач, який призначений для зміни величини в задане число разів (власне кажучи це підсилювач сигналу вимірювальної інформації).

Функціональний вимірювальний перетворювач – це вимірювальний перетворювач, призначений для формування сигналу вимірювальної інформації, пов'язаного з вимірювальною величиною деякою заданою функцією.

За ступенем захисту вимірювальні пристрої поділяються на виконані в нормальному (звичайному), пило-, водо-, вибухозахищеному, герметичному та іншому виконанні.

За характером застосування вимірювальні прилади поділяють на стаціонарні (щитові), корпус яких пристосований для жорсткого кріплення на місці експлуатації, та переносні, корпус яких не призначений для закріплення.

Крім розглянутої класифікації суттєвим є поділ засобів вимірювання за принципом дії, тобто, залежно від фізичного принципу, який покладений в основу його побудови. Принцип дії знаходить відображення, як правило, в назві засобу вимірювання, наприклад: термоелектричний термометр, деформаційний манометр, електромагнітний витратомір та інше.

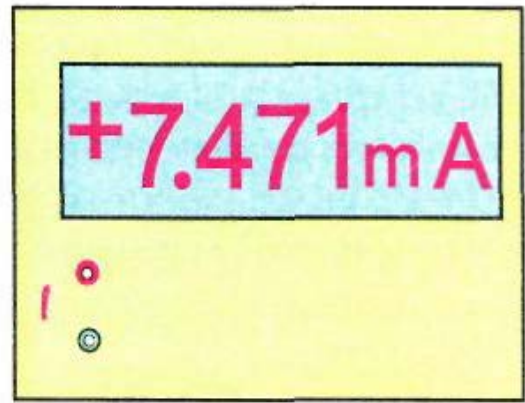
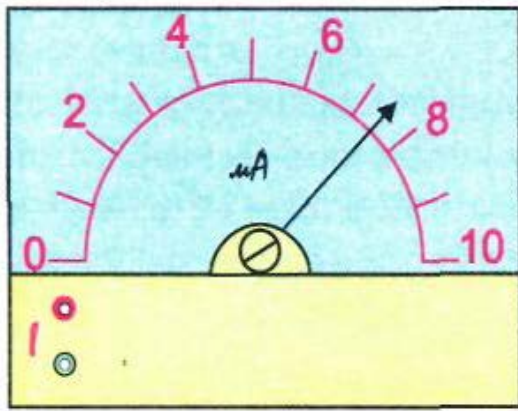
І нарешті, суттєвою з позиції метрології є класифікація згідно з метрологічним призначенням, відповідно до якої розрізняють зразкові та робочі засоби вимірювань.

Робочий засіб вимірювання – засіб, який застосовується для вимірювань, не пов'язаних з передачею розміру одиниць. Робочі засоби вимірювань – це вся сукупність вимірювальних приладів, перетворювачів, установок та систем, яка застосовується в усіх галузях діяльності людини безпосередньо на виробництві для визначення технологічних параметрів.

Зразковий засіб вимірювання – міра, вимірювальний прилад або перетворювач, які призначені для перевірки за допомогою їх інших засобів вимірювань.

1.4 Аналогові і цифрові прилади

З погляду користувача (експериментатора) аналогові і цифрові прилади відрізняються способом отримання результату вимірювання. В аналогових приладах значення вимірюваної величини, зазвичай, перетворюється в кутове чи лінійне переміщення покажчика (стрілки чи світлової плямки) (рис. 1.2, а). Таке переміщення є механічним аналогом розміру вимірюваної величини. Числове значення величини одержується безпосередньо за участю експериментатора, який здійснює відлік за шкалою приладу.



а)

б)

Рисунок 1.2 – Аналоговий (а) та цифровий (б) прилади

Наприклад, для рисунка 1.2, а вимірне значення струму становить $I=7,5 \text{ мА}$. У цифрових приладах (рис. 1.2, б) значення величини отримується автоматично, відразу у вигляді числового значення з відповідною одиницею. Експериментатор безпосередньо не бере участі у формуванні відліку. Наприклад, для рисунка 1.2, б вимірне значення струму становить $I=7,471 \text{ мА}$.

Аналогові прилади бувають електромеханічними (рис. 1.3, а) та електронними (рис. 1.3, б). Електромеханічний прилад (рис. 1.3, а) складається з вимірювального механізму та відлікового пристрою. У механізмі приладу електрична величина (струм чи напруга) перетворюється в механічне переміщення (кутове чи лінійне) рухомої частини механізму. Відліковий пристрій містить шкалу з поділками та покажчик (механічний – стрілка чи світловий – плямка). Для вимірювання інших величин (опір, потужність тощо), а також для зміни границь вимірювань вимірювальний механізм вмикається відповідно у вимірювальну схему приладу.

Електронний аналоговий прилад (рис. 1.3, б) складається з вхідного електронного перетворювача вимірюваної величини у вихідну напругу, яка вимірюється електромеханічним вольтметром. Вихідною величиною може бути струм, тоді на виході приладу використовується міліамперметр.

Структура цифрового приладу (рис. 1.3, в) у вхідній частині подібна до структури електронного аналогового приладу. Обов'язковим елементом кожного цифрового вимірювального приладу є *аналого-цифровий перетворювач (АЦП)* – вимірювальний пристрій, що здійснює автоматичне перетворення розміру вихідної величини (переважно напруги) вхідного перетворювача у її цифрове (числове) значення. Таке перетворення називають *аналого-цифровим перетворенням*.

На виході цифрового приладу використовується цифровий відліковий пристрій, за допомогою якого через дешифратор результат вимірювання подається у вигляді цифр та інших знаків.

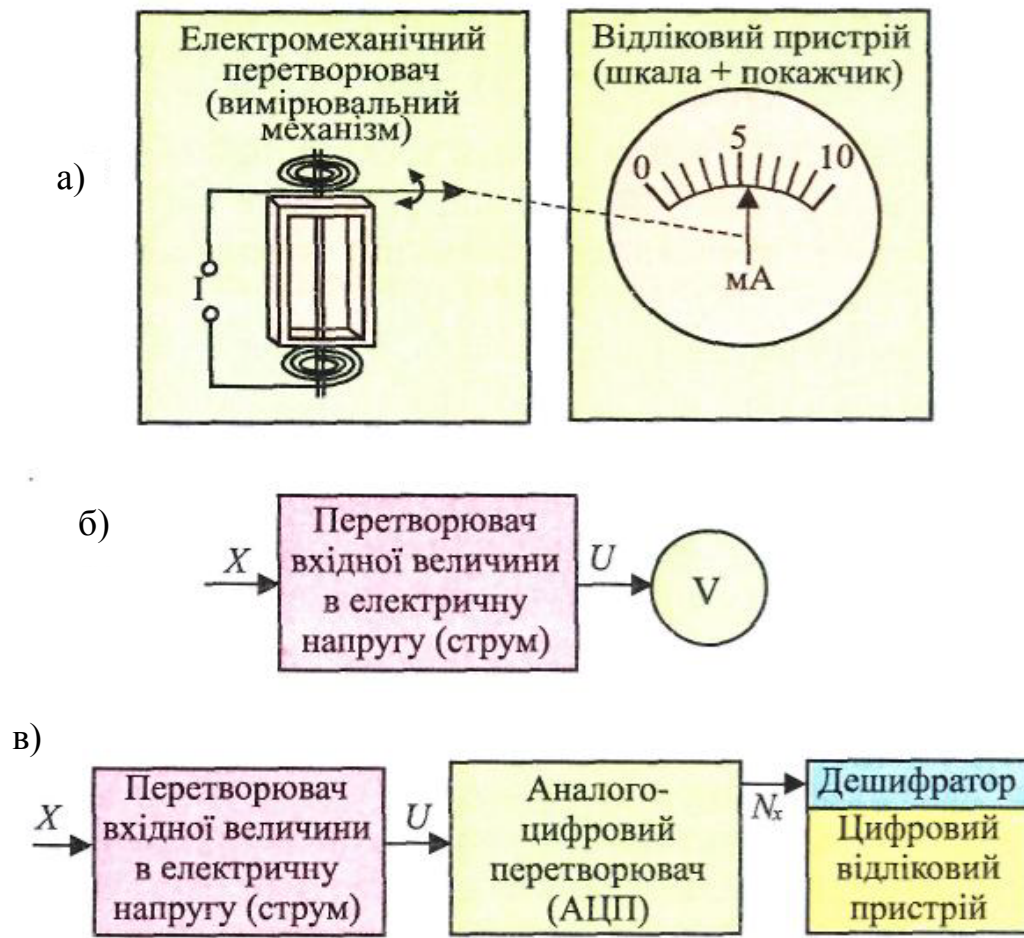


Рисунок 1.3 – Структурні схеми електромеханічного (а) електронного аналогового (б) та цифрового (в) приладів

Існує широкий спектр вимірювальних приладів, які відрізняються між собою за видом і родом вимірюваних величин, за діапазонами та характеристиками точності їх вимірювань та іншими характеристиками. На промислових об'єктах переважно використовують стаціонарні (щитові) прилади (аналогові та цифрові) для вимірювань однієї величини в одному, сталому діапазоні. Наприклад, вольтметр для вимірювання напруги мережі живлення, термометр для вимірювання температури у технологічній пічці тощо. У технічних та лабораторних вимірюваннях широко застосовуються прилади, які можуть вимірювати декілька величин у різних діапазонах. Такі прилади називають мультиметрами, вони здебільшого призначені для вимірювань у різних діапазонах електричних величин: постійних та змінних струму та напруги, електричного опору, частоти і періоду змінних сигналів тощо. Існують мультиметри, які забезпечують вимірювання також і неелектричних величин, зокрема, температури при використанні вимірювальних перетворювачів (термоелектричних, резистивних та термісторів) зі стандартними функціями перетворення.

1.5 Вимірювальний канал

Вимірювальний канал – це сукупність засобів вимірювальної техніки, засобів зв'язку та інших пристроїв, призначена для отримання вимірювальної інформації про одну вимірювальну величину. Переважно вимірювальний канал складається з декількох блоків, серед яких найважливішими є (рис. 1.4):



Рисунок 1.4 – Вимірювальний канал

- *вимірювальний перетворювач (сенсор, С)*, який сприймає вимірювану величину і перетворює її у вихідну, придатну для подальшого перетворення і пересилання;

- *кондиціонер (нормалізатор) сигналу (КС)*, в якому відбувається низка вимірювальних операцій над вихідним сигналом сенсора для доведення цього сигналу (переважно електричної напруги) до рівня, придатного до подальшого аналого-цифрового перетворення;

- *аналого-цифровий перетворювач (АЦП)*, що здійснює автоматичне перетворення розміру аналогового сигналу (переважно, електричної напруги) у її цифрове(числове)значення;

- *інтерфейс (І)* – це група технічних пристроїв (перетворювачів кодів, формувачів і модуляторів сигналів, з'єднувачів, кабелів тощо) і відповідних програм керування, які призначені для пересилання вимірювальної інформації між ЗВТ, обчислювальними, відліковими та реєструвальними пристроями.

На рисунку 1.4 використано позначення: X – вимірювана величина; Y – вихідна величина сенсора; U_m – нормалізований рівень сигналу, придатний для подальшого аналого-цифрового перетворення; N_x – результат аналого-цифрового перетворення; D_x – цифрові дані, що пересилаються з виходу АЦП для подальшого опрацювання, зберігання чи (і) реєстрації.

Оскільки аналого-цифрові перетворювачі зазвичай виготовляються на задані рівні вхідних сигналів (переважно вхідною величиною АЦП є напруга у заданому діапазоні, наприклад, однополярна в діапазонах $0-1V$; $0-2V$; $0-5V$; $0-10V$ чи інші або у двох полярних діапазонах), тому незалежно від роду і виду вихідного сигналу вимірювального перетворювача (сенсора) на виході КС мусить бути сформований сигнал із заданими властивостями, найголовніша з яких – це заданий діапазон її зміни. Тому цей елемент вимірювального каналу називають *нормалізуючим перетворювачем*, чи *перетворювачем з уніфікованим вихідним сигналом*, а останнім часом в зарубіжній літературі з вимірювальної техніки такі пристрої називають *кондиціонерами сигналів*. Відповідні вимірювальні операції називаються

кондиціонуванням вимірювального сигналу. Дослівно англійський термін *conditioning* означає «покращувати стан», а термін *conditioned* – відповідний нормі чи стандарту. Тобто, кондиціонований сигнал – це сигнал, що відповідає встановленим нормам.

Набір перетворень сигналів у кожному конкретному випадку залежить від роду, виду та інших властивостей вимірювальної величини. Наприклад, цими операціями можуть бути перетворення вихідної величини сенсора в електричні напругу чи струм, підсилення (сигнал замалий) чи послаблення (сигнал завеликий) сигналу, зміщення його початкового рівня (ненульовий вихідний сигнал сенсора за нульового значення величини), аналогове фільтрування (сигнал з перетворювача спотворений завадами та шумами), перетворення роду величини (при вимірюваннях характеристик змінних сигналів – середньоквадратичного, середньовипрямленого, амплітудного значень) тощо.

1.6 Вимірювальні системи

Вимірювальні системи – це сукупність вимірювальних каналів, інших засобів вимірювальної техніки і зв'язку, обчислювальних та інших технічних пристроїв, а також керуючих та обчислювальних програм, об'єднаних для отримання вимірювальної інформації про стан досліджуваного об'єкта загалом. Вимірювальні системи призначені для вимірювання не однієї величини, а сукупності величин, які характеризують стан об'єкта. Ці величини можуть бути як одного виду, так і різних видів, що характеризують різні властивості об'єкта.

Наприклад, для вимірювання температури у різних просторових точках об'єкта (температурного поля у топці котлоагрегату) використовують багатоканальну вимірювальну систему, що має однотипні елементи. Для дослідження параметрів двигуна внутрішнього згоряння застосовують вимірювальну систему з різними вхідними величинами: температура та тиск газів у циліндрі, напруга запалювання, швидкість обертів, витрата палива, потужність тощо.

Узагальнена функціональна схема вимірювальної системи наведена на рисунку 1.5. На досліджуваному об'єкті встановлюються необхідні вимірювальні перетворювачі, які створюють сигнали про значення параметрів. Вихідні сигнали сенсорів за допомогою пристроїв перетворюються у цифрові дані, які пересилаються до пристроїв обробки, де відбувається їх необхідне опрацювання.

Етап опрацювання вимірювальних даних включає широкий спектр математичних, зокрема логічних операцій, серед яких: розв'язування обернених вимірювальних задач для знаходження значень параметрів об'єкта за результатами вимірювань вихідних сигналів перетворювачів, цифрове згладжування, фільтрація та усереднення сигналів, їх статистичне опрацювання для визначення числових характеристик, лінеаризація функцій перетворення сенсорів та вимірювальних каналів загалом, корекція статичних

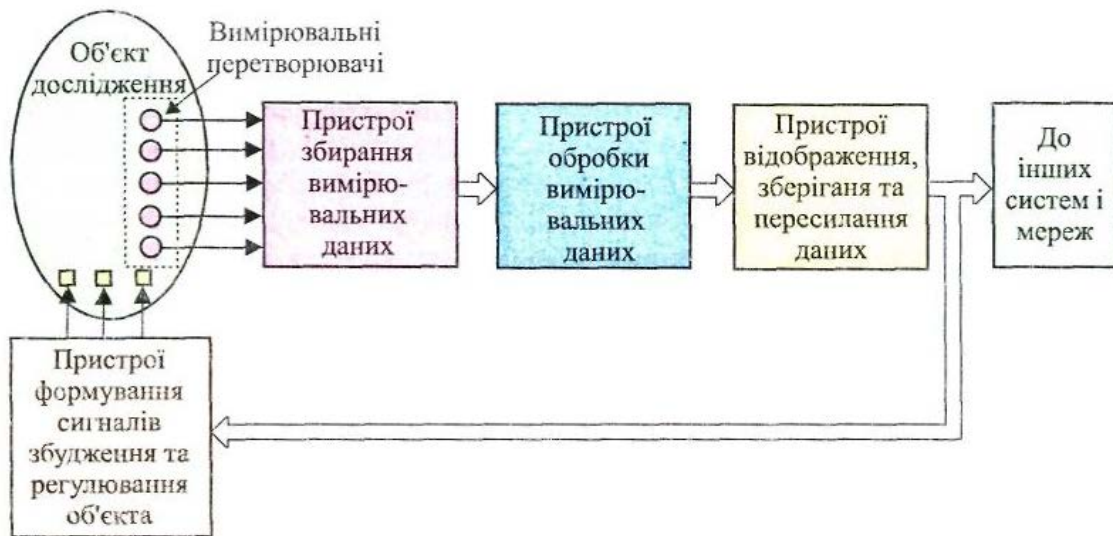


Рисунок 1.5 – Функціональні пристрої вимірювальної системи

та динамічних похибок, порівняння результатів вимірювань контрольованих параметрів об'єкта з їх заданими допусками і формування відповідних сигналів, формування сигналів збудження об'єкта під час його діагностики тощо.

Ці функції виконують обчислювальні засоби різної продуктивності, від найпростіших до надскладних. Як обчислювальні засоби у вимірювальних системах можуть використовуватися мікроконтролери, мікропроцесори, одноплатні та однокристальні ЕОМ, персональні комп'ютери широкого застосування, мультипроцесорні обчислювальні системи, спеціалізовані процесори тощо. Аналогічно програмне забезпечення вимірювальних систем також може бути різної складності, бути універсальним чи спеціалізованим.

Пристрої відображення, зберігання та пересилання (транспорту) даних забезпечують комунікацію вимірювальної системи з персоналом та системами інших ієрархічних рівнів, документування та архівування результатів вимірювань, візуалізацію результатів контролю та діагностики об'єкта. Відображення результатів може відбуватися як у цифровій, так і в аналоговій формах, за допомогою типових цифрових та аналогових відлікових пристроїв та табло, а також віртуальним способом на екранах моніторів.

Для діагностування стану об'єкта необхідно здійснювати його збудження зовнішніми впливами і далі вимірювати реакцію об'єкта на ці збудження. Для цього служать пристрої формування сигналів збудження, в яких відбуваються зворотні операції: цифрові дані – цифроаналогове перетворення – аналогове згладжування (фільтрація) – підсилення – зворотне перетворення електричного сигналу у вихідну неелектричну величину.

Об'єкт дослідження може бути просторово зосередженим або розпорошеним, може характеризуватися однотипними або різнотипними параметрами, тому збирання вимірювальних даних може здійснюватися зосередженим чи розподіленим способом на основі використання відповідних

вимірювальних каналів, пересилання та комутації потоків даних. Важливими елементами вимірювальних систем є їх інтерфейсні компоненти, які забезпечують різні види узгоджень між складовими системи: конструктивні, інформаційні, сигналові та програмні.

Залежно від призначення вимірювальних систем розрізняють інформаційно-вимірювальні, контрольно-вимірювальні та діагностично-вимірювальні системи (рис. 1.6).

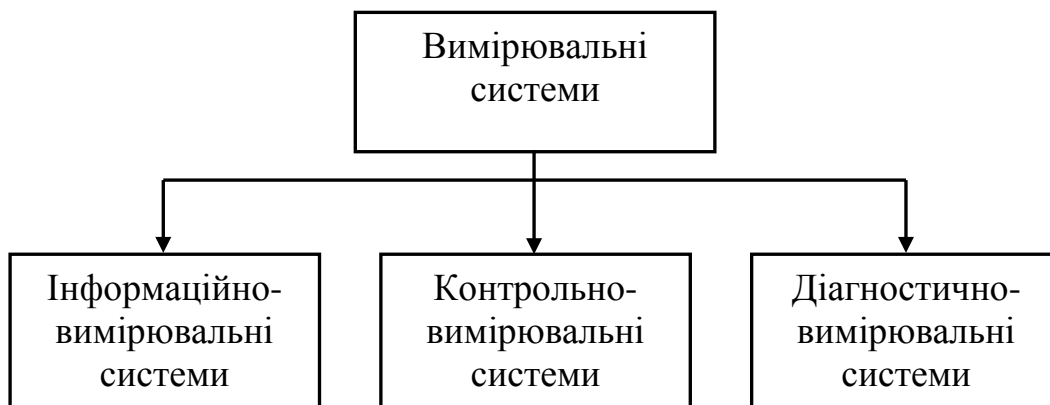


Рисунок 1.6 – Класифікація вимірювальних систем

Завданням *інформаційно-вимірювальної системи* є визначення розмірів вимірюваних величин – параметрів досліджуваного об'єкта, тобто, кількісного оцінювання процесів, що відбуваються в об'єкті. Такі системи переважно використовують у наукових дослідженнях.

Якщо необхідно встановити, чи параметр (параметри) об'єкта в нормі, чи ні, то виникає потреба реалізації формування нижнього та верхнього допустимих рівнів для кожного з параметрів об'єкта, порівняння результатів вимірювань з цими рівнями і формування відповідного результату контролю. Такі функції виконують контрольно-вимірювальні системи. Отже, *контрольно-вимірювальна система*, крім кількісного оцінювання параметрів стану об'єкта, дає також якісну його характеристику: чи об'єкт (його параметри) в нормі, чи ні.

Якщо ж один чи декілька параметрів, що характеризують стан об'єкта, виходять за межі допуску, то виникає проблема встановлення причини такого стану. Відповідь на це питання дає *діагностично-вимірювальна система*. У такій системі результати діагностики отримують за допомогою відповідного збудження об'єкта і вимірювання та опрацювання його реакцій на ці збудження.

1.7 Вимірювальна установка

Вимірювальна установка – це сукупність функціонально об'єднаних вимірювальних приладів і пристроїв та інших технічних засобів, призначених для досліджень властивостей зразків матеріалів та метрологічної перевірки інших засобів вимірювальної техніки. Об'єктом досліджень у такому разі є

засоби вимірювальної техніки (прилади, канали систем, сенсори та інші вимірювальні перетворювачі, міри тощо). Конструктивно установка виконана переважно як одне ціле у вигляді стенда з необхідними пристроями під'єднання досліджуваних зразків, регулювання величин, відображення і документування результатів. Операції з досліджень матеріалів та метрологічної перевірки можуть здійснюватися вручну або з різним ступенем автоматизації, аж до повної. Тенденція розвитку ЗВТ є такою, що у перспективі функції установок переберуть на себе контрольні-вимірювальні системи.

1.8 Вимірювальні пристрої

Вимірювальний пристрій – ЗВТ, в якому виконується лише одна із складових частин процедури вимірювання (вимірювальна операція). Вимірювальні пристрої самостійно не забезпечують можливості отримувати результат вимірювання.

До вимірювальних пристроїв належать міри, вимірювальні перетворювачі, масштабні перетворювачі, компаратори та обчислювальні компоненти.

До них можна зарахувати також індикатори, гальванометри, нуль-органи (показники нуля), та інші пристрої відображення значень величин.

Міра – вимірювальний пристрій, що реалізує відтворення і (або) збереження фізичної величини заданого значення.

Розрізняють однозначні та багатозначні міри (магазини). Однозначні міри відтворюють одне значення фізичної величини. Наприклад, однозначні міри опору відтворюють значення опорів $R_N = 10^n$ Ом (де n – ціле число від – 5 до 9). Міра електрорушійної сили – нормальний елемент, який відтворює певне значення ЕРС.

Набір однозначних мір утворює багатозначну міру, наприклад, магазин опору.

Вимірювальний перетворювач (ВП) – вимірювальний пристрій, що реалізує вимірювальне перетворення.

До вимірювальних перетворювачів, зокрема, належать масштабні ВП та ВП неелектричних величин.

Масштабний ВП здійснює масштабне перетворення фізичної величини без зміни роду. Наприклад, подільник напруги, підсилювач напруги, вимірювальні трансформатори, вимірювальний шунт тощо.

ВП неелектричних величин (сенсори) – це перетворювачі роду фізичної величини, вони перетворюють неелектричну величину, наприклад, температуру, в електричний сигнал (термоелектричний перетворювач). Тензорезистор перетворює механічну деформацію у зміну електричного опору.

Компаратори – це вимірювальні пристрої, за допомогою яких порівнюють вимірювану та відтворену мірою величини. Прикладом компаратора є терези для знаходження маси тіла його зрівноважуванням

гирями відомої маси. Часто компаратор може бути сконструйованим разом з однозначною чи багатозначною мірою (для зрівноважування величин), а також масштабним перетворювачем та іншими пристроями, наприклад, нуль-індикатором, за яким встановлюють факт порівняння величин. У такий спосіб побудовані компаратори електричних опорів – мости постійного і змінного струмів, компаратори електричної напруги тощо.

Обчислювальні компоненти – це пристрої, за допомогою яких здійснюють необхідні обчислювальні процедури над первинними результатами вимірювань для отримання остаточних результатів. Залежно від обсягу та складності виконуваних операцій ці компоненти можуть бути різної складності – від найпростіших мікропроцесорів, універсальних комп'ютерів аж до найскладніших спеціалізованих процесорів сигналів та мультипроцесорних систем. Важливим елементом обчислювального компонента є його програмне забезпечення, а з метрологічного погляду – програма (чи програми) опрацювання результатів вимірювань.

Питання для самоконтролю

1. Що таке засоби вимірювальної техніки?
2. Що таке засоби вимірювань? Навести приклади.
3. Що таке вимірювальні пристрої? Навести приклади.
4. Що таке вимірювальні прилади? Навести приклади.
5. Що таке вимірювальний канал?
6. Назвати основні складові вимірювального каналу.
7. Що таке вимірювальна система?
8. Перерахувати основні функціональні компоненти вимірювальної системи.
9. Назвати різновиди вимірювальних систем.
10. Що таке вимірювальна установка?
11. Що таке вимірювальна міра?
12. Що таке вимірювальний перетворювач?
13. Що таке компаратор?
14. Що таке обчислювальний компонент?

ТЕМА 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ПАРАМЕТРИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ

План

- 2.1 Призначення та особливості використання засобів вимірювання.
- 2.2 Характеристики засобів вимірювання.
- 2.3 Структури засобів вимірювання.
- 2.4 Статичні характеристики вимірювальних пристроїв.
- 2.5 Динамічні характеристики вимірювальних пристроїв.

2.1 Призначення та особливості використання засобів вимірювання

Засоби вимірювання, відповідно до Державної системи вимірювань (ДСВ) за своїм експлуатаційним призначенням, підрозділяють на такі групи: еталони, зразкові міри і прилади, виробничі міри і прилади.

Еталони – це міри і прилади, призначені для відтворення і зберігання будь-якої величини з найвищою точністю. До них, наприклад, належать: державний еталон метра, еталонні набори кінцевих мір довжини.

Зразкові міри і прилади призначаються для перевірки і градування лабораторних і заводських мір.

Виробничі міри і прилади призначаються для перевірки виробів в умовах виробництва.

За характером використання у виробничому процесі ЗВ поділяють на міри, вимірювальні прилади (інструменти) і калібри.

Залежно від призначення, будови, принципу дії та інших характерних ознак, ЗВ застосовуються для технологічних та теплотехнічних вимірювань і поділяються на групи.

Найпоширенішими ЗВ є прилади безпосередньої оцінки, у яких є рухомий елемент у вигляді стрілки і нерухомий елемент у вигляді шкали. Ціна поділки шкали відповідає частці або кратній одиниці вимірюваної фізичної величини. Часто прилади оснащуються спеціальним пристроєм для реєстрації (наприклад, на папері – самописні) вимірних значень. У цьому випадку вони називаються реєструючими.

Допоміжні засоби вимірювання – поєднання допоміжних елементів, призначених для роботи сумісно з ВП. Ці допоміжні ЗВ, як правило, впливають на метрологічні характеристики ЗВ і тому вони також нормуються. До допоміжних ЗВ належать: вимірювальні трансформатори, шунти, спеціальні коаксіальні кабелі тощо.

Зразкові міри і прилади призначені для відтворення фізичної величини, з їх допомогою забезпечується єдність вимірювань. Ними здійснюється повірка робочих мір і ВП. Робочі міри і прилади поділяються на лабораторні і технічні (промислові).

Лабораторні міри і прилади застосовуються виключно у лабораторних умовах, їх точність вища ніж точність технічних приладів, хоча у багатьох випадках конструктивно- і метрологічно- вони не відрізняються. Підвищена

точність лабораторних мір і приладів забезпечується спеціальними градуювальними характеристиками, що додаються до них.

Основна класифікація передбачає розподіл ЗВ за родом вимірюваних величин.

Для найбільш поширених засобів вимірювання умовно прийняті такі назви:

- для засобів вимірювання температури: термометри і пірометри;
- тиску: манометри, вакуумметри, мановакуумметри, тягоміри, напороміри, барометри;
- витрати та кількості: витратоміри, лічильники та витратоміри з лічильниками;
- рівня: рівнеміри та показчики рівня;
- складу димових та інших газів: газоаналізатори, киснеміри тощо;
- аналізу та складу рідини: аналізатори рідини, кондуктометри, густиноміри, рН-метри, рефрактометри тощо.;
- вологості: вологоміри, психрометри, гігрометри тощо.

Додатково засоби вимірювань поділяються на групи за такими ознаками:

- за принципом дії та використанням енергії: механічні, електричні, рідинні, пневматичні, гідравлічні, хімічні, ультразвукові, інфрачервоні, радіоізотопні тощо;
- формою показів: аналогові та цифрові;
- характером відображення: показуючі, самописні, реєструючі, інтегруючі;
- призначенням: промислові (технічні), лабораторні, зразкові, еталонні;
- місцем розташування: щитові, місцеві, дистанційні;
- габаритами: мініатюрні, малогабаритні, нормальні та великогабаритні.

Промислові (робочі) ЗВ є найпоширенішими. Вони використовуються для вимірювання технологічних або теплотехнічних параметрів, мають порівняно просту структуру та конструкцію, високу надійність і необхідну точність, прості в експлуатації та ремонті. Показання промислових приладів видно на велику відстань, а наявність сигнальних пристроїв дозволяє впроваджувати звукову та світлову сигналізацію відхилень технологічних параметрів.

Лабораторні прилади використовуються для більш точних лабораторних вимірювань при наукових дослідженнях та з метою визначення похибок ЗВ. Для одержання більшої точності вимірювань лабораторні засоби виготовляються більш ретельно, мають досконаліші схеми та спеціальні засоби для відліку показань (оптичні пристрої), до їх показань вводяться поправки, визначені експериментальним або розрахунковим шляхом.

2.2 Характеристики засобів вимірювання

З огляду на специфічність застосування ЗВ їх характеристики умовно можна розділити на технічні та метрологічні. Для оцінки їх ефективності не існує якихось єдиних критеріїв, а тому оцінка ЗВ здійснюється за наступними

основними метрологічними характеристиками: точність, швидкодія, чутливість, надійність.

Точність – характеристика ЗВ, під якою розуміють ступінь наближення результатів вимірювання до істинного значення фізичної величини, яка вимірюється. Часто замість поняття «точність» застосовується поняття «похибка», що визначає ступінь відхилення показів ЗВ від дійсного значення вимірюваної величини (x_0).

Для оцінки похибок вводиться ряд визначень:

абсолютна похибка

$$\Delta = y - x_0; \quad (2.1)$$

відносна похибка (%)

$$\delta = \Delta / x_0 \cdot 100 \quad \text{або} \quad \delta = \Delta / y \cdot 100; \quad (2.2)$$

зведена похибка

$$\gamma = |\Delta|_{\max} / y_{\max}, \quad (2.3)$$

де $|\Delta|_{\max}$ – максимальне значення абсолютної похибки;

y_{\max} – максимальне значення шкали вимірювального приладу.

Швидкодія ЗВ характеризується кількістю вимірювань за одиницю часу; половою частот вхідного параметра, за яких ЗВ не виходить за задану межу точності. У стрілочних приладах швидкодія оцінюється часом з моменту зміни вхідного сигналу до моменту, коли стрілка приладу ввійшла у половою не більше 1% від встановленого значення вхідного параметра по шкалі приладу і залишається у цій полові.

Чутливість ЗВ – це реакція приладу на вхідний сигнал, тобто відношення вихідної величини до вхідної:

$$s = dy / dx. \quad (2.4)$$

Часто під s приймається величина

$$s = \Delta y / \Delta x. \quad (2.5)$$

У деяких випадках чутливість визначається за формулами:

$$s = \frac{\Delta y}{\Delta x / x} \quad \text{або} \quad s = \frac{\Delta y / y}{\Delta x / x}. \quad (2.6)$$

Для стрілочних приладів $s = \alpha / x$. Тому вимірювана величина

$$x = \frac{1}{s} \alpha. \quad (2.7)$$

де α – покази приладу;

$1/s$ – постійна приладу або ціна поділки.

Не слід плутати чутливість засобу вимірювання з порогом чутливості, що визначає найменше значення вхідного сигналу, за якого впевнено проявляється зміна вихідного сигналу.

Метрологічна надійність ЗВ – це збереження його характеристик точності у заданих межах за встановлений період експлуатації при відповідних умовах оточуючого середовища. У цьому випадку враховується не тільки вихід з ладу окремого елемента ЗВ і припинення його роботи, але й

обов'язкове збереження метрологічних характеристик (похибки, чутливості, швидкодії тощо) за вказаних умов.

Однією з важливих кількісних характеристик надійності ЗВ є ймовірність безвідмовної роботи. На практиці, у технічних умовах на ЗВ вказуються вимоги щодо характеристик надійності. Наприклад, за період часу $t = 1000$ год ймовірність того, що даний засіб вимірювання буде працездатним $p(t)$, повинна бути не менша 0,85, тобто $p(t) \geq 0,85$.

До характеристик ЗВ також належать: діапазон вимірювання, вхідний опір, власне споживання енергії, стабільність характеристик, захищеність від зовнішніх впливів, габарити, маса, вартість тощо.

2.3 Структури засобів вимірювання

Структура ЗВ у загальному вигляді показана на рисунку 2.1. Тут на ЗВ і вихідний сигнал у діють як параметри z_1, z_2, \dots, z_n , та і q_1, q_2, \dots, q_n – значення внутрішніх, конструктивних, геометричних та інших параметрів (тертя, тип матеріалу та інші дестабілізуючі внутрішні чинники), якими характеризується даний засіб вимірювання; z_i – значення зовнішніх неінформативних параметрів, що діють на ЗВ (вологість, температура тощо).

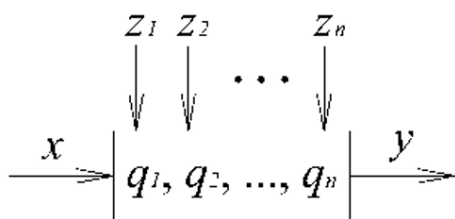


Рисунок 2.1 – Узагальнена структура засобу вимірювання

Залежно від класифікації методу вимірювань – пряме чи врівноважувальне перетворення – типова структура може бути розімкнутою і замкнутою.

Розімкнуті структури бувають послідовного або паралельного виду (рис. 2.2).

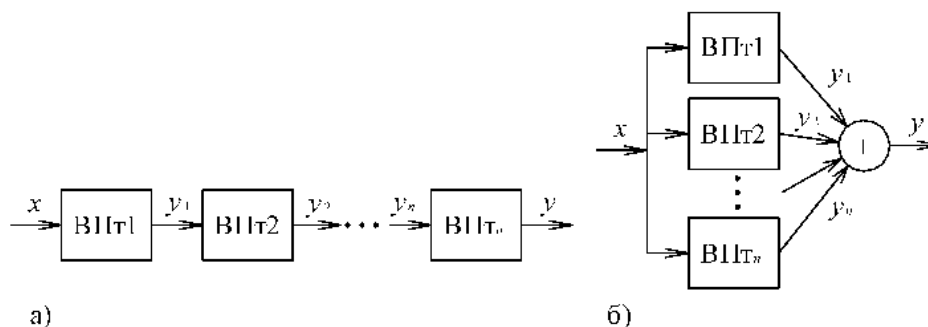


Рисунок 2.2 – Структурна схема засобу вимірювання прямого перетворення: а) послідовна; б) паралельна; ВПт – вимірювальний перетворювач

Замкнута структура ЗВ врівноважувального перетворення включає канал прямого перетворення з коефіцієнтом β , і канал зворотного перетворення (з

коефіцієнтом λ) (рис. 2.3).

$$y = \Delta x \cdot \beta; \quad \Delta x = x - x_1; \quad x_1 = y\lambda, \quad (2.8)$$

і вихідний сигнал

$$y = \beta x / (1 + \beta\lambda). \quad (2.9)$$

Якщо прийняти $\beta\lambda \gg 1$, то вся похибка ЗВ буде визначатись нестабільністю коефіцієнта λ :

$$y = \frac{1}{\lambda} x. \quad (2.10)$$

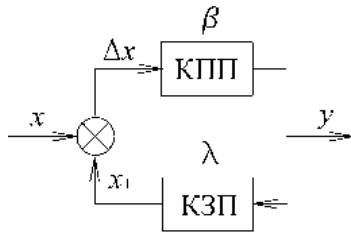


Рисунок 2.3 – Структурна схема засобу вимірювання врівноважувального перетворення: КПП – канал прямого перетворення; КЗП – канал зворотного перетворення

Кожен з каналів перетворення може складатись з послідовних, паралельних або послідовно-паралельних ланок.

2.4 Статичні характеристики вимірювальних пристроїв

Статичною характеристикою вимірювального пристрою називається функціональна залежність вихідного сигналу від вхідного у статичному (стаціонарному, врівноваженому) режимі. Статична характеристика описується рівнянням перетворення:

$$Y = f(X) \quad (2.10)$$

Для вимірювальних приладів статичну характеристику іноді називають характеристикою шкали.

Визначення статичної характеристики пов'язане з виконанням градування, а тому для всіх ЗВ використовується поняття *градувальної характеристики*, що визначає залежність між значеннями величин на виході і вході ЗВ, складену у вигляді таблиці, графіка або формули.

На рисунку 2.4 показано види статичних характеристик вимірювальних пристроїв.

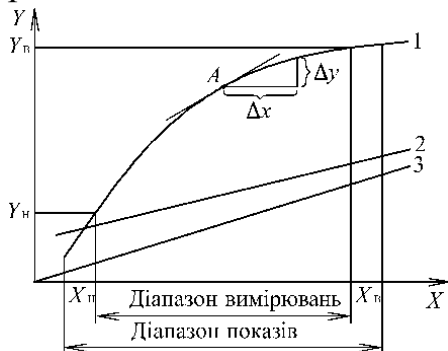


Рисунок 2.4 – Статичні характеристики вимірювального пристрою

За винятком спеціального застосування, основна вимога, яка висувається до статичної характеристики вимірювального пристрою, зводиться до

отримання лінійної залежності між вихідною та вхідною величиною.

Якщо статична характеристика вимірювального приладу нелінійна (крива 1 на рис. 2.4), то його чутливість буде різною у різних точках характеристики, а шкала приладу нерівномірною. Прилади з лінійною (пряма 2) або пропорційною (пряма 3) статичною характеристикою маю незмінну у будь-якій точці шкали чутливість і рівномірну шкалу.

Для визначення метрологічних параметрів, окрім статичної характеристики, використовується ще ряд параметрів. На рис. 2.4 на статичній характеристиці позначені діапазон показів, діапазон вимірювань, нижня X_H , Y_H та верхня X_B , Y_B межі вимірювання.

Діапазон показів – область значень шкали, обмежена кінцевим та початковим значенням шкали.

Діапазон вимірювань (робоча частина шкали) – область значень вимірюваної величини на шкалі приладу, для якої нормовані допустимі похибки засобу вимірювання.

Важливою характеристикою шкальних вимірювальних приладів є *ціна поділки*, тобто та зміна вимірюваної величини, якій відповідає переміщення вказівника на одну поділку шкали. У цифрових приладів шкали у явному вигляді немає, і для них замість ціни поділки вказується ціна одиниці найменшого розряду числа у показах приладу.

Одним з важливих аспектів отримання коректних результатів вимірювань є врахування взаємодії вимірювальних пристроїв між собою і з об'єктом вимірювання.

Від підключення вимірювального пристрою або перетворювача до об'єкта вимірювань останній споживає деяку енергію або потужність від об'єкта. Аналогічна ситуація має місце від підключення вимірювального приладу чи перетворювача до виходу попереднього по ланцюгу вимірювання перетворювача. Це особливо часто проявляється у лабораторних вимірюваннях, що приводить до спотворення результатів вимірювання і змушує враховувати властивості вимірювального пристрою відбирати чи віддавати енергію через свої вхідні або вихідні кола.

У якості характеристики вказаної властивості прийнято використовувати для вимірювальних пристроїв поняття *вхідного імпедансу* – повного або уявного опору. У загальному випадку під імпедансом Z приймається відношення узагальненої сили N до зумовленої нею узагальненої швидкості W :

$$Z = N / W \quad (2.11)$$

2.5 Динамічні характеристики вимірювальних пристроїв

Режим роботи вимірювального пристрою, при якому значення вихідного і вхідного сигналів змінюються у часі називається *динамічним*.

Практично всі вимірювальні пристрої мають у своєму складі інерційні елементи, а саме: рухомі механічні вузли, електричні або пневматичні ємності, індуктивності, елементи, наділені тепловою інерцією. Наявність інерційних елементів зумовлює інерційність всього вимірювального пристрою, тобто

приводить до того, що у динамічному режимі миттєве значення вихідного сигналу вимірювального пристрою залежить не тільки від миттєвого значення вхідного сигналу, але і від будь-яких змін цього сигналу, тобто від першої і другої похідних і похідних вищого порядку.

Ці інерційні властивості вимірювальних пристроїв визначаються динамічною характеристикою.

Динамічні характеристики вимірювального пристрою – це залежність між інформативними параметрами вихідного і вхідного сигналів та часом, або залежність вихідного сигналу від вхідного у динамічному режимі.

Динамічну характеристику вимірювального пристрою прийнято описувати диференціальним рівнянням, передатною або комплексною частотною функціями.

У переважній більшості випадків динамічна характеристика вимірювальних пристроїв, якщо у них статична характеристика лінійна у всьому діапазоні перетворення, може бути описана диференціальним рівнянням виду

$$a_n \frac{d^n Y(\tau)}{d\tau^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y(\tau)}{d\tau^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dY(\tau)}{d\tau} + Y(\tau) = KX(\tau) \quad (2.12)$$

або відповідною передатною функцією

$$W(p) = \frac{K}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1}, \quad (2.13)$$

або

$$Y(p) = W(p)X(p), \quad (2.8)$$

де $Y(\tau)$ і $X(\tau)$ – вихідний і вхідний сигнали вимірювального пристрою як функція часу;

n – число, що визначає порядок похідної.

Передатну функцію $W(p)$ можна розглядати як коефіцієнт перетворення вимірювального пристрою у динамічному режимі.

Передатна функція, як диференціальне рівняння, є вичерпною характеристикою інерційних властивостей вимірювального пристрою. Вона дозволяє визначити реакцію вимірювального пристрою на вхідні сигнали, які змінюються у часі за будь-яким законом.

Передатну функцію вимірювальних пристроїв зручно використовувати для аналізу роботи у випадку використання ЗВ у системі автоматичного регулювання. Її визначають через перехідну або часову характеристику, яка визначається як зміна у часі вихідного сигналу $h(\tau)$ вимірювального пристрою від подачі на його вхід стрибкоподібного сигналу, рівного за значенням одиниці вхідної величини.

Якщо висота стрибкоподібного вхідного сигналу не рівна одиниці, а має деяке значення X_A , то за перехідною характеристикою можна визначити вихідний сигнал, скориставшись виразом

$$Y(\tau) = h(\tau)X_A. \quad (2.14)$$

Для визначення інерційних властивостей вимірювальних пристроїв за

перехідними характеристиками використовують теорію динаміки ланки системи автоматичного регулювання. Перехідні характеристики і передатні функції типових динамічних ланок відомі, що дозволяє за формою перехідної характеристики вимірювального пристрою ототожнити його з будь-якою типовою динамічною ланкою, а відповідно, визначити форму передатної функції досліджуваного ЗВ. Таку процедуру прийнято називати ідентифікацією.

Для всіх засобів вимірювання важливою характеристикою є час встановлення вихідного сигналу (показів) T_n , який ще називається часом реакції. Він визначає собою відрізок часу, необхідний для завершення перехідного процесу від стрибкоподібної зміни вхідного сигналу. Так як всі перехідні процеси теоретично закінчуються тільки за безконечного значення часу, то за час реакції T_n зазвичай приймається час, за який вихідний сигнал вимірювального пристрою наближаючись до нового встановленого значення, входить у зону, що відрізняється від цього значення на $\pm 5\%$ від зміни вхідного сигналу, що відповідає даному стрибкоподібному вхідному сигналу.

Питання для самоконтролю

1. Як поділяються вимірювальні засоби за призначенням?
2. У чому полягає основна відмінність лабораторних приладів від промислових?
3. Які характеристики приладів прийнято за основні?
4. Що лежить в основі поняття "точність" вимірювального засобу?
5. Що таке метрологічна надійність засобу вимірювання?
6. Якого виду бувають розімкнуті структури ЗВ?
7. Якою є структура ЗВ врівноважувального перетворення?
8. Що називається статичною характеристикою ЗВ?
9. Що визначає діапазон показів приладу?
10. Що таке вхідний імпеданс вимірювального пристрою?
11. Яку властивість засобу вимірювання відображає його динамічна характеристика?

ТЕМА 3 СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОЇ ПЕРЕДАЧІ, НОРМУЮЧІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

План

- 3.1 Загальні відомості про вимірювальні перетворення.
- 3.2 Класифікація та характеристики вимірювальних перетворювачів.
- 3.3 Вимірювальні перетворювачі з уніфікованим вихідним сигналом.
- 3.4 Аналогові системи передачі сигналів.
- 3.5 Первинні перетворювачі неелектричних величин.
- 3.6 Цифрові вимірювальні перетворювачі.

3.1 Загальні відомості про вимірювальні перетворення

Вимірювання застосовуються у всіх без винятку галузях науки й техніки і, власне, складають основу наукових досліджень та є невід'ємною частиною технологічних процесів. Мета будь-якого вимірювання – отримання інформації, що містить кількісну оцінку властивостей фізичного об'єкта або явища. Для отримання цієї інформації застосовуються практично всі відомі методи фізичних перетворень, які ґрунтуються на природничих законах та використовуються відповідні технічні засоби, що отримали назву – вимірювальні перетворювачі.

На практиці доводиться вимірювати сотні фізичних величин, зокрема:

- електричні та магнітні величини – струм, напругу, опір, індуктивність, індукцію та напруженість магнітного поля, магнітну проникність тощо;
- величини, що характеризують простір та час – геометричні розміри, час, параметри руху;
- механічні величини – маса та сила, а також величини, які характеризують їх прояв у просторі та часі, такі, як момент сили, тиск, механічні напруження тощо;
- теплові величини, які характеризують тепловий стан тіл, їх зміну в просторі та часі – температура, кількість теплоти, теплопровідність;
- світлотехнічні та енергетичні величини, які характеризують оптичні явища – сила світла, світловий потік, яскравість та відповідно енергетична сила світла, потужність випромінювання, енергетична яскравість;
- величини, що характеризують акустичні явища – звуковий тиск, гучність звуку, акустичний шум тощо;
- величини, які характеризують фізико-хімічні властивості речовин, зокрема хімічний склад, густину, масову чи молярну концентрацію, активність іонів водню;
- величини, які характеризують іонізуюче випромінювання.

Велика кількість видів фізичних величин, часто велика розкиданість об'єктів вимірювання у просторі, у багатьох випадках необхідність автоматизації управління з централізованим отриманням інформації, оброблення цієї інформації та вироблення сигналів для зворотної дії на об'єкт дослідження зумовлюють використання переважно електричних методів

вимірювання неелектричних величин, оскільки електричні сигнали є дуже "зручними" як для вимірювальних перетворень так і для оброблення та передачі інформації на відстань.

До основних переваг електричних вимірювань неелектричних величин належать:

- універсальність, яка полягає в можливості вимірювань декількох чи навіть багатьох неелектричних величин за допомогою одного електричного вимірювального засобу;

- простота автоматизації вимірювань внаслідок того, що в електричних засобах легко виконуються логічні та цифрові операції;

- можливість забезпечення високої чутливості, необхідної точності та швидкодії, зумовлені простотою оброблення електричних сигналів;

- дистанційність, що полягає в можливості передачі електричних сигналів з допомогою як провідних, так і безпроводних ліній зв'язку.

Вимірювання неелектричних величин електричними вимірювальними засобами стає можливим внаслідок попереднього перетворення досліджуваних величин у функціонально пов'язані з ними електричні величини за допомогою відповідних вимірювальних перетворювачів. Для проведення вимірювань необхідна наявність первинного вимірювального перетворювача, вторинного електричного приладу, а також пристроїв їх спряження. Тобто, на практиці, згідно стандартного означення, у переважній більшості для вимірювання електричних і неелектричних величин використовуються вимірювальні системи та комплекси.

Всі методи вимірювань неелектричних величин розділяються на контактні та безконтактні. За контактних методів вимірювальний перетворювач безпосередньо контактує з досліджуваним об'єктом. Ці методи порівняно нескладні у реалізації і забезпечують високу чутливість, а також можливість локалізації точки вимірювання у тому місці технологічного процесу, яке, наприклад, є найінформативнішим. Але за контактного методу вимірювання може, в окремих випадках, виникнути зворотна дія вимірювального перетворювача на параметри досліджуваного об'єкта, що приводить до спотворення результату вимірювань. Крім цього, іноді є неможливим здійснити безпосередній контакт вимірювального перетворювача з досліджуваним об'єктом.

За безконтактних вимірювань первинний перетворювач безпосередньо не контактує з досліджуваним об'єктом і не впливає на його параметри. Однак на результати вимірювань у цьому випадку значно впливає зовнішнє середовище, яке відділяє вимірювальний перетворювач від об'єкта дослідження.

Згідно з офіційним означенням, вимірювальний перетворювач – це засіб вимірювальної техніки, що створює сигнал вимірювальної інформації у формі, зручній для його передачі, зберігання, подальшого перетворення, але недоступній для безпосереднього сприйняття людиною. Для первинних перетворювачів, які безпосередньо контактують з об'єктом вимірювання, часто застосовують термін "давач" (рос. – "датчик"), а також дозволений до

використання термін «сенсор».

3.2 Класифікація та характеристики вимірювальних перетворювачів

На даний час використовується величезна кількість різноманітних за будовою, принципом дії та призначенням вимірювальних перетворювачів (ВП) різних фізичних величин. Розвиток науки і техніки спонукає до постійного вдосконалення існуючих ВП, та до створення нових видів.

Для їх систематизації, поділу та групування використовується ряд класифікаційних ознак. Ці ознаки повинні бути достатньо загальними, щоб враховувати вимоги як спеціалістів, які працюють в галузі дослідження та проектування перетворювачів, так і тих, хто займається їх використанням.

Для споживача класифікація ВП за природою вхідної вимірюваної величини є найдоцільнішою. Такий підхід прийнято у довідниковій літературі. Важливе значення має і природа вихідного сигналу, оскільки вона визначає вибір методів і засобів подальшого перетворення чи вимірювання. Отже, однією з основних класифікаційних ознак треба вважати природу вхідного та вихідного сигналів.

Залежно від природи вхідної і вихідної величини ВП поділяють на групи:

- перетворювачі електричних величин в електричні;
- перетворювачі неелектричних величин у електричні;
- перетворювачі електричних величин у неелектричні.

Як класифікаційні ознаки використовуються також характер функції перетворення та характер вихідного сигналу. Функції перетворення або передатні характеристики відтворюють динамічні властивості елементів. У цьому випадку визначальними є не конструктивні чи функціональні ознаки, а його математична модель.

За видом передатної характеристики перетворювачі поділяють на лінійні, нелінійні та лінеаризовані.

За виглядом функції перетворення ВП поділяють на три великі групи:

- масштабні, що змінюють в певну кількість разів розмір вхідної величини без зміни її фізичної природи;
- функціональні, що однозначно функціонально перетворюють вхідну величину зі зміною природи вхідної величини або без її зміни;
- операційні, які виконують над вхідною величиною математичні операції вищого порядку – диференціювання чи інтегрування за вхідним параметром.

За характером зміни вихідної величини можна виділити два класи елементів – аналогові, що мають неперервну у часі передатну характеристику, і дискретні, які у свою чергу розділяють на імпульсні, цифрові та релейні.

Найбільш повною прийнято вважати класифікацію за фізичними закономірностями, покладеними в основу принципу дії ВП.

За принципом дії вимірювальні перетворювачі поділяються на такі групи:

1) *Механічні пружні перетворювачі*. В основу принципу дії покладено залежність між вхідними механічними зусиллями і викликаними ними переміщеннями чи механічними напруженнями в матеріалі чутливого

елемента, що визначаються його пружними властивостями.

2) *Резистивні перетворювачі.* Вихідним сигналом перетворювачів механічних величин є зміна електричного опору чутливого елемента внаслідок переміщення повзунка в реостатних та реохордних перетворювачах або внаслідок тензоефекту в тензорезистивних перетворювачах. Резистивні перетворювачі теплових величин (терморезистивні перетворювачі) та резистивні перетворювачі хімічних величин (електрохімічні резистивні перетворювачі) належать відповідно до теплових та електрохімічних, оскільки їх дія ґрунтується на теплових та електрохімічних явищах.

3) *Ємнісні перетворювачі.* Принцип фізичного перетворення полягає у залежності ємності конденсатора від відстані між його електродами, площі перекриття або від зміни діелектричної проникності середовища між цими електродами, коли відстань, площа перекриття або діелектрична проникність є мірою вимірюваної величини.

4) *П'єзоелектричні перетворювачі.* Принцип дії оснований на використанні явища поляризації п'єзоелектрика від дії на нього механічних зусиль. Різновидом п'єзоелектричних є п'єзорезонансні перетворювачі, принцип дії яких оснований на використанні залежності резонансної частоти п'єзоелемента від значення вимірюваної величини, наприклад, температури.

5) *Індуктивні перетворювачі.* В основу принципу дії покладено залежність повного електричного опору намагнічувальної обмотки від зміни комплексного магнітного опору магнітного кола перетворювача, який може бути наслідком зміни проміжку в магнітному колі або результатом зміни магнітних властивостей феромагнетика, що використовується у магнітопроводі.

6) *Взаємодуктивні або трансформаторні перетворювачі.* В основу принципу дії покладено залежність ЕРС вторинної обмотки від зміни комплексного магнітного опору магнітопровода, який, як і в індуктивних перетворювачах може змінюватись від зміни величини магнітного проміжку чи магнітних властивостей матеріалу магнітопровода.

7) *Індукційні перетворювачі.* Принцип дії оснований на використанні явища електромагнітної індукції. Вхідними величинами таких перетворювачів може бути швидкість зміни магнітного потоку або швидкість лінійного чи кутового переміщення вимірювальної котушки.

8) *Гальваномагнітні перетворювачі.* Принцип дії базується на використанні гальваномагнітних ефектів Гауса або Холла. Суть ефекту Гауса полягає у зміні електричного опору провідника чи напівпровідника від проходження по ньому електричного струму та одночасної дії на нього магнітного поля, а ефекту Холла – в появі за таких умов поперечної різниці потенціалів. Основними різновидами гальваномагнітних перетворювачів є магніторезистивні перетворювачі та перетворювачі Холла.

9) *Теплові перетворювачі.* В основу принципу дії покладено фізичні ефекти, що визначаються тепловими процесами. Теплові перетворювачі – це, переважно перетворювачі температури. Є дві основні групи теплових

перетворювачів: терморезистивні, у яких використовується залежність опору матеріалу від температури, та термометричні, в основу дії яких покладено явище виникнення термо-ЕРС у робочому спаї двох різнорідних провідників або сплавів. Теплові перетворювачі іноді використовуються для перетворення інших фізичних величин, що проявляються через теплові процеси, наприклад, хімічного складу, концентрації, швидкості руху газів або рідин тощо.

10) *Електрохімічні перетворювачі*. Принцип дії заснований на залежності:

- електропровідності речовин від їх складу, концентрації, температури чи інших властивостей – електрохімічні резистивні перетворювачі;

- електродних потенціалів від активності водневих іонів – гальванічні перетворювачі іонометрів;

- різниці електричних потенціалів на межі розділу твердої та рідкої фаз від швидкості переміщення розчину – електрокінетичні перетворювачі.

11) *Оптичні перетворювачі*. В основу принципу дії покладено залежність параметрів оптичного випромінювання від значення перетворюваної величини. Ця величина може діяти безпосередньо на джерело випромінювання, змінюючи його інтенсивність випромінювання, або ж на оптичний канал, впливаючи на параметри оптичного потоку.

12) *Іонізаційні перетворювачі*. Принцип дії оснований на перетворенні інтенсивності іонізаційного чи рентгенівського випромінювання. У перетворювачах іонізаційного випромінювання вихідна електрична величина функціонально пов'язана з інтенсивністю іонізаційного чи рентгенівського випромінювання, яка є мірою досліджуваної величини.

3.3 Вимірювальні перетворювачі з уніфікованим вихідним сигналом

Одним із напрямків розвитку первинних перетворювачів є подальше вдосконалення вимірювальних перетворювачів з уніфікованим вихідним сигналом (ВПУС), що забезпечують зв'язок між давачами та вхідними колами наступних елементів вимірювальних систем.

Перетворювач з уніфікованим вихідним сигналом – це первинний перетворювач (ПП) та уніфікуючий перетворювач (УП), що поєднані схемно, конструктивно і алгоритмічно для забезпечення уніфікації вихідного сигналу.

Уніфікація здійснюється за такими основними характеристиками:

- за інформативними параметрами – напруга, струм, частота, цифровий код, пневматичний тиск тощо;

- за робочим діапазоном, наприклад, (0 – 1) В; (0 – 5) мА; (4 – 20) мА і т.д.;

- за функціональною залежністю між значенням вимірюваної величини та інформативного параметра вихідного сигналу – лінійна, логарифмічна тощо.

Основні функції, що реалізує УП, можна розділити на лінійні, наприклад, встановлення нуля, масштабування, компенсація зовнішніх впливів, та нелінійні – лінеаризація функції перетворення ПП.

Загалом функція перетворення ПП є його індивідуальною характеристикою, а тому, переважно оперують номінальними функціями

перетворення для кожного конкретного типу ПП.

Наприклад, номінальна функція перетворення (рис. 3.1, а) умовного ПП описується залежністю $Y = f(X)$, а $(X_{min} \dots X_{max})$ і $(Y_{min} \dots Y_{max})$ – робочі діапазони значень вхідного і вихідного інформативних параметрів. Для побудови ВПУС ставиться завдання одержати уніфікований сигнал, значення інформативного параметра якого описується лінійною залежністю (рис. 3.1, б):

$$Y_n = K(X - X_{min}) + Y_{nmin}, \quad (3.1)$$

де

$$K = \frac{Y_{nmax} - Y_{nmin}}{X_{max} - X_{min}}. \quad (3.2)$$

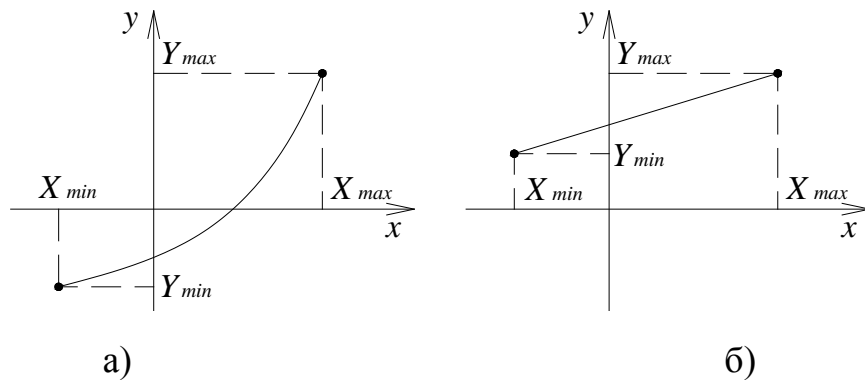


Рисунок 3.1 – Номінальна (а) та лінеаризована (б) функції перетворення ВПУС

Такий вид залежності можна отримати на основі послідовного з'єднання ПП та УП. Це вимагає, насамперед, погодження динамічних діапазонів Y та Y_n і забезпечення лінеаризації функції перетворення:

$$Y_n = K_1(Y - Y_{min}) + Y_{nmin}, \quad (3.3)$$

де

$$K_1 = \frac{Y_{nmax} - Y_{nmin}}{Y_{max} - Y_{min}}. \quad (3.4)$$

Якщо $K_1 = const$, то забезпечується лише лінійне приведення динамічних діапазонів і функціональна залежність $Y_n(X)$ зберігає нелінійність. Лінеаризація досягається введенням відповідної залежності $K_1(Y)$:

$$K_1 = K \frac{X - X_{min}}{f(X) - Y_{min}}. \quad (3.5)$$

Оскільки УП взаємодіє лише з вихідним сигналом ПП, то знаходять обернену залежність $X = g(Y)$ та реалізують у перетворювачі, функція перетворення якого визначається:

$$K_1 = K \frac{g(Y) - X_{min}}{Y - Y_{min}}. \quad (3.6)$$

Відповідно, одним з можливих варіантів реалізації функції (3.6) може

служити ВПУС, структурну схему якого показано на рисунку 3.2.

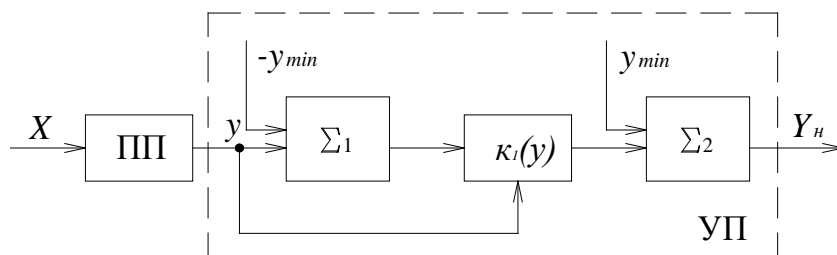


Рисунок 3.2 – Структурна схема ВПУС: ПП – первинний перетворювач; Σ_1 – суматор для приведення нижньої межі робочого діапазону Y до початку координат; $\kappa_1(y)$ функціональний вузол лінеаризації; Σ_2 – суматор для забезпечення відповідного зміщення робочого діапазону Y_n

Кожен з вузлів, що входять в схему ВПУС може бути розділеним на окремі складові різного ступеня складності та структури.

Найбільш поширені УП сигналів постійного струму і напруги. До таких сигналів належать, наприклад, вихідні сигнали термопар, мостових вимірювальних схем постійного струму, потенціометричних давачів, каліброваних шунтів тощо.

УП сигналів постійного струму та напруги переважно будуються на основі використання операційних підсилювачів, охоплених відповідними зворотними зв'язками. Сучасна електронна елементна база дозволяє розв'язувати більшість проблем, пов'язаних з необхідністю забезпечення високого вхідного опору, значних коефіцієнтів підсилення, низьких температурних дрейфів та високих динамічних характеристик. Значна частина УП постійного струму і напруги є лінійними, що значно спрощує їх використання.

У сучасних умовах беззаперечна перевага надається вимірювальним перетворювачам з цифровим уніфікованим сигналом. Це зумовлено високою заводо захищеністю цифрових сигналів від зовнішніх впливів та можливістю безпосереднього використання в комп'ютеризованих системах та комплексах.

3.4 Аналогові системи передачі сигналів

З електричних аналогових перетворювачів для перетворення неелектричних величин у електричний вихідний сигнал та дистанційної передачі показів, найчастіше використовуються диференціально-трансформаторні, селісинні, резистивні та частотні перетворювачі.

3.4.1 Диференціально-трансформаторні перетворювачі

Диференціально-трансформаторні перетворювачі призначені для перетворення лінійного переміщення осердя у вихідний електричний параметр. Змінним параметром у перетворювачах цього типу є значення взаємоіндуктивності між обмотками.

У диференціально-трансформаторних перетворювачах переміщення

осердя первинного приладу врівноважується відомим переміщенням осердя вторинного приладу. Використовуються для вимірювання витрат, тиску, рівня та інших параметрів, значення яких можуть бути перетворені у переміщення осердя котушки первинного приладу.

Дифтрансформаторний перетворювач (рис. 3.3) складається з двох однакових котушок, одна з яких знаходиться у первинному перетворювачі 1, а друга – у вторинному приладі 2. Первинні обмотки котушок включені послідовно і живляться напругою змінного струму від обмотки силового трансформатора електронного підсилювача ЕП. Вторинні обмотки включені між собою зустрічно і з виходом на електронний підсилювач. Всередині котушок встановлено рухомі осердя – магнітопроводи.

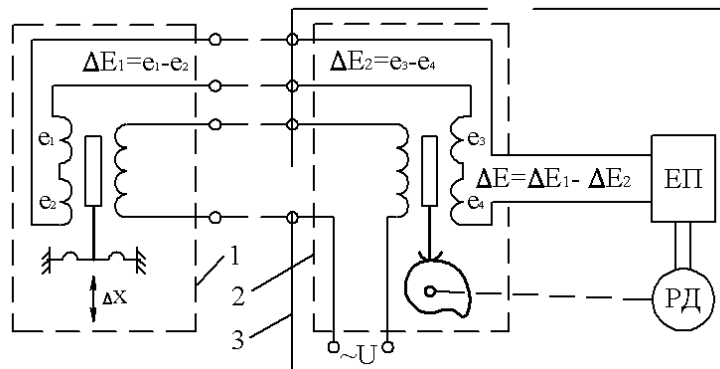


Рисунок 3.3 – Схема диференціально-трансформаторного перетворювача: 1 – первинний перетворювач; 2 – вторинний перетворювач; 3 – вторинний прилад; ЕП – електронний підсилювач; РД – реверсивний двигун

Якщо осердя знаходяться у середньому положенні, то ЕРС e_1 та e_2 , які наводяться в осердях, рівні, тобто, $\Delta E_1 = e_1 - e_2 = 0$ і $\Delta E_2 = e_3 - e_4 = 0$, і різниця на вході підсилювача теж рівна нулю: $\Delta E = \Delta E_1 - \Delta E_2 = 0$.

Якщо осердя, механічно з'єднане з чутливим елементом у первинному перетворювачі 1 зміститься, то ЕРС e_1 та e_2 зміняться, і відповідно, $\Delta E \neq 0$.

Сила струму у вторинному колі котушок відповідно первинного і вторинного приладів:

$$I_n = \frac{M_1 U - M_2 U}{2Z + Z_n} = \frac{e_1 - e_2}{2Z + Z_n}; \quad (3.7)$$

$$I_e = \frac{M_3 U - M_4 U}{2Z + Z_n} = \frac{e_3 - e_4}{2Z + Z_n}, \quad (3.8)$$

де M_1, M_2, M_3, M_4 – коефіцієнти взаємодукції;

U – напруга живлення первинної обмотки;

Z – повний опір вторинної обмотки кожної котушки;

Z_n – опір навантаження.

Результуюча сила струму:

$$\Delta I = I_n - I_e = \frac{U \Delta M}{2Z + Z_n}, \quad (3.9)$$

де ΔM – результуючий приріст коефіцієнта взаємодукції, викликаний зміною положення осердь.

На вході підсилювача $\Delta E = \Delta I Z_n = U \Delta M / (2Z + Z_n)$. У вимірювальній схемі з виходом на електронний підсилювач можна вважати $Z_n = \infty$, тоді:

$$\Delta E = \frac{U \Delta M}{\frac{2Z}{Z_n} + 1} \approx U \Delta M. \quad (3.10)$$

Отримане значення ΔE підсилюється у електронному підсилювачі ЕП до величини, необхідної для управління реверсивним двигуном РД. Двигун через профільний диск (кулачок) переміщує осердя у котушці вторинного перетворювача, що призводить до рівності ЕРС, які наводяться у обох котушках – до нового стану рівноваги. Результуюча ЕРС знову стане рівна нулю $\Delta E = 0$ і двигун зупиниться. Вал двигуна зв'язаний зі стрілкою відлікового пристрою.

Якщо переміщення осердя первинного перетворювача лежить в межах до 5 мм, то залежність ЕРС від величини переміщення практично лінійна.

Розглянутий диференціально-трансформаторний перетворювач незасмозамінний, і вимірювальні комплекти, побудовані за такою схемою, вимагають індивідуального градування. В уніфікованих перетворювачах до вихідної обмотки первинного перетворювача підключено подільник, за допомогою якого можна встановлювати номінальний робочий хід осердя.

У даній час використовуються дифтрансформаторні перетворювачі з повним ходом осердя 1,6, 2,5, і 4 мм. Такі перетворювачі створюють уніфікований сигнал у вигляді напруги змінного струму, що змінюється в діапазоні $(-1 - 0 - +1)$ В. Знак "-" вказує на зміну фази сигналу. Вказаним значенням вихідного сигналу відповідає зміна взаємодуктивності перетворювача $(-10 - 0 - +10)$ мГн. Класи точності приладів для вимірювання тиску та перепаду тиску 1,0 і 1,5. Час встановлення вихідного сигналу – не більше 1 с.

3.4.2 Сельсинні системи передач інформації

Для передачі на віддаль великих кутових переміщень можуть використовуватись сельсинні системи, у яких перетворення кутових переміщень в сигнал вимірювальної інформації здійснюється сельсинами.

Сельсин – це мініатюрна трифазна електрична машина, виконана за аналогією з синхронним генератором або двигуном. Найчастіше ротор сельсина має одну обмотку (збудження), а статор – три обмотки (синхронізації), осі яких зсунуті на 120° одна відносно іншої (рис. 3.4). Обмотка збудження живиться змінним струмом; кінці трифазної обмотки з'єднані між собою.

Оскільки обмотка ротора первинного сельсина-давача Д живиться змінною напругою, то створений змінний магнітний потік буде індукувати в кожній з обмоток статора ЕРС:

$$E_{1Д} = E_{\max} \cos \alpha; E_{2Д} = E_{\max} \cos(\alpha + 120^\circ); E_{3Д} = E_{\max} \cos(\alpha + 240^\circ), \quad (3.11)$$

де α – кут повороту ротора сельсина; E_{\max} – значення ЕРС у випадку співпадіння осей обмоток ротора і статора.

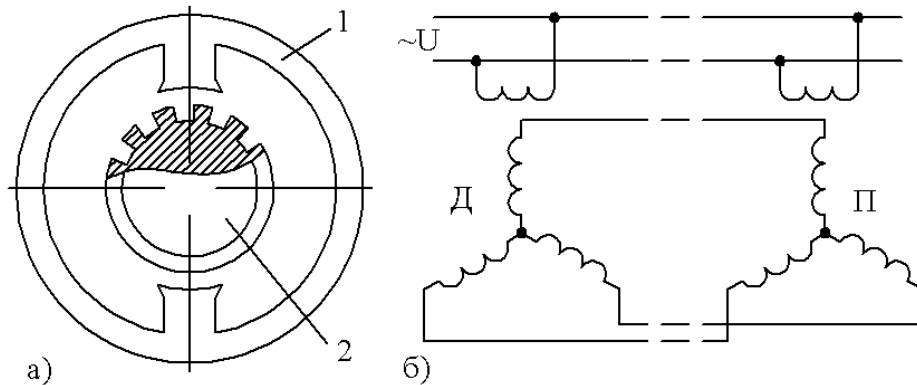


Рисунок 3.4 – Сельсинна телепередача: а – схема сельсина; б – схема включення; 1 – статор; 2 – ротор; Д – сельсин-давач; П – сельсин-приймач

Те ж і для вторинного сельсина-приймача П:

$$E_{1П} = E_{\max} \cos \beta; E_{2П} = E_{\max} \cos(\beta + 120^\circ); E_{3П} = E_{\max} \cos(\beta + 240^\circ), \quad (3.12)$$

де β – кут повороту ротора сельсина-приймача.

Якщо положення обох роторів відносно обмоток статорів будуть однаковими, тобто $\alpha = \beta$, то сили струмів у цих обмотках теж будуть рівними внаслідок рівності ЕРС, що наводяться. У цьому випадку момент синхронізації $M_{сн}$ рівний нулю. Якщо ротор сельсина-давача відхилиться від узгодженого положення, тобто, $\alpha \neq \beta$, то значення ЕРС, які наводяться в обмотках будуть відрізнятись ($E_{цд} \neq E_{цп}$) і, відповідно, сили струмів, що виникають у зустрічно ввімкнених обмотках, не врівноважуються.

У сельсині-приймачі виникне синхронізуючий момент, який проверне ротор сельсина-приймача:

$$M_{сн} = M_{\max} \sin \theta, \quad (3.13)$$

де $\theta = \alpha - \beta$; M_{\max} – найбільший момент, що виникає при $\theta = 90^\circ$.

Відповідно, за постійного значення магнітного потоку однофазної обмотки ротора вихідна ЕРС, що наводиться у трифазній обмотці, буде пропорційною куту повороту.

Ротор сельсина-давача зв'язаний з чутливим елементом вимірювального перетворювача, а ротор сельсина-приймача – з відліковим пристроєм вторинного приладу.

Промислові сельсини випускаються декількох типів на частоти напруги живлення від 50 до 500 Гц.

3.4.3 Частотні електричні перетворювачі

У системах автоматичного технологічного контролю досить часто використовуються струнні частотні перетворювачі. Вихідний частотний сигнал вимірювальної інформації цих перетворювачів може бути введений безпосередньо в цифрові вимірювальні пристрої. Частотні перетворювачі

мають незначну похибку і дозволяють передавати сигнал вимірювальної інформації по каналах зв'язку на значні відстані.

Струнний частотний перетворювач (рис. 3.5) складається з металевої струни 1, поміщеної між полюсними наконечниками постійного магніту 2. Один кінець струни закріплений жорстко, а інший – зв'язаний з рухомим важелем 3.

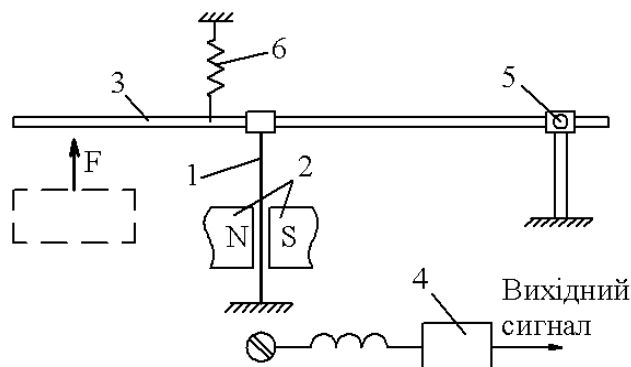


Рисунок 3.5 – Схема струнного частотного перетворювача: 1 – струна; 2 – постійний магніт; 3 – важіль; 4 – підсилювач; 5 – опора; 6 – пружина

Вимірювальний параметр діє на чутливий елемент вимірювального блоку і перетворюється у пропорційне зусилля F , яке сприймається важелем 3 та зв'язаною з ним струною 1. Якщо по струні пропускати струм, то внаслідок взаємодії його з магнітним полем постійного магніту виникають поперечні коливання струни. Частота цих коливань залежить від натягу струни під дією зусилля F . Власна частота коливань перетворюється підсилювальним пристроєм 4 у частоту змінного струму – вихідний сигнал перетворювача.

Власна частота поперечних коливань струни залежить від сили F :

$$f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho}}, \quad (3.14)$$

де l – довжина робочої частини струни;

ρ – маса одиниці довжини струни.

Струна виготовляється з вольфрамового дроту діаметром 0,05 мм і довжиною близько 20 мм. Амплітуда вихідного сигналу на навантаженні з опором 1 кОм становить 0,4 В.

Нелінійність перетворення може бути скомпенсованою нелінійністю чутливого елемента вимірювального блоку. Для підвищення лінійності іноді використовується дві струни, які під дією чутливого елемента піддаються натягу у протилежних напрямках.

Для налагодження перетворювача змінюється активна довжина важеля 3, закріпленого на опорі 5. Початкове значення вихідного сигналу (1500 Гц) встановлюється з допомогою пружини 6 (коректора нуля). Дальність передачі вихідного сигналу – до декількох кілометрів.

3.5 Первинні перетворювачі неелектричних величин

Про кількість та фізичну різноманітність неелектричних величин можна зробити висновки з огляду Міжнародної системи одиниць, яка містить 7

основних одиниць, з них 6 – неелектричні, дві додаткові, а також близько 150 похідних одиниць неелектричних величин. Будова та принцип дії більшості вимірювальних перетворювачів неелектричних величин розглядаються у відповідних розділах цього навчального посібника, конкретно з методом перетворення та відповідно до умов використання. У цьому розділі розглядаються найбільш поширені "універсальні" вимірювальні перетворювачі деяких неелектричних фізичних величин у проміжний інформаційний сигнал.

3.5.1 Механоелектричні резистивні перетворювачі

Механічні пружні перетворювачі застосовуються як первинні перетворюючі елементи динамометрів, манометрів, віброметрів, акселерометрів. Вхідними величинами у них може бути сила, тиск, крутний момент, а вихідними – лінійне або кутове переміщення чи деформація. Механічний пружний елемент використовується як первинний перетворювач реостатних, ємнісних, індуктивних або тензорезистивних давачів.

Як пружні перетворювачі широко використовуються суцільні та трубчасті стержні. Загальним недоліком їх є надзвичайно малі вихідні переміщення, тому вони використовуються з тензорезистивними вторинними перетворювачами.

Кільцеві пружні елементи мають порівняно великі вихідні переміщення, що дає можливість використовувати їх в ємнісних та індуктивних давачах.

Найчутливішими до дії сил є балкові пружні елементи. Вони технологічні, деформації стискування і розтягу в них повністю ідентичні. Для отримання рівномірного розподілу напружень застосовуються балки рівномірного опору згину.

Найпоширенішим пружним перетворювачем тиску є мембрана – плоска, круглої форми пластинка, защемлена по периметру. Вона може використовуватись як перетворювач тиску в деформацію або як перетворювач тиску в переміщення.

Як пружні перетворювачі тиску використовуються також циліндричні оболонки та трубки Бурдона.

Для перетворення крутних моментів використовуються суцільні і порожнисті вали або плоскі торсіони.

Реостатні перетворювачі. Реостатним називається резистивний перетворювач, виконаний у вигляді реостата, повзунок якого переміщується під дією вхідної вимірюваної величини. Вихідною величиною є електричний опір. Реостатні перетворювачі використовуються для вимірювання лінійних і кутових переміщень, а також величин, які попередньо можуть бути перетворені у переміщення.

У приладах серійного виробництва для роботи з реостатними перетворювачами використовуються мостові логотричні схеми (рис. 3.6).

У схемі на рисунку 3.6 опори ліній R_1 та R_2 додаються з опорами R_x та R_3 , увімкненими в суміжні плечі моста. В результаті, за умови, що $R_1 = R_2$ та

$R_x = R_3$, вплив опору ліній, а також їх зміни в результаті зміни температури, взаємно компенсуються. За інших значень – $R_x \neq R_3$, вплив опору ліній або їх змін буде незначним і на результати вимірювання впливати не буде.

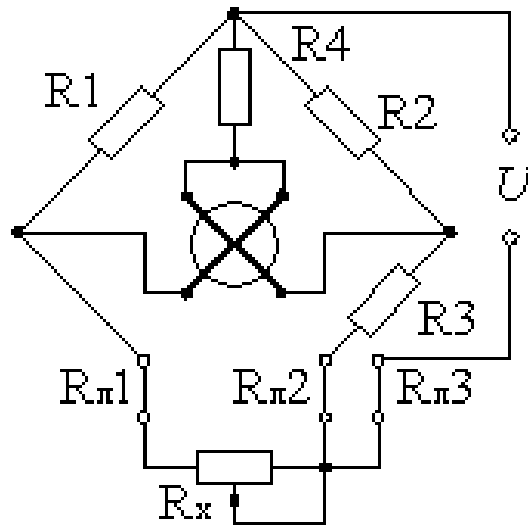


Рисунок 3.6 – Мостова логометрична схема

Тензорезистивні перетворювачі. В основі принципу дії тензорезисторів лежить явище тензоефекту, суть якого полягає в зміні електричного опору провідникового матеріалу від його механічної деформації. Основною характеристикою є коефіцієнт відносної тензочутливості, що визначається як відношення відносної зміни опору до відносного видовження провідника:

$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}. \quad (3.15)$$

У практиці електричних вимірювань тензоефект використовується у двох напрямках. Це, по-перше, тензоефект у провіднику чи напівпровіднику в результаті об'ємного стискування. Вхідною величиною таких перетворювачів є тиск газу чи рідини, що їх оточують.

Суть другого напрямку полягає у використанні тензоефекту, викликаного розтягуванням чи стискуванням тензочутливого матеріалу. Перетворювачі цієї групи можуть бути виконані у вигляді наклеюваних дротяних тензоперетворювачів, фольгових, плівкових чи так званих навісних тензоперетворювачів.

Дротяний тензоперетворювач (рис. 3.7, а) має підкладку 1 з тонкого паперу або лакової плівки, на котру наклеюється тензочутливий елемент 2, виконаний з дроту. До кінців приєднані виводи 3 з тонкого мідного дроту. Зверху перетворювач покритий шаром лаку 4.

Фольгові тензорезистори (рис. 3.7, б) – це тонка стрічка з фольги завтовшки 0,01 ... 0,02 мм, на якій частина матеріалу вибрана, наприклад, травленням так, щоб утворилась решітка з виводами. Ця решітка закріплюється між двома плівками з лаку.

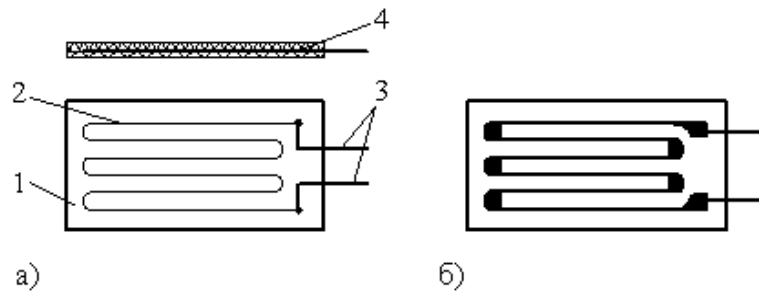


Рисунок 3.7 – Будова тензорезисторів: а) дротяний; б) фольговий

Напівпровідникові монокристалічні тензорезистори виготовляються головним чином з германію або кремнію, які мають кубічну кристалічну ґратку.

Вимірювальними схемами тензорезистивних перетворювачів у більшості є мостові схеми постійного струму (рис. 3.8).

Тензорезистор R_T вмикається в одне з пліч моста. Для компенсації температурної похибки в суміжне плече вмикається неробочий тензорезистор R_{T_k} , аналогічний робочому і поставлений в однакові температурні умови.

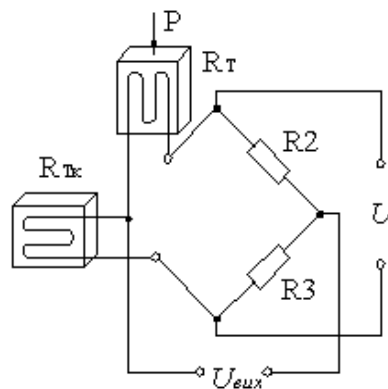


Рисунок 3.8 – Мостова схема під'єднання тензорезистора

3.5.2 П'єзоелектричні та ємнісні перетворювачі

П'єзоелектричні перетворювачі. Принцип дії п'єзоелектричних перетворювачів оснований на використанні прямого або зворотного п'єзоелектричних ефектів. Суть прямого п'єзоелектричного ефекту полягає в поляризації певного класу діелектриків, названих п'єзоелектриками, якщо виникає механічне напруження в їх кристалах. Зворотний п'єзоелектричний ефект проявляється в деформації п'єзоелектрика в електричному полі.

П'єзоелектричні елементи використовуються як перетворювачі тиску, сил, прискорень та для інших неелектричних величин. Як матеріал для виготовлення цих перетворювачів найчастіше використовується кварц, а також штучно поляризована п'єзокераміка на основі титанату барію, титанату свинцю, цирконату свинцю. П'єзоелектричні перетворювачі відрізняються простотою конструкції з можливості мініатюрного виконання, надійністю роботи, високою точністю.

Вимірювальні кола п'єзоелектричних датчиків виконуються у вигляді підсилювачів напруги з високим входним опором (рис. 3.9).

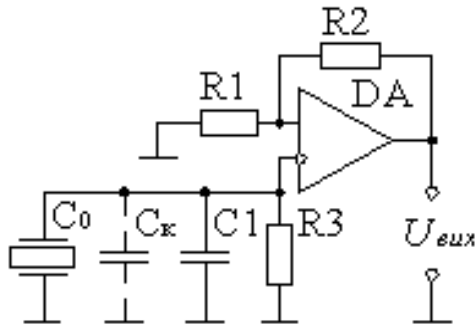


Рисунок 3.9 – Вимірювальна схема п'єзоелектричного перетворювача

Еквівалентна ємність вимірювального кола C складається з ємності перетворювача C_0 , ємності під'єднувального кабеля C_k і вхідної ємності вимірювальної схеми: $C = C_0 + C_k + C_1$.

Напруга, що подається на вхід підсилювача:

$$U_{\text{вх}} = \frac{q}{C} \cdot \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}, \quad (3.16)$$

а вихідна напруга підсилювача буде становити:

$$U_{\text{вих}} = \frac{q(1 + R_2 / R_1)}{C} \cdot \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}, \quad (3.17)$$

де $C = C_0 + C_k + C_1$.

Основним недоліком схеми є залежність вихідної напруги від ємності кабеля C_k , яка може змінюватись залежно від положення кабеля і зовнішніх чинників – температури або вологості. Для зменшення впливу зміни ємності кабелю на чутливість, паралельно до входу підсилювача вмикається стабілізуючий конденсатор C_1 .

П'єзорезонансні перетворювачі. Основу п'єзорезонансного частотного давача складає п'єзорезонатор, частота якого є функцією вимірюваної величини. Використовуються термочутливі, тензочутливі та масочутливі резонансні перетворювачі.

П'єзорезонансні кварцові термоперетворювачі (рис. 3.10) виконуються у вигляді дискового кварцового резонатора 1, закріпленого на пружних виводах 2 і 3, які виконують одночасно роль струмовідводів. Резонатор розміщений у металевому герметизованому корпусі діаметром 6-8 мм, заповненому, для зменшення теплоінерційності, гелієм.

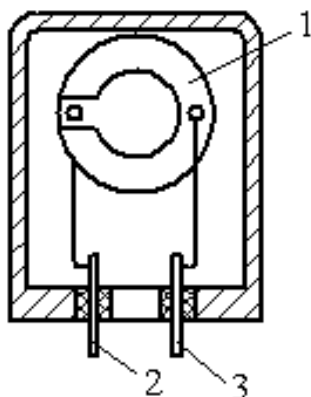


Рисунок 3.10 – Будова кварцового термочутливого резонатора

Ємнісні перетворювачі – це електричні конденсатори, ємність яких змінюється внаслідок зміни величини відстані між обкладинками, площі перекриття обкладинок або діелектричної проникності середовища, що знаходиться між обкладинками. Вони є складовими елементами ємнісних манометрів, динамометрів, віброметрів та акселерометрів.

Всі ємнісні перетворювачі можна поділити на дві групи: плоско-паралельні та коаксіальні.

Ємність конденсатора з плоскопаралельними обкладинками:

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S}{\delta}, \quad (3.18)$$

де ε_0 – діелектрична проникність середовища між обкладками;

ε – діелектрична стала;

S і δ – площа і відстань між обкладинками.

Ємність коаксіального перетворювача:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}{\ln(1 + d/R_1)}, \quad (3.19)$$

де l – довжина обкладинок;

d – відстань між електродами;

R_1 – радіус внутрішньої обкладки.

Ємнісні перетворювачі тиску. Чутливими елементами ємнісних перетворювачів тиску є мембрани та діафрагми, які перетворюють вимірюваний тиск у переміщення.

Для мембранної діафрагми відносна зміна ємності буде пропорційна вимірюваному тиску:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{R^2}{8\delta W} P_x, \quad (3.20)$$

де R – радіус мембрани;

W – величина прогину мембрани;

δ – відстань між мембраною та нерухомою обкладкою за відсутності тиску.

В основу вимірювальних схем ємнісних перетворювачів покладаються такі структури: подільники напруги, вимірювальні мости, ємнісно-діодні кола, резонансні контури.

Схема перетворювача лінійних переміщень, що викликають зміну віддалі між обкладками конденсатора C_2 може бути побудована за принципом подільника напруги (рис. 3.11).

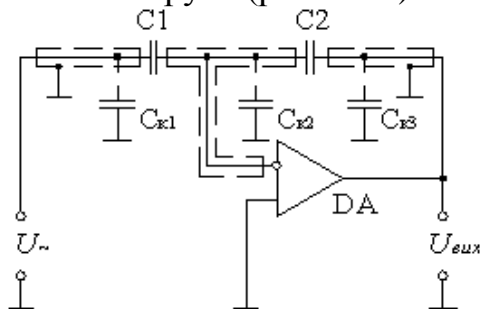


Рисунок 3.11 – Вимірювальна схема ємнісного перетворювача

Для такої схеми $U_{вих} = U_{вх} C_1 / C_2$. Якщо схема застосовується для вимірювання переміщень із зміною проміжку δ між обкладками C_2 , то

$$U_{вих} = U_{вх} \frac{C_1}{C_2} = U_{вх} \frac{\delta_2}{\epsilon \epsilon_0 S_2}, \quad (3.21)$$

тобто вихідна напруга буде лінійною функцією δ_2 .

Диференціальні ємнісні перетворювачі, як правило, працюють зі схемами трансформаторних вимірювальних мостів.

3.5.3 Електромагнітні перетворювачі

Індуктивні перетворювачі. Індуктивні перетворювачі застосовуються для перетворення переміщень та інших механічних величин, які можуть бути попередньо перетворені у переміщення. Основні різновиди: перетворювачі зі змінною довжиною повітряного проміжку, перетворювачі плунжерного типу, перетворювачі з зубчатим проміжком та перетворювачі з розподіленими параметрами.

Найпростішим різновидом індуктивного перетворювача зі змінною довжиною повітряного проміжку є перетворювач малих переміщень (рис. 3.12).

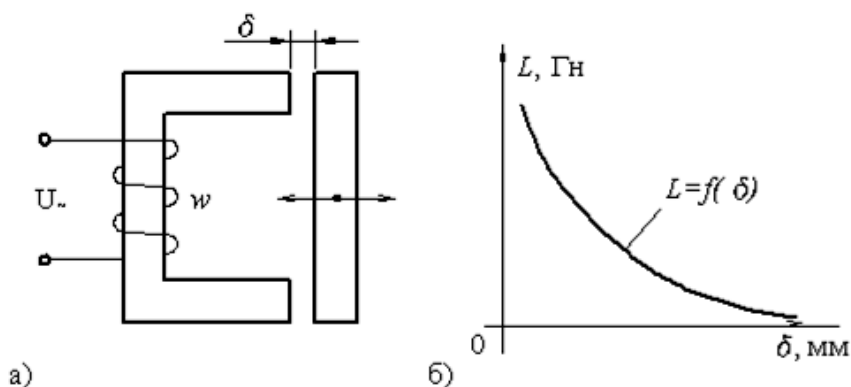


Рисунок 3.12 – Індуктивний перетворювач (а) і його статична характеристика (б)

Такий перетворювач має високу чутливість до вхідної величини, незначну чутливість до дії зовнішніх магнітних полів, порівняно невисоку власну ємність. Інформативним параметром індуктивного перетворювача зі змінною довжиною повітряного проміжку є еквівалентна індуктивність L , значення якої є функцією комплексного опору z_m магнітного кола цього перетворювача.

На практиці для індуктивних перетворювачів часто використовуються мостові схеми з диференціальними перетворювачами (рис. 3.13).

У цих схемах два плеча становлять повні опори секцій диференціального перетворювача z_1 і z_2 , а два інших – активні опори R_1 і R_2 .

Диференціальні індуктивні перетворювачі мають вищу чутливість і значно покращену лінійність передатної характеристики.

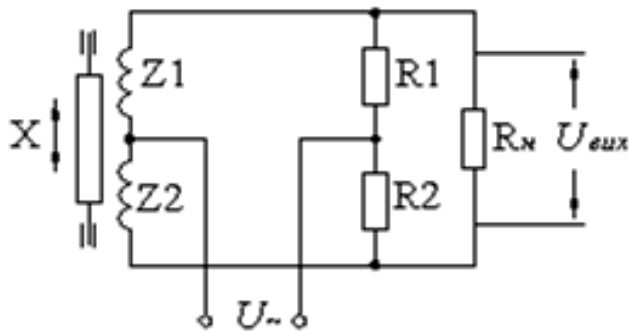


Рисунок 3.13 – Мостова схема підключення диференціального індуктивного перетворювача

Індукційні перетворювачі. Принцип дії індукційних перетворювачів оснований на використанні явища електромагнітної індукції. Всі індукційні перетворювачі поділяються на дві групи.

До першої належать перетворювачі, у яких зміна магнітного потоку відбувається внаслідок переміщення котушки в магнітному полі постійного магніту, або навпаки – переміщення постійного магніту відносно нерухомої котушки.

До другої групи входять магнітні перетворювачі, в яких магнітний потік, що зчіплюється з витками котушки, змінюється від зміни опору магнітного кола, наприклад, внаслідок зміщення рухомого феромагнітного елемента.

У перетворювачах першої групи ЕРС, що наводиться у вимірювальній обмотці:

$$e = -Bl \frac{dx}{dt} \quad (3.22)$$

або

$$e = -BS \frac{d\alpha}{dt}, \quad (3.23)$$

де B – індукція в робочому проміжку;

$l = \pi D w$ – активна довжина вимірювальної обмотки (рамки);

$S = \frac{\pi D^2}{4} w$ – активна площа рамки;

D – середній діаметр обмотки;

x та α – лінійне та кутове переміщення, відповідно; w – кількість витків.

У перетворювачах зі змінним магнітним опором:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} = \frac{w F_M}{R_M^2} \frac{dR_M}{dt}, \quad (3.24)$$

де F_M – магніторушійна сила;

R_M – магнітний опір.

Індукційні перетворювачі використовуються для вимірювання швидкості лінійних переміщень, вібрацій, частоти обертання та витрат рідин і газів.

3.6 Цифрові вимірювальні перетворювачі

Сигнали вимірювальної інформації поділяються на аналогові, що мають неперервну в часі передатну характеристику, і дискретні або цифрові –

імпульсні сигнали, однакові за тривалістю, але різні за рівнем. Вимірювальні засоби, в основу роботи яких покладено використання імпульсних сигналів, називаються цифровими.

Цифрові засоби вимірювальної техніки виникли через потребу у суттєвому підвищенні точності, швидкодії і чутливості засобів вимірювання. Цифрові вимірювальні засоби розділяються на аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), цифрові вимірювальні прилади та цифрові вимірювальні системи.

АЦП не мають відлікових або реєструючих пристроїв, вони є базовим елементом цифрових вимірювальних приладів або систем.

ЦАП призначені для зворотного перетворення кодових сигналів у пропорційні аналогові. Вони використовуються для створення аналогових сигналів, наприклад, для управління в системах автоматичного керування.

Цифрові вимірювальні прилади (ЦВП) є засобами вимірювання, які автоматично видають значення вимірюваної величини на цифровому відліковому пристрої – індикаторі, табло, дисплеї тощо. Цифровими вимірювальними системами (ЦВС) називається сукупність вимірювальних пристроїв, вимірювальних каналів та допоміжних пристроїв, об'єднаних для створення та аналізу сигналів цифрової вимірювальної інформації про декілька одно- або різнорідних фізичних величин.

3.6.1 Аналого-цифрові перетворювачі

У аналого-цифровому перетворювачі здійснюються три базові операції над вхідною величиною: її часова дискретизація, квантування за рівнем і кодування отриманих квантованих значень. Дискретизація сигналу означає заміну неперервної у часі величини її окремими вибірками, взятими у певні моменти часу (рис. 3.14, а).

Суть квантування полягає у заміні неперервних значень сигналу в області його інтенсивності (рівня) квантованими (дозволеними) значеннями, подібно до заокруглення чисел (рис. 3.14, б).

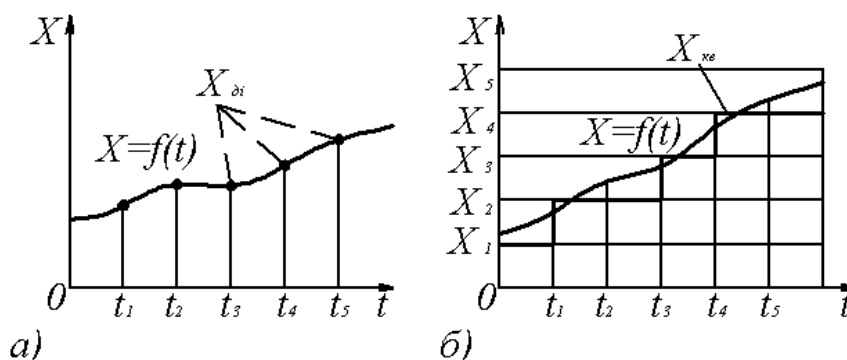


Рисунок 3.14 – Дискретизація у часі (а) та квантування за рівнем (б) вимірюваної аналогової величини

Кодування результату аналого-цифрового перетворення – це операція його представлення за допомогою сукупності символів (коду) вибраної

системи числення, що здійснюється за певними правилами. Для цього використовується числове кодування – операція переведення числового значення деякої величини N_x в іншу систему числення. Незалежно від використовуваної системи числення, результати перетворення АЦП переважно подаються бінарними символами, тобто лише двома різними рівнями.

Крім безпосереднього кодування результатів аналого-цифрового перетворення, у вимірювальній техніці кодування використовується також у пристроях відображення результатів, а також з метою захисту від завад під час передачі каналами зв'язку.

Існують різні методи аналого-цифрового перетворення, які можна класифікувати за різними ознаками (рис. 3.15).



Рисунок 3.15 – Схема класифікації аналого-цифрових перетворень

Залежно від роду величин перетворення та використаного методу квантування можна виділити три основні способи аналого-цифрового перетворення: з квантуванням просторових параметрів, частотно-часових параметрів та параметрів інтенсивності вимірювальних сигналів.

У АЦП з просторовим перетворенням здійснюється порівняння величини вимірювання (переміщення, кута повороту тощо) з відомою величиною, яка задається за допомогою спеціальних пристроїв – кодових масок, лінійок чи дисків, причому всі розряди кодів визначаються одночасно. В електромеханічних АЦП кодова лінійка або диск зміщується пропорційно

величині перетворення відносно нерухомого пристрою зчитування, а в електронних АЦП навпаки – маска нерухома, а зміщується зчитувальний промінь електронно-променевої трубки, що дозволяє перетворити вхідну величину в переміщення, а потім – у відповідний код. АЦП з просторовим перетворенням призначаються для вимірювання лінійних та кутових величин з похибкою в межах $\pm(0,02\dots 1)\%$. Основною операцією цифрових засобів вимірювань з квантуванням частотно-часових параметрів є підрахунок кількості імпульсів – число-імпульсне перетворення, у якому результат визначається кількістю імпульсів n , що надійшли в лічильник.

Метод послідовного підрахунку застосовується у вимірювачах частотно-часових параметрів неперервних та імпульсних сигналів, зокрема, частоти, періоду, фази, відношення частот тощо.

У АЦП з квантуванням параметрів інтенсивності перетворення може виконуватись паралельним або послідовним способом. У паралельних АЦП операції дискретизації та квантування вхідних сигналів з наступним кодуванням виконується одночасно, що забезпечує високу швидкодію.

На сучасному етапі найбільшу інформативність забезпечують цифрові засоби з сигма-дельта перетворенням. Сигма-дельта перетворення полягає у квантуванні різниці (дельта) між поточним значенням сигналу та сумою (сигма) попередніх різниць.

3.6.2 Цифро-аналогові перетворювачі

Цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) призначені для перетворення кодового сигналу в напругу або струм. ЦАП використовуються як вузли зворотного зв'язку АЦП та для формування вихідних сигналів цифрових вимірювальних пристроїв.

Для перетворення двійкового коду в аналоговий сигнал формуються струми, пропорційні вазі розрядів коду, після чого підсумовуються ті із струмів, які відповідають ненульовим (одичним) розрядам вхідного коду.

Спрощену схему ЦАП подано на рис. 3.16. Опорна напруга U_0 ЦАП подається на всі вагові резистори $2^0R, 2^1R, \dots, 2^iR, \dots, 2^{n-2}R, 2^{n-1}R$, інші виводи яких під'єднані до входів перемикача струмів $ПС$. Один вихід перемикача струмів сполучений із спільною шиною, а другий – із входом перетворювача струму на напругу (підсилювач $ОП$ та резистор зворотного зв'язку $R_{3.3}$).

Завдяки такому включенню незалежно від поданого коду керування через i -й ваговий резистор 2^iR завжди протікає струм $I_i = \frac{U_0}{2^i R}$, який за наявності одиниці в i -му розряді вхідного коду N замикається через резистор $R_{3.3}$, а в протилежному випадку стікає на загальну шину. Вихідна напруга $U_{вих}$ ЦАП визначається як спад напруги на резисторі $R_{3.3}$ від суми струмів I_i :

$$U_{вих} = U_0 \sum_{i=0}^{n-1} a_i \frac{R_{3.3}}{2^i R} = U_0 \frac{N}{N_{max}}, \quad (3.25)$$

де a_i – комутаційний коефіцієнт ($a_i = 1$, якщо в i -му розряді вхідного коду N є одиниця і $a_i = 0$ – у протилежному випадку);

N, N_{\max} – відповідно, вхідний код керування та його максимальне значення.

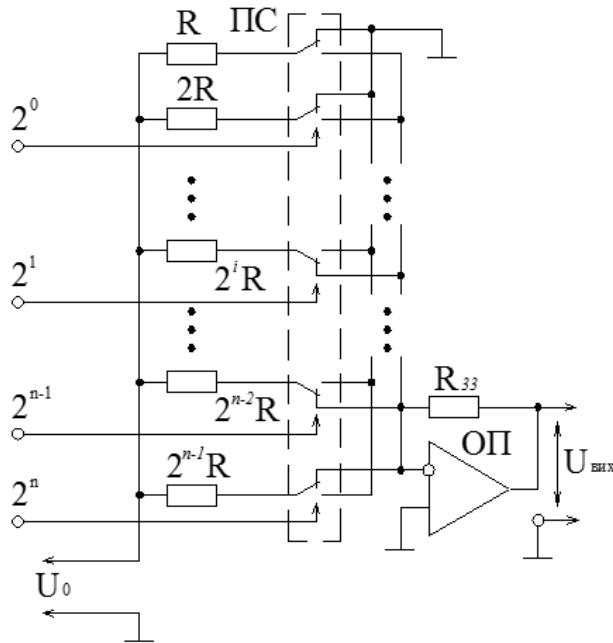


Рисунок 3.16 – Спрощена структура ЦАП з підсумовуванням розрядних струмів

Проблемами описаного ЦАП є велика кількість прецизійних резисторів з різними номіналами, а також обмеженість мінімального опору R ЦАП через вплив опорів замкнених ключів перемикача струмів, суттєвий вплив опорів ізоляції для багаторозрядних ЦАП.

Ці недоліки усунені в ЦАП з матрицею $R-2R$ (рис. 3.17), принцип дії якої полягає у поділі вдвічі струмів у кожному її вузлі.

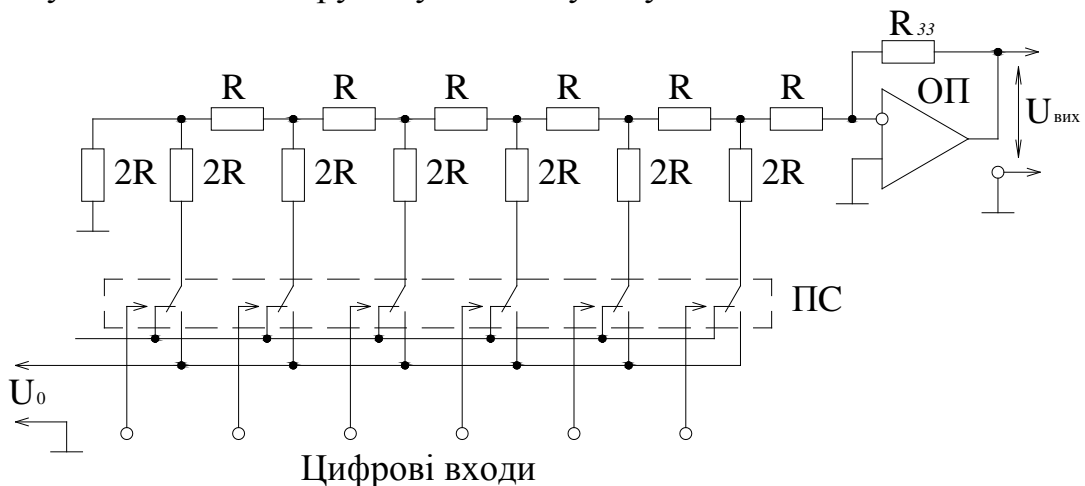


Рисунок 3.17 – Структурна схема ЦАП з $R-2R$ – матрицею

Застосування матриці типу $R-2R$ дозволяє суттєво зменшити кількості номіналів прецизійних резисторів. Завдяки невеликим розмірам резистивної матриці в інтегральній мікросхемі, і температура, і температурні коефіцієнти, і часові дрейфи всіх резисторів приблизно однакові, що забезпечує високі температурну та часову стабільність таких ЦАП. У перетворювачі

формується два вихідні струми: I_2 , пропорційний до коду керування N , та $I_2 = I_{1\max} - I_1$, де $I_{1\max}$ – максимальне значення вхідного струму I_1 , яке відповідає максимальному значенню коду N_{\max} .

Вихідний струм I_1 ЦАП протікає через резистор зворотного зв'язку $R_{з.з.}$ і формує його вихідну напругу $U_{вих}$:

$$U_{вих} = -U_{вх} \frac{N}{N_{\max}}, \quad (3.26)$$

де $U_{вх}$ – вхідна напруга перетворювача.

Питання для самоконтролю

1. У чому полягає мета вимірювання фізичної величини?
2. За якими признаками виконується класифікація вимірювальних перетворювачів?
3. Що спонукало застосування вимірювальних перетворювачів з уніфікованим вихідним сигналом у практиці вимірювань?
4. Які типи аналогових перетворювачів використовуються найчастіше?
5. Чому в техніці вимірювань завжди надається перевага застосуванню вимірювальних перетворювачів з електричним виходом?
6. З якою метою використовуються механічні пружні перетворювачі і який принцип покладено в основу їх дії?
7. У чому полягає суть квантування інформаційних сигналів за рівнем та дискретизацією їх у часі?
8. Яке основне призначення аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів у вимірювальній техніці?

ТЕМА 4 МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

План

- 4.1 Загальні відомості та класифікація засобів вимірювання тиску.
- 4.2 Рідинні та поршневі манометри.
- 4.3 Пружні чутливі елементи деформаційних манометрів.
- 4.4 Деформаційні прилади для вимірювання тиску.
- 4.5 Деформаційні вимірювальні перетворювачі тиску.
- 4.6 Диференціальні манометри.

4.1 Загальні відомості та класифікація засобів вимірювання тиску

Тиск характеризує напружений стан рідин та газів і визначається відношенням нормальної сили, яка діє на поверхню, до площі цієї поверхні. Вважається, що нормальна сила рівномірно розподілена по поверхні:

$$p = \frac{N}{F}, \quad (4.1)$$

де p – тиск;

N – нормальна сила, яка діє на поверхню;

F – площа поверхні.

Тиск – одна з основних величин, яка характеризує термодинамічний стан речовин. Надзвичайно багатостороннє застосування тиску в науці, техніці і виробництві, а його вимірювання необхідне практично в будь-якій області науки і техніки.

Розрізняють наступні види тиску:

- абсолютний тиск – тиск, значення якого відраховується від тиску рівного нулю;

- атмосферний (барометричний) тиск – тиск повітряної оболонки Землі на її поверхню;

- надлишковий тиск – різниця тисків, один з яких, прийнятий за початок відліку, є атмосферним тиском:

$$p_n = p_{абс} - p_{атм}; \quad (4.2)$$

- вакуум – стан середовища, абсолютний тиск якого менший від атмосферного тиску.

У Міжнародній системі одиниць (СІ) за одиницю тиску прийнято паскаль (Па), що є відношенням сили в 1 ньютон (Н) до площі в 1 м²:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2.$$

Розмір одиниці тиску Па є дуже маленьким, відповідає тиску стовпа води висотою 0,1 мм. Тому на практиці використовують кілопаскалі (кПа), мегапаскалі (МПа), гектапаскалі (гПа): 1 кПа = 1 · 10³ Па; 1 МПа = 1 · 10⁶ Па; 1 гПа = 1 · 10² Па.

Використовуються також позасистемні одиниці:

$$1 \text{ бар} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

1 кгс/см² = 0,980665 · 10⁵ Па ≈ 100 кПа, (кілограм-сила на квадратний сантиметр);

1 мм рт. ст. = 133,322 Па, (міліметр ртутного стовпа);
1 мм вод. ст. = 9,80665 Па, (міліметр водяного стовпа);
1 psi = 6, 89476 · 10³ Па, (фунт-сила на квадратний дюйм);
1 Па = 0,102 мм вод. ст. = 7,5 · 10⁻³ мм. рт. ст.

Тиск, зважаючи на його фізичну суть, може бути визначений як шляхом безпосереднього вимірювання, так і опосередковано – вимірюванням іншої фізичної величини, функціонально пов'язаної з тиском.

У першому випадку вимірюваний тиск діє безпосередньо на чутливий елемент приладу, який передає інформацію про значення тиску на наступні ланки вимірювального кола для перетворення її у необхідну форму. Цей метод визначення тиску відноситься до прямих вимірювань і є найпоширенішим у техніці вимірювання тиску. На ньому основані принципи дії більшості манометрів та вимірювальних перетворювачів тиску.

Широкий діапазон вимірювання тисків – від часток Па до майже 10¹⁰ Па зумовив і велику різноманітність методів та засобів їх вимірювань. Значна частина методів основана на попередньому перетворенні тиску в механічне напруження, деформацію або переміщення за допомогою пружних перетворювальних елементів з наступним вимірюванням цих механічних величин.

За принципом дії прилади для вимірювання тиску поділяють на такі основні групи:

- рідинні – вимірюваний тиск врівноважується тиском стовпа рідини відповідної висоти;
- деформаційні – вимірюваний тиск визначається за величиною деформації різних пружних чутливих елементів;
- вантажопоршневі – вимірюваний тиск врівноважується тиском, який створюється масою поршня та вантажів;
- електричні – дія яких основана на залежності електричних параметрів манометричного перетворювача від вимірюваного тиску.

За видом вимірюваного тиску розрізняють наступні основні прилади:

- манометри – прилади для вимірювання тиску або різниці тисків (загальна назва);
- барометри – для вимірювання барометричного тиску атмосферного повітря;
- манометри надлишкового тиску – для вимірювання надлишкового тиску, рівного різниці між абсолютним і атмосферним тиском;
- вакуумметри – для вимірювання тиску нижчого за атмосферний, рівного різниці між барометричним і абсолютним тиском;
- мановакуумметри – для вимірювання надлишкового і вакууметричного тиску;
- диференціальні манометри – для вимірювання різниці двох тисків, ні один з яких не є тиском оточуючого середовища.

Манометри, вакуумметри і диференціальні манометри, призначені для вимірювання невеликих надлишкових і вакууметричних тисків або різниці

тисків (до 40 кПа або 4000 мм вод. ст.) газових середовищ називають напоромірами, тягомірами або диференціальними тягонапоромірами.

4.2 Рідинні та поршневі манометри

4.2.1 Скляні рідинні манометри

Дія рідинних приладів основана на гідростатичному принципі, за якого вимірюваний тиск врівноважується тиском стовпа робочої рідини. В якості робочої рідини використовується дистильована вода, ртуть, спирт, трансформаторне мастило. Прилади підрозділяють на трубні, чашкові, дзвонові, кільцеві та поплавкові.

В U -подібному рідинному манометрі (рис. 4.1, а) значення вимірюваного тиску визначається висотою перепаду рівня рідини у трубці:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = H \cdot \rho \cdot g, \quad (4.3)$$

де $H = h_1 + h_2$; ρ – густина робочої рідини;

g – прискорення вільного падіння.

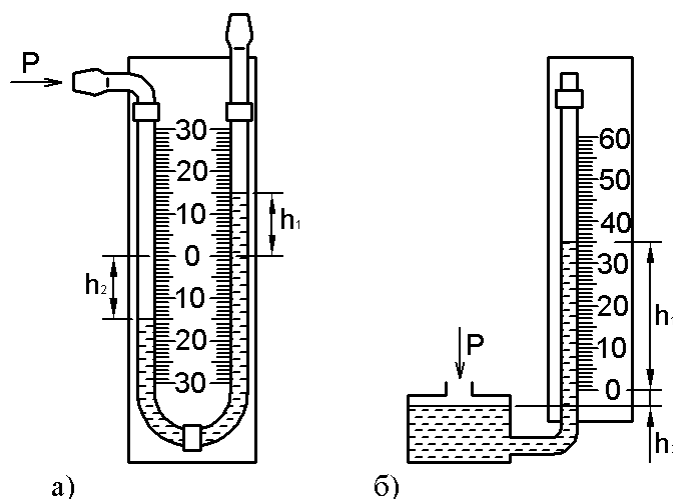


Рисунок 4.1 – Рідинні манометри: а) U -подібний; б) чашковий

Похибка показів в U -подібному манометрі може виникнути через неточність градування шкали (до 0,2 – 0,4 мм), вплив капілярних сил і поверхневого натягу (до 0,2 мм), відхилення від вертикального положення манометра і, головне, неточності відліку. Відлік необхідно виконувати по двох рівнях. Не можна відраховувати рівень в одній трубці і множити на два. Неоднаковий діаметр скляних трубок може призвести до великих додаткових похибок.

У чашковому манометрі (рис. 4.1, б) одна з частин виконана у вигляді чашки діаметром D , який є значно більшим від діаметра трубки d . У цьому випадку перепад робочої рідини легко визначити за зміною висоти H :

$$H = h_1 \left(1 + \frac{f}{F} \right) = h_1 \left(1 + \frac{d^2}{D^2} \right), \quad (4.4)$$

де d, D – внутрішні діаметри трубки та чашки.

Перевага чашкового приладу, який ще називають однотрубним

манометром, полягає у одному відліку положення меніску рідини у трубці. Але тут виникає похибка через зниження рівня рідини (h_2) у чашці, що змінює положення нуля шкали. Ця похибка буде прямо залежати від відношення площ трубки f і чашки F , та відповідно, діаметрів d і D . Площу перерізу трубки і чашки вибираються такими, щоб відношенням f/F можна було знехтувати. В основному для чашкових приладів вибирається відношення $f/F \leq 1/400$.

Для вимірювання невеликих тисків іноді застосовуються однотрубні манометри з похилою трубкою. У манометрах такого типу кут нахилу трубки α можна встановлювати довільно на декілька значень. Цим розширюються границі вимірювання таких манометрів.

Верхня межа вимірювання стандартних манометрів з похилою трубкою складає від 60 до 240 кГс/м² з приведеною похибкою від 0,6 до 1,0%.

4.2.2 Вантажопоршневі манометри

Для лабораторних вимірювань у якості зразкових засобів використовуються рідинні компенсаційні, вантажопоршневі та деформаційні манометри.

Принцип дії вантажопоршневих засобів вимірювання тиску заснований на врівноваженні зусилля, що створюється тиском, який вимірюється, на неущільненому поршні, силою ваги вантажу, що навантажує поршень. Неущільнений поршень – це поршень правильної циліндричної форми, поміщений у циліндр. Між стінками циліндра й поршня забезпечено рівномірний дуже незначний проміжок (1 – 5 мкм), заповнений робочою рідиною – трансформаторним або касторовим мастилом. У результаті поршень знаходиться у підвішеному стані і може проявляти на рідину тиск, зумовлений вагою поршня та вантажу, поміщеного на ньому.

Поршневий манометр (рис. 4.2) складається з циліндричного поршня 1, притертого до циліндра 2 мінімально можливим проміжком. Якщо на нижній торець поршня діє вимірюваний тиск p , то для його врівноваження до поршня повинна бути прикладена сила P .

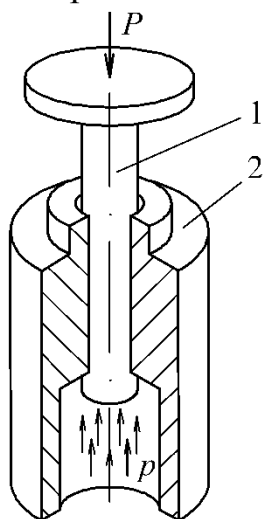


Рисунок 4.2 – Схема поршневого манометра

Рівняння рівноваги з врахуванням сили тертя на бокову поверхню поршня, що виникає від протікання рідини чи газу через кільцевий проміжок

між поршнем і циліндром під дією вимірюваного тиску, має вигляд:

$$pF = P - T, \quad (4.5)$$

де F – геометрична площа перерізу поршня;

T – сила рідинного тертя на бокову поверхню поршня.

Теоретичні та експериментальні дослідження показують, що сила рідинного тертя T пропорційна діючому тиску. Тому ефективна площа не залежить від тиску, а відповідно вимірюваний тиск прямо пропорційний силі, яка його врівноважує.

Найчастіше вимірюваний тиск врівноважується вагою вантажів, що є важливою перевагою з огляду на досягнення високої точності вимірювань. Рівняння вимірювань у цьому випадку має вигляд:

$$p = \frac{m \cdot g}{F_{\text{эф}}}, \quad (4.6)$$

де $F_{\text{эф}} = F + T / p$ – ефективна (приведена) площа поршня.

На рисунку 4.3 показано схему установки з вантажопоршневим манометром, оснащеним простим поршнем. Установка включає вантажопоршневий манометр I та гідравлічний прес II. Вантажопоршневий манометр – це посудина циліндричної форми 1, заповнена робочою рідиною. У внутрішній порожнині циліндра розташовано поршень 2 з вантажоутримуючою тарілкою 6.

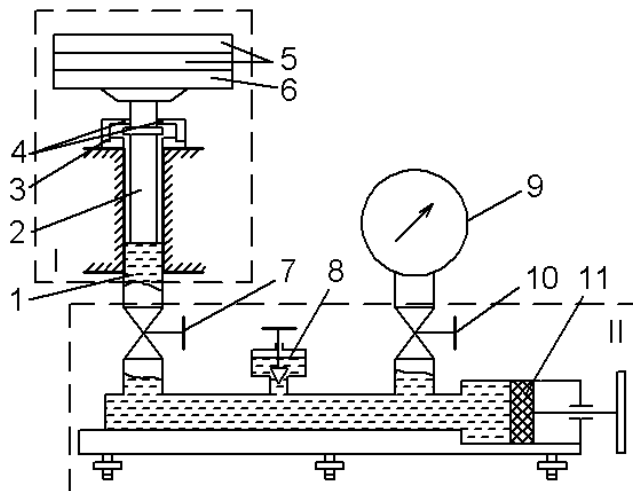


Рисунок 4.3 – Схема установки з вантажопоршневим манометром

Гідропрес складається з поршня 11, що має манжетне ущільнення. Внутрішня порожнина преса з'єднується з вантажопоршневим манометром I і приладом, який повіряється 9, через канали, що перекриваються вентилями 7 і 10. Для заповнення гідравлічної системи робочою рідиною передбачено бачок 8 з запірним вентилям.

Під час вимірювання тиску P , що створюється гідропресом, вантажоутримуючу тарілку навантажують вантажами 5 до того моменту, доки поршень 2 не прийде в стан рівноваги. Про досягнення рівноваги судять по співпадинні рисок 4 на поршні і обмежувачі ходу 3 поршня. В стані рівноваги

поршня буде справедливою рівність:

$$P = \frac{m_p + m_e}{F_{np}} (1 - \rho_n \rho_e) g, \quad (4.7)$$

де m_p, m_e – маса поршня та вантажів;

ρ_n, ρ_e – густина повітря і матеріалу вантажів;

F_{np} – приведена площа поршня.

На практиці F_{np} визначається експериментально і є основним метрологічним параметром вантажопоршневих манометрів. Приведена площа поршня – 0,5 см². Класи точності вантажопоршневих манометрів з простим поршнем – 0,02; 0,05; 0,2.

Найбільш важлива перевага поршневих манометрів полягає в тому, що вони безпосередньо відтворюють тиск за визначенням: тиск рівний силі, поділеній на площу поршня. Цей метод, як і метод врівноваження тиску стовпом рідини, є фундаментальним, тобто вимірювання тиску у кінцевому підсумку зводиться до вимірювання маси, довжини та часу.

4.3 Пружні чутливі елементи деформаційних манометрів

Висока точність, простота конструкції, надійність та невисока вартість – це основні фактори, які обумовлюють широке використання деформаційних приладів для вимірювання тиску в промисловості та в наукових дослідженнях. Ці прилади призначені для вимірювання надлишкового тиску рідин та газів.

Принцип дії деформаційних приладів ґрунтується на використанні пружної деформації чутливого елемента або сили, яка ним створюється.

Основні типи пружних чутливих елементів (рис. 4.4): мембрани, мембранні коробки, сильфони і трубчаті пружини.

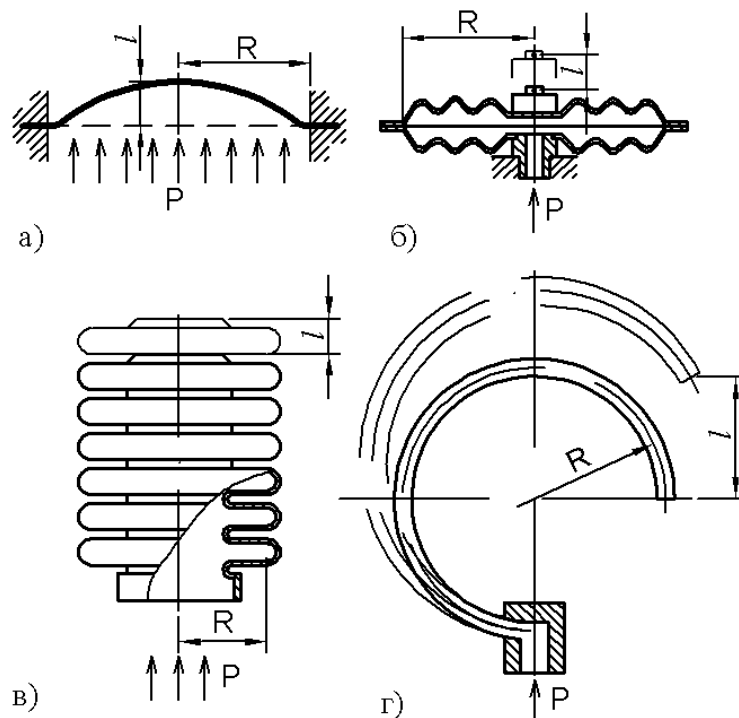


Рисунок 4.4 – Основні типи пружних чутливих елементів

Мембрана – це пружна пластина у формі диска, жорстко закріплена по контуру, прогин якої визначається тиском, що діє на неї (рис. 4.4, а).

Мембранна коробка складається з двох гофрованих мембран, які герметично з'єднані по зовнішньому контуру, що суттєво збільшує її прогин під дією тиску (рис. 4.4, б).

Сильфон має форму тонкостінного циліндра, бокова поверхня якого гофрована з метою збільшення його видовження під дією тиску (рис. 4.4, в).

Для великої глибини витягування гофр сильфона стає ідентичним батареї послідовно з'єднаних мембранних коробок.

Трубочата пружина – це сплюснута тонкостінна трубка, яка зігнута за формою кільцевої дуги і під дією тиску розгинається, а її вільний кінець переміщується по дузі (рис. 4.4, г).

Залежно від призначення та області застосування основні типи пружних чутливих елементів мають чисельні різновиди:

- мембрани – плоскі тонкостінні та товстостінні, з жорстким центром, гофровані, з попереднім натягом;
- мембранні коробки – зварні за грибковою схемою, складні, блоки мембранних коробок;
- сильфони – безшовні, зварні, одношарові та багатшарові;
- трубочаті пружини – одновиткові кругові, багатовиткові гвинтові та спіральні, S-подібні, виті, з ексцентричним внутрішнім отвором.

Основні метрологічні характеристики пружних чутливих елементів: пружна характеристика, нелінійність пружної характеристики, чутливість та жорсткість (штивність), гістерезис та постійність пружної характеристики.

Пружною характеристикою називається залежність між переміщенням заданої точки пружного елемента та тиском, що діє на нього $l = \varphi(p)$.

У залежності від типу та конструкції пружного чутливого елемента його пружна характеристика може бути лінійною або нелінійною. Під час проектування завжди прагнуть досягти лінійності характеристики, тому що у цьому випадку за допомогою простого передатного механізму можна отримати шкалу, яка буде рівномірною на всьому діапазоні вимірювання. Але на практиці, особливо для точних вимірювань, завжди має місце відхилення реальної пружної характеристики від лінійності. Нелінійність пружної характеристики визначається за формулою: $\eta = \Delta l_{\max} / l_{\max}$, де l_{\max} – переміщення заданої точки під дією максимального робочого тиску; Δl_{\max} – найбільше відхилення характеристики від прямої лінії.

4.4 Деформаційні прилади для вимірювання тиску

Найпоширенішим типом манометрів, які використовуються у різних галузях техніки, є деформаційні манометри з одновитковою трубочатою пружиною (рис. 4.5). Їх часто називають технічними манометрами.

Вимірювальна система манометра складається з одновиткової трубочатої пружини 1, один кінець якої герметично з'єднаний з утримувачем 7, а на іншому кінці з наконечником 5 змонтована тяга 6, яка шарнірно з'єднана з

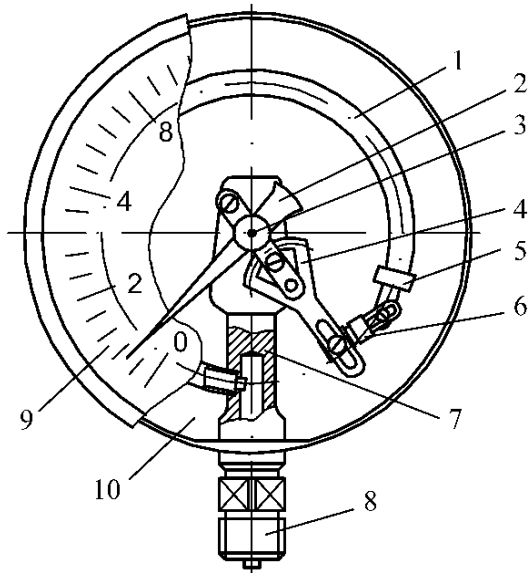


Рисунок 4.5 – Деформаційний манометр з одновитковою трубчатою пружиною

зубчатим сегментом 4. Переміщення наконечника трубчатої пружини перетворюється в обертання осі стрілочного вказівника 2 з допомогою насадженої на вісь трубки 3 шестерні, що входить у зачеплення з зубчатим вінцем сегмента 4. Від зростання тиску, що подається всередину трубчатої пружини, вона розгинається, і стрілочний вказівник повертається за часовою стрілкою відносно шкали 9, нанесеної на циферблат, закріплений в корпусі 10 манометра. Для коректування кута повороту вказівника відносно шкали довжини пліч шарнірно-важільного механізму, що складається з тяги 6 й зубчатого сегмента 4, юстируються затискними гвинтами. До пристрою відбору тиску манометр під'єднується за допомогою штуцера 8.

Переміщення вільного кінця трубчатої пружини пропорційне тиску, що вимірюється, до певної межі $\Delta = kp$. При подальшому підвищенні тиску лінійна залежність порушується – деформація починає зростати швидше за збільшення тиску. Граничний тиск, за якого ще зберігається лінійна залежність між переміщення кінця трубки і тиском, називається границею пропорційності трубки.

Механічні властивості трубки, тобто, границя пропорційності і величина переміщення вільного кінця, залежать від ряду чинників, з яких найважливішими є відношення осей перерізу приплюснutoї (овальної) трубки, товщина її стінок, модуль пружності матеріалу і радіус дуги згину трубки.

Збільшення відношення осей за інших рівних умов підвищує чутливість та знизити границю пропорційності. Переважно відношення осей трубок, розрахованих на малий та середній тиск, знаходиться в межах $a/b = 1,5 \dots 4,5$. Збільшення товщини стінок різко підвищує границю пропорційності.

У манометрах високого тиску застосовують товстостінні із легованої сталі трубчаті пружини круглого перерізу з каналом, вісь якого зміщена відносно осі пружини в сторону центру кривизни (рис. 4.6). Завдяки ексцентричному каналу надлишковий тиск, що діє на заглушку вільного кінця трубки, створює момент, який викликає зменшення кривизни трубки і переміщення її вільного кінця.

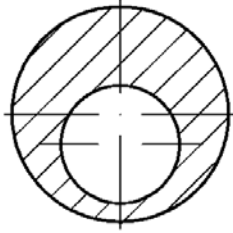


Рисунок 4.6 – Поперечний переріз трубочатої пружини манометра високого тиску

Залежно від необхідної точності вимірювань та призначення ступінь складності передатного механізму і габаритні розміри манометра можуть змінюватись у широких межах. Наприклад, для забезпечення необхідної точності відліку довжина шкали манометрів типу МО класу 0,15 – 0,25 складає не менше 500 мм для діаметра корпусу 250 мм, тоді як у манометрів класу 2,5 – 4 діаметр корпусу рівний 40 – 60 мм. Для усунення люфту у зубчатій передачі на осі стрілки монтуються натяжні спіральні пружинки. У найбільш точних приладах передбачено часткову компенсацію впливу температури. Суттєво також відрізняються вимоги щодо якості виготовлення деталей та матеріалів.

4.5 Деформаційні вимірювальні перетворювачі тиску

Деформаційні перетворювачі тиску, основані на методі прямого перетворення, розрізняють як за видом деформаційного чутливого елемента, так і за способом отримання сигналу вимірювальної інформації.

У техніці використовують індуктивні, ємнісні, п'єзоелектричні, тензорезистивні та деякі інші елементи перетворення.

4.5.1 Індуктивні вимірювальні перетворювачі тиску

Дія індуктивних перетворювачів (рис. 4.7) заснована на зміні індуктивності в залежності від деформації чутливого елемента.

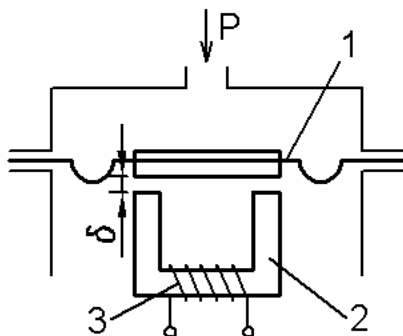


Рисунок 4.7 – Схема індуктивного перетворювача тиску:

- 1 – мембрана з якорем;
- 2 – електромагнітне осердя;
- 3 – індуктивна котушка

Мембрана 1, яка сприймає тиск, є рухомих якорем електромагніту 2 з обмоткою 3. Під дією вимірюваного тиску мембрана 1 переміщується, що викликає зміну електричного опору індуктивного перетворювального елемента. Якщо знехтувати активним опором котушки, магнітними потоками розсіювання і втратами у осерді, індуктивність L перетворювального елемента можна визначити за формулою:

$$L = \frac{w^2}{l_c / (\mu_c S_c) + \delta / (\mu_0 S)}, \quad (4.8)$$

де w – кількість витків котушки;

l_c, S_c – довжина і площа поперечного перерізу феромагнітного осердя;
 δ – довжина повітряного проміжку;
 μ_c, μ_0 – магнітна проникність осердя і повітря;
 S – площа поперечного перерізу повітряного проміжку.

У процесі вимірювання величина $l_c / (\mu_c S_c) \ll \delta / (\mu_0 S)$, тому вираз (4.8) можна подати як:

$$L = w^2 \mu_0 S / \delta. \quad (4.9)$$

Якщо величина деформації мембрани пропорційна до тиску, що вимірюється $\delta = k_1 P$, то отримуємо:

$$L = w^2 \mu_0 S / k_1 P. \quad (4.10)$$

Рівняння (4.10) є статичною характеристикою вимірювального перетворювача тиску індуктивного типу.

Вимірювання L виконується переважно мостами змінного струму або резонансними LC -контурами. Для тиску 0,5 – 1,0 МПа товщина мембрани складає 0,1 – 0,3 мм, а для тиску 20 – 30 МПа – 1,3 мм. Робочий хід мембрани складає соті долі міліметра.

За принципом дії індуктивні перетворювачі придатні для вимірювання будь-якого тиску: абсолютного, надлишкового або різниці тисків. Основними перевагами індуктивних перетворювачів є простота конструкції, хороші динамічні характеристики, високі вихідні сигнали, довгострокова стабільність.

Основна похибка індуктивних перетворювачів тиску $\pm(0,2 - 5)\%$, постійна часу – $(2,2 - 3) \cdot 10^{-4}$ с.

4.5.2 Диференціально-трансформаторні перетворювачі тиску

Вимірювальний перетворювач тиску диференціально-трансформаторного (ДТ) типу (рис. 4.8) включають деформаційний чутливий елемент 1 і ДТ-перетворювальний елемент 2.

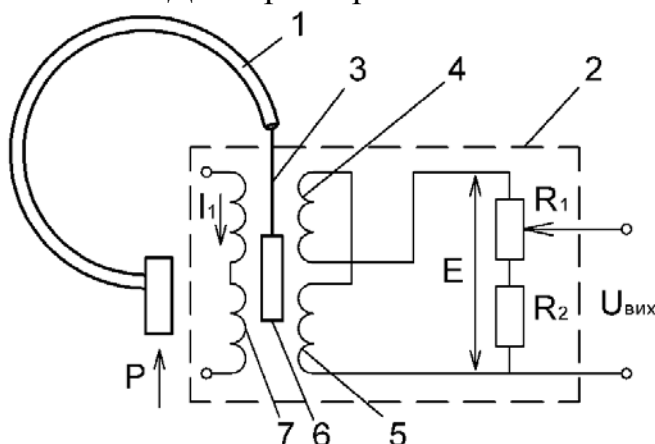


Рисунок 4.8 – Схема диференціально-трансформаторного перетворювача тиску

Перетворювальний елемент 2 – це циліндричний каркас із діелектрика, на якому розміщена котушка з первинною обмоткою 7, що складається з двох секцій, з'єднаних узгоджено, та двох секцій 4, 5 вторинної обмотки, з'єднаних зустрічно. В середині каналу котушок розташовано рухоме осердя 6 з магнітом'якого матеріалу, яке зв'язане з трубчатою пружиною 1 тягою 3.

До виходу вторинної обмотки підключено подільник, який складається з регульованого R_1 і постійного R_2 резисторів. Подільник використовується для налаштування перетворювача на заданий діапазон. Шляхом зміни опору R_1 можна змінювати межі вимірювання на $\pm 25\%$.

Формування вихідного сигналу ДТ-перетворювача здійснюється наступним чином. При протіканні по первинній обмотці струму I_1 виникають магнітні потоки, які пронизують обидві секції вторинної обмотки та індукуює в них ЕРС e_1 і e_2 . Значення цих ЕРС зв'язані з взаємними індуктивностями M_1 і M_2 між первинною обмоткою та кожною з секцій вторинної обмотки співвідношеннями:

$$e_1 = 2\pi f I_1 M_1; \quad e_2 = 2\pi f I_1 M_2, \quad (4.11)$$

де f – частота струму I_1 .

Для зустрічного включення обмоток секцій 4 і 5:

$$E = e_1 - e_2 = 2\pi f I_1 (M_1 - M_2) = 2\pi f I_1 M, \quad (4.12)$$

де M – взаємна індуктивність між первинною і вторинною обмотками.

Для уніфікованого ДТ-перетворювача, що має у вторинній обмотці резистори R_1 і R_2 , вихідний сигнал $U_{вих}$ визначається взаємною індуктивністю $M_{вих}$ між первинною обмоткою і вихідними колами і може бути подана у вигляді:

$$U_{вих} = 2\pi f I_1 M_{вих}. \quad (4.13)$$

Величина $M_{вих}$ пов'язана з переміщенням δ осердя б залежністю:

$$M_{вих} = M_{max} \frac{\delta}{\delta_{max}}, \quad (4.14)$$

де M_{max} – максимальне значення взаємної індуктивності між первинною обмоткою і вихідними колами перетворювача, що відповідає максимальному δ_{max} переміщенню осердя.

Розв'язуючи сумісно рівняння (4.13) і (4.14), отримаємо статичну характеристику уніфікованого ДТ-перетворювача:

$$U_{вих} = \frac{2\pi f I_1 M_{max}}{\delta_{max}} \cdot \delta. \quad (4.15)$$

У промислових ДТ-перетворювачах хід осердя складає 1,6, 2,5 або 4 мм. Перетворювачі мають уніфікований сигнал у вигляді напруги змінного струму, що змінюється в межах $-1 \div 0 \div +1$ В. Знак "-" вказує на зміну фази сигналу. Цим значенням вихідного сигналу відповідають зміни взаємної індуктивності перетворювача в межах $-10 \div 0 \div 10$ мГн.

Перетворювачі тиску ДТ-типу працюють в комплекті з диференціально-трансформаторними вторинними приладами. Клас точності ДТ-перетворювачів тиску 1,0 або 1,5.

4.5.3 Ємнісні вимірювальні перетворювачі тиску

У ємнісних перетворювачах використовується явище зміни електричної ємності від деформації чутливого елемента. Електростатичний (ємнісний) перетворювач (рис. 4.9) складається з двох електродів у формі плоских

пластин, розташованих паралельно одна відносно другої, які утворюють конденсатор.

Якщо одна з пластин має можливість переміщуватись, то електрична ємність C перетворювача обернено пропорційна віддалі між пластинами:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S}{\delta}, \quad (4.16)$$

де S – площа перекриття пластин;

ε – діелектрична проникність середовища між пластинами;

δ – віддаль між пластинами.

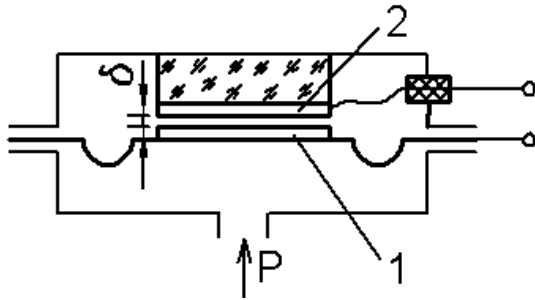


Рисунок 4.9 – Схема ємнісного перетворювача тиску:
1 – металева мембрана з однією пластинкою конденсатора;
2 – нерухома пластина конденсатора на ізолюючій підкладці

Якщо ємнісний перетворювач підключити до джерела змінного струму, то через нього буде протікати струм силою:

$$I = \omega \cdot C \cdot U_m \cdot \cos \omega t, \quad (4.17)$$

де U_m – напруга змінного струму;

$\omega = 2\pi f$ – кругова частота.

Як і у індуктивних перетворювачах, залежність між ємністю і переміщенням має нелінійний характер (гіпербола). Для зменшення нелінійності, якщо вимірюються невеликі переміщення (від 1 мкм до 1 мм), переважно застосовуються диференціальні ємнісні перетворювачі (рис. 4.10).

Пластина 2 закріплена на мембрані 4, величина зміщення якої буде залежати від знаку і різниці тисків P_1 і P_2 . Пластини 1 і 3 нерухомо закріплені на ізоляторах. Від переміщення пластини 2 ємність між пластинами 1 і 2 збільшується, а між пластинами 2 і 3 – зменшується або навпаки.

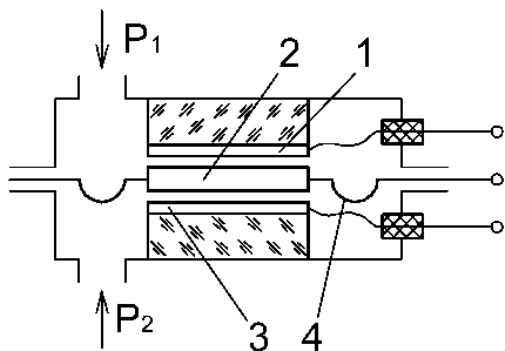


Рисунок 4.10 – Схема диференціального ємнісного перетворювача:
1, 3 – нерухомі пластини; 2 – рухома пластина; 4 – мембрана

Диференціальні ємнісні перетворювачі відрізняються високою чутливістю (до 500 в/мм), незначними похибками та простотою конструкції, особливо у вимірюванні різниці тисків. Залежність електричного комплексного опору перетворювача від переміщення мембрани практично лінійна.

4.5.4 П'єзоелектричні та тензорезисторні перетворювачі тиску

Дія п'єзоелектричних манометрів базується на використанні явища п'єзоєфекту – виникненні на поверхнях пластини різнойменних зарядів від її стискання. П'єзоелектричні манометри мають високі динамічні характеристики, а тому широко використовуються для вимірювання швидкоплинних процесів.

Тензорезисторні перетворювачі тиску (манометри опору) містять деформаційний чутливий елемент у вигляді мембрани, на яку наклеюють або напилюють тензорезистори, у яких виникає тензоєфект – зміна електричного опору від деформації тензорезисту. Принципова відмінність тензорезистивного методу вимірювання тиску полягає у тому, що мірою тиску є не величина переміщення точки пружного чутливого елемента, а деформація поверхні цього елемента.

Тензорезистори умовно поділяють на основні групи: дротяні, фольгові, плівкові та напівпровідникові. У провідникових перетворювачах застосовується манганін або константан, а у напівпровідникових – кремній або германій. Застосування мембрани з сапфіру або кремнію дозволяє відмовитись від наклеювання тензорезисторів.

У якості вимірювальної схеми використовуються мостові вимірювальні схеми, у якій тензорезистори включаються у всі чотири плеча.

Цифровий манометр "Diptron 2" (Німеччина) призначений для вимірювання тиску з похибкою не більше 0,05%. Манометр (рис. 4.11, а) складається з сильфона 1, який перетворює вимірюваний тиск у зусилля, яке за допомогою стержня 2 згинає пружну балку 4.

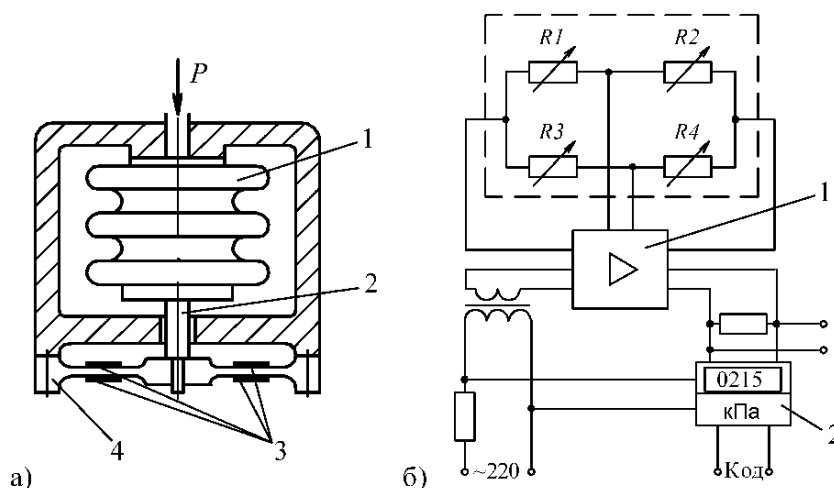


Рисунок 4.11 – Цифровий манометр «Diptron 2»:
а) конструкція перетворювача; б) схема електрична

Пропорційна тиску деформація сприймається тензорезисторами 3, включеними у мостову схему, два з яких працюють на розтяг, і два – на стискання. Підсилювачем 1 (рис. 4.11, б) вихідний сигнал підсилюється та після перетворення поступає на цифрове табло 2. Одночасно виконується перетворення в аналоговий та кодовий вихідні сигнали.

4.6 Диференціальні манометри

Диференціальні манометри використовуються у різних галузях промисловості для вимірювання перепаду тиску, витрат рідин та газів за перепадом тиску на звужуючому пристрої і рівня рідин, які знаходяться під атмосферним, надлишковим або вакууметричним тиском. Крім цього, деякі типи дифманометрів використовуються у якості тягомірів, напоромірів та тягонапоромірів.

Диференціальні манометри служать для вимірювання різниці тисків, а тому мають два входи. Дифманометри випускаються декількох класів точності: 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 і градуюються за номінальним перепадом тиску ΔP . Вони можуть мати відліковий пристрій – прилади для вимірювання витрат і не мати відлікового пристрою – вимірювальні перетворювачі.

За конструкцією поділяються на рідинні, у яких перепад тиску врівноважується відповідним стовпом рідини, та деформаційні, у яких врівноваження здійснюється за рахунок деформації пружних елементів. Рідинні дифманометри підрозділяють на поплавкові, дзвонові і кільцеві, а деформаційні – на мембранні і сільфонні.

Рідинні поплавкові дифманометри виготовляються за типом рідинних чашкових приладів, у чашці якого розміщено поплавок, з'єднаний системою важелів з відліковим механізмом. Дзвонові та кільцеві дифманометри, як морально застарілі, практично не використовуються. Основним недоліком рідинних дифманометрів є обов'язкова наявність робочої рідини у приладі, і як наслідок, велика інерційність показів, невеликі робочі частоти, можливість втрати частини робочої рідини тощо. Тому у сучасній вимірювальній техніці використовуються диференціальні манометри з пружними чутливими елементами і електричним виходом.

Дифманометри типу ДМ (рис. 4.12) оснащені уніфікованим лінійним диференціально-трансформаторним перетворювачем, не мають відлікового пристрою і застосовуються у комплекті з вторинними приладами дифтрансформаторної системи.

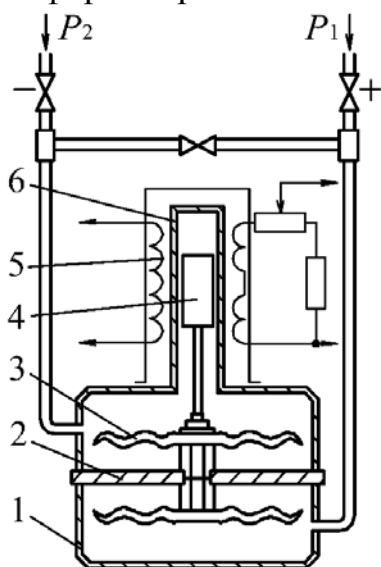


Рисунок 4.12 – Схема дифманометра мембранного типу ДМ

Чутливим елементом приладу є мембранний блок, який складається з двох мембранних коробок 1 і 3, закріплений з двох сторін основи 2.

Основа з верхньою і нижньою кришками корпусу приладу утворюють дві камери: нижню – «плюсову» та верхню – «мінусову». Внутрішні порожнини мембранних коробок, заповнені дистильованою водою, сполучаються через отвір у перегородці.

З центром мембрани верхньої коробки за допомогою немагнітного штока жорстко зв'язане осердя 4 диференціально-трансформаторного перетворювача 5. Осердя знаходиться всередині роздільної трубки 6, виготовленої з немагнітної нержавіючої сталі. У дифманометрі передбачено пристрій, який дозволяє переміщувати перетворювач вздовж роздільної трубки для початкової корекції нульового значення вихідного параметра.

Тиск P_1 і P_2 до камер дифманометра підводиться через два запірних вентиля, розташованих на вертикальних трубках. Для сполучення між собою плюсової та мінусової камер служить зрівнювальний вентиль, розташований нижче запірних вентилів. Під дією різниці тисків $P_1 - P_2$ нижня мембранна коробка стискається, рідина з неї перетікає у верхню коробку, викликаючи переміщення центру мембрани верхньої коробки, а разом з тим і осердя диференціально-трансформаторного перетворювача. Це переміщення приводить до зміни взаємної індуктивності між первинною та вторинною обмоткою перетворювача, і відповідно, до зміни його вихідної напруги пропорційно до вимірюваного перепаду тиску.

Якщо фактичний перепад тиску перевищує граничний номінальний або одна з мембранних коробок знаходиться під дією одностороннього перевантаження, поломки коробок не станеться, бо мембрани цієї коробки складуться по профілю, витіснивши рідину у іншу коробку.

Питання для самоконтролю

1. Які одиниці використовуються для означення величини тиску?
2. На якому принципі ґрунтується дія рідинних манометрів?
3. У чому полягає основна перевага поршневих манометрів?
4. Чутливі елементи якого типу застосовуються у приладах тиску?
5. Для яких тисків використовуються п'єзоелектричні перетворювачі?
6. У чому полягає особливість тензорезистивного методу вимірювання?
7. Для яких вимірювань найчастіше використовуються дифманометри?

ТЕМА 5 МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

План

- 5.1 Основні поняття про температуру. Температурні шкали.
- 5.2 Класифікація засобів для вимірювання температури.
- 5.3 Термометри розширення.
- 5.4 Термоелектричні термометри.
- 5.5 Прилади для вимірювання термоелектрорушійної сили.
- 5.6 Електричні термометри опору.
- 5.7 Пірометри випромінювання.
- 5.8 Цифрові прилади для вимірювання температури.
- 5.9 Тепловізори.

5.1 Основні поняття про температуру. Температурні шкали

Температурою називають величину, яка характеризує тепловий стан тіла. Згідно кінетичної теорії температуру визначають як міру кінетичної енергії поступального руху молекул. Таким чином, температурою називають умовну статистичну величину, прямопропорційну середній кінетичній енергії молекул тіла. Від дотику двох тіл, наприклад газів, перехід тепла від одного тіла до другого буде відбуватись до того часу, доки значення середньої кінетичної енергії поступального руху молекул цих тіл не зрівняються. Зі зміною середньої кінетичної енергії рух молекул тіла змінює ступінь його нагрітості, і разом з цим змінюються його фізичні властивості. За даної температури кінетична енергія кожної окремої молекули тіла може значно відрізнятись від його середньої кінетичної енергії. Тому поняття температури є статистичним і може стосуватись тільки тіла, яке складається з достатньо великої кількості молекул. Для окремої молекули поняття температури втрачає смисл.

За другим законом термодинаміки температуру T можна визначити з відношення температур T_1 та T_2 і відношення відповідних кількостей тепла Q_1 та Q_2 , отриманого і відданого у циклі Карно:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (5.1)$$

Таким чином, можна встановити числові значення температури, якщо прийняти деякі значення її для двох основних реперних точок. Тому температурою можна назвати міру відхилення термодинамічного стану тіла від довільно вибраного стану теплової рівноваги.

Температура не піддається безпосередньому вимірюванню. Тому про стан теплової рівноваги і про значення температури судять за зміною фізичних властивостей тіл.

Можливість вимірювати температуру термометром основана на явищі теплового обміну між тілами з різним ступенем нагрітості і на зміні термометричних властивостей речовин від нагрівання. Відповідно, для

створення термометра і побудови температурної шкали, здавалось би, можна вибрати будь-яку термометричну властивість, що характеризує стан тієї або іншої речовини і на основі його вимірювань побудувати шкалу температур. Але зробити такий вибір зовсім не просто, бо термометрична властивість повинна однозначно змінюватись зі зміною температури, не залежати від інших факторів і допускати можливість її вимірювання порівняно простим та зручним способом. В дійсності не існує ні однієї термометричної властивості, яка повністю могла б задовольнити всі вимоги на всьому інтервалі вимірювання температур.

Всі температурні шкали будувались однаковим шляхом: двом постійним точкам присвоювались певні числові значення і допускалось, що видима термометрична властивість речовини, яка використовується в термометрі, лінійно зв'язана з температурою t :

$$t = kE + D, \quad (5.2)$$

де k – коефіцієнт пропорційності;

E – термометрична властивість речовини;

D – стала.

Прийнявши для двох постійних точок певні значення температур, можна обчислити сталі k та D і, на цій основі, побудувати температурну шкалу.

Для розмітки температурної шкали найчастіше використовували об'ємне розширення тіл від нагрівання, а за сталі точки приймали температури кипіння води та розтавання льоду. На цьому принципі основані температурні шкали, створені Ломоносовим, Фаренгейтом, Реомюром та Цельсієм.

Перша температурна шкала була запропонована і впроваджена Д.Г. Фаренгейтом у 1724 р. В основу шкали він поклав три точки: 1 – "точка надзвичайного холоду", прийнята за нульову відмітку (за сучасною шкалою $\approx -17,8^\circ\text{C}$); 2 – точка плавлення льоду, визначена ним у $+32^\circ$ та нормальна температура людського тіла, визначена у $+96^\circ$ (за сучасною шкалою це становить $+35,6^\circ\text{C}$) – 3-я точка.

У 1742 р. А. Цельсій, використовуючи ртуть у скляних термометрах, позначив точку плавлення льоду за 100°C , а точку кипіння води за 0°C . Таке позначення було незручним і через три роки Штремер запропонував змінити позначення на зворотні.

У 1848 р. Кельвін запропонував побудувати температурну шкалу на термодинамічній основі, прийнявши за нульове значення температуру абсолютного нуля і позначивши температуру плавлення льоду $+273,1^\circ$. Термодинамічна температурна шкала ґрунтується на другому законі термодинаміки. Як відомо, робота в циклі Карно пропорційна різниці температур і не залежить від термодинамічної речовини. Один градус по термодинамічній шкалі відповідає такому підвищенню температури, яке відповідає $1/100$ частині роботи по циклу Карно між точками плавлення льоду та кипіння води за нормального атмосферного тиску.

Термодинамічна шкала аналогічна шкалі ідеального газу, побудованої на залежності тиску ідеального газу від температури. Закони зміни тиску від

температури для реальних газів відрізняються від ідеальних, але поправки на відхилення реальних газів незначні і можуть бути встановлені з високим ступенем точності. Тому, спостерігаючи за розширенням реальних газів і ввівши поправки, можна оцінити температуру по термодинамічній шкалі.

Менделєєв Д.І. у 1874 р. вперше науково обґрунтував доцільність побудови термодинамічної температурної шкали не за двома реперними точками, а за однією. Така шкала має значні переваги і дозволяє точніше визначати термодинамічну температуру.

Міжнародна температурна шкала (МТШ) є практичним здійсненням термодинамічної стоградусної температурної шкали, у якій температура плавлення льоду і температура кипіння води за нормального атмосферного тиску відповідно позначені через 0° та 100° .

МТШ ґрунтується на системі постійних, точно відтворюваних температур рівноваги (постійних точок), яким присвоєні числові значення. Для визначення проміжних температур служать інтерполяційні прилади, відградуйовані по цих постійних точках.

Основні постійні точки МТШ та присвоєні їм числові значення:

а) температура рівноваги між рідким та газоподібним киснем (точка кипіння кисню) – $182,97^\circ$;

б) температури рівноваги між льодом та водою, насиченою повітрям (точка плавлення льоду) – $0,000^\circ$;

в) температура рівноваги між рідкою водою і її парою (точка кипіння води) – $100,000^\circ$;

г) температура рівноваги між рідкою сіркою та її парою (точка кипіння сірки) – $444,60^\circ$;

д) температура рівноваги між твердим та рідким сріблом (точка затвердіння срібла) – $960,5^\circ$;

е) температура рівноваги між твердим та рідким золотом (точка затвердіння золота) – $1063,0^\circ$.

Міжнародна практична температурна шкала (МПТШ) теж базується на шести постійних первинних точках. Але в МПТШ були внесені уточнення:

1) замість точки плавлення льоду використовується точка рівноваги між льодом, рідкою водою та водяною парою – потрійна точка води, якій присвоєно значення $+0,01^\circ$;

2) температурі рівноваги між твердим і рідким сріблом присвоєно нове значення – $960,8^\circ$;

3) всі постійні точки, крім потрійної точки води, визначаються за одної нормальної атмосфери, рівної тиску 101325 Н/м^2 ;

4) замість точки кипіння сірки рекомендується використовувати точку рівноваги між твердим і рідким цинком (точка затвердіння цинку) – $419,505^\circ\text{С}$.

Основна одиниця термодинамічної температури T названа кельвін і позначається K . Кельвін є $1/273,16$ частина термодинамічної температури потрійної точки води. Одиниця, яка застосовується для вираження температури Цельсія – градус Цельсія $^\circ\text{С}$.

Таблиця 5.1 – Деякі постійні точки МПТШ

№ точки	Стан рівноваги	Присвоєне значення температури	
		К	°С
1	Між твердою, рідкою і газоподібною фазою водню (потрійна точка водню)	13,81	-259,34
6	Між рідкою та газоподібною фазами кисню (точка кипіння кисню)	90,188	-182,962
7	Між твердою, рідкою та пароподібною фазами води (потрійна точка води)	273,16	0,01
8	Між рідкою і пароподібною фазами води (точка кипіння води)	373,15	100
9	Між твердою і рідкою фазами цинку (точка затвердіння цинку)	692,73	419,58
10	Між твердою та рідкою фазами срібла (точка затвердіння срібла)	1235,08	961,93
11	Між твердою та рідкою фазами золота (точка затвердіння золота)	1337,58	1064,43

Різниця температур може бути виражена або в кельвінах, або в градусах Цельсія:

$$t = T - 273,15 \text{ К.} \quad (5.3)$$

Передача розміру одиниці температури, а разом з цим і практичних температурних шкал від еталонів зразковим засобам вимірювань і від них до робочих засобів вимірювань з зазначенням похибки, виконується у відповідності з повірочними схемами, затвердженими відповідними стандартами.

5.2 Класифікація засобів для вимірювання температури

Температуру вимірюють за допомогою пристроїв, у яких використовуються різні термометричні властивості рідин, газів або твердих тіл. Існують десятки різних технічних пристроїв, які використовуються для вимірювання температури в промисловості, у наукових дослідженнях та зі спеціальною метою. У таблиці 5.2 наведені найбільш поширені пристрої для вимірювання температури та практичні межі їх використання.

Термометром називають пристрій або прилад, що служить для вимірювання температури шляхом перетворення її у покази або сигнал, який є відомою функцією температури.

Чутливим елементом термометра називають частину, яка перетворює теплову енергію в інший вид енергії для отримання інформації про температуру.

Розрізняють термометри контактні і безконтактні. Чутливий елемент контактного термометра входить у безпосередній контакт з середовищем вимірювання.

Пірометром називають безконтактний термометр, дія якого основана на використанні теплового випромінювання нагрітих тіл.

Таблиця 5.2 – Практичні межі застосування найбільш поширених пристроїв для промислових вимірювань температур

Термометрична властивість	Назва пристрою	Межі вимірювання, °С	
		нижня	верхня
Теплове розширення	Рідинні скляні термометри	-190	600
Зміна тиску	Манометричні термометри	-160	600
Зміна електричного опору	Електричні термометри опору	-200	500
	Напівпровідникові термометри (термістори, терморезистори)	-90	180
Термоелектричні ефекти (термо-е.р.с.)	Термоелектричні термометри термопари)	-50	1600
	Термопари спеціальні	1300	2500
Теплове випромінювання	Оптичні пірометри	700	6000
	Радіаційні пірометри	20	3000
	Фотоелектричні пірометри	600	4000
	Колірні пірометри	1400	2800

5.3 Термометри розширення

5.3.1 Рідинні скляні термометри

Дія скляних рідинних термометрів (рис. 5.1) основана на різниці коефіцієнтів теплового розширення термометричної речовини та оболонки, у якій вона знаходиться (термометричне скло або кварц).

У якості термометричної речовини у скляних термометрах, крім ртуті, застосовуються інші рідини, переважно органічного походження.

Основна перевага скляних рідинних термометрів – простота використання і достатньо висока точність вимірювання, навіть для термометрів серійного виготовлення.

Термометри випускаються наступних різновидів:

1. Технічні ртутні з вкладеною шкалою, з зануренням робочої частини у вимірювальне середовище, прямі та кутові зі шкалами від -35 до +50°С та від 0 до +500°С.

2. Лабораторні ртутні палочні або з вкладною шкалою, прямі з зовнішнім діаметром 5 – 11 мм. За границями вимірювання і ціною поділки поділяються на чотири групи. Найбільш точні мають ціну поділки шкали 0,1°С та інтервал вимірювання 50°С, наприклад, від +150 до +200°С.

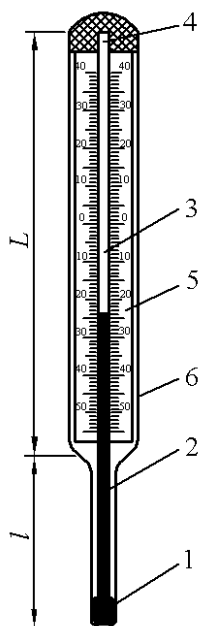


Рисунок 5.1 – Рідинний скляний термометр:

- 1 – скляний балон;
- 2 – термометрична речовина;
- 3 – капілярна трубка;
- 4 – резервуар з термометричною речовиною;
- 5 – шкала термометра;
- 6 – захисний скляний корпус;
- l* – робоча частина

3. Рідинні (не ртутні) термометри випускаються у різному конструктивному виконанні, включаючи – з прикладною шкальною пластиною для вимірювання у діапазоні від -190 до +100°C.

4. Підвищеної точності та зразкові ртутні термометри з верхньою границею вимірювання 600°C і ціною поділки шкали – до 0,01°C.

5. Електроконтактні ртутні термометри з впаяними у капілярну трубку регульованими контактами з діапазоном від 0 до +300°C.

6. Спеціальні термометри, включно з максимальними (напр. медичними), мінімальними, метрологічними та іншого призначення.

Таблиця 5.3 – Термометричні речовини для скляних термометрів

Назва	Формула	Коефіцієнт видимого об’ємного розширення, $\gamma, \text{град}^{-1}$	Межі застосування, °C	
			нижня	верхня
Метилловий спирт	CH ₃ OH	0,00115	-80	+80
Етиловий спирт	C ₂ H ₅ OH	0,00103	-80	+80
Керосин	-	0,00093	0	+300
Петролейний ефір	-	0,00140	-120	+20
Пентан (технічний)	-	0,00170	-190	+20
Толуол	C ₆ H ₅ CH ₃	0,00107	-80	+100
Амальгама талія	-	0,00016	-50	+20
Галій	Ga	-	-	+1200
Ртуть	Hg	0,00016	-35	+600

Найбільш поширеною причиною виникнення похибок вимірювання є різна величина занурення робочої частини у вимірювальне середовище. Для виключення таких похибок вводиться поправка.

Повірка термометрів виконується у термостатах шляхом порівняння показів із показами зразкового приладу більш високого класу точності.

Допустимі похибки вимірювання технічних термометрів не повинні перевищувати однієї поділки шкали. Допустима похибка показів зразкових термометрів значно нижча.

Основна і обов'язкова температурна точка для повірки термометрів, якщо вона попадає у діапазон вимірювання, – потрійна точка води.

5.3.2 Біметалеві та дилатометричні термометри

Дія біметалевих та дилатометричних термометрів основана на термометричній властивості теплового розширення різних твердих тіл.

У біметалевих термометрах у якості чутливого елемента використовуються пластинки або стрічки, що складаються з двох шарів різнорідних металів, які характеризуються різними коефіцієнтами теплового розширення. Найчастіше використовують мідноцинковий сплав – латунь (70%Cu + 30%Zn) та сплав заліза з нікелем – інвар (64%Fe+36%Ni), з суттєво різними коефіцієнтами теплового розширення: близько $0,000019 \text{ град}^{-1}$ для латуні та $0,000001 \text{ град}^{-1}$ для інвару.

Чутливі елементи біметалевих термометрів переважно виконуються у формі спіралей, з'єднаних із стрілочним вказівником (рис. 5.2).

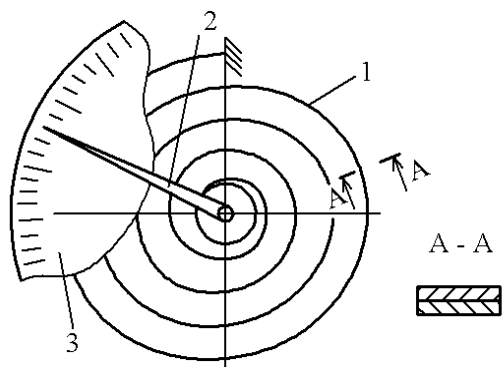


Рисунок 5.2 – Схема біметалевого термометра:

- 1 – біметалева спіраль;
- 2 – вказівник;
- 3 – шкала

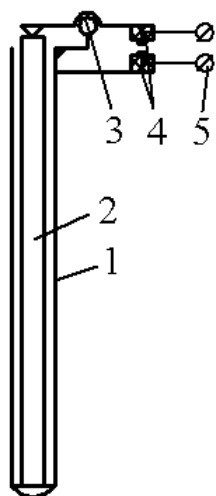


Рисунок 5.3. – Схема дилатометричного регулятора:

- 1 – трубка (латунь);
- 2 – вставка (кварц);
- 3 – важільна передача;
- 4 – ізольовані контакти;
- 5 – електричний вихід

Дилатометричні термометри як засоби вимірювання температури майже не застосовують. Їх використовують переважно в якості термореле та дискретних регуляторів температури (рис. 5.3). Такі ж регулятори будуються

і на біметалевих елементах.

Чутливий елемент дилатометричного регулятора складається з металевої трубки 1 і кварцової або фарфорової вставки 2. Важільна передача 3 пропорційно збільшує різницю розширення трубки і вставки та змінює стан контактної групи 4.

Дилатометричні регулятори типу ТУДЕ оснащені задавачами температури спрацювання. У них можна також змінювати зону нечутливості.

5.3.3 Манометричні термометри

Дія манометричних термометрів основана на використанні залежності тиску речовини за постійного об'єму від температури.

Манометричний термометр складається з термобалона 1, капілярної трубки 2 та манометричної частини 3 – 7 (рис. 5.4). Вся система приладу – термобалон, капілярна трубка, манометрична пружина, заповнені робочою речовиною. Термобалон встановлюють в зону вимірювання температури. Від нагріву термобалона тиск робочої речовини всередині замкнутої системи збільшується. Збільшення тиску сприймається манометричною трубкою-пружиною, яка через передатний механізм діє на стрілку відлікового пристрою.

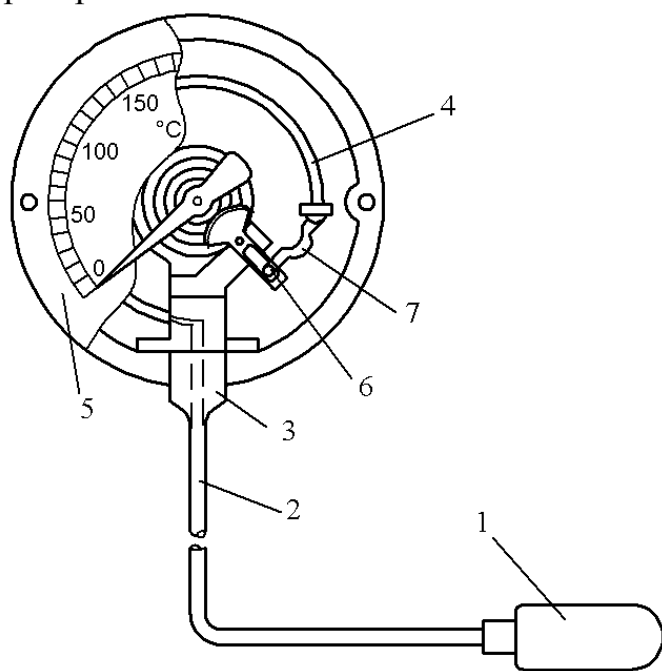


Рисунок 5.4 – Манометричний термометр з трубчатою пружиною:

- 1 – термобалон;
- 2 – капілярна трубка;
- 3 – утримувач;
- 4 – манометрична трубка (пружина);
- 5 – шкала;
- 6 – поводок;
- 7 – біметалевий компенсатор

Термобалон виготовляється з корозійностійкої сталі, а капіляр – з мідної або сталевий трубки з внутрішнім діаметром 0,15 – 0,5 мм. Капіляр може мати довжину від 1 до 60 м. Клас точності приладів – 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Манометричні термометри підрозділяють на три основних види:

1) рідинні, у яких вся вимірювальна система – термобалон, манометр і з'єднувальний капіляр заповнені рідиною;

2) конденсаційні, у яких термобалон заповнений частково рідиною з низькою температурою кипіння і частково – її насиченими парами, а з'єднувальний капіляр і манометр – насиченими парами, або частіше, спеціальною передавальною рідиною;

3) газів, у яких вся вимірювальна система – термобалон, манометр та капіляр заповнені інертним газом.

За будовою манометричні термометри всіх типів аналогічні. Вони бувають показуючими, самописними та з контактним виходом. У контактних приладах вмонтовані електричні ізольовані контакти та механізм зміщення контактних груп у межах діапазону вимірювання. У момент досягнення температурою заданого значення спрацьовують електричні контакти.

У газових термометрах у якості робочої речовини використовують азот. Початковий тиск у системі залежить від діапазону вимірювання і складає від 0,98 до 4,9 МПа. Чим вища температура, тим менший тиск і навпаки. Діапазон вимірювання: від -160°C до $+600^{\circ}\text{C}$.

У рідинних термометрах використовують органічні рідини: метиловий спирт або ксилол $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$ для вимірювань у діапазоні температур від -80°C до 320°C . Початковий тиск у термосистемі – 1,47 – 1,96 МПа.

У конденсаційних термометрах найбільше поширення отримали робочі речовини, приведені у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Термометричні речовини для конденсаційних манометричних термометрів

Назва	Формула	Межі застосування	
		нижня	верхня
Хлор-метил	CH_3Cl	-25	+75
Хлор-етил	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$	0	120
Ацетон	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	+60	180
Бензол	C_6H_6	+80	250
Ртуть	Hg	350	500

У якості передатної рідини, що заповнює капіляр і манометр конденсаційних термометрів найчастіше застосовують гліцерин (пропантріоль) у суміші зі спиртом або водою.

Шкали конденсаційних термометрів мають суттєву нерівномірність через нелінійність відношення між температурою кипіння і відповідним тиском. Робоча частина шкали розташована на ділянці 2/3 від верхньої межі вимірювання.

5.4 Термоелектричні термометри

5.4.1 Термоелектричний ефект

В основу вимірювання температури термоелектричними термометрами покладено термоелектричний ефект, який полягає у тому, що в замкнутому колі термоелектричного перетворювача (термопари), який складається з двох різнорідних провідників виникає електричний струм, якщо хоча б два місця з'єднання провідників мають різні температури. Спай (з'єднання), що має температуру t , називається робочим, а спай, що має постійну температуру t_0 , – вільним (рис. 5.5).

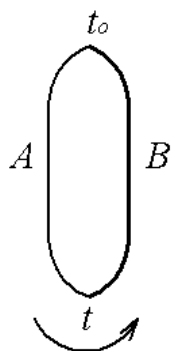


Рисунок 5.5 – Термоелектричне коло з двох різнорідних провідників

Провідники A та B називаються термоелектродами. Термоелектричний ефект пояснюється наявністю у металі вільних електронів, кількість яких в одиниці об'єму різна для різних металів.

У термоелектричному колі, складеному з двох різнорідних провідників A та B , виникає чотири різних термоелектрорушійних сили (термо-е.р.с.): дві термо-е.р.с. у місцях спаю провідників A та B , термо-е.р.с. на кінці провідника A і термо-е.р.с. на кінці провідника B .

Враховуючи обидва чинники, що визначають сумарну термо-е.р.с. замкнутого кола з двох провідників A та B , спаї яких нагріті до температур t та t_0 , і, прямуючи колом у напрямку проти годинникової стрілки, отримаємо:

$$E_{AB}(tt_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0), \quad (5.4)$$

де $E_{AB}(tt_0)$ – сумарна термо-е.р.с., що визначається дією обох чинників;

$e_{AB}(t)$ та $e_{BA}(t_0)$ – термо-е.р.с. викликані контактною різницею потенціалів та різницею температур кінців провідників A та B .

Якщо температура спаїв однакова, то термо-е.р.с. у колі рівна нулю, так як у обох випадках виникають термо-е.р.с., рівні за величиною та протилежно направлені. Відповідно, для $t = t_0$: $E_{AB}(t_0) = e_{AB}(t_0) + e_{BA}(t_0) = 0$, звідки $e_{BA}(t_0) = -e_{AB}(t_0)$. Підставивши ці значення у (5.4), отримаємо:

$$E_{AB}(tt_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0), \quad (5.5)$$

з чого випливає, що термо-е.р.с. є складною функцією двох змінних величин t та t_0 , тобто температур обох спаїв.

Підтримуючи температуру одного із спаїв постійною, наприклад, $t_0 = \text{const}$, отримаємо:

$$E_{AB}(tt_0) = f(t). \quad (5.6)$$

Якщо для даного термоелектричного перетворювача (ТЕП) експериментально, шляхом градування, знайдена залежність (5.6), то вимірювання температури зводиться до визначення термо-е.р.с. термометра.

Для включення вимірювального приладу необхідно розірвати електричне коло. Розрив можна виконати у спаї з температурою t_0 (рис. 5.6, а) або в одному з термоелектродів (рис. 5.6, б).

Термо-е.р.с., яка розвивається ТЕП для обох схем однакова, якщо температури t та t_0 і температури кінців провідника C також однакові. Термо-е.р.с. термометра не змінюється від введення третього провідника і відповідає рівнянню (5.6). На практиці найчастіше використовується схема, показана на рис. 5.6, а.

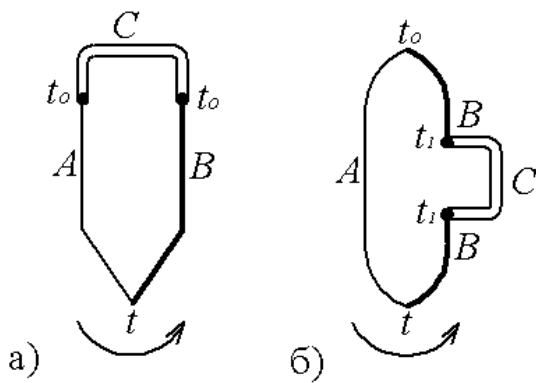


Рисунок 5.6 – Коло з третім провідником С, включеним:
а) у спай ТЕР;
б) у термоелектрод ТЕР

5.4.2 Термоелектричні перетворювачі – термопари

Існує велика кількість матеріалів у чистому вигляді і в комбінаціях, які можна використовувати як термоелектроди.

Термометричні властивості термопар прийнято порівнювати з нормальним термоелектродом, матеріалом для якого служить чиста платина. Всі матеріали за термоелектродними властивостями поділяють на позитивні та негативні. Позитивні – у яких в парі з платиною струм у гарячішому кінці за температури $t > t_0$ протікає від платини до цього матеріалу, а негативними – у яких струм протікає у зворотному напрямку.

У таблиці 5.5. приведено значення термо-е.р.с. для деяких чистих металів, металевих сплавів та інших матеріалів у парі з платиною за температури $t = 100^\circ\text{C}$ і вільних кінців $t_0 = 0^\circ\text{C}$.

Таблиця 5.5 – Термоелектричні властивості матеріалів у парі з платиною ($t = 100^\circ\text{C}$, $t_0 = 0^\circ\text{C}$)

Назва	Склад (приблизний)	Термо-е.р.с.
Залізо	практично чисте	+1,80
Мідь	те ж	+0,75
Нікель	– " –	– 1,49
Срібло	– " –	+0,72
Золото	– " –	+0,75
Платинородій	90%Pt+10%Rh	+0,64
Константан	60%Cu+40%Ni	– 3,35
Копель	56%Cu+44%Ni	– 4,05
Ніхром	(75-88)%Ni+(10-20)%Cr+(2-5)%Fe	+(1,6-2,4)
Алюмель	94,5%Ni+2%Al+2%Mn+1%Si+0,5%Co	– 1,25
Хромель	90,5%Ni+9,5%Cr	+2,90
Кремній	–	+44,8

Як видно з таблиці 5.5 незначна зміна вмісту компонент у сплавах може суттєво змінити термо-е.р.с. (наприклад, константан і копель).

До термоелектронних матеріалів, призначених для виготовлення термоелектричних термометрів, висувається ряд вимог: жаростійкість та механічна міцність; хімічна інертність; термоелектрична однорідність; стабільність і відновлюваність термоелектричної характеристики; однозначна, бажано близька до лінійної, залежність термо-е.р.с. від температури; висока

чутливість.

На практиці підбирають два матеріали, які утворюють термопару, наділену певними конкретними термоелектричними властивостями. З'єднані між собою кінці термопари, які поміщуються у контрольне середовище, називаються *робочим спаєм*. Кінці, що знаходяться в зовнішньому середовищі, до яких під'єднуються провідники від вимірювального приладу, називаються *вільними кінцями*.

Для забезпечення взаємозамінності було прийнято стандарти на термопари масового виготовлення (таблиця 5.6).

Таблиця 5.6 – Стандартні технічні термопари

Позначення		Матеріал термоелектродів	Межі використання, °С		
термопар	градування		нижня	верхня	
				тривала	тимчасова
ТПП	ПП-1	платинородій (10% родія – платина)	– 20	1300	1600
ТПР	ПР-30/6	платинородій (30% родія) – платинородій (6% родія)	300	1600	1800
ТХА	ХА	хромель – алюмель	– 50	1000	1300
ТХК	ХК	хромель – копель	– 50	600	800
ТВР	ВР-5/20	вольфрам-реній (5% ренію) – вольфрам-реній (20% ренію)	800	1800	2300

Термопари ТПП поділяють на еталонні, зразкові та робочі. Еталонні служать для перевірки зразкових ТЕП, зразкові – для робочих ТЕП. Ці термопари надійно працюють в нейтральному та окислювальному середовищі.

ТПП та ТПР виготовляють у вигляді дроту діаметром 0,5 або 1 мм, яку ізолюють фарфоровими бусами або трубками.

Термопари ТХА використовують для вимірювання температур до 1300°С. Вони стійкі проти окислення та корозії.

Термопари ТХК розвивають найбільшу термо-е.р.с., що дозволяє виготовляти їх з вузьким діапазоном вимірювання, наприклад, 0 – 300°С.

ТХА і ТХК виготовляють з дроту діаметром 0,7 – 3,2 мм, які ізолюються керамічними бусами.

Термопари ТВР застосовують для вимірювання температур до 2300°С у нейтральному та відновлювальному середовищі, а також у вакуумі. Використовуються для визначення температури розплавлених металів.

Характеристики перетворення ТЕП деяких термопар хоча й близькі до лінійних (особливо ХА та ХК), та все ж є нелінійними. Градування термопар виконується за табличними значеннями, а функція перетворення називається

нормалізованою статичною характеристикою (НСХ).

У деяких випадках використовуються нестандартні термопари: мідь – константанові (60% Cu+40% Ni), нікель – константанові, мідь – копелеві та залізо – копелеві.

У багатьох пристроях та різних вимірювальних приладах використовуються напівпровідникові ТЕП з термо-е.р.с., у 5 – 10 разів більшою ніж у ТЕП з металів та сплавів. Тут у якості термоелектродних матеріалів використовують сплави ZnSb та CdSb.

У випадку, якщо необхідно виміряти невелику різницю температур, застосовують диференціальні ТЕП, а якщо треба отримати велику термо-е.р.с. термобатареї – послідовно з'єднані декілька термопар (рис. 5.7).

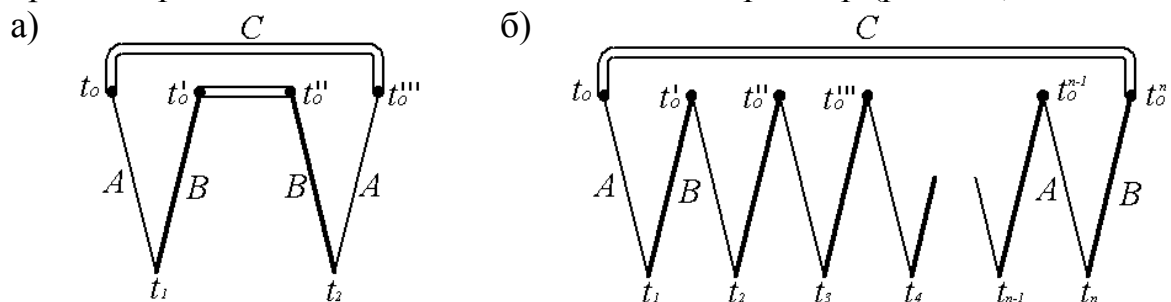


Рисунок 5.7 – Схема диференціального ТЕП (а) та термобатареї (б)

Сумарна термо-е.р.с. диференціального ТЕП:

$$E_{AB}(t_1 t_2) = e_{AB}(t_1) - e_{AB}(t_2). \quad (5.7)$$

Термо-е.р.с. термобатареї, яка складається із n елементів:

$$E = [e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0)]n = nE_{AB}(tt_0), \quad (5.8)$$

де $E_{AB}(tt_0)$ – термо-е.р.с. одного термоелемента за температури t та t_0 ;

n – кількість термоелементів, з'єднаних послідовно.

Армовані термопари (рис. 5.8) називають термоелектричними термометрами. Конструктивне оформлення термоелектричних термометрів різноманітне і залежить головним чином від умов їх використання. Термоелектричні термометри випускаються у захисних корпусах різної форми, з різною тепловою інерцією і різною глибиною занурення в контрольне середовище.

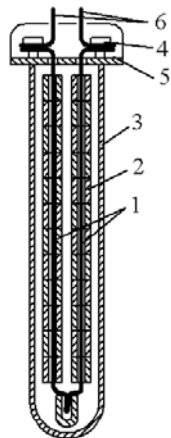


Рисунок 5.8 – Конструктивна схема термоелектричного термометра:

- 1 – термоелектроди;
- 2 – ізоляційні трубки;
- 3 – захисний чохол;
- 4 – з'єднувальні клеми;
- 5 – головка термометра;
- 6 – провідники до вимірювального приладу

5.4.3 Компенсація температури вільних кінців термопар

Якщо відомі контактні різниці потенціалів для різних температур одного кінця термопар, за умови, що інший кінець термопари має температуру 0°C , то результуюча термо-е.р.с. визначається з (5.6).

Якщо, навпаки, відома результуюча термо-е.р.с. для $t \neq 0^{\circ}\text{C}$, то контактна різниця потенціалів:

$$e(t;0) = E(t;t_0) + e(t_0;0). \quad (5.9)$$

Звідси, за градуювальними таблицями, визначивши поправку $e(t_0;0)$, можна знайти і температуру, яка визначається.

Температура t , якщо $t \neq 0^{\circ}\text{C}$ визначається наступним чином:

- 1) вимірюється результуюча термо-е.р.с. $E(t;t_0) = E(t;0)$;
- 2) визначається величина поправки $e(t_0;0)$ – термо-е.р.с., що відповідає температурі t_0 вільного кінця термопари;
- 3) за сумарною термо-е.р.с. $E(t;t_0) + e(t_0;0)$ за градуювальною таблицею визначається температура робочого кінця термопари.

Отже, щоб визначити температуру t необхідно знати температуру вільних кінців.

Для підключення вимірювального приладу до термопари часто необхідно використовувати подовжуючі провідники (рис. 5.9). Для того щоб не виникало похибки із-за різниці температур t_1 вільного кінця термопари та температури точки під'єднання приладу t_0 , використовується компенсаційний провід.

Компенсаційні проводи розвивають у з'єднаннях за невеликих температур (до $100 - 150^{\circ}\text{C}$) термо-е.р.с., рівну термо-е.р.с. термопари і є, по суті, продовженням її вільних кінців. Тільки термоелектроди із дорогих металів замінюють дешевшими компенсаційними проводами.

Компенсаційні проводи випускаються з жилами перерізом $0,2 - 2,5 \text{ мм}^2$, в різній ізоляції та з різним покриттям. Кожному матеріалу жил присвоєно певний колір обмотки або зовнішнього шару ізоляції. У деяких випадках під ізоляцією у проводі прокладається кольорова пізнавальна нитка.

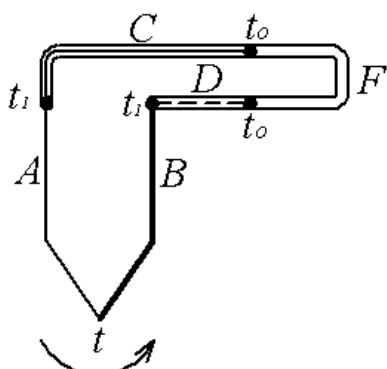


Рисунок 5.9 – Схема включення компенсаційних проводів C і D в коло термопари A і B

Термопари типу ТПР, ТВР не потребують компенсації термо-е.р.с. вільних кінців, так як нижня межа вимірювання лежить значно вище температури у зоні під'єднання приладу.

У виробничих умовах для автоматичного введення поправки на температуру вільних кінців використовують спеціальні електричні схеми.

5.5 Прилади для вимірювання термоелектрорушійної сили

Для вимірювання температури за допомогою термопар застосовуються різні методи та прилади, які можуть вимірювати величину термо-е.р.с. на вільних кінцях термопари. На практиці застосовуються два методи вимірювання: прямий, у якому використовуються мілівольтметри, та компенсаційний, у якому використовуються прилади з потенціометричною схемою вимірювання. Для контролю температурних параметрів технологічних процесів все частіше використовуються цифрові прилади з цифровим дискретним відліком.

5.5.1 Магнітоелектричні мілівольтметри

У магнітоелектричних мілівольтметрах використовується дія магнітного поля постійного магніту на провідники, якими протікає електричний струм (рис. 5.10).

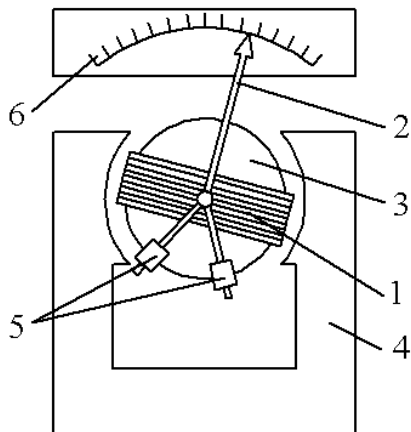


Рисунок 5.10 – Схема магнітоелектричного мілівольтметра:

- 1 – рамка з обмоткою;
- 2 – стрілка;
- 3 – нерухомий сердечник;
- 4 – постійний магніт;
- 5 – вантажик-балансири;
- 6 – шкала

Рамка підключається до електричного кола, в якому виконується вимірювання термо-е.р.с. Підключення здійснюється або через спіральні пружинки, або через розтяжки, якщо рамка закріплена на них.

Магнітоелектричний момент, що заставляє обертатись рамку зі стрілкою, Н·м:

$$M_i = 2r \ln Bi, \quad (5.10)$$

де $2r$ – ширина рамки, м;

l – активна довжина рамки (та, що у магнітному полі), м;

n – кількість витків рамки; B – магнітна індукція, $\text{H} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$;

i – сила струму у витках рамки, А.

Магнітоелектричному моменту протидіє пружний момент, що створюється спіральними пружинками або розтяжками, Н·м:

$$M_{np} = \frac{EJ_x}{L} \varphi, \quad (5.11)$$

де E – модуль пружності матеріалу, $\text{H} \cdot \text{m}^{-2}$;

J_x – геометрична характеристика перерізу пружного елемента, m^4 ;

L – розгорнута довжина пружного елемента, м;

φ – кут закручування (повороту рамки), рад.

Від зміни сили струму рамка буде обертатись до того часу, доки

магнітоелектричний момент не стане рівним протидіючому: $M_i = M_{np}$.

Схема підключення термопари до мілівольтметра показана на рисунку 5.11, де: R_M – опір мілівольтметра; R_{Π} – опір з'єднувальних проводів; R_y – зрівнюючий опір; R_D – додатковий опір. Така схема підключення мілівольтметра служить для зменшення похибки вимірювання. Опір R_M завжди виконують досить великим, включаючи додаткову манганінову котушку R_D послідовно з рамкою.

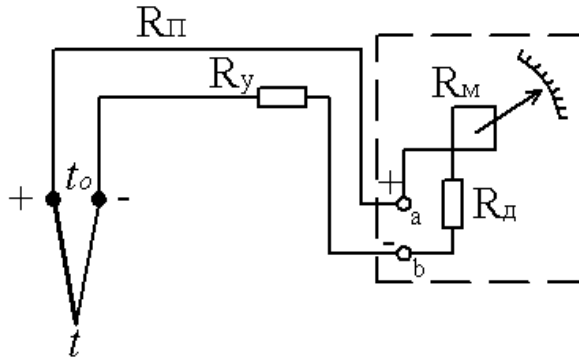


Рисунок 5.11 – Принципова схема термоелектричного термометра з використанням мілівольтметра

Точність показів дуже залежить від опору зовнішнього кола. Значення $R_{вн}$ повинне відповідати розрахунковому. Тому, опір зовнішнього кола після монтажу приладів підганяють з допомогою додаткової (зрівнюючої) манганінової котушки R_y . Розрахункова величина $R_{вн}$ у серійних приладах становить 0,6; 1,6; 5; 15; 25 Ом. Це значення опору наноситься на шкалу приладу.

5.5.2 Потенціометри

Принцип потенціометричного методу вимірювання оснований на рівноваженні (компенсації) термо-е.р.с., яка вимірюється, відомою різницею потенціалів, утвореною допоміжним джерелом струму.

Струм від допоміжного джерела E проходить колом, у яке між точками A і B включений компенсуючий змінний резистор R_{AB} (рис. 5.12). Різниця потенціалів між точкою A і будь-якою проміжною точкою D дивіжка резистора R_{AB} буде пропорційною опору резистора R_{AD} . Послідовно з термопарою включений чутливий мілівольтметр НП з "0" посередині шкали, який називається нуль-прилад або нуль-індикатор. Термопара підключена таким чином, що струм на ділянці R_{AD} протікає у тому ж напрямку, що й від допоміжного джерела.

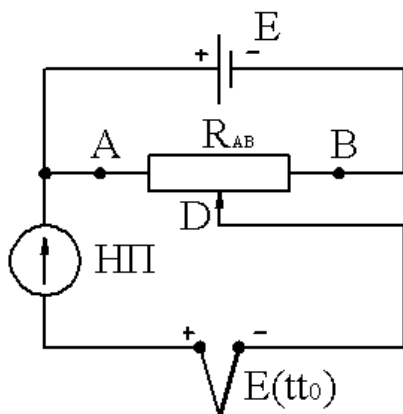


Рисунок 5.12 – Принципова схема потенціометра:

НП – нуль-прилад;

E – додаткове джерело живлення;

$E(tt_0)$ – термопара;

R_{AB} – змінний резистор

Пересуваючи контакт D можна знайти таке положення, за якого сила струму у колі буде рівна нулю – стрілка нуль-індикатора встановиться на відмітці «0».

Отже, термо-е.р.с. термопари визначається спадом напруги на ділянці змінного резистора і не залежить від опору НП та зовнішнього опору кола, а на змінному резисторі R_{AB} можна встановлювати шкалу, проградуєвану в мілівольтах або в градусах.

Вимірювання термо-е.р.с. компенсаційним методом залежить від постійності струму в колі змінного резистора.

Для вимірювання термо-е.р.с. з постійним значенням сили струму у компенсаційному колі використовується схема з трьома джерелами напруги: термопарою T , нормального елемента HE та гальванічного елемента E і, відповідно, з трьома електричними колами (рис. 5.13).

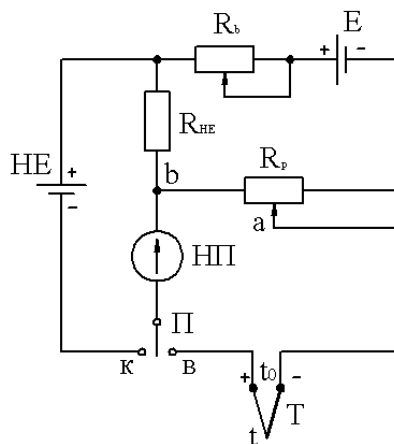


Рисунок 5.13 – Принципова схема потенціометра з постійною силою струму у компенсаційному колі

Нормальний елемент HE – це спеціальний прилад, який використовується у якості міри електрорушійної сили та характеризується великою постійністю е.р.с., яка розвивається у ньому (становить 1018,61 мВ). У сучасних приладах замість HE використовуються високостабілізовані джерела живлення.

Нормальний елемент HE призначається для встановлення постійного значення сили струму або для стандартизації струму у компенсаційному колі джерела E . Нуль-індикатор може по чергову підключатись або у коло HE , або у коло термопарою T . Стандартизація струму здійснюється компенсаційним методом. Для цього ставлять перемикач у положення "к", співставляючи напругу E_{HE} зі спадом напруги ΔU_{cn} на опорі R_{HE} . Якщо $E_{HE} \neq \Delta U_{cn}$, то, повертаючи движок R_b , доводять силу струму i до такого значення, за якого сила струму у колі нормального елемента буде рівна нулю.

Потім перемикач переводиться у положення "в" для вимірювання термо-е.р.с. термопарою. Переміщують движок опору R_p , добиваючись відсутності струму у колі термопарою. Це свідчить про те, що має місце повна компенсація е.р.с.

Величина термо-е.р.с. буде прямопропорційною опору ділянки ab :

$$E(tt_0) = iR_{ab} = \frac{E_{HE}}{R_{HE}} R_{ab} = kR_{ab}, \quad (5.12)$$

де $k = \text{const}$.

Движок резистора R_p оснащується шкалою, проградуєваною у градусах. Такий проградуєваний змінний резистор називається реохордом.

Компенсаційне вимірювання термо-е.р.с. термопари, що виконується потенціометрами, у порівнянні з прямим вимірюванням має дві основні переваги:

- відсутність у момент вимірювання струму в колі термопари;
- відсутність у вимірювальній схемі вимірювального приладу, бо гальванометр служить лише індикатором, що констатує відсутність струму.

7.5.3 Автоматичні потенціометри

Принципова відмінність автоматичних електронних потенціометрів – нуль-прилад замінений на електронний нуль-індикатор (рис. 5.14).

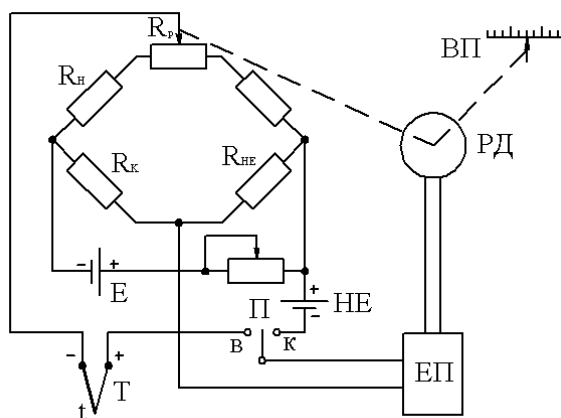


Рисунок 5.14 – Принципова схема електронного автоматичного потенціометра:

- РД – реверсивний двигун;
- ЕП – електронний підсилювач;
- ВП – відліковий пристрій

Вимірювальні схеми всіх автоматичних потенціометрів передбачають автоматичне введення поправки на температуру вільних кінців термопари. З цією метою у схему введено резистор R_k , виконаний з міді (або нікелю), який встановлюється у безпосередній близькості від клем підключення вільних кінців термопари або компенсаційних проводів. У промислових автоматичних вимірювальних потенціометрах (рис. 5.15) нормальний елемент не використовується.

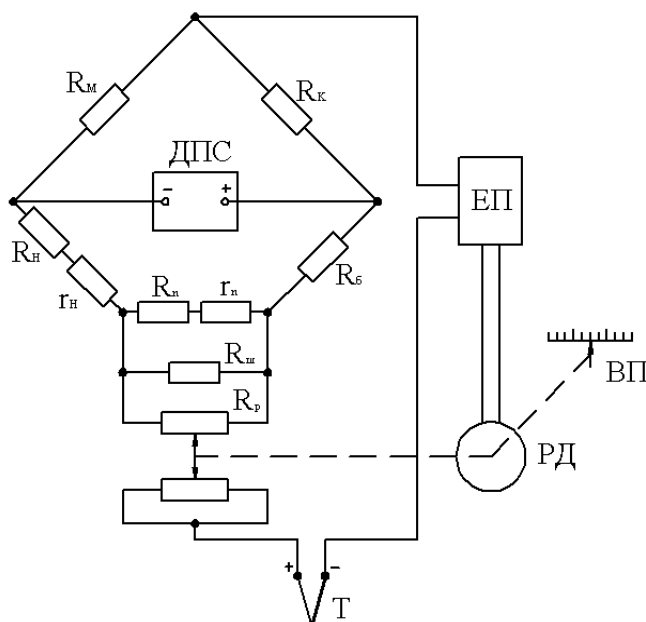


Рисунок 5.15 – Вимірювальна схема автоматичного електронного потенціометра зі стабілізованим джерелом живлення

У схему введено джерело стабілізованої напруги (ДПС), що забезпечує постійність струму у вимірювальній схемі.

У схемі (рис. 5.15) R_p – реохорд, паралельно якому, для забезпечення точного опору, включено шунт $R_{ш}$. Мідний резистор R_m служить для компенсації температури вільних кінців термопари T . Постійне значення робочого струму у компенсаційному колі встановлюється за величиною спаду напруги на резисторі R_k .

Для зміни меж діапазону вимірювання автоматичного потенціометра служать резистори (R_n, r_n) , (R_k, r_k) та R_6 .

Джерело постійного струму ДПС включене у діагональ вимірювальної схеми. Призначення решти елементів таке ж, як і у попередній схемі.

Автоматичні потенціометри є промисловими приладами високого класу точності і бувають стрілочними з візуальним відліком та самописними з записом на круговій або стрічковій діаграмі.

5.6 Електричні термометри опору

5.6.1 Матеріали для виготовлення та будова термометрів опору

Вимірювання температури термометрами опору ґрунтується на властивості провідників та напівпровідників змінювати свій електричний опір за зміни їх температури. Отже, опір провідника є деякою функцією його температури $R = f(t)$.

Для виготовлення чутливих елементів серійних термометрів використовуються чисті метали. До цих металів висуваються вимоги:

а) метал не повинен окислятися та вступати у хімічну реакцію з середовищем контролю;

б) температурний коефіцієнт електричного опору металу $\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{d\tau}$

повинен бути достатньо високим та незмінним; цей коефіцієнт прийнято визначати відношенням $\alpha_{0...100} = (R_{100} - R_0) / 100R_0$, де R_0 та R_{100} – опір зразка матеріалу за температури 0 та 100°C відповідно;

в) питомий електричний опір металу повинен бути достатньо високим;

г) зі зміною температури опір повинен змінюватись лінійно або по плавній кривій без різких відхилень.

Цим вимогам найбільш повно відповідають платина, мідь, нікель та залізо (таблиця 5.7).

Таблиця 5.7 – Основні характеристики матеріалів для термометрів опору

Матеріал	Температурний коефіцієнта, $1/^\circ\text{C}$	Питомий опір, ρ , Ом·мм ² /м	Діапазон практичного використання, °C
Платина	$3,9 \cdot 10^{-3}$	0,1	- 260 ÷ +750
Мідь	$4,26 \cdot 10^{-3}$	0,017	- 50 ÷ +180
Нікель	$(6,21-6,34) \cdot 10^{-3}$	0,118 – 0,138	-
Залізо	$(6,25-6,57) \cdot 10^{-3}$	0,055 – 0,061	-

Зміна опору платини виражається рівняннями:
у діапазоні температур від 0 до +650°C:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + bt^2), \quad (5.13)$$

у діапазоні від – 200 до 0°C:

$$R_t = R_0[1 + \alpha t + bt^2 + c(t - 100)t^3], \quad (5.14)$$

де a, b, c – постійні коефіцієнти, значення яких визначається під час градування термометра по точках кипіння кисню, води та сірки;

R_t, R_0 – опір платини за температури t та 0°C.

До переваг мідних термометрів ТСМ можна віднести: невисока вартість, простота отримання тонкого дроту в різній ізоляції, можливість отримання провідникової міді високої чистоти. Температурний коефіцієнт електричного опору провідникової міді лежить в межах від $4,2 \cdot 10^{-3}$ до $4,27 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Зміна опору міді виражається рівнянням:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t). \quad (5.15)$$

Конструктивно термометри опору виготовляються у стандартних корпусах, а чутливі елементи (рис. 5.16) поміщаються у захисних гільзах корпусів.

Для виготовлення термометрів опору використовуються також напівпровідникові елементи – оксиду деяких металів. Суттєва перевага напівпровідників – великий температурний коефіцієнт температурного опору (від $3 \cdot 10^{-2}$ до $4 \cdot 10^{-2} \text{ } 1/^\circ\text{C}$).

Залежність електричного опору напівпровідникового резистора від температури описується рівнянням:

$$R = A \exp(B/T) \quad (5.16)$$

або

$$\ln R = \ln A + B/T, \quad (5.17)$$

де A і B – постійні коефіцієнти, що залежать від фізичних властивостей матеріалу напівпровідника; T – абсолютна температура терморезистора.

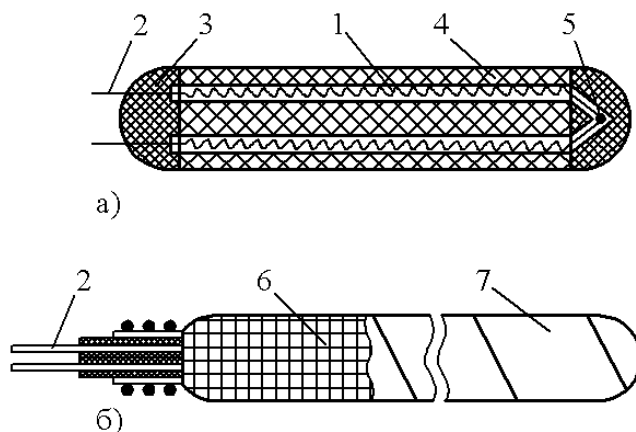


Рисунок 5.16 – Чутливі елементи платинового (а) та мідного (б) термометрів опору:

- 1 – платинова спіраль;
- 2 – виводи;
- 3 – термоцемент;
- 4 – керамічний каркас;
- 5 – з'єднання пайкою;
- 6 – безіндукційна мідна намотка;
- 7 – захисна фторопластова плівка

Для вимірювання температури найчастіше використовують напівпровідникові терморезистори типу ММТ-1, ММТ-4, КМТ-1, КМТ-4, у яких в робочих інтервалах температур опір змінюється за експоненціальним законом.

5.6.2 Логометри

Робота вторинних приладів для вимірювання температури, у випадку використання термометрів опору, зводиться до точного вимірювання активного електричного опору. Вимірювання опору на практиці виконується прямим методом – за допомогою логометрів, та нульовим методом або методом відхилення – за допомогою вимірювальних мостів.

Логометри – магнітоелектричні прилади, рухома частина яких складається з двох рамок, розташованих під деяким кутом (рис. 5.17) і поміщених у повітряний проміжок між полюсами постійного магніту і осердям. Протидіючий момент у логометрів, як і обертовий, створюється електричним полем однієї з його рамок, що є характерною особливістю цих приладів. Тому струмопроводи до рамок логометра не повинні створювати механічного протидіючого моменту, і стрілка відлікового пристрою у відключеному приладі може займати довільне положення.

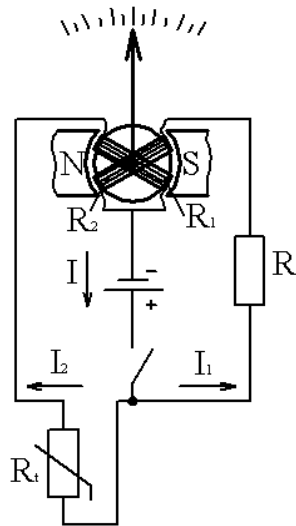


Рисунок 5.17 – Принципова схема логометра

Кут повороту такої рухомої системи є функцією відношення сили струму у обох рамках $\varphi = f(I_1 I_2)$. Обертові моменти рамок:

$$M_1 = c_1 B_1 I_1; M_2 = c_2 B_2 I_2. \quad (5.18)$$

На рисунку 5.18 подано принципову електричну схему логометра Л-64.

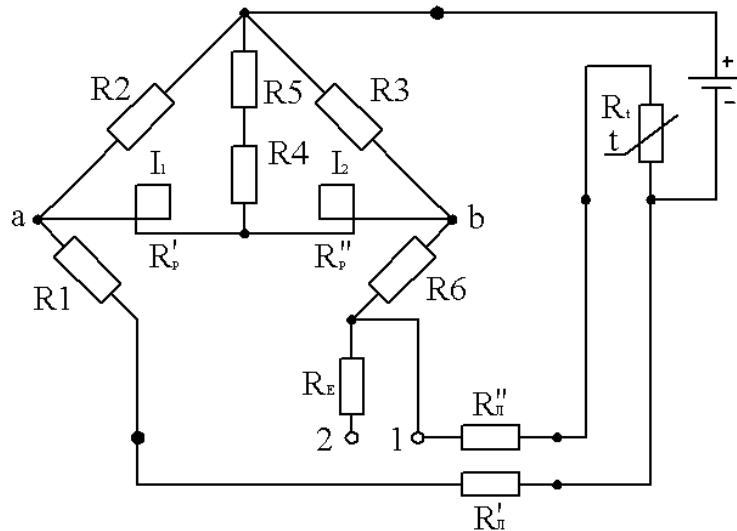


Рисунок 5.18 – Електрична схема логометра Л-64

Рамки логометра включені послідовно в діагональ моста, виконаного з постійних манганінових резисторів $R1$, $R2$, $R3$, $R6$ та термометра опору R_t . Середня точка між рамками з'єднана через послідовно включені мідний резистор $R5$ та манганіновий $R4$ з вершиною моста, до якої підводиться один провід джерела живлення; другий провід під'єднується до протилежної вершини. Резистор $R4$ служить для зміни кута відхилення рухомої системи, а $R5$ – для температурної компенсації.

Розрахунковий зовнішній опір логометра 2,5 або 7,5 Ом. Підгонка зовнішнього опору $R_{л}'$ та $R_{л}''$ виконується роздільно для кожного проводу.

5.6.3 Мостові вимірювальні схеми

У якості вимірювальних приладів з термометрами опору використовують врівноважені мости та логометри, а з напівпровідниковими терморезисторами – неврівноважені мости.

Врівноважені мости поділяються на лабораторні (неавтоматичні) та промислові (автоматичні). Автоматичні можуть бути показуючими, реєструючими та регулюючими.

Принципова схема врівноваженого моста постійного струму приведена на рисунку 5.19. Міст складається з двох резисторів R_1 та R_3 з постійними і рівними опором, змінного резистора R_2 та термометра R_t .

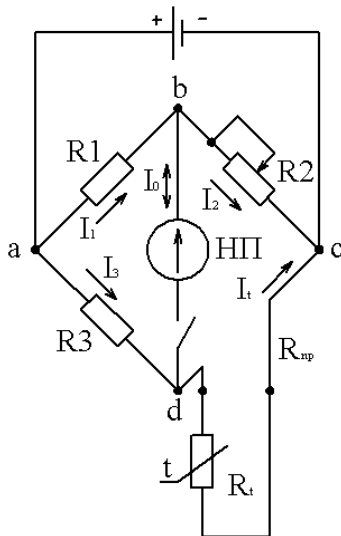


Рисунок 5.19 – Схема врівноваженого моста з термометром опору

До опору термометра додаються опори $2R_{np}$ двох під'єднувальних проводів. У одну діагональ (ac) моста включене джерело постійного струму, в іншу (bd) – нуль-прилад НП.

У момент встановлення рівноваги моста, яка досягається переміщенням движка резистора $R2$, сила струму у діагоналі моста $I_0 = 0$. У цьому випадку потенціали на вершинах моста b та d рівні, струм від джерела живлення розділяється на два розгалуження I_1 та I_3 , спад напруги на резисторах $R1$ та $R3$ однаковий, тобто:

$$R_1 I_1 = R_3 I_3, \quad (5.19)$$

а опір термометра буде визначатися як:

$$R_t = R_2 \frac{R_3}{R_1} - 2R_{np}. \quad (5.20)$$

У випадку, коли коливання температури під'єднувальних проводів є значними, застосовується трьохпровідна система під'єднання, яка полягає у тому, що одну з вершин моста переносять безпосередньо до головки термометра (рис. 5.20). У цьому випадку опір одного проводу R_{np} додається до опору R_t , а опір другого проводу – до змінного опору R_2 .

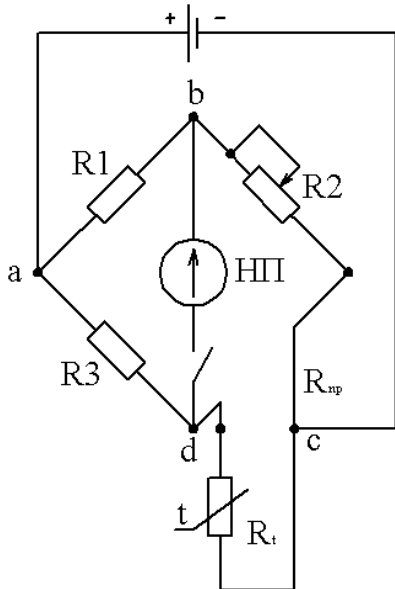


Рисунок 5.20 – Трьохпровідна схема включення термометра опору у вимірювальний міст

У автоматичних врівноважених мостах використовується вимірювальна схема чотирьохплечого моста. Движок змінного опору, який називається реохордом, переміщується автоматично, а не вручну. Ця схема, яка забезпечує високу точність вимірювання, дозволяє виконувати шкали моста односторонні, безнульові та двосторонні.

Як видно зі схеми (рис. 5.21), термометр опору підключається до моста за трипровідною схемою. У цьому випадку опір провідників, що служать для під'єднання термометра до моста, розподіляється між двома суміжними плечами моста R_t та $R1$. Завдяки цьому досягається значне зниження значення додаткової похибки, викликаній можливою зміною опору під'єднувальних провідників внаслідок зміни температури оточуючого середовища.

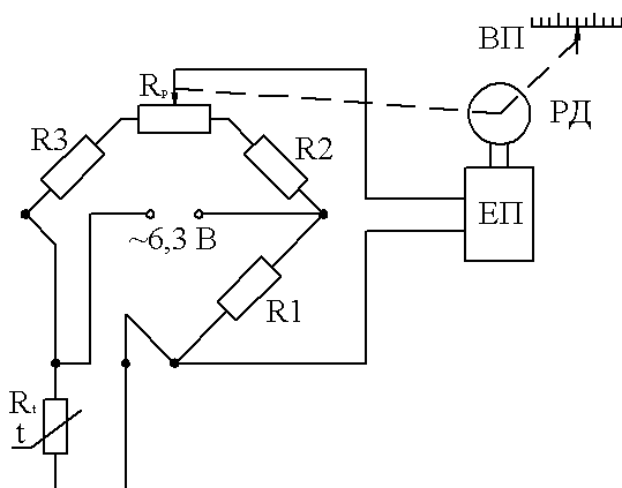


Рисунок 5.21 – Схема автоматичного врівноваженого моста на змінному струмі з трипровідним підключенням термометра опору

Номинальне сумарне значення опору проводів, які з'єднують термометр з мостом, встановлено рівним 5 Ом. Таким чином, опір кожного провідника, а відповідно, і спеціальних підгоночних резисторів, які включаються послідовно з провідниками, рівний 2,5 Ом з допустимим відхиленням від номіналу не більше $\pm 0,01$ Ом.

Резистори R_1 , R_2 , R_3 вимірювальної схеми з постійними опорами виконані з манганіну, а реохорд R_p – з манганіну або спеціального сплаву. Вимірювальна схема живиться змінним струмом напругою 6,3 В. Напруга розбалансу подається на вхід електронного підсилювача ЕП і підсилюється до величини, достатньої для приведення в дію реверсивного електродвигуна РД. Ротор двигуна, який обертається в ту або іншу сторону, через систему передач переміщує движок реохорда, врівноважуючи схему, а також переміщує стрілку відлікової пристрою ВП.

5.7 Пірометри випромінювання

5.7.1 Теоретичні основи безконтактного вимірювання температури

Принцип дії пірометрів випромінювання ґрунтується на використанні теплового випромінювання нагрітих тіл. Основні переваги пірометрів:

- а) вимірювання виконується безконтактним методом;
- б) верхня межа вимірювання теоретично необмежена;
- в) є можливість вимірювання температури полум'я та високих температур газових потоків на великих швидкостях.

Променева енергія виділяється нагрітим тілом у вигляді хвиль різної довжини. За порівняно низьких температур (до 500°C) нагріте тіло випромінює інфрачервоні промені, які не сприймаються людським оком. З підвищенням температури зростає спектральна енергетична яскравість (СЕЯ), тобто випромінювання певної довжини хвилі (яскравості), а також сумарне (інтегральне випромінювання). У відповідності до цих властивостей пірометри випромінювання поділяються на квазімонохроматичні, спектральних відношень та повного випромінювання.

Теоретично можна обґрунтувати лише явище випромінювання абсолютно чорного тіла, коефіцієнт випромінювання якого приймають рівним одиниці. Всі реальні фізичні тіла наділені властивістю відбивання частини променів і їх коефіцієнт випромінювання менше одиниці. Шкали пірометрів градуують за випромінюванням абсолютно чорного тіла.

Для абсолютно чорного тіла СЕЯ описується рівнянням Віна:

$$E_{0\lambda} = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}, \quad (5.21)$$

де $E_{0\lambda}$ – СЕЯ абсолютно чорного тіла для хвилі довжиною λ ;

T – абсолютна температура тіла, К;

C_1 і C_2 – константи випромінювання, числові значення яких залежать від прийнятої системи одиниць.

$$C_1 = 2\pi^5 h c^2, \quad (5.22)$$

де \hbar – постійна Планка;
 c – швидкість світла.

$$C_2 = Nhc / R, \quad (5.23)$$

де N – постійна Авогадро;

R – універсальна газова постійна.

Для температур вищих 3000 К СЕЯ абсолютно чорного тіла описується рівнянням Планка:

$$E_{0\lambda} = C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1}. \quad (5.24)$$

З підвищенням температури абсолютно чорного тіла область спектру, наділена максимальною енергією, зміщується у напрямку малих довжин хвиль (рис. 5.22). Це явище приводить до поступової зміни кольору тіла та зростання його яскравості. Кількість енергії, що випромінюється абсолютно чорним тілом, характеризується площею, обмеженою між віссю абсцис та кривою розподілу енергії по спектру.

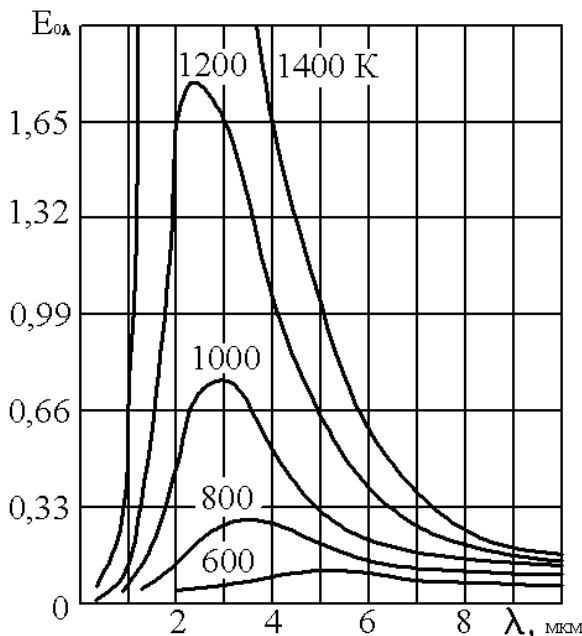


Рисунок 5.22 – Залежність спектральної енергетичної яскравості (СЕЯ) абсолютно чорного тіла $E_{0\lambda}$ від довжини хвилі λ

Спектральний розподіл енергії випромінювання відбувається згідно з законом зміщення Віна: $\lambda_{max}T = b$, де λ_{max} – довжина хвилі, що відповідає максимальному випромінюванню за даної температури T ; $b = 2896$ мкм·К – стала. Закон зміщення Віна, який отримується диференціюванням рівняння (5.24) по λ та прирівнюванням похідної нулю, може бути застосованим і до фізичних тіл.

5.7.2 Квазімонохроматичні пірометри

Принцип дії квазімонохроматичних пірометрів оснований на порівнянні яскравості монохроматичного випромінювання двох тіл: еталонного та тіла, температуру якого вимірюють. У якості еталонного тіла використовується нитка лампи розжарення, яскравість випромінювання якої регулюється.

Найбільш поширеним приладом цієї групи є квазімонохроматичний (оптичний) пірометр з ниткою розжарення, яка зникає (рис. 5.23).

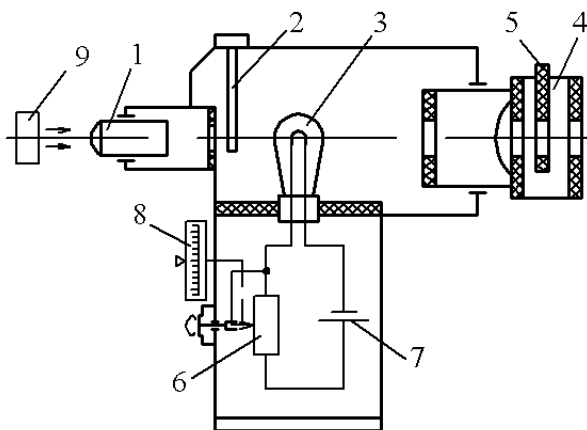


Рисунок 5.23 – Схема оптичного пірометра з ниткою, яка зникає:

- 1 – об'єктив;
- 2 – світлофільтр;
- 3 – лампа розжарення;
- 4 – окуляр;
- 5 – червоний світлофільтр;
- 6 – реостат;
- 7 – джерело струму;
- 8 – відліковий пристрій;
- 9 – об'єкт вимірювання

Пірометр складається з телескопічної трубки з об'єктивом 1 та окуляром 4. Всередині трубки у фокусі лінзи об'єктива знаходиться лампа розжарювання 3 з підковоподібною ниткою. Лампа живиться від джерела струму 7 через реостат 6. Движок реостата 6 механічно з'єднаний з обертовою шкалою 8 відлікового пристрою. Для отримання монохроматичного світла окуляр оснащено червоним світлофільтром 5, який пропускає промені тільки певної довжини хвилі. В об'єктиві розміщено сірий поглинаючий світлофільтр, що служить для розширення меж вимірювання.

Об'єктив та окуляр можуть переміщуватись вздовж осі, що дозволяє отримати різке зображення розжареного тіла 9 та нитки. Після включення джерела струму, реостатом регулюється яскравість нитки до того моменту, доки середня її частина не зіллється з яскравістю об'єкта контролю – нитка стає невидимою на фоні розжареного тіла. За положенням шкали у цей час проводиться відлік температури тіла.

Стабільність показів пірометра з ниткою, яка зникає, залежить головним чином від постійності характеристик вимірювального приладу і лампи. Лампа з вольфрамовою ниткою протягом тривалого періоду зберігає властиву їй залежність яскравості нитки від сили струму, що через неї протікає, якщо температура не перевищує 1400°C. Нагрівання до температури вище 1400°C приводить до розпилення вольфрамової нитки та зміни її опору, а виділений вольфрам осідає на стінках колби лампи і утворює темний наліт.

Межі вимірювання підвищують введенням сірого світлофільтра, який з однаковою мірою поглинає енергію хвиль всіх довжин. Скло сірого світлофільтра вибирається такої оптичної густини, щоб за яскравісної температури випромінювача вище 1400°C нитка лампи розжарювалась до температури не вище 1400°C. У відповідності з цим мілівольтметр оснащують двома шкалами: верхньою – для вимірювання температур від 800 до 1400°C з виведеним сірим світлофільтром та нижньою – для температур вище 1300°C з виведеним сірим світлофільтром.

5.7.3 Пірометри повного випромінювання та спектрального відношення

Пірометри повного випромінювання вимірюють температуру за потужністю випромінювання нагрітого тіла. У радіаційних пірометрах, як їх ще називають, використовується весь спектр випромінювання – промені всіх довжин хвиль, теоретично від $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$.

Умовна температура реального тіла, виміряна пірометром повного випромінювання, чисельно рівна температурі абсолютно чорного тіла, за якої інтегральне випромінювання обох тіл однакове.

Інтегральне випромінювання реального тіла, нагрітого до температури T :

$$E = \varepsilon C_0 (T / 100)^4, \quad (5.25)$$

де $\varepsilon = E / E_0$ – ступінь чорноти тіла для всіх довжин хвиль.

Інтегральне випромінювання абсолютно чорного тіла при співпадінні його температури з T_y :

$$E_0 = C_0 (T_y / 100)^4. \quad (5.26)$$

Порівнявши праві частини рівнянь (5.25) і (5.26) з врахуванням, що $E = E_0$, отримується формула для визначення дійсної температури реального тіла:

$$T = T_y \sqrt[4]{1 / \varepsilon}, \quad (5.27)$$

де T_y – умовна температура, виміряна пірометром повного випромінювання.

Пірометр оснащується оптичною системою (лінзою, дзеркалом), яка концентрує промені, що випромінюються нагрітим тілом, на теплоприймачі. Теплоприймач складається з мініатюрної термобатарей (з декількох термопар), термоопору або напівпровідникового терморезистора. Термобатарей промислового пірометра РАПІР (рис. 5.24) складається з десяти послідовно з'єднаних хромель-копелевих термоелектричних перетворювачів – термопар.

Для збільшення теплосприймаючої поверхні робочі спаї 1 термопар, виконані у формі невеличких трикутників, зачорнені і наклеєні на тонку слюдяну пластинку. Вільні кінці термопар приварені до тонких металевих пластинок 2, закріплених на затиснутому між двома тонкими кільцями у корпусі телескопа, слюдяному кільці 3.

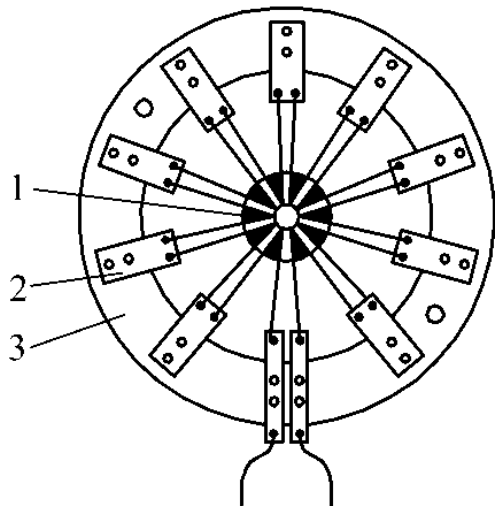


Рисунок 5.24 – Термобатарей пірометра РАПІР:

- 1 – робочий спай;
- 2 – контактна пластинка;
- 3 – плата

Пірометр з термобатареею (рис. 5.25) складається з телескопа з лінзою 1 об'єктива та лінзою 2 окуляра. На шляху променів лінзи 1 встановлена діафрагма 3, а в фокусі об'єктиву – термоелектрична батарея 4. Перед окуляром поміщено кольорове скло 5 для захисту очей під час юстирування пірометра.

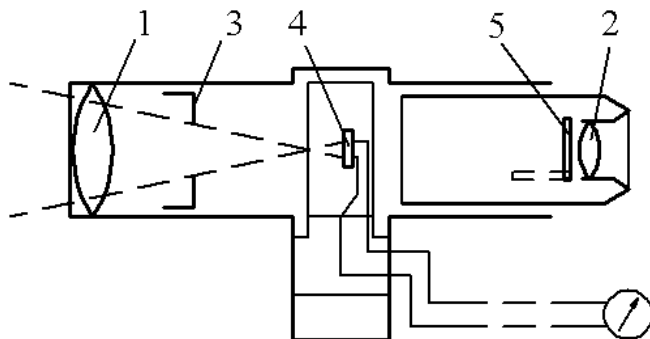


Рисунок 5.25 – Схема пірометра повного випромінювання з термобатареею:

- 1 – об'єктив;
- 2 – окуляр;
- 3 – діафрагма;
- 4 – термоелектрична батарея;
- 5 – кольорове скло;
- 6 – фільтр

Пірометрами повного випромінювання, у яких в якості чутливого елемента використовуються термометри опору, можна вимірювати порівняно низькі температури, наприклад, від +20 до +100 °С.

Металевий корпус з приймачем випромінювання, оптичною системою та іншими додатковими пристроями називається телескопом радіаційного пірометра. Практично оптична система радіаційних пірометрів дещо обмежує пропускання довгих хвиль. У скла коефіцієнт пропускання хвиль різко зменшується для довжини хвиль $\lambda \approx 2,5$ мкм, досягаючи нульового значення для $\lambda \geq 3$ мкм. Оптичний кварц нормально пропускає хвилі довжиною $\lambda \approx 3,5$ мкм, після чого коефіцієнт пропускання хвиль знижується, досягаючи нуля для $\lambda \geq 4,2$ мкм. Для вимірювання низьких температур, близьких до 100 °С, коли інтенсивність випромінювання коротких хвиль з довжиною $\lambda < 1,0 - 1,5$ мкм, стає дуже малою і інтегральне випромінювання визначається довгохвильовою частиною спектру, для оптичних систем використовуються інші матеріали, наприклад, синтетичний фтористий літій. Пластина з цього матеріалу товщиною 2 мм має межу пропускання $\lambda \approx 9$ мкм.

У якості вторинних вимірювальних приладів застосовують мілівольтметри, автоматичні потенціометри або врівноважені мости.

У пірометрах спектрального відношення (колірних) визначається відношення СЕЯ реального тіла у променях двох попередньо вибраних довжин хвиль, тобто, покази пірометра є функцією $f(E_{\lambda_1}/E_{\lambda_2})$. Це відношення для кожної температури різне, але достатньо однозначне.

У більшості випадків для реальних тіл криві $E_\lambda = f(\lambda)$ для різних температур повністю подібні кривим для абсолютно чорного тіла, тому практично не вимагається вводити поправки на неповноту випромінювання, що є основною перевагою колірних пірометра. Більша частина конструкцій колірних пірометрів основана на визначенні кольору тіла, температура якого вимірюється, за відношенням енергетичних яскравостей для двох довжин хвиль, не дуже близьких одна до одної у видимій частині спектру. Щоб

уникнути залежності результатів вимірювання від суб'єктивних особливостей спостерігача, у колірних пірометрах для вимірювання відношення енергетичних яскравостей використовуються фотоелементи.

Випромінювання, що вимірюється, через захисне скло 1 (рис. 5.26) та об'єktiv 2 попадає на фотоелемент 4. Між об'єktivом та фотоелементом встановлено обтюратор 3, що обертається синхронним двигуном. У дисковому обтюраторі виконано два отвори, які закриті світлофільтрами: один червоним Ч, інший – синім С. Фотоелемент поміщений у термостат.

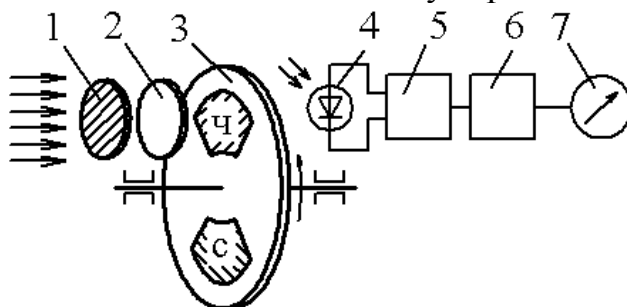


Рисунок 5.26 – Схема пірометра спектрального відношення з фотоелементом: 1 – захисне скло; 2 – об'єktiv; 3 – обтюратор; 4 – фотоелемент; 5 – підсилювач; 6 – логарифмуючий пристрій; 7 – мілівольтметр

Електричний струм, напруга якого пропорційна відповідним СЕЯ, попередньо підсилюється підсилювачем 5 і перетворюється логарифмуючим пристроєм 6 у постійний струм: сила струму залежить від $1/T$. Струм вимірюється мілівольтметром 7.

Межі вимірювання – від 1400 до 2500°С, основна похибка не перевищує $\pm 1\%$ від верхньої границі вимірювання.

Застосовуються також колірні пірометри з диференціальною вимірювальною схемою, з використанням двох фотоелементів.

5.8 Цифрові прилади для вимірювання температури

У сучасних умовах для вимірювання температури широко використовуються цифрові вимірювальні прилади. Ці прилади є переважно багатофункціональними, можуть використовуватись для вимірювання температури та інших фізичних величин. Можуть працювати у комплекті з термоелектричними перетворювачами, термометрами опору або сприймати уніфікований електричний сигнал. Часто використовуються для автоматизації різних технологічних процесів як регулятори. На виході можуть реалізовувати дво- та трипозиційне дискретне регулювання або ПІД-закон регулювання. Можна використовувати у комплекті з ПК – протокол MODBUS, інтерфейс RS232 або RS485. Прилади дозволяють архівування результатів вимірювання до 10 – 20 тисяч результатів.

Цифрові прилади використовуються як для контактних, так і безконтактних методів вимірювання температури.

Отримують широке застосування і цифрові прилади, які прийнято

називати інтелектуальними давачами.

До таких інтелектуальних давачів останнього покоління відноситься вимірювальний перетворювач температури SITRANS TF2.

Прилад SITRANS TF2 (рис. 5.27) – це компактний вимірювальний перетворювач температури з цифровим дисплеєм та термометром опору Pt100. Призначення приладу – індикація та контроль температури, що вимірюється на технологічній лінії за місцем встановлення, а також дистанційна передача сигналу вимірювальної інформації на відстань.

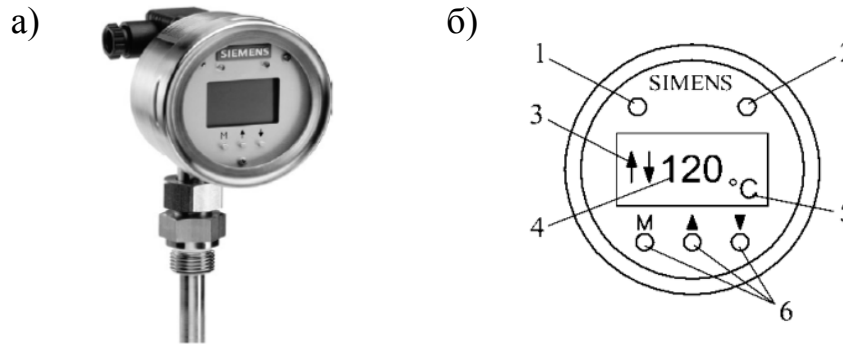


Рисунок 5.27 – Загальний вигляд (а) і передня панель (б) приладу TF2:

1 – зелений світлодіод; 2 – червоний світлодіод; 3 – індикація виходу за верхнє і нижнє граничне значення; 4 – індикація значення параметра; 5 – індикація одиниць вимірювання; 6 – клавіші управління

Вимірювальний перетворювач температури SITRANS TF2 об'єднує три компоненти в одному приладі:

- а) термометр опору Pt100 в захисній трубці із нержавіючої сталі;
- б) корпус із нержавіючої сталі з високим класом захисту;
- в) вбудований мікропроцесорний вимірювальний перетворювач з дисплеєм на рідких кристалах.

Діапазон вимірювання приладу – температура від -50 до $+200^{\circ}\text{C}$.

Вихід: електричний уніфікований сигнал $4\dots 20$ мА.

Абсолютна похибка за температури навколишнього середовища в межах $(23\pm 5)^{\circ}\text{C}$ складає: $< \pm(0,45^{\circ}\text{C} + 0,2\%)$ від верхнього значення встановленого діапазону. Час одного циклу вимірювання ≤ 100 мс.

Основні переваги приладу SITRANS TF2:

- висока точність вимірювання та індикація з роздільною здатністю $1/100^{\circ}\text{C}$ на всьому діапазоні вимірювання;
- можливість встановлення довільних діапазонів вимірювання в межах від -50 до $+200^{\circ}\text{C}$;
- сигналізація ($+/-$) про перевищення заданого граничного значення температури на дисплеї, а також відповідного світлового індикатора.

Корпус SITRANS TF2 ($\varnothing 80$ мм) виготовлений із інструментальної сталі та оснащений захисним склом. У захисну трубу із інструментальної сталі з різьбовим з'єднанням вмонтований і термометр опору Pt100. У стандартному виконанні довжина захисної труби складає 170 мм.

На зворотній стороні корпусу розміщені клеми для підключення

живлення вихідного навантаження, яке включається за схемою струмової петлі 4...20 мА.

На передній панелі корпусу під захисною скляною кришкою знаходиться п'ятирозрядний рідкокристалічний дисплей (рис. 5.27, б). Під дисплеєм розташовані три клавіші конфігурування SITRANS TF2. Вище над дисплеєм розташовані один зелений та один червоний світлодіоди для індикації виходу значення контрольованої температури за встановлені межі регулювання.

Первинний вимірювальний перетворювач Pt100, що поміщений у контрольне середовище, отримує живлення від стабілізованого джерела струму I_k (рис. 5.28).

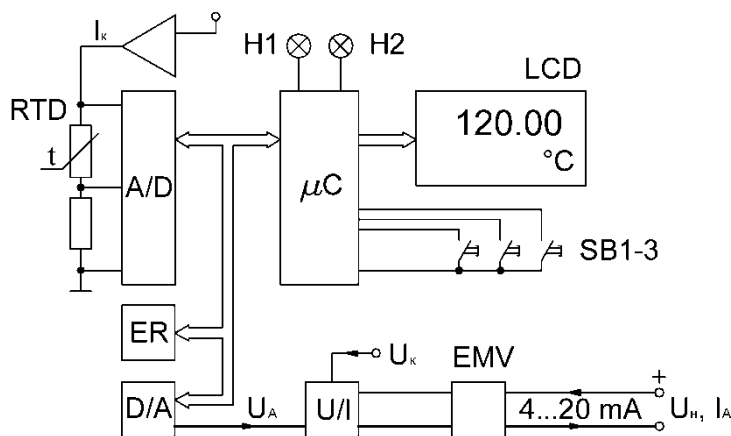


Рисунок 5.28 – Структурна схема перетворювача SITRANS TF2

Спад напруги на термоопорі Pt100 відповідає вимірюваній температурі. Аналого-цифровий перетворювач (A/D) перетворює спад напруги у цифровий сигнал. У мікроконтролері (μC) цифровий сигнал лінеаризується та відтворюється у числовій формі на дисплеї (LCD) у відповідності з вибраною одиницею вимірювання та встановленим діапазоном. Ці дані програмуються клавішами SB1-3 заздалегідь та зберігаються у блоці постійної пам'яті (ER). Вимірювальний перетворювач TF2 включає блоки і вузли (рис. 5.28):

Вхід: *RTD* – термометр опору Pt100; I_k – стабілізоване джерело струму; *A/D* – аналого-цифровий перетворювач.

Вихід: *D/A* – цифро-аналоговий перетворювач;

U/I – перетворювач напруги в струм, який живиться від стабілізованого джерела напруги та перетворює напругу ЦАП в уніфікований вихідний сигнал по струму (4...20 мА);

EMV – вихідний каскад з захисними компонентами, який об'єднує струм живлення з уніфікованим вихідним сигналом по струму;

U_n – джерело живлення перетворювача (+12 В);

I_A – уніфікований вихідний сигнал по струму (він же струм споживання).

Керування та індикація: *SB1-3* – конфігурування режимів роботи перетворювача; *LCD* – індикація вимірюваних величин з одиницями вимірювання; *H1* (зелений світлодіод) – індикація нормального режиму роботи; *H2* (червоний світлодіод) – індикація повідомлень про помилки та сигналізація про вихід параметру за встановлені межі.

Мікроконтролер: ER (EEPROM) – запам'ятовуючий пристрій для всіх параметрів; μC – функції обчислення та контролю мікроконтролера.

Основною перевагою перетворювача Sitrans TF2 є двопровідна схема живлення, у якій об'єднано коло живлення перетворювача з одночасною передачею по ньому сигналу вимірювальної інформації – вихідного уніфікованого аналогового сигналу струму 4...20 мА, який відповідає значенню вимірюваної температури. Тобто, для початкового значення вимірюваної температури схема перетворювача споживає струм 4 мА зі сталою напругою 12...30 В. У кінці діапазону вимірювання – перетворювач споживає струм 20 мА у тих же межах напруги живлення.

5.9 Тепловізори

Тепловізор (інфрачервона камера) – це оптико-електронний безконтактний вимірювальний прилад, що працює в інфрачервоній області електромагнітного спектра, який «переводить» у видиму область спектра власне теплове випромінювання фізичних об'єктів. Тепловізор може використовуватися як прилад для безконтактного вимірювання температури фізичних об'єктів і температурних полів.

Сучасний тепловізор має досить просту будову: об'єктив, тепловізійну матрицю (чутливий елемент) і електронний блок обробки сигналу. Матриця – це ґратка мініатюрних детекторів, що сприймає інфрачервоні сигнали і перетворює їх в електричні імпульси, які після підсилення перетворюються у відеосигнал. Розмір фотоелектричних матриць у середньому 640×480 пікселів. Тепловізори поділяють на дві категорії: з матрицею з охолодженням і без охолодження. Простота і відносно невисока вартість тепловізорів без охолодження дозволили їх масове використання.

На рисунку 5.29 наведено узагальнену функціональну схему тепловізора з фокальною ІЧ-матрицею. Принцип роботи тепловізорів полягає в тому, що вони "бачать" не відбите інфрачервоне випромінювання, а власне випромінювання об'єктів. Кожне нагріте тіло випускає теплове випромінювання, інтенсивність і спектр якого залежать від властивостей тіла і його температури.

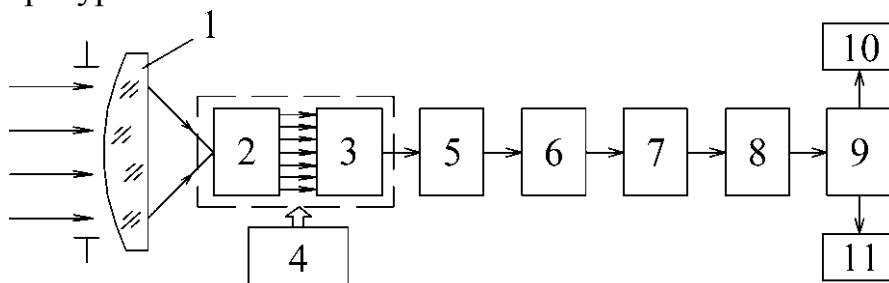


Рисунок 5.29 – Узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною ІЧ-матрицею: 1 – оптична система; 2 – фокальна матриця із підсилювачами; 3 – мультиплексор; 4 – система охолодження; 5 – коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів; 6 – аналого-цифровий перетворювач; 7 – цифровий коректор неоднорідності; 8 – коректор; 9 – формувач зображення; 10 – дисплей; 11 – цифровий вихід

Принцип дії тепловізора такий: інфрачервоне (теплове) випромінювання від досліджуваного об'єкта через оптичну систему передається на приймач – неохолоджувану матрицю термодетекторів. Далі отриманий відеосигнал за допомогою електронного блока вимірювання, реєстрації і математичної обробки оцифровується і відтворюється на екрані комп'ютера або дисплеї монітора.

Тобто фізична картина фотоефекта така: ІЧ-фотони, потрапляючи на поверхню напівпровідника зі звуженою зоною чутливості (*HgCdTe*, *InSb*), "переводять" носіїв заряду зі зв'язаного стану у вільний. Їх кількість пропорційна інтенсивності теплового випромінювання об'єкта. Матриця фотоелектричних детекторів, яка встановлена у тепловізорі, обов'язково повинна охолоджуватися, інакше власні теплові коливання ґратки напівпровідника викликають настільки інтенсивне вивільнення носіїв заряду, що на його фоні генерація носіїв ІЧ-випромінювання стає просто непомітною.

Головний елемент тепловізорів – об'єктив, для виготовлення якого використовується чистий германій. Вартість об'єктива становить приблизно 45% вартості всього приладу, ще 45% – матриця.

Питання для самоконтролю

1. На яких теоретичних засадах будуються температурні шкали?
2. Які термометричні властивості речовин знайшли найбільше застосування у промислових засобах вимірювання температури?
3. Які вимірювальні засоби використовуються для вимірювання температури?
4. Яка термометрична речовина може використовуватись у рідинних скляних термометрах розширення?
5. На чому ґрунтується дія термометрів розширення?
6. Яким чином виконано термочутливий елемент біметалевого термометра?
7. Які робочі речовини застосовуються у манометричних термометрах?
8. Який фізичний ефект покладено в основу роботи термопар?
9. На чому ґрунтується потенціометричний метод вимірювання е.р.с.?
10. Що служить матеріалом для виготовлення термометрів опору?
11. Які вторинні прилади можуть використовуватись в комплекті з термометрами опору?
12. Як поділяються і чим відрізняються пірометри випромінювання?
13. На чому ґрунтується принцип безконтактного вимірювання температури – робота пірометрів?
14. Від чого залежить стабільність показів оптичного пірометра з ниткою, яка зникає?
15. Який спектр випромінювань використовується у радіаційних пірометрах?
16. Що таке тепловізор і на чому ґрунтується його дія?
17. Що є головним елементом тепловізорів?

ТЕМА 6 МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КІЛЬКОСТІ ТА ВИТРАТ

План

- 6.1 Загальні відомості про вимірювання витрат рідин і газів.
- 6.2 Вимірювання витрат за перепадом тиску.
- 6.3 Витратоміри постійного перепаду тиску.
- 6.4 Лічильники кількості витрат.
- 6.5 Ультразвукові витратоміри.

6.1 Загальні відомості про вимірювання витрат рідин і газів

Кількість речовини – рідини або газу, яка проходить через переріз трубопроводу за одиницю часу, або за деякий проміжок часу, прийнято називати витратами. Кількість речовини виражається в одиницях об'єму – метр кубічний (м^3) і літр (л), або в одиницях маси – кілограм (кГ) і тонна (т).

Витрати вимірюються витратомірами та лічильниками кількості.

Лічильники кількості визначають кількість речовини за інтервал часу між двома відліками, тобто вимірювати об'ємні витрати.

Витратоміри дозволяють визначати значення витрат у будь-який момент часу, тобто вимірювати миттєві витрати. Миттєві витрати вимірюються в $\text{м}^3/\text{с}$ або $\text{кГ}/\text{с}$. Якщо витратомір оснастити інтегруючим пристроєм, то він буде виконувати функції витратоміра і лічильника кількості.

За методом вимірювання витратоміри можна поділити на наступні основні групи:

- пневматичні або напірні – вимірювання витрат виконується за швидкістю потоку в одній або декількох точках перерізу трубопроводу;
- змінного перепаду тиску – вимірювання витрат виконується за перепадом тиску на місцевому звуженні потоку речовини;
- постійного перепаду тиску або обтікання – вимірювання витрат виконується за перерізом потоку біля рухомого елемента, що обтікається вимірюваною речовиною;
- електромагнітні або індукційні – вимірювання витрат виконується за е.р.с., що індукується електропровідною рідиною, яка перетинає магнітне поле;
- ультразвукові – вимірювання витрат виконується за зміщенням звукових коливань рухомою речовиною;
- тахометричні – вимірювання витрат виконується за швидкістю обертання ротора, крильчатки або диска, розташованих у потоці речовини.

6.2 Вимірювання витрат за перепадом тиску

Найпоширенішим методом вимірювання миттєвих витрат рідин та газів є метод змінного перепаду тиску. Вимірювання витрат за цим методом ґрунтується на вимірюванні потенційної енергії речовини, що протікає через місцеве звуження у трубопроводі. У вимірювальній техніці в якості звужуючих

пристроїв використовуються діафрагми, сопла та сопла Вентурі.

У якості звужуючого пристрою найчастіше використовується діафрагма. Діафрагма (рис. 6.1) виконується у вигляді тонкостінного диска, встановленого в трубопроводі так, щоб отвір у диску був концентричним до внутрішнього контуру перерізу трубопроводу.

Звуження потоку починається до діафрагми; потім, на деякій відстані за нею, завдяки сил інерції потік звужується до мінімального перерізу d_2 , а далі поступово розширюється до повного перерізу трубопроводу. Перед діафрагмою та за нею утворюються зони з вихровим рухом.

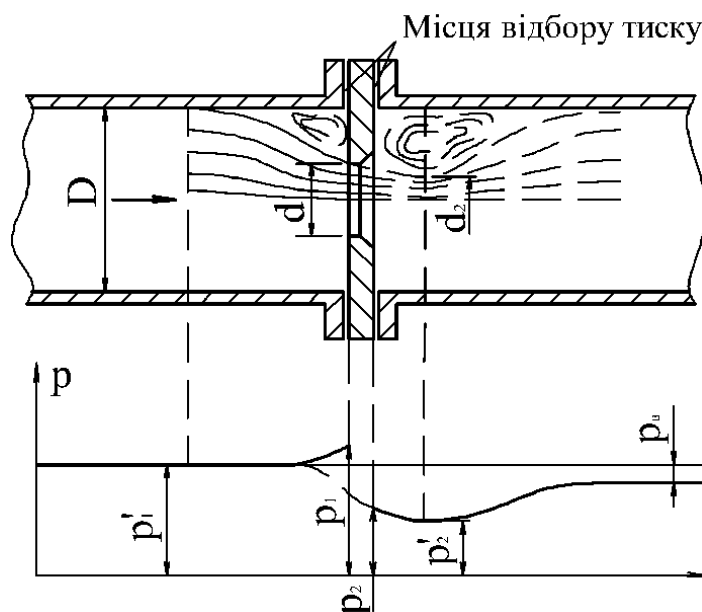


Рисунок 6.1 – Характер потоку і графік розподілу статичного тиску на звужуючому пристрої

Тиск потоку біля стінки трубопроводу дещо зростає через підпір перед діафрагмою та знижується до мінімуму за діафрагмою у найвужчому місці потоку. Далі з розширенням струменя тиск потоку біля стінки знову підвищується, але не досягає попереднього значення. Втрата частини тиску p_v визначається головним чином втратою енергії на тертя та вихрення.

Таким чином, біля передньої та задньої стінки діафрагми виникає різниця тисків $\Delta p = p_1 - p_2$, яка однозначно визначає витрати речовини, що проходить у трубопроводі через звужуючий пристрій.

Вимірювання перепаду тиску на звужуючому пристрої практично виконується через окремі циліндричні отвори, розташовані біля торців діафрагми, або через дві кільцеві камери, кожна з яких з'єднується з внутрішньою порожниною трубопроводу кільцевою щілиною.

Теорія та основні рівняння методу змінного перепаду тиску однакові для звужуючих пристроїв всіх типів. Різниця полягає лише у значеннях деяких коефіцієнтів, що визначаються дослідним шляхом.

Отже, вимірювання витрат за методом змінного перепаду тиску зводиться до вимірювання різниці тисків p_1 і p_2 , що створюється звужуючим пристроєм, безпосередньо на трубопроводі за допомогою пристроїв відбору.

Для стаціонарного потоку неподатливої рідини з густиною ρ (рис. 6.1) рівняння Бернуллі буде мати вигляд:

$$\frac{\rho v_{cep2}^2}{2} - \frac{\rho v_{cep1}^2}{2} = p_1 - p_2, \quad (6.1)$$

а рівняння нерозривності потоку:

$$F v_{cep1} = F_1 v_{cep2} = \mu' F_0 v_{cep2}, \quad (6.2)$$

де F – площа поперечного перерізу трубопроводу, м²;

F_0 – площа отвору діафрагми, м²;

F_1 – площа перерізу потоку у місці його найбільшого стискання, м²;

$\mu' = F_0 / F$ – коефіцієнт стискання потоку, який залежить від типу звужуючого пристрою;

v_{cep1} і v_{cep2} – середні швидкості потоку у перерізах до та після діафрагми;

p_1 і p_2 – абсолютний тиск у цих же перерізах відповідно.

У реальних умовах виникають додаткові фізичні явища, наприклад, втрати тиску на в'язкісне тертя, вихрові опори, нерівномірний розподіл швидкостей, зміна густини тощо.

Тоді рівняння витрат приймуть вигляд:

$$Q = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}; \quad (6.3)$$

$$M = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2\rho (p_1 - p_2)}, \quad (6.4)$$

де $\alpha = \frac{\mu' \xi}{\sqrt{1 - (\mu')^2 m^2}}$, відповідно $m = F_0 / F$ – відносна площа звужуючого пристрою.

Рівняння (6.3) і (6.4) є загальними для всіх витратомірів змінного перепаду тиску і придатними для стискуваних та нестискуваних речовин. Для нестискуваних речовин $\varepsilon = 1$.

Коефіцієнт α . Що входять у рівняння називається коефіцієнтом витрат. Цей коефіцієнт залежить від відносної площі m звужуючого пристрою. Він враховує складні гідродинамічні явища, які виникають у потоці.

Для реалізації методу змінного перепаду тиску необхідні три пристрої, об'єднані загальним визначенням витратомір змінного перепаду:

- пристрій для створення перепаду тиску у потоці за рахунок місцевої зміни швидкості потоку або за значенням (звужуючі пристрої) або за напрямком (зігнуті ділянки труби);

- вимірювальний прилад – дифманометр, що вимірює перепад тиску;

- з'єднувальний пристрій, що передає перепад тиску від потоку до дифманометра.

Як звужуючі пристрої найчастіше використовуються нормальні діафрагми – плоскі та камерні, нормальні сопла і труби (сопла) Вентурі.

Нормальна діафрагма (рис. 6.2) являє собою тонкий диск з отвором, концентричним до осі труби, з гострою прямокутною крайкою зі сторони входу потоку.

Тиск від плоскої діафрагми відбирають за допомогою окремих отворів у трубопроводі біля її торців.

Тиск у камерних діафрагмах відбирається з камер, з'єднаних з трубою кільцевими щілинами. Перевагою камерних діафрагм є відбір дійсних середніх тисків, що дозволяє дещо знизити вимоги до прямолінійних ділянок трубопроводу; недолік – необхідність спеціальних ущільнювальних пристроїв для герметизації камер.

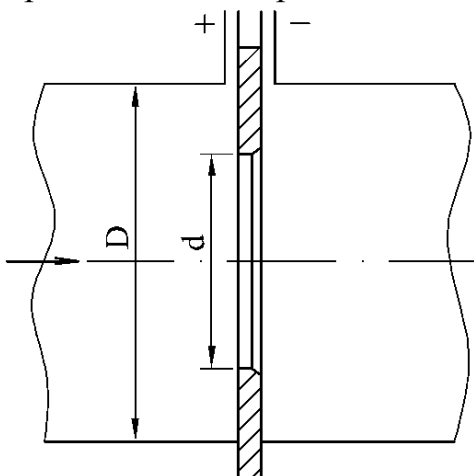


Рисунок 6.2 – Плоска безкамерна діафрагма

Нормальне сопло (рис. 6.3) виконується у вигляді насадки, що має вхідну частину, яка далі звужується, утворену дугами з радіусами r_1 і r_2 , рівними $0,2d$ і $d/3$ та циліндричну частину діаметром d і довжиною $0,3d$.

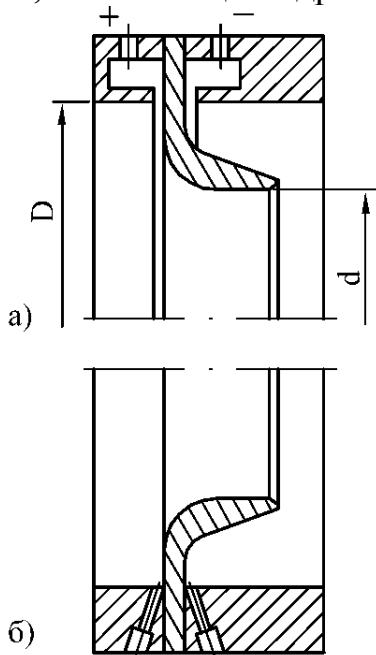


Рисунок 6.3 – Нормальне сопло:
а) з камерним відбором тиску;
б) безкамерний відбір

Труби Вентурі використовуються чотирьох конструктивних різновидів: труби Вентурі з сопловим і конічним входами, з довгим і коротким дифузорами.

Для вимірювання перепаду тиску на звужуючому пристрої та отримання інформаційного сигналу використовуються диференціальні манометри різного принципу дії. Практична система для вимірювання витрат складається із декількох окремих пристроїв. У трубопроводі, яким протікає вимірювана речовина, встановлюється стандартна діафрагма, сопло або сопло Вентурі.

Перепад тиску на звужуючому пристрої, що є мірою витрат, вимірюється диференціальним манометром, оснащеним телеметричною системою для передачі вихідного сигналу на віддалі до вторинного вимірювального приладу.

6.3 Витратоміри постійного перепаду тиску

Витратоміри постійного перепаду тиску широко використовуються в системах автоматичного контролю та регулювання в різних галузях промисловості завдяки конструктивній простоті, високій чутливості і, внаслідок цього, можливості застосування для вимірювання досить незначних витрат, можливості застосування для агресивних речовин, простоти автоматизації вимірювань, великого діапазону вимірювання, незначних витрат тиску.

Витратоміри постійного перепаду тиску належать до засобів вимірювання, які називаються витратомірами обтікання. Існують витратоміри постійного перепаду тиску трьох конструктивних різновидів: ротаметри, поршневі та поплавкові витратоміри. Принцип дії всіх цих приладів заснований на силевій взаємодії потоку та переміщенні у ньому тіла.

Основними елементами ротаметра (рис. 6.4), принципово необхідними для його роботи, є розширена доверху конічна трубка 1 та поміщений у неї поплавок 2. Для візуального відліку показів використовують скляну трубку, безпосередньо на яку нанесено поділки шкали.

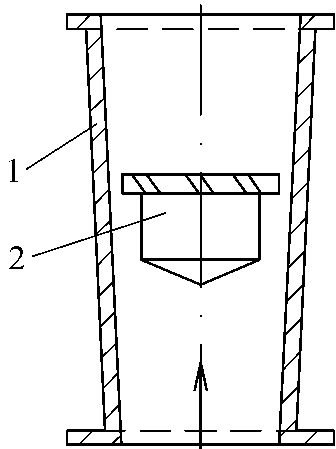


Рисунок 6.4 – Схема ротаметра:
1 – конусна трубка;
2 – поплавок

Поплавок складається з нижньої конічної та середньої циліндричної частини, яка закінчується буртиком з косими канавками. Призначення канавок – забезпечити стійке обертання поплавка під час протікання речовини, що необхідно для центрування відносно осі трубки.

Якщо ротаметр призначається для роботи в системах автоматичного регулювання або контролю, то прилад повинен оснащуватись додатковим пристроєм, який перетворює хід поплавка у пропорційний механічний, електричний або пневматичний сигнал.

Принципова схема поплавкового витратоміра з електричною диференціально-трансформаторною дистанційною передачею показів приведена на рисунку 6.5.

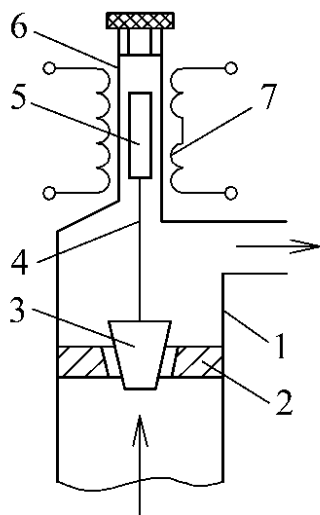


Рисунок 6.5 – Схема поплавкового витратоміра з диференціально-трансформаторним перетворювачем

Принцип дії ротаметрів полягає в наступному. Гідродинамічний тиск потоку вимірюваної речовини діє на поплавок і викликає його вертикальне переміщення. У зв'язку з конусністю трубки, від переміщення поплавка змінюється площа прохідного перерізу приладу, що утворюється діаметром буртика поплавка і внутрішньою стінкою трубки. Ця зміна площі відбувається таким чином, що перепад тиску знизу і зверху поплавка залишається практично постійним.

Поплавок буде підніматись до того часу, доки його вага і вага зв'язаних з ним елементів не врівноважиться динамічний тиск потоку речовини.

Вимірювальна частина витратоміра (рис. 6.5) складається з циліндричного металевого корпусу 1 з діафрагмою 2. Всередині діафрагми переміщується конусний поплавок 3, жорстко закріплений на штокові 4. На верхньому кінці штока закріплено осердя 5 диференціально-трансформаторного перетворювача. Осердя переміщується всередині роздільної трубки 6, ззовні якої закріплені обмотки 7 перетворювача.

6.4 Лічильники кількості витрат

Лічильниками називаються прилади для вимірювання кількості речовини, що протікає трубопроводом за певний проміжок часу. Ця кількість визначається за різницею показів вказівника лічильника, зафіксованих на початку і вкінці відлікового інтервалу часу.

Лічильники рідин за принципом вимірювання можна поділити на дві групи: швидкісні та об'ємні.

Кожен лічильник включає два функціональних вузли: гідравлічний або пневматичний та відліковий.

У швидкісних лічильниках рідина або газ, що протікає через прилад, заставляє обертатись крильчатку або турбіну із швидкістю пропорційною до швидкості потоку, а відповідно, і кількості пропущеної рідини. Кількість обертів чутливого елемента підсумовується відліковим механізмом приладу. Похибка таких лічильників складає приблизно $\pm 2\%$.

Схема швидкісного крильчатого лічильника приведена на рисунку 6.6, а турбінного – на рисунку 6.7.

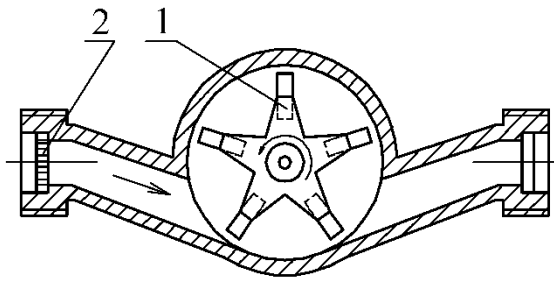


Рисунок 6.6 – Схема вимірювального пристрою швидкісного крильчатого лічильника: 1 – крильчатка; 2 – сітка запобіжна

У лічильниках з вертикальними крильчатками потік рідини, що поступає у гідравлічний пристрій, направлений тангенціально до середнього радіусу лопаток. У лічильниках з турбінкою потік рідини, що поступає у гідравлічний пристрій, направлений аксіально – паралельно до осі турбінки.

Лічильники з крильчатками використовуються для вимірювання відносно невеликих витрат, а з турбінкою – для великих витрат рідин.

Швидкісні лічильники дуже чутливі до в'язкості рідини, кількість якої вимірюється, а тому використовуються переважно, як побутові і промислові лічильники витрат води.

Об'ємні лічильники здійснюють вимірювання кількості рідин у широкому діапазоні в'язкості з досить високою точністю.

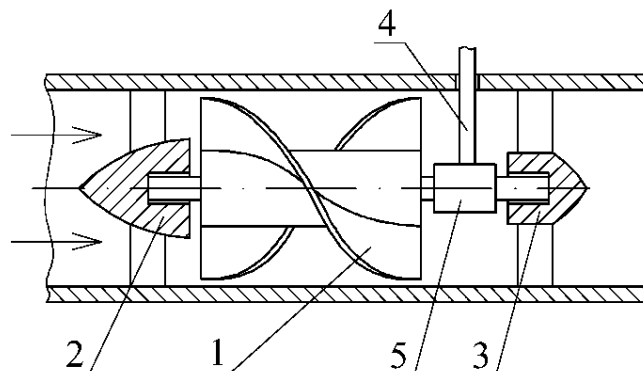


Рисунок 6.7 – Схема вимірювального пристрою швидкісного турбінного лічильника: 1 – турбінка; 2 – передній обтічник; 3 – задній обтічник; 4 – вал до лічильного механізму; 5 – черв'ячна передача

Існує багато конструкцій об'ємних лічильників, але найбільше поширення отримали поршневі лічильники та лічильники рідин з овальними шестернями (рис. 6.8).

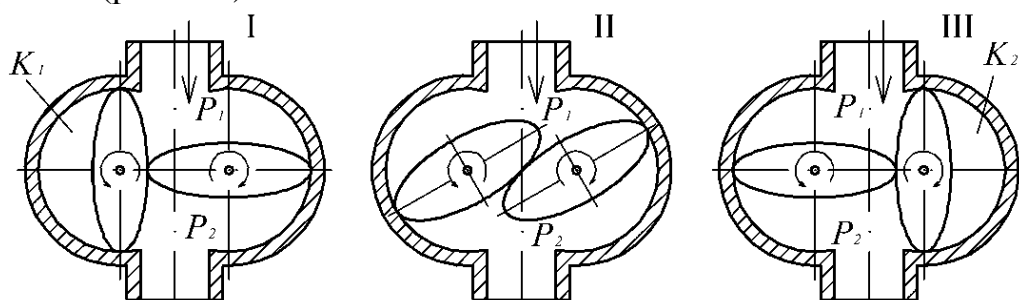


Рисунок 6.8 – Схема дії об'ємного лічильника з овальними шестернями

У вимірювальній камері лічильника розташовані дві овальні шестерні, примусово з'єднані між собою зубчатим зчепленням. Під дією різниці тисків до і після вимірювальної камери завдяки овальній формі шестерень виникає обертовий момент, який змушує шестерні обертатися. Одночасно з кожним оборотом переміщується певний об'єм вимірювальної рідини.

Схема дії лічильника показана на рисунку 6.8. У положенні I обертовий момент за різниці тисків ($P_1 - P_2$) виникає на лівій шестерні та змушує її обертатися і обертати праву шестерню. У положенні II обертовий момент виникає на обох шестернях. У положенні III обертовий момент виникає на правій шестерні, а ліва стає веденою. За один оберт вимірювальні порожнини K_1 і K_2 двічі наповнюються та двічі випорожнюються. Таким чином, за один оберт лічильник з овальними шестернями пропускає об'єм рідини, рівний чотирьом об'ємам K_1 (або K_2).

Передача руху від шестерень до передатного та лічильного механізму виконується від однієї з шестерень за допомогою магнітної муфти.

6.5 Ультразвукові витратоміри

Ультразвуковий метод вимірювання витрат оснований на явищі зміщення звукових коливань рухомого рідинного середовища.

Звукові коливання високої частоти (20 кГц і вище), що створюються електроакустичним випромінювачем $B1$, проходять через рідину, яка протікає трубопроводом, і реєструються приймачем $П1$, який знаходиться від випромінювача на відстані L (рис. 6.9).

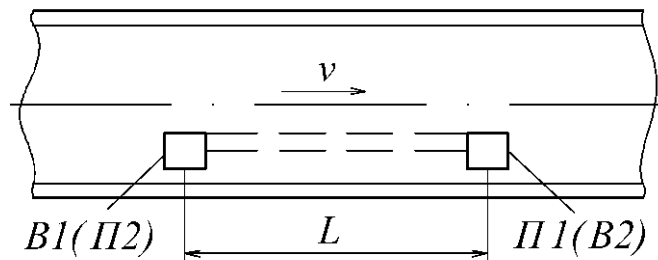


Рисунок 6.9 – Схема ультразвукового витратоміра

Якщо v – швидкість потоку речовини, а c – швидкість звуку у цій речовині, то тривалість поширення звукової хвилі у напрямку руху потоку від випромінювача $B1$ до приймача $П1$:

$$\tau_1 = \frac{L}{c + v}. \quad (6.5)$$

Тривалість поширення звукової хвилі проти руху потоку від випромінювача $B2$ до приймача $П2$:

$$\tau_2 = \frac{L}{c - v}. \quad (6.6)$$

На основі (6.5) і (6.6) різниця часу, що вимірюється електронною системою,

$$\Delta\tau = \frac{2Lv}{c^2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (6.7)$$

Зважаючи на те що v^2/c^2 дуже мала порівняно з одиницею (наприклад, для рідин, у яких $c = 1000 - 1500$ м/с, а v не перевищує $6 - 8$ м/с, $v^2/c^2 < 6 \cdot 10^{-5}$), і виразивши швидкість потоку через витрати, отримаємо рівняння вимірювання ультразвукових витратомірів:

$$\Delta\tau = 2\varphi \frac{L}{Fc^2} Q, \quad (6.8)$$

де F – площа перерізу потоку;

φ – коефіцієнт, що враховує розподіл швидкостей по перерізу потоку.

Існують різні способи і різні вимірювальні схеми для визначення $\Delta\tau$:

- вимірювання різниці фазових зсувів ультразвукових хвиль, направлених по потоку та проти нього;
- вимірювання різниці частот повторення коротких імпульсів або пакетів ультразвукових коливань, направлених одночасно по потоку та проти нього;
- вимірювання різниці тривалості проходження коротких імпульсів, направлених одночасно по потоку та проти нього.

Існує також самостійний метод визначення витрат, оснований на вимірюванні зміщення потоком ультразвукової хвилі, направленої перпендикулярно до напрямку руху речовини.

Чутливість ультразвукових витратомірів залежить від відношення v/c . Чим більше це відношення, тим вища чутливість приладу і менші похибки вимірювання.

Питання для самоконтролю

1. Що таке звужуючий пристрій витратоміра?
2. Які прилади використовуються для вимірювання перепаду тиску?
3. Чому ротаметри називаються витратомірами постійного перепаду тиску?
4. Яка суттєва різниця між витратомірами та лічильниками витрат?
5. У чому полягає основна відмінність між швидкісними та об'ємними лічильниками кількості речовин?
6. У чому полягає принцип дії швидкісних лічильників?
7. На якому фізичному явищі ґрунтується ультразвуковий метод вимірювання витрат?
8. Які існують способи та схеми для визначення різниці часу $\Delta\tau$ в ультразвукових витратомірах?

ТЕМА 7 МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ

План

- 7.1 Класифікація методів та приладів для вимірювання рівня.
- 7.2 Візуальні та поплавкові рівнеміри.
- 7.3 Вимірювання рівня сипких речовин.
- 7.4 Гідростатичні та буйкові рівнеміри.
- 7.5 Ємнісні рівнеміри та кондуктометричні сигналізатори рівня.
- 7.6 Акустичні рівнеміри.

7.1 Класифікація методів та приладів для вимірювання рівня

Рівнем називається відносна висота заповнення технологічних ємкостей робочою речовиною: рідиною – водою, нафтою, спиртом, або сипкими матеріалами, наприклад, піском, зерном, вугіллям тощо.

Під вимірюванням рівня приймається індикація положення границі розділу двох середовищ різної густини відносно деякої горизонтальної площини, прийнятої за початок відліку. Рівень вимірюється в одиницях довжини. Засоби для вимірювання рівня називаються рівнемірами.

За принципом дії рівнеміри поділяють на: поплавкові, буйкові, гідростатичні, електричні, ультразвукові, радіоізотопні.

У залежності від того, які фізичні властивості речовин сприймає первинний перетворювач, рівнеміри поділяють на механічні, акустичні, електричні, оптичні та теплові.

Основні метрологічні характеристики будь-якого типу рівнемірів:

- статична функція перетворення або градувальна характеристика, що описує зв'язок вихідних сигналів первинного перетворення з поточним значенням рівня;

- основна та додаткова похибка;

- варіація показів.

Для рівнемірів, які працюють в системах автоматичного регулювання технологічними процесами, необхідно нормувати та оцінювати динамічні характеристики – постійну часу, перехідну характеристику тощо.

Рівнеміри, які служать для сигналізації граничних значень рівня і не мають відлікового пристрою, називаються сигналізаторами рівня. Вони можуть бути односторонніми, двосторонніми, тристоронніми.

7.2 Візуальні та поплавкові рівнеміри

Візуальні рівнеміри – це прозорі вставки в стінках ємкості або сполучені з ємкістю мірні трубки з нанесеною на них шкалою.

Візуальні рівнеміри – найпростіші, і в той же час найбільш точні засоби вимірювання рівня.

За відповідного діаметра (що виключає вплив меніску) мірної трубки, підсвічування поверхні розділу і використанні спеціальних засобів відліку (наприклад, катетометрів) похибка візуальних рівнемірів за нерухомої

поверхні рідини може бути зведена до десятих часток міліметра.

На практиці застосовуються вказівні трубки зі склом прохідного та відбитого світла (рис. 7.1).

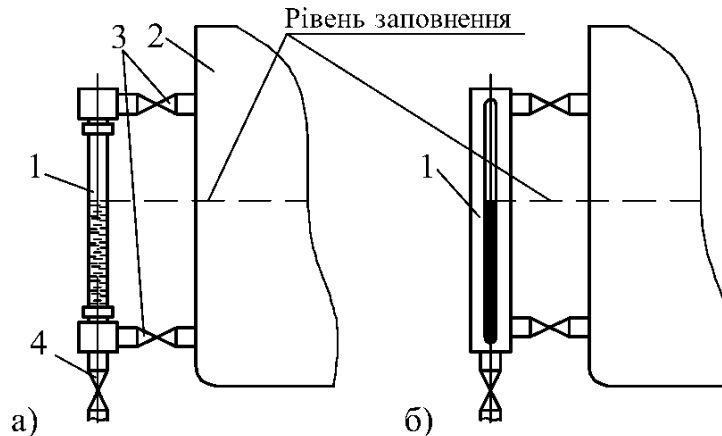


Рисунок 7.1 – Вказівні трубки прохідного (а) та відбитого (б) світла: 1 – рівнемірна трубка; 2 – ємкість з рідиною; 3 – запірні вентиля; 4 – зливний вентиль

Вказівне скло відбитого світла – це товста скляна пластина, на поверхні якої, поверненої до рідини, нанесені паралельні канавки. Промені світла, що попадають на скло, відбиваються від похилих граней канавок у газовій частині і проходять всередину в частині заповненій рідиною. Частина скла, яка контактує з рідиною, буде візуально темною, а частина скла, за якою газ або пара – сріблясто-білою (рис. 7.1, б).

Рівнемірні трубки застосовуються до тисків в ємкості до 2,94 МПа та до температури рідини – до 300°C.

У поплавковому рівнемірі переміщення поплавка на поверхні рідини передається на відліковий пристрій або перетворювач для перетворення переміщення чи сили у вихідний сигнал.

Сила виштовхування, яка діє на поплавок довільної форми, за законом Архімеда (рис. 7.2):

$$F(x) = \rho_0 g \int_{h-x}^h S(x) dx + \rho g \int_0^x s(x) dx, \quad (7.1)$$

де ρ_0 – густина середовища над контрольною рідиною;

g – прискорення вільного падіння;

ρ – густина рідини, у яку занурена нижня частина поплавка;

S – площа перерізу поплавка.

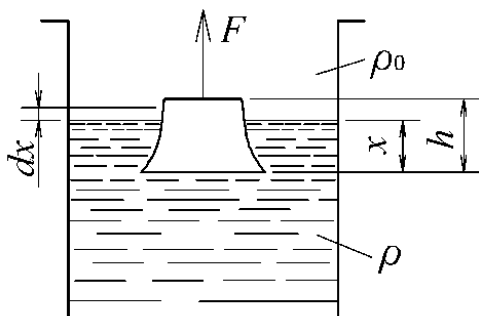


Рисунок 7.2 – Схема переміщення поплавка

Об'єм поплавка:

$$V = \int_0^h S(x)dx, \quad (7.2)$$

де h – висота поплавка.

Тоді,

$$F(x) = \rho_0 g V + (\rho - \rho_0) g \int_0^x S(x)dx. \quad (7.3)$$

Для поплавка постійного перерізу:

$$F = Sh\rho_0 g + (\rho - \rho_0) g Sx. \quad (7.4)$$

Якщо над рідиною знаходиться повітря, то $\rho_0 = 0$. Тоді у загальному випадку:

$$F = \rho g \int_0^x S(x)dx. \quad (7.5)$$

Для поплавка постійного перерізу:

$$F = \rho g Sx. \quad (7.6)$$

Найпростіші поплавкові рівнеміри складаються з поплавка і противаги, які з'єднані між собою тросиком. У нижній частині противаги закріплена стрілка, вказує на шкалі значення рівня рідини в резервуарі (рис. 7.3).

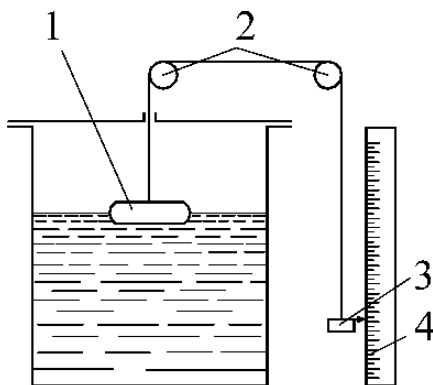


Рисунок 7.3 – Схема поплавкового рівнеміра:

- 1 – поплавок;
- 2 – напрямні ролики;
- 3 – вантаж;
- 4 – шкала

Поплавок 1 підвішений на гнучкому тросі, перекинутому через ролики 2. На іншому кінці троса закріплений вантаж 3 для підтримання постійного натягу троса. На тросі закріплена стрілка, яка показує на шкалі 4 рівень рідини.

Якщо знехтувати вагою тросика та тертям в роликах передавального механізму, то стан системи "поплавок – вантаж" описується рівнянням:

$$G_{ne} = G_n - S_n h_1 \rho g, \quad (7.7)$$

де G_{ne} , G_n – відповідно, вага вантажу та поплавка;

S_n – площа поплавка;

h_1 – глибина занурення поплавка;

ρ – густина рідини;

g – прискорення тяжіння.

Такий простий пристрій у багатьох випадках є оправданим і може забезпечити достатню точність. Недоліки простого поплавкового рівнеміра:

- перевернута шкала – відлік починається зверху;

- похибка від непостійності сили натягу троса – у нижньому положенні до ваги вантажу додається вага троса.

7.3 Вимірювання рівня сипких речовин

Вимірювання рівня сипких матеріалів має свої особливості. Характерна відмінність сипких речовин від рідких – непропорційність передачі тиску на дно та стінки в залежності від висоти рівня заповнення.

Якщо вимірюванням рівня визначається вага речовини, то важливо знати його об'ємну та питому вагу, а також вологість.

Якщо вільно насипати з однієї точки сипку речовину, то утворюються відкоси. Утворення відкосів є наслідком тертя та зчеплення між частинками. Деякі сипкі матеріали від тривалого зберігання в ємкостях втрачають рухливість частинок. Такий стан називається злежуваністю.

Часто необхідно враховувати липкість матеріалів, тобто здатність деяких сипких матеріалів прилипати до твердих тіл.

Для контактних методів вимірювання, коли чутливий елемент знаходиться в товщині матеріалу необхідно враховувати абразивність матеріалу, тобто його здатність стирати поверхні, з якими є механічне контактне взаємне переміщення.

Деякі сипкі речовини, які утворюють повітряний пил, стають фактором підвищеної вибухо- та пожежної небезпеки. У деяких випадках пил може бути струмопровідним.

Всі ці фактори створюють специфічні вимоги та обмеження до вимірювальних засобів і методів вимірювання рівня сипких матеріалів.

У багатьох випадках протікання технологічного процесу не вимагає необхідності мати поточне значення рівня заповнення ємкості і достатньо виконувати контроль верхнього та нижнього рівнів сипких матеріалів.

Властивість сипких матеріалів створювати тиск як на дно, так і на стінки ємкості використовується у мембранних вказівниках рівня (рис. 11.4). Мембранні прилади є вказівниками тільки одного рівня. Це пояснюється неоднозначністю ваги стовпа насипного матеріалу його тиску на дно чи стінки ємкості. Тиск у цьому випадку є функцією форми ємкості, коефіцієнту внутрішнього тертя та коефіцієнту тертя сипких тіл об стінки ємкості.

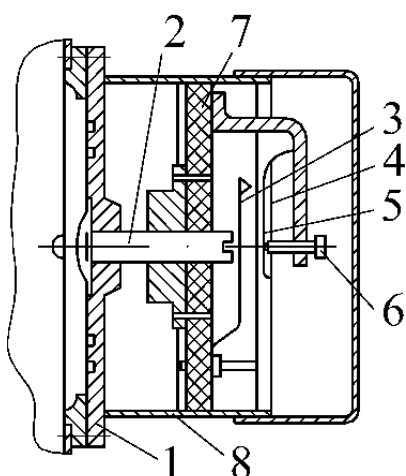


Рисунок 7.4 – Вказівник рівня з металевою мембраною:

- 1 – мембрана;
- 2 – шток;
- 3 – контактний пристрій;
- 4 – кронштейн;
- 5 – пружина;
- 6 – гвинт регулювальний;
- 7 – плата;
- 8 – корпус

Мембранний вказівник рівня складається з металевої мембрани 1 з закріпленням у центрі штоком 2. Прогинання мембрани штоком передає на контактний пристрій 3. На кронштейні 4 закріплена зворотна пружина 5.

Регулювання натягу зворотної пружини здійснюється гвинтом 6. Ізолююча плата 7 закріплюється у корпусі 8.

Використовуються вказівники рівня, які працюють на принципі гальмування крильчатки, що обертається на валу.

У вказівниках такої конструкції синхронний двигун за допомогою зубчатої та черв'ячної передачі обертає крильчатку. Крильчатка обертається то того часу, доки її торкнеться шар матеріалу, який засипається в ємкість. Шар матеріалу спочатку пригальмовує, а потім зупиняє обертання крильчатки. Разом з нею зупиняється і черв'ячне колесо.

Разом з черв'яком, долаючи зусилля пружини повернення, переміщується штовхач, який діє на головку мікроперемикача, розмикаючи електричні кола сигналізації. Таким чином можна здійснювати автоматичне управління процесами завантаження чи дозування сипких матеріалів.

Для контролю рівня сипких матеріалів широко використовуються засоби, дія яких ґрунтується на електричних властивостях середовища вимірювання. Переважно це ємнісні сигналізатори та рівнеміри, що реагують на зміну діелектричної постійної об'єму ємкості в залежності від наявності в ній сипкого матеріалу. У якості чутливого елемента використовується стержень чи пластина, які служать однією з обкладинок конденсатора. Іншою обкладинкою слугують стінки самої ємкості.

Досить ефективним у багатьох випадках для вимірювання рівня сипких матеріалів є застосування акустичних рівнемірів.

7.4 Гідростатичні та буйкові рівнеміри

Вимірювання рівня гідростатичними рівнемірами зводиться до вимірювання гідростатичного тиску P , який створюється стовпом h рідини постійної густини ρ , згідно з рівнянням:

$$P = \rho gh. \quad (7.8)$$

Вимірювання гідростатичного тиску здійснюється:

- манометром, встановленим на висоті, що відповідає нижньому граничному значенню рівня;
- диференціальним манометром, підключеним до резервуару на висоті, що відповідає нижньому граничному значенню рівня та до газового простору над рідиною;
- вимірюванням тиску газу, наприклад, повітря, який прокачується по трубці, опущеній в рідину, яка заповнює резервуар, на фіксовану глибину.

Рівнеміри, у яких вимірювання гідростатичного тиску здійснюється шляхом вимірювання тиску газу, що прокачується по зануреній у рідину трубці, називають п'єзометричними. Схема п'єзометричного рівнеміра наведена на рисунку 7.5.

П'єзометрична трубка розміщується в апараті, у якому вимірюється рівень. Газ поступає в трубку через дросель 2, що служить для обмеження витрат. Для вимірювання витрат газу служить стаканчик 3 (витрата з допомогою стаканчика визначається за кількістю бульбашок, які пройшли

через рідину, яка його заповнює, за одиницю часу), а тиск підтримується постійним за допомогою стабілізатора тиску 4. Тиск газу після дроселя вимірюється дифманометром 5 і є мірою рівня.

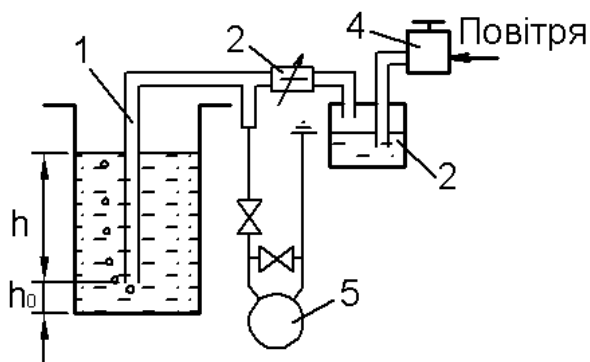


Рисунок 7.5 – Схема п'езометричного рівнеміра

При подачі газу тиск в п'езометричній трубці поступово підвищується до того часу, поки вказаний тиск не стане рівним тиску стовпа рідини висотою h . Коли тиск у трубці стане рівним гідростатичному тиску, із нижнього відкритого кінця трубки починає виходити газ. Витрату підбирають такою, щоб газ покидав трубку у вигляді окремих бульок – приблизно одна булька за секунду.

Для стабілізації витрат газу в п'езометричних рівнемірах може додатково встановлюватися мембранний стабілізатор витрат. Дія стабілізатора основана на автоматичному регулюванні постійного перепаду тиску на дроселі 2.

В основу роботи буйкових рівнемірів покладено фізичне явище, що описується законом Архімеда. Чутливим елементом у цих рівнемірів є циліндричний буйок, виготовлений з матеріалу, що має густину, більшу за густину рідини (рис. 7.6). Буйок займає вертикальне положення і частково занурений в рідину. Вимірювальним параметром тут є сила виштовхування, що діє на занурений буйок, величина якої пропорційна глибині його занурення в рідину.

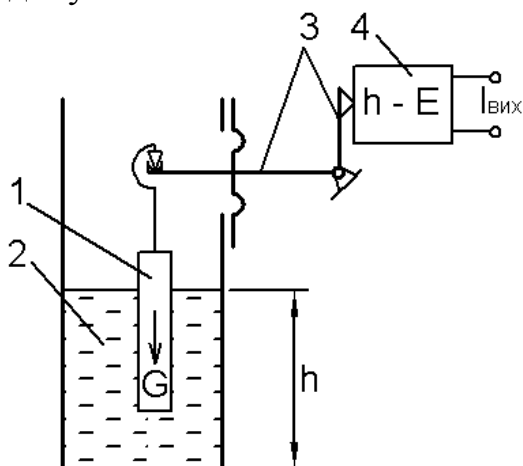


Рисунок 7.6 – Схема буйкового рівнеміра з електричним виходом:
 1 – буйок масою G ;
 2 – ємкість;
 3 – система важелів;
 4 – нормуючий перетворювач

Довжина буйка визначається в залежності від встановлених значень рівнів: верхнього BP і нижнього HP . Буйкові рівнеміри найчастіше використовуються як пристрої інформації в системах автоматичного регулювання, захисту та сигналізації.

Поплавкові й буйкові вимірювачі рівня виготовляються різних конструктивних форм. Діапазон вимірювання рівня вибирається з ряду: від 0

до 0,25, 0,4 ... і до 20 м. Клас точності може бути 0,6; 1,0; 1,6; і 2,5.

Для перетворення рівня в уніфікований струмовий сигнал розроблені буйкові електричні рівнеміри, оснащені уніфікованими перетворювачами «сила – струм». Підключення буйка до уніфікованого перетворювача здійснюється за схемою рисунку 3.5.

7.5 Ємнісні рівнеміри та кондуктометричні сигналізатори рівня

У ємнісних рівнемірах використовується залежність електричної ємності чутливого елемента первинного вимірювального перетворювача від рівня рідини. Конструктивно ємнісні чутливі елементи виконують у вигляді коаксіальну розташованих циліндричних електродів або паралельних плоских електродів (рис. 7.7).

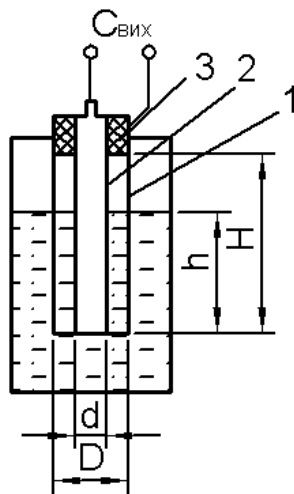


Рисунок 7.7 – Схема ємнісного коаксіального рівнеміра:

- 1, 2 – електроди;
- 3 – прохідний ізолятор

У загальному вигляді електрична ємність циліндричного конденсатора визначається рівнянням:

$$C = 2\pi\epsilon\epsilon_0 H / \ln \frac{D}{d}, \quad (7.9)$$

де ϵ – відносна діелектрична проникність речовини, що заповнює міжелектродний простір;

ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму;

H – висота електродів;

D, d – діаметр, відповідно, зовнішнього та внутрішнього електродів.

Перетворення електричної ємності в сигнал вимірювальної інформації здійснюється мостовим, резонансним або імпульсним методом.

Ємнісні рівнеміри випускаються класів точності 0,5; 1,0; 2,5. Мінімальний діапазон вимірювання складає 0–0,4 м, максимальний – 0–20 м.

Ємнісні рівнеміри широко використовуються для вимірювання рівня сипких матеріалів.

Кондуктометричні сигналізатори (рис. 7.8) рівня призначені для сигналізації рівня електропровідних рідинних і сипких середовищ з питомою провідністю більше 10^{-3} См/м. Дія цих приладів ґрунтується на використанні властивості речовин, рівень яких контролюється, проводити електричний струм.

На точність кондуктометричних рівнемірів може суттєво впливати зміна електропровідності робочої рідини, поляризація середовища біля електродів. Тому релейний елемент 3 переважно включається в коло змінного струму – вторинної обмотки трансформатора.

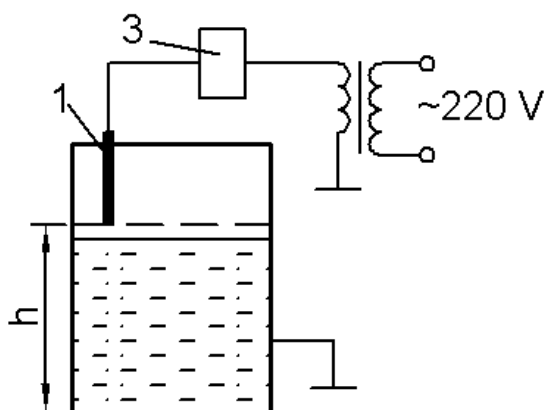


Рисунок 7.8 – Схема кондуктометричного сигналізатора граничного рівня

Електроди, які використовуються в кондуктометричних сигналізаторах рівня виготовляються зі сталі спеціальних марок або вугільні. Вугільні використовуються тільки для рідин.

Сигналізатори рівня широко використовуються в схемах автоматизації, коли проміжні значення рівня рідини в резервуарі не відіграють ролі, а необхідно визначати тільки дискретні значення рівня рідини. Промислові кондуктометричні реле-регулятори рівня випускаються на реагування від одного до чотирьох незалежних фіксованих рівнів.

7.6 Акустичні рівнеміри

В акустичних рівнемірах найчастіше використовується принцип локації. У відповідності з цим принципом вимірювання рівня здійснюється за часом проходження ультразвуковими коливаннями віддалі від випромінювача до межі розділу двох середовищ і навпаки до приймача випромінювання. Локація межі розділу двох середовищ здійснюється або зі сторони газу, або зі сторони робочого середовища – рідини чи сипкого матеріалу.

Рівнеміри, у яких локація межі розділу середовищ здійснюється зі сторони газу, називаються акустичними, а рівнеміри з локацією через шар робочого середовища – ультразвуковими.

Локаційні рівнеміри (рис. 7.9) реалізують ефект відбиття звукової хвилі від поверхні розділу середовищ. Генератор 1 випромінює в рідину пачку імпульсів ультразвукової частоти. Відбитий від межі розділу рідина-газ сигнал уловлюється приймачем 2 ультразвукових коливань.

Час t між моментом посилення зондуєчого імпульсу та моментом приходу відбитого від рівня імпульсу пов'язане з поточним значенням рівня залежністю:

$$t = \frac{2h}{c \cdot \sin \alpha}, \quad (7.10)$$

де c – швидкість звуку в контрольному середовищі.

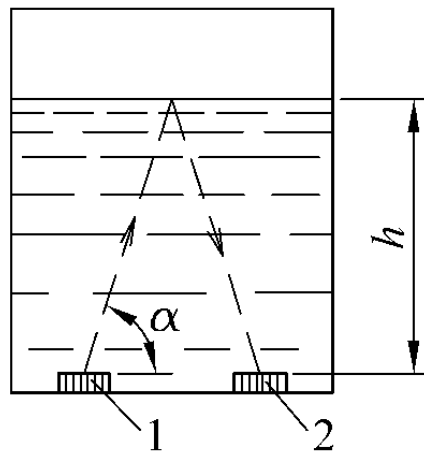


Рисунок 7.9 – Схема локаційного рівнеміра: 1 – генератор імпульсів; 2 – ультразвуковий приймач

Час t фіксується відповідною вимірювальною схемою та перетворюється у вихідний сигнал рівнеміра, пропорційний поточному значенню рівня h .

Більшість локаційних рівнемірів мають одноелементні давачі, у яких функції випромінювача й приймача поперемінно виконує один і той же елемент. У цьому випадку кут α в формулі (7.10) рівний $\pi/2$ і $\sin \alpha = 1$.

Перевагою акустичних рівнемірів є незалежність їх показів від фізико-хімічних властивостей і складу робочого середовища.

У акустичному рівнемірі (рис. 7.10) генератор 9 виробляє електричні імпульси з певною частотою повторення, які потім перетворюються в ультразвукові за допомогою акустичного перетворювача I, встановленого на кришці резервуара. Поширюючись вздовж акустичного тракту, ультразвукові імпульси відбиваються від площини межі розділу середовищ та попадають на той же перетворювач I. Відбиті ультразвукові імпульси після зворотного перетворення у електричні підсилюються, формуються підсилювачем-формувавцем 1 та подаються на пристрій вимірювання часу запізнення відбитого сигналу – тригер 2.

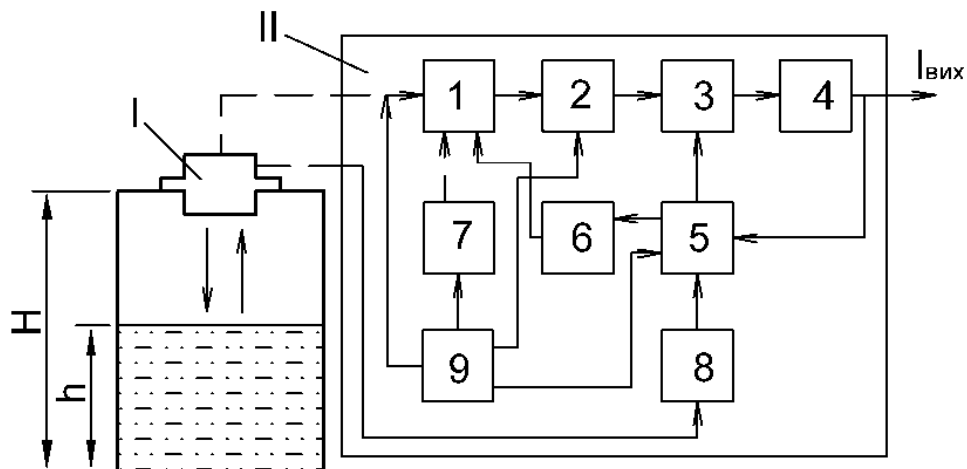


Рисунок 7.10 – Схема акустичного рівнеміра:

- I – первинний перетворювач;
- II – проміжний перетворювач

Формування уніфікованого вихідного сигналу постійного струму 0–5 мА здійснюється за допомогою компенсаційного перетворювача, оснований на принципі статичного регулятора, до складу якого входить пристрій порівняння 3, підсилювальний елемент 4 і елемент зворотного зв'язку – блок перетворення напруги у часовий інтервал 5.

Для зменшення впливу зміни температури газу на покази приладу, так як швидкість поширення звуку у газовому середовищі залежить від температури, рівнемір включає блок температурної компенсації 8, який включає в себе термометр опору, встановлений всередині акустичного перетворювача. У схемі також передбачено заводозахисний пристрій 6, для виключення впливу різного роду завод на вході підсилювача 1.

Основні метрологічні характеристики рівнемірів будь-якого типу наступні:

- статична функція перетворення (градувальна характеристика), що описує зв'язок вихідних сигналів первинного перетворювача з поточним значенням вимірюваної величини – рівня;

- основна похибка;

- варіація показів;

- додаткові похибки, зумовлені конструктивними особливостями рівнемірів, взаємодією чутливого елемента з середовищами, що утворюють поверхню розділу.

Перерахований комплекс характеристик визначається під час градування, повірки, атестації та випробуваннях рівнемірів.

Питання для самоконтролю

1. Для чого призначені рівноміри рідин та сипких матеріалів?
2. Які властивості речовин використовуються для контролю їх рівня?
3. Які основні переваги та недоліки поплавкових рівнемірів?
4. У чому полягає складність контролю рівня сипких матеріалів?
5. Який прилад використовується для вимірювання рівня гідростатичним методом?
6. Що служить параметром контролю у буйкових рівнемірів?
7. На якому принципі базується робота кондуктометричних рівнемірів?
8. Який ефект покладено в основу роботи акустичних рівнемірів?
9. Від чого залежить точність акустичних рівнемірів?

ТЕМА 8 МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ

План

- 8.1 Вимірювання лінійних та кутових розмірів.
- 8.2 Вимірювання товщини шару покриття.
- 8.3 Вимірювання відстаней між об'єктами.
- 8.4 Основні напрямки автоматизації контролю.
- 8.5 Пасивний і активний контроль.
- 8.6 Автоматичний контроль лінійних розмірів деталей.
- 8.7 Автоматичний контроль форми деталей.
- 8.8 Завантажувальні і транспортні пристрої контрольних автоматів.
- 8.9 Контрольні пристрої автоматичних ліній.
- 8.10 Автоматична сигналізація і захист.

8.1 Вимірювання лінійних та кутових розмірів

У класифікації фізичних величин одну із груп становлять величини простору та часу, до яких відносяться геометричні розміри, час та параметри руху. Геометричні розміри – це широка група понять лінійних та кутових розмірів, площі та об'єму. У машино- та приладобудуванні лінійно-кутові вимірювання складають до 80% від всіх вимірювань.

Завдання вимірювань лінійних та кутових розмірів можна розділити на такі групи:

- вимірювання лінійних розмірів в діапазоні від часток мікрометра до декількох десятків метрів та кутових розмірів від 0,1" до 360°.

Найпоширенішими в цій групі є вимірювання розмірів деталей, відхилення розміру деталі від заданого значення, вимірювання параметрів шорсткості поверхонь, товщини покриття;

- вимірювання розмірів від часток метра до сотень метрів під час визначення рівня рідких та сипких матеріалів у різних технологічних ємкостях, резервуарах та свердловинах, рівня пального в баках транспортних засобів;

- визначення координат об'єктів та відстаней між об'єктами, зокрема і космічними, що знаходяться в межах від одиниць міліметрів до мільйонів кілометрів.

Основні електричні методи залежно від принципу вимірювального перетворення поділяються на електромеханічні, електрофізичні та спектрометричні або хвильові.

Електромеханічні методи поділяють на резистивні, індуктивні, ємнісні, оптоелектронні, обкочування тощо.

Електрофізичні методи основані на використанні відмінності в фізичних властивостях речовин, що знаходяться по різних сторонах межі вимірюваного розміру і поділяються на електромагнітні, ємнісні, кондуктометричні тощо. Найпоширенішими з електромагнітних є вихрострумові та резонансні методи.

Спектротричні методи залежно від довжини хвилі випромінювання поділяються на звукові, ультразвукові, радіохвильові, надвисокочастотні, та оптичні або лазерні. Залежно від використовуваних явищ спектротричні методи класифікуються на локаційні, інтерферотричні, рефрактометричні.

Електромеханічні методи широко застосовуються для вимірювань розмірів деталей та шорсткості поверхонь – мікрометри, профілометри, для вимірювання рівнів рідин – поплавкові та буйкові рівнеміри. Для вимірювання відстаней пройдених транспортними засобами може використовуватись спосіб обкочування.

У контактних мікрометрах та профілометрах координати досліджуваного об'єкта попередньо перетворюються в лінійне переміщення голкоподібного щупа, а потім – в електричний сигнал за допомогою індуктивних, взаємоіндуктивних чи ємнісних перетворювачів.

Вимірювач малих розмірів на основі ємнісного перетворювача, який є елементом LC-контурі кварцового генератора показано на рисунку 8.1. Ємнісний перетворювач має нерухомий електрод 1, напилений на полірований скляний стержень, та нерухомий електрод 2, механічно з'єднаний з голкоподібним щупом, закріпленим в корпусі за допомогою плоских пружин.

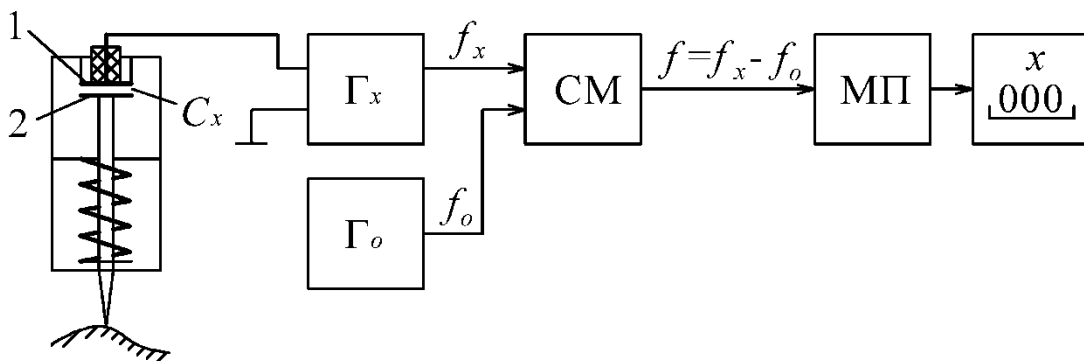


Рисунок 8.1 – Схема ємнісного профілометра

Ємнісний перетворювач високочастотним кабелем з'єднаний з кварцовим генератором G_x , вихідна частота f_x якого є функцією ємності C_x між рухомих та нерухомих електродами. Частота f_x та частота f_0 від опорного генератора частоти G_0 подаються на вхід суматора СМ, вихідна частота якого $f = f_x - f_0$. Після лінеаризації за допомогою мікропроцесора МП сигнал надходить на цифровий відліковий пристрій, проградуєований у мікрометрах.

Враховуючи, що:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}, \quad (8.1)$$

а для випадку, коли $C_x = C_{x0} + \Delta C = C_0 + \Delta C$:

$$f_x = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_x}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0 \left(1 + \frac{\Delta C}{C_0}\right)}}, \quad (8.2)$$

отримуємо:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{L_0 C_0 \left(1 + \frac{\Delta C}{C_0}\right)}} - \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \right) = -\frac{1}{2} \frac{\Delta C}{C_0} f_0. \quad (8.3)$$

За наведеною схемою будуються мікрометри з порогом чутливості в частки мікрометра та діапазоном вимірювань 0,1 – 1 мм. Такий мікрометр використовується і для вимірювання шорсткості поверхонь.

У приладо- і машинобудуванні часто вимірюється не повне значення розміру, яке може досягати десятків сантиметрів і більше, а лише його відхилення від деякого заданого значення. Ці відхилення, як правило не перевищують часток міліметра, а отже такі мікрометри можуть успішно використовуватись для контролю розмірних відхилень.

Для вимірювання розмірів у діапазоні від часток міліметра до декількох сантиметрів може використовуватись штангенциркуль з ємнісним перетворювачем переміщень (рис. 8.2).

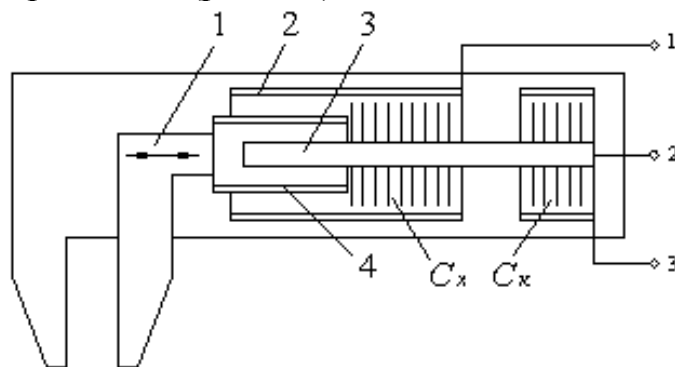


Рисунок 8.2 – Схема ємнісного штангенциркуля

На довгоходовому щупі 1 механічно закріплений екран 4, який взаємодіє з циліндричними елементами ємнісного перетворювача – зовнішнього 2 та внутрішнього 3. Від переміщення екрана 4 ємність C_x вимірювального конденсатора буде змінюватись пропорційно вимірюваному переміщенню. Для захисту від впливу завад передбачено компенсуючий конденсатор, ємність C_k якого дорівнює ємності вимірювального конденсатора для $x = 0$. Одна з можливих вимірювальних схем такого штангенциркуля приведена на рисунку 8.3.

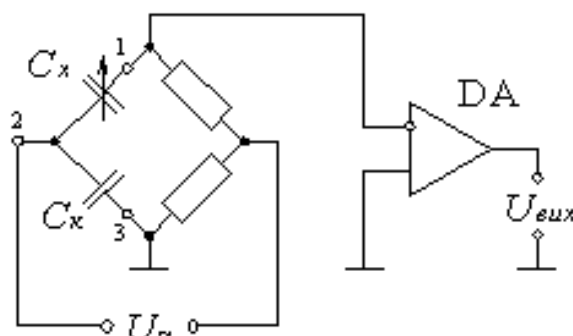


Рисунок 8.3 – Мостова вимірювальна схема з ємнісним перетворювачем

8.2 Вимірювання товщини шару покриття

Для вимірювання товщини шару покриття та товщини тонких листових виробів застосовують електрофізичні методи перетворення. Всі методи можуть бути розділені на дві групи: з руйнуванням покриття та без його руйнування. До неруйнівного контролю відносяться вихрострумові, індуктивні, магнітометричні, радіаційні, індукційні, ємнісні методи.

За способом перетворення розрізняють параметричні та генераторні вихрострумові перетворювачі. До генераторних можна віднести індуктивні, а до генераторних – взаємоіндуктивні перетворювачі. На практиці, для вимірювання товщини покриття, використовується частотний спосіб отримання інформації. Вимірювальна котушка вмикається в LC-контур генератора високої частоти. Залежно від товщини покриття змінюється індуктивність котушки і тим самим частота f_x вимірювального автогенератора, значення якої розраховується як

$$f_x = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_0(L_0 - L_{\text{вн}})} - \frac{(R_0 + R_{\text{вн}})^2}{4(L_0 - L_{\text{вн}})^2}}, \quad (8.4)$$

де C_0 – ємність резонансного контуру;

L_0 та R_0 – відповідно індуктивність та активний опір перетворювача за відсутності досліджуваного об'єкта;

$L_{\text{вн}}$ та $R_{\text{вн}}$ – відповідно внесені індуктивність та активний опір, зумовлені впливом вихрових струмів у досліджуваному об'єкті.

Для вимірювань товщини покриття на феромагнітних деталях може застосовуватись індуктивний метод. Повний електричний опір або індуктивність вимірювальної обмотки перетворювача (рис. 8.4) є функцією товщини покриття.

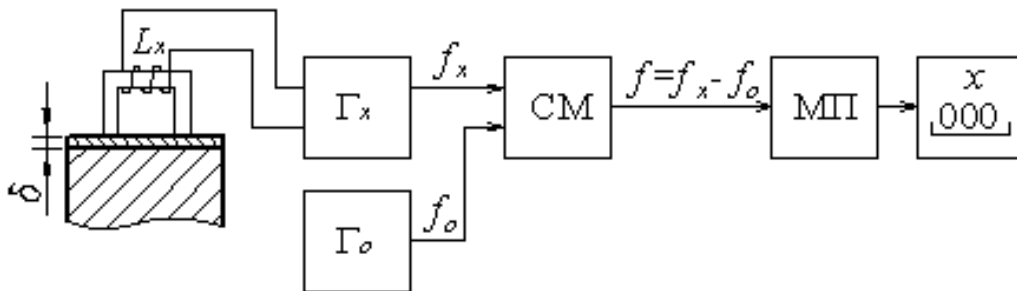


Рисунок 8.4 – Схема індуктивного товщиноміра

Котушка індуктивності L_x є елементом високочастотного генератора Γ_x , вихідна частота f_x якого порівнюється з опорною частотою f_o , що генерується генератором опорної частоти Γ_o . Частоти поступають на вхід суматора частот СМ, вихідна частота якого $f = f_x - f_o$. Після лінеаризації та оброблення з допомогою мікропроцесора МП сигнал подається на цифровий відліковий пристрій. Враховуючи, що магнітний опір магнітопроводу значно менший від магнітного опору покриття, еквівалентна індуктивність буде визначатися як:

$$L_{\text{екв}} \approx \frac{w^2 \mu_0 S_M}{2\delta}, \quad (8.5)$$

де w – кількість витків вимірювальної обмотки;
 S_M – площа перерізу магнітопроводу;
 δ – товщина шару покриття.

Неруйнівний метод вимірювання може ґрунтуватись і на використанні взаємодуктивних перетворювачів, вихідним інформативним параметром яких є ЕРС (рис. 8.5).

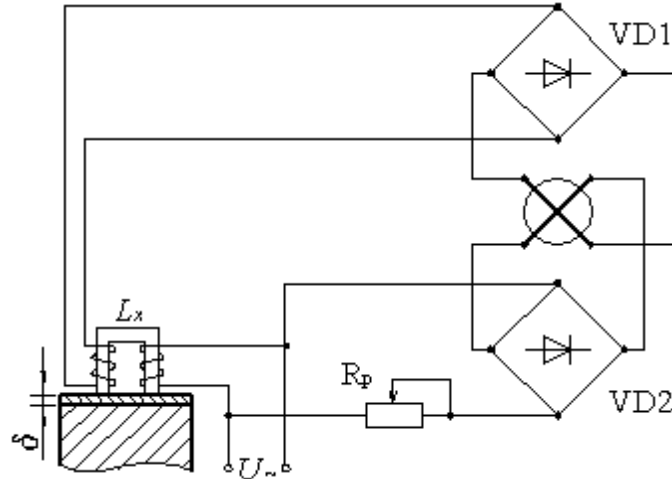


Рисунок 8.5 – Логометричний вимірювач товщини покриття

ЕРС, що наводиться у вимірювальній обмотці:

$$e_2 = \omega w_2 \Phi = \omega w_2 \frac{I_1 w_1}{Z_M} \approx \frac{\omega w_1 w_2 I_1}{2\delta / \mu_0 S}, \quad (8.6)$$

де w_1 та w_2 – кількість витків намагнічувальної та вимірювальної обмоток;
 I_1 – струм намагнічування;
 S – площа перерізу магнітопроводу;
 δ – товщина шару покриття;
 Z_M – комплексний магнітний опір магнітопроводу.

$$Z_M = (R_M + R_{M\delta}) + jX_M \approx R_{M\delta}, \quad (8.7)$$

де X_M та R_M – реактивна та активна складові комплексного опору магнітопроводу, що значно менші від магнітного опору покриття $R_{M\delta} = 2\delta / \mu_0 S$.

На базі такого методу побудовані прилади для вимірювання товщини покриття в межах до 3 мм з похибкою 10 – 15%.

8.3 Вимірювання відстаней між об'єктами

Найточнішими методами вимірювань відстаней між об'єктами є спектрометричні, зокрема локаційний метод, оснований на вимірюванні часу проходження вимірюваної відстані променем, швидкість якого відома і є незмінною.

Для реалізації локаційного методу можна використати всі види випромінювань, але найпоширенішими є методи та засоби оптичної, акустичної та радіолокації. У локаційних засобах джерело випромінювання і приймач знаходяться на одній межі вимірювання, а на іншій – відбивач або

межа об'єкта, відстань до якого визначається.

Радіолокаційний та оптичний локаційний методи застосовуються для вимірювань великих відстаней – від десятків до сотень метрів та багатьох мільйонів кілометрів.

Акустична локація використовується в твердих, рідких та газоподібних середовищах для вимірювань розмірів та відстаней від одиниць міліметрів до декількох кілометрів.

Швидкість проходження звукових та ультразвукових коливань в повітрі складає близько 333 м/с, в морській воді – 1500 м/с, в металах – від 3000 до 10000 м/с, що дозволяє використовувати акустичну локацію для вимірювань малих відстаней.

Є два основні способи реалізації локаційного методу: імпульсний та модуляційний або фазовий. Для першого використовується випромінювання у вигляді коротких імпульсів, для другого – безперервне модульоване випромінювання, фаза якого містить інформацію про вимірювану відстань.

В імпульсних локаторах (рис. 8.6) випромінювання у вигляді короткого імпульсу від джерела випромінювання – лазера 1 спрямовується до об'єкта 2, відстань до якого вимірюється.

Відбитий від об'єкта імпульс приймається оптоелектронним чутливим елементом 3. Інтервал часу τ , протягом якого імпульс проходить подвійну вимірювану відстань, визначається вимірювачем інтервалів часу 4. Якщо відома швидкість v розповсюдження променя, вимірювана відстань l_x обчислюється за допомогою обчислювального пристрою 5 за формулою $l_x = v\tau / 2$ і відтворюється відліковим пристроєм 6.

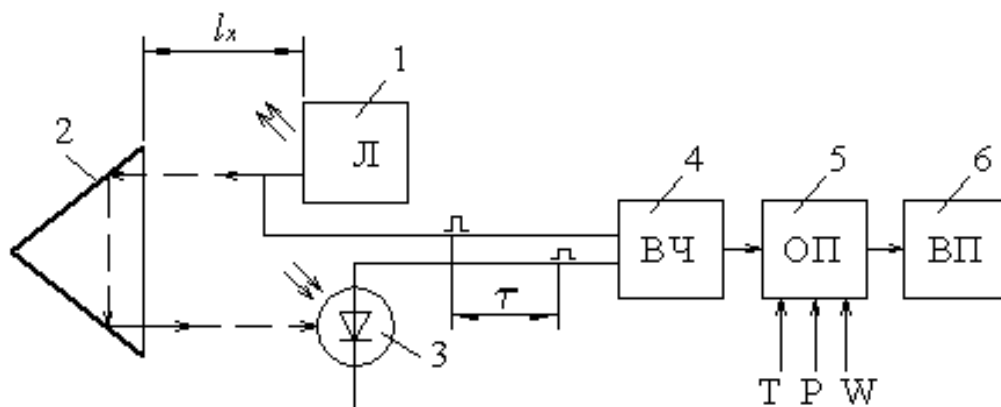


Рисунок 8.6 – Локаційний імпульсний метод визначення відстаней

Швидкість розповсюдження електромагнітного випромінювання, зокрема оптичного, в повітряному середовищі визначається за формулою:

$$v = c / n, \quad (8.8)$$

де $c = 299792458$ м/с – швидкість світла у вакуумі;

n – показник заломлення світла в середовищі, що залежить від його температури, тиску, вологості.

У сучасних світловіддалемірах здійснюються допоміжні вимірювання температури, тиску, вологості в декількох точках вздовж лінії вимірювання і вводяться відповідні корективи в мікропроцесорі 5.

У модуляційних локаційних віддалемірах (рис. 8.7) використовується неперервне випромінювання лазера 1, модульоване за інтенсивністю синусоїдним сигналом з частотою f_m від генератора 5.

Як інформативний параметр для визначення часу проходження променем подвійної відстані l_x приймається кут фазового зсуву між напругою на виході приймача випромінювання 3 та модульованої напругою, який вимірюється фазометром 4 і здійснюється на частоті модуляції:

$$\varphi_\tau = 2\pi N + \Delta\varphi = \omega_m t_2 - \omega_m t_1 = 2\pi f_m (t_2 - t_1) = 2\pi f_m \tau, \quad (8.9)$$

де $\omega_m t_1$ та $\omega_m t_2$ – фази коливань в моменти часу t_1 і t_2 , відповідно;

N – повна кількість фазових циклів;

$\Delta\varphi$ – кут фазового зсуву в границях неповного фазового циклу.

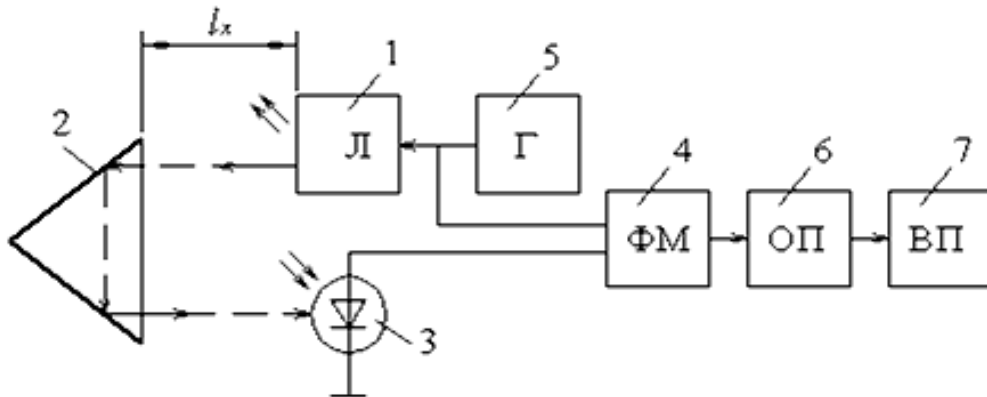


Рисунок 8.7 – Схема модуляційного локаційного віддалеміра

Вимірювана відстань визначається в обчислювальному пристрої 6 за формулою:

$$l_x = \frac{v}{2} \tau = \frac{v}{2} \frac{\varphi_\tau}{2\pi f_m} = \frac{v}{2f_m} \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) = \frac{c}{2nf_m} \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right). \quad (8.10)$$

Отже, під час вимірювання фазовими локаційними віддалемірами відстаней, більших від половини довжини хвилі модуляційного сигналу, необхідно визначити повну кількість фазових циклів і кут фазового зсуву в границях неповного останнього циклу. Частота модуляції таких віддалемірів лежить в межах 10 ... 100 МГц.

За допомогою оптичної локації та лазерів відстань від Землі до відбивачів, встановлених на Місяці, була визначена з точністю до 2 ... 6 см, тобто з похибкою $\approx 2 \cdot 10^{-8} \%$.

8.4 Основні напрямки автоматизації контролю

Контрольні операції у приладобудуванні займають великий об'єм робіт. Велике число контролерів перевіряють заготовки, напівфабрикати, готові деталі і вироби, щоб не допустити браковану продукцію на наступні операції чи до споживача виробу. Автоматизація контролю не тільки зменшує необхідність у контролерах, але дозволяє стабільно виконувати всі запрограмовані дії із проведення контролю і більш ретельно перевіряти контрольовані параметри (розміри, форму тощо) деталей і виробу в цілому.

Контроль – це одна з діючих форм боротьби за покращення якості виробів відповідно з його основними функціями – профілактикою браку при виготовленні виробів і запобіганням випуску бракованої продукції. За організаційно-технічними ознаками контроль може бути класифікований:

1. За призначенням – перевірка лінійних розмірів, форми, шорсткості поверхні, фізико-механічних і хімічних властивостей деталей, взаємного розташування і якості з'єднання деталей у складальних одиницях (дотримання необхідних зазорів, натягів тощо), виконання функціональних параметрів виробу тощо.

2. За кількістю вимірюваних виробів – на суцільний і вибірковий.

3. За кількістю контрольних операцій – на поопераційний і остаточний.

4. За ступенем – на ручний, механізований і автоматизований.

5. За характером впливу на технологічний процес – на активний і пасивний.

6. За способом вимірювання – на прямий, непрямий, комбінований.

Застосування механізації чи автоматизації контролю, так само як і інших операцій виробничого процесу, повинно бути обґрунтовано технічно й економічно. Основні міркування, якими потрібно керуватися при виборі механізації і автоматизації контролю і необхідних вимірювальних засобів:

а) раціональна схема контролю, що забезпечує перевірку з заданою точністю і стабільністю показів вимірювання;

б) найменші з можливих трудові затрати на контрольні операції;

в) досягнення мінімального часу на операцію контролю;

г) суміщення контролю декількох параметрів в одному контрольному переході, тобто використання пристроїв для контролю декількох величин одночасно;

д) використання найбільш економічних приладів і пристроїв;

е) застосування надійних і довговічних пристроїв, простих в експлуатації і ремонті.

При виконанні контрольних операцій в результаті неправильного базування контрольованої деталі, обмеженої точності контрольних засобів, помилок відліку, впливу температурних факторів, нераціональної схеми проведення вимірювання тощо виникають похибки вимірювання.

8.5 Пасивний і активний контроль

Автоматичним контрольним пристроєм називають такий, який без участі робітника виконує всі дії, необхідні для вимірювання виробу і зіставлення його дійсних розмірів з заздалегідь заданими. В автоматичному контрольному пристрої є блок пам'яті, куди заносять граничні розміри параметрів виробу, щоб пристрій міг зіставляти вимірювані розміри з заданими граничними. Якщо в результаті такого зіставлення пристрій сортує вироби за групами, то його називають *автоматом пасивного контролю* (рис. 8.8, а). Якщо за результатами зіставлення розмірів пристрій змінює хід

проходження процесу (зменшується подача, відводиться шліфувальна бабка тощо), то його називають *автоматом активного контролю* (рис. 8.8, б).

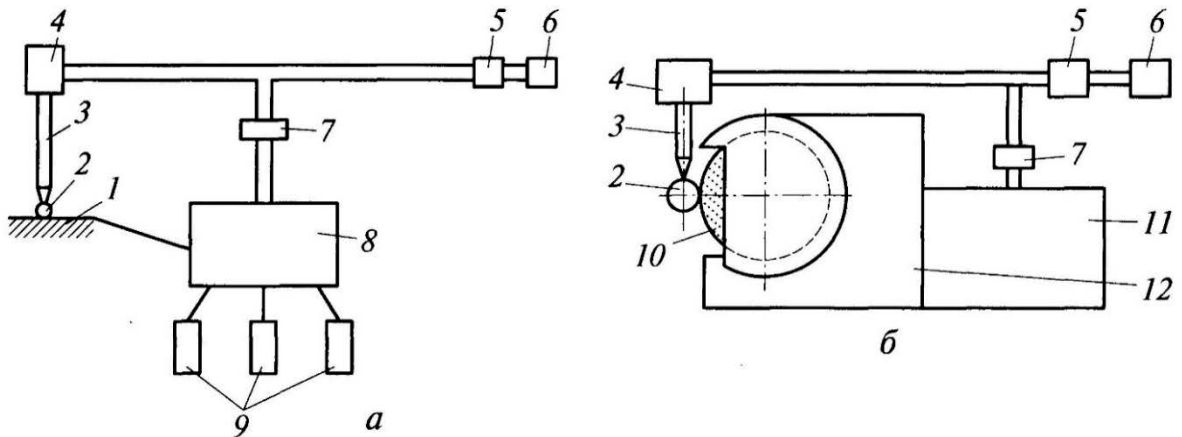


Рисунок 8.8 – Схеми автоматів пасивного (а) і активного (б) контролю:
 1 – вимірювальний пристрій; 2 – деталь; 3 – шток; 4 – розмірний давач;
 5 – лічильник; 6 – сигналізація; 7 – проміжна ланка; 8 – сортувальний пристрій;
 9 – ємності для розсортовування деталей; 10 – інструмент; 11 – виконавчий механізм;
 12 – шліфувальна бабка

Автомати пасивного й активного контролю містять ряд однакових за призначенням пристроїв, що дозволяє уніфікувати найбільш надійні і конструктивно удосконалені з них.

Автомати пасивного контролю. За допомогою автоматів для пасивного контролю (рис. 8.8, а) можна не тільки сортувати вироби 2, вимірювані в пристосуванні 1, на придатні і непридатні за заниженими і завищеними розмірами, але і сортувати (8-сортувальний пристрій) придатні вироби за групами із заздалегідь заданим груповим допуском (9-ємності для розсортованих деталей), що особливо важливо при автоматичному складанні деталей.

Для розподілу деталей за групами використовують різні конструкції сортувальних автоматів. Часто потік деталей сортується за допомогою шиберів чи „прапорців”, що приводяться в дію електромагнітами (рис. 8.9).

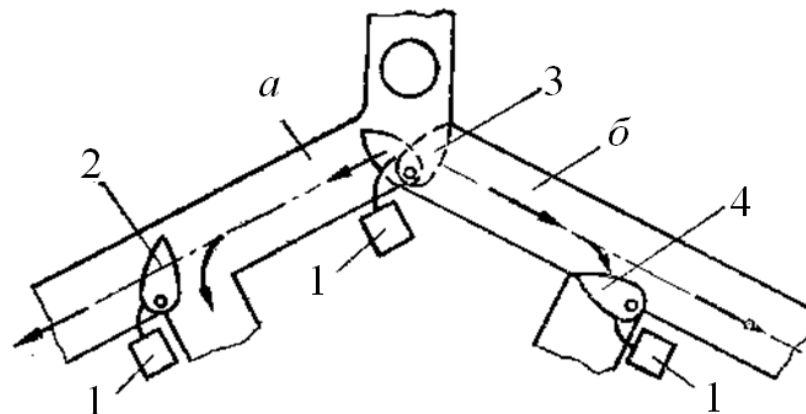


Рисунок 8.9 – Схеми розділення потоку з заслінками:
 1 – електромагніт; 2 ... 4 – шибери; а, б – канали

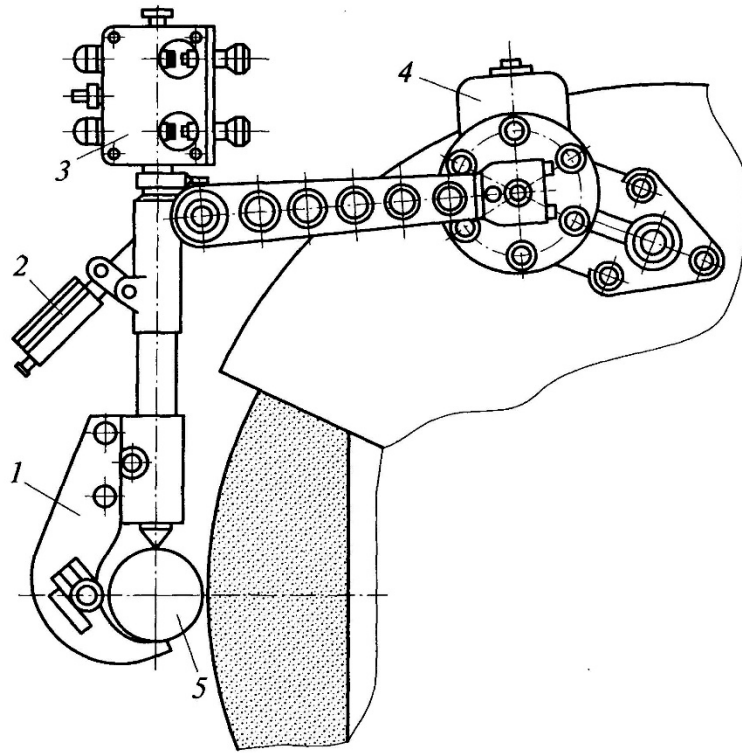
Електромагніт 1, одержуючи сигнал від давача, спрацьовує і прапорець 3, повертаючись, закриває канал *б*, щоб деталь могла пройти в канал *а*. У разі відсутності сигналу від контрольного давача прапорець перебуває у початковому положенні (зазначеному суцільним) і деталь прямуватиме в канал *б*. Аналогічно відбувається робота шиберів у наступних роздільних каналах. Для зменшення кількості сигналів на електромагніти і спрощення роботи сортувального автомата потрібно інтервали вимірювання деталей розділяти навпіл. Наприклад, потрібно згрупувати деталі, виготовлені на розмір $2+0,08$ мм, на чотири групи з груповим допуском 0,02 мм.

Перший розділювач потоку налаштовують на розмір 2,04 мм, щоб деталі, більші 2,04 мм, відокремлювалися в потік *а*, менші – у потік *б*. Деталі, що надійшли в потік *а*, знову розділяють на розміри, більші і менші 2,06 мм. У потоці *б* розподіл відбувається на розміри, більші і менші 2,02 мм. Таким чином, для визначення групи деталей повинно бути лише 1–2 сигнали на спрацьовування відповідних шиберів (2,04 мм і 2,06 мм чи 2,02 мм). Так, якщо дійсний розмір деталі 2,03 мм, то вимірювальний давач подасть команду на переключення лише шибера на розмір від 2,02 мм до 2,04 мм. Деталь відразу потрапляє в канал *б*, а потім з нього в канал, що відкривається шибером 4. Таким чином, спрацював лише один шибер. Якщо дійсний розмір буде 2,07 мм, то спрацює шибер 3, що відкриває канал *а* (на 2,04 мм), і шибер 2, що відкриває канал на розмір більший, ніж 2,06 мм.

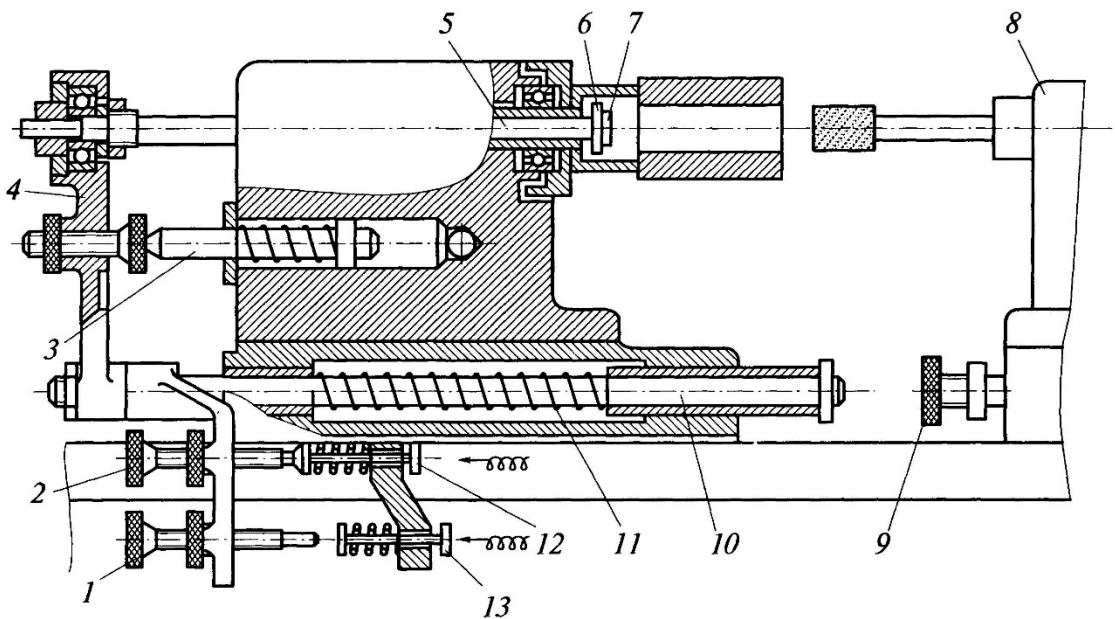
Автомати активного контролю. За допомогою автоматів активного контролю вимірювання здійснюють у процесі обробки деталі. Причому вимірювати можна безпосередньо оброблювану деталь (прямий метод), положення інструмента чи частини верстата (непрямий метод) або деталь і положення інструмента (комбінований метод). Іноді активний контроль здійснюють не в процесі обробки, а після закінчення обробки, коли складно вмонтувати вимірювальний шток в зону обробки. Автомат активного контролю, вимірявши деталь, може подати сигнал на зупинку верстата через невідповідність заданих розмірів, поломку інструмента та інші причини а також на підналагодження верстата.

Активний контроль – найбільш прогресивний метод, тому що він не фіксує брак, а запобігає його появі, дозволяє звільнити робітника від функцій керування верстатом залежно від досягнення заданих параметрів виробу і створює можливість введення автоматичного підналагодження.

На рисунку 8.10, а показана трьохконтактна вимірювальна скоба, яка призначена для вимірювання при врізному зовнішньому шліфуванні. Накидна скоба 1 зв'язана з кожухом шліфувального круга за допомогою амортизатора 4. Автоматичне вимірювання деталі 5 і керування процесом шліфування здійснюються за допомогою електроконтактного давача 3. Давач налаштовують за еталонною деталлю або за допомогою розташованого на скобі індикатора 2. Цикл роботи верстата полягає в наступному. Деталь встановлюється на верстаті. Вимірювальна скоба встановлюється на деталь. Потім підводиться шліфувальний круг і починається обробка деталі.



a



б

Рисунок 8.10 – Активний контроль прямим способом за допомогою:
 а – трьохконтактної скоби: 1 – скоба; 2 – індикатор; 3 – електроконтактний давач; 4 – амортизатор; 5 – деталь; б – калібрів: 1, 2 – мікрометричні гвинти; 3, 5, 10 – штки; 4 – кронштейн; 6, 7 – калібри; 8 – шліфувальна бабка; 9 – упор; 11 – пружина; 12, 13 – контакти

При зменшенні діаметра деталі до значення, що відповідає начорно відшліфованій деталі, шток, опускаючись вниз, замикає контакти, що подають сигнал на перемикання подачі з чорнової на чистову. При подальшому шліфуванні, коли розмір деталі виявиться рівним остаточному, шток, продовжуючи опускатися, замкне інші контакти, що подають сигнал на відключення подачі і на реле часу, яке відключить верстат після процесу виходжування деталі.

На внутрішньошліфувальних верстатах автоматичний контроль при обробці можна здійснювати за допомогою калібрів 6 і 7 за схемою, показаною на рисунку 8.10, б. Калібри закріплені на штоку 5, що проходить через шпиндель верстата. Шток і калібри обертаються спільно зі шпинделем верстата. Калібр 7 зроблений за розміром чорнової обробки отвору, калібр 6 – чистового розміру. За допомогою пружини 11 через шток 10 і кронштейн 4 забезпечується безперервне підтискання калібрів до торця деталі. Під час шліфування при русі шліфувальної бабки 8 упор 9 відводить калібри від деталі, щоб не заважати шліфуванню. При відході бабки вправо калібри вводяться у вимірюваний отвір. При вході калібру 7 замикається контакт 12, подається команда на автоматичну правку шліфувального круга і перехід на чистове шліфування. При вході калібру 6 замикається контакт 13 і подається команда на закінчення роботи. Мікрометричні гвинти 1 і 2 служать для регулювання контактів 12 і 13. Штоки 3 і 10 визначають положення кронштейну 4.

8.6 Автоматичний контроль лінійних розмірів деталей

Найчастіше при виготовленні деталей контролюють зовнішні і внутрішні діаметри, довжину, висоту, відстань між цапфами й отворами, биття одних поверхонь відносно інших. Для вимірювання зовнішніх діаметрів використовують наступні пристрої (рис. 8.11).

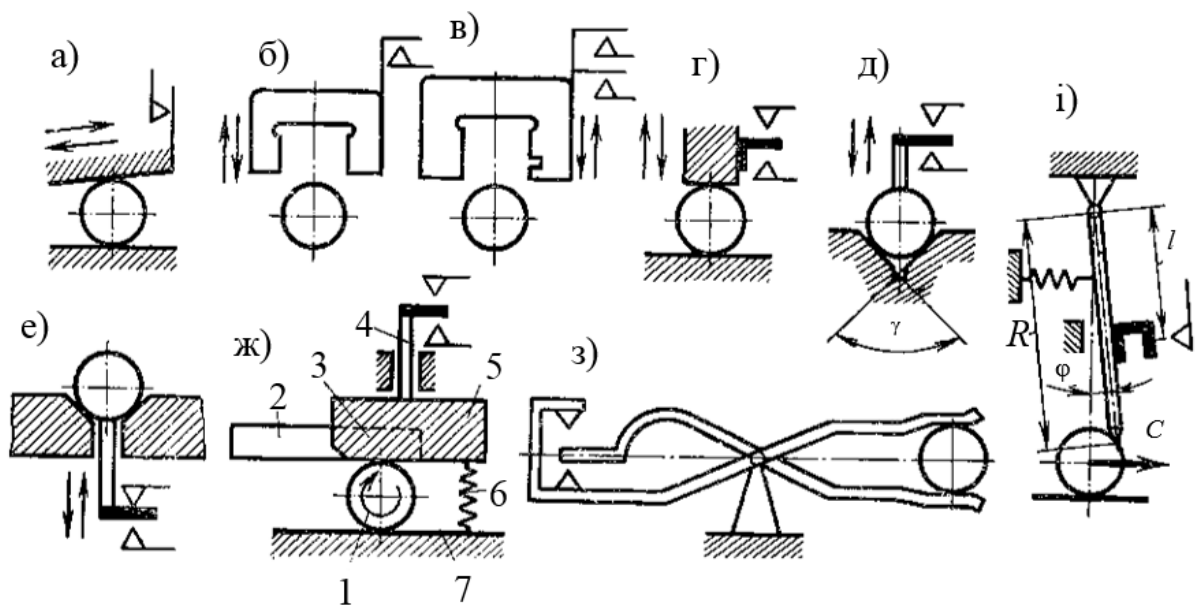


Рисунок 8.11 – Схеми активного контролю зовнішніх діаметрів

Конусний калібр (*a*), одногранична (*б*) чи двохгранична (*в*) скоба при своїх переміщеннях натискають на відповідні чутливі елементи давачів, щоб подати команду на прилади, для сортування чи регулювання роботи верстата або для візуального спостереження. При вимірюванні розміру деталі від площини (*г*) переміщенням штока $l=JT$, а при встановленні деталі в призму (*д*)

$$l = \frac{JT}{2} + \frac{JT}{2\sin(\gamma/2)}, \quad (8.11)$$

де γ – кут призми, а JT – допуск на розмір деталі. Чим менший кут γ , тим більше переміщення штока.

При вимірюванні за схемою (*е*)

$$l = \frac{JT}{2\sin(\gamma/2)} - \frac{JT}{2}, \quad (8.12)$$

тобто переміщення штока дуже мале і точність вимірювального пристрою дуже висока.

Якщо потрібно вимірювати виріб у процесі переміщення, то можна застосовувати схеми *ж*, *з*, *і*. У схемі *ж* виріб 1 притискається до плоского установочного елемента 7 штовхачем 2 і губкою 5 за допомогою пружини 6. Непаралельність сторін губки 5 до 0,4 мкм, що забезпечує високу точність показів приладу при переміщенні штока 4. Штовхач 2 зв'язаний з губкою 5 шарніром 3.

У схемі *з* розмір діаметра вимірюється губками-ножицями.

У схемі *і* граничний розмір деталі визначають за відхиленням штока. При такому вимірюванні переміщення штока значно більше, ніж допуск на розмір деталі JT .

Контакт давача при цьому потрібно встановлювати на відстані

$$L = 1,41l\sqrt{JT/R} \quad (8.13)$$

від вертикального положення штока. Наприклад, нехай $JT=0,01$ мм, $R=100$ мм, $l=80$ мм. Тоді $L = 1,41 \cdot 80\sqrt{0,01/100} = 1,128$ мм.

Таким чином, відстань, яку проходить контакт на штоку, у 112,8 рази більше допуску на розмір валу.

Дія автоматичних пристроїв для вимірювання висоти і довжини аналогічна розглянутим вище на рисунку 8.11, *a*, *б*, *в*, *г*, *з*, *і*.

Пристрої, призначені для вимірювання діаметрів отворів, можуть працювати за схемами, представленим на рисунку 8.12. При контролі однограничною і двохграничною пробками (*a* і *б*) переміщення їх в отворі призводить до замикання контактів для подачі сигналу на сортувальний пристрій чи в систему керування верстатом і приладом для візуального спостереження. Аналогічно вимірювання здійснюють конічними пробками (*в*).

Дуже зручно контролювати розмір малих отворів пневмодавачами.

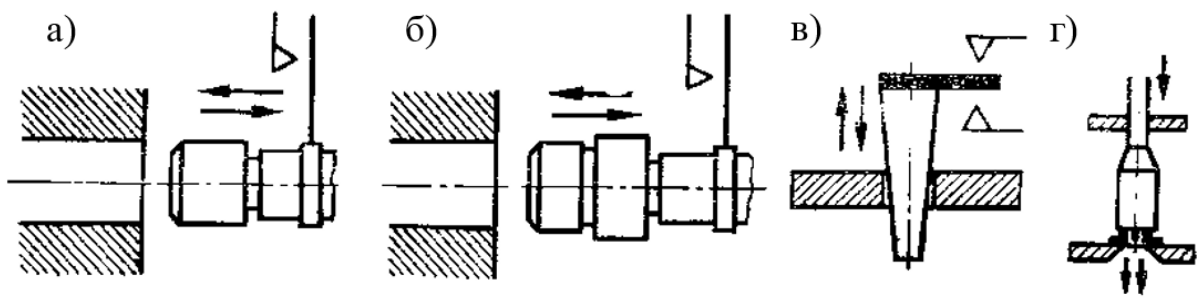


Рисунок 8.12 – Схеми автоматичного контролю діаметрів отворів

Вимірювальне сопло підводиться безпосередньо до торця отвору так, щоб контрольований отвір являв собою продовження отвору сопла (z). Така зміна перерізу отвору сопла викликає зміну тиску у вимірювальній камері давача. Давач градується за еталонним отвором.

8.7 Автоматичний контроль форми деталей

Форми поверхонь деталі, що задані кресленням, у результаті похибок при обробці можуть мати значні відхилення. У циліндричних поверхонь можуть виникати: овальність; огранювання; некруглість – відхилення форми, що з'являються в перерізі, перпендикулярному осі; конусність; випуклість; увігнутість; зігнутість – відхилення форми, що з'являються у перерізі уздовж осі.

При підвищених вимогах до правильності геометричної форми деталі задаються межі відхилень від необхідної форми. Вимірюють відхилення приладами для пасивного контролю, що складаються з пристосування для встановлення деталі, вимірювального пристрою, приладу для світлової чи звукової сигналізації, транспортного і сортувального пристрою. Для контролю відхилень у поперечному перерізі деталі циліндричної форми встановлюють деталь 2 контрольованою поверхнею в призму 1 (рис. 8.13, а) і до поверхні деталі, що перевіряється, підводиться шток 3 амплітудного давача. Після цього деталь обертають у призмі на $180\text{--}200^\circ$. Якщо відхилення форми перевищать допустиме значення, то замкнуться один 4 і потім інший 7 контакти давача, завдяки тому, що важіль 8 повертається і сектор 6 переміщає місток 5.

При контролі відхилення форми поверхні (биття) відносно осі деталь 9 встановлюють у центрах 12 на вимірювальну базу (вісь деталі, у даному випадку співпадаючу з технологічними базами – центровими гніздами), а до циліндричної поверхні підводять оправку 11 з амплітудним давачем чи індикатором 10 (рис. 8.13, б). При повороті деталі на $180\text{--}200^\circ$ вимірювальний шток чи стрілка індикатора буде відхилитися в один та інший бік, тому що биття характеризується зміною розміру радіуса кола в перерізі, перпендикулярному осі деталі.

Аналогічно контролю биття можна перевіряти перпендикулярність торця осі деталі. Для цього деталь 14 (рис. 8.13, в) встановлюють у центри чи в призму 18 з упором 13 у торець, а до торця, що перевіряється, підводять шток амплітудного давача 16 чи індикатора. При повороті деталі на $180\text{--}200^\circ$

визначитись биття торця.

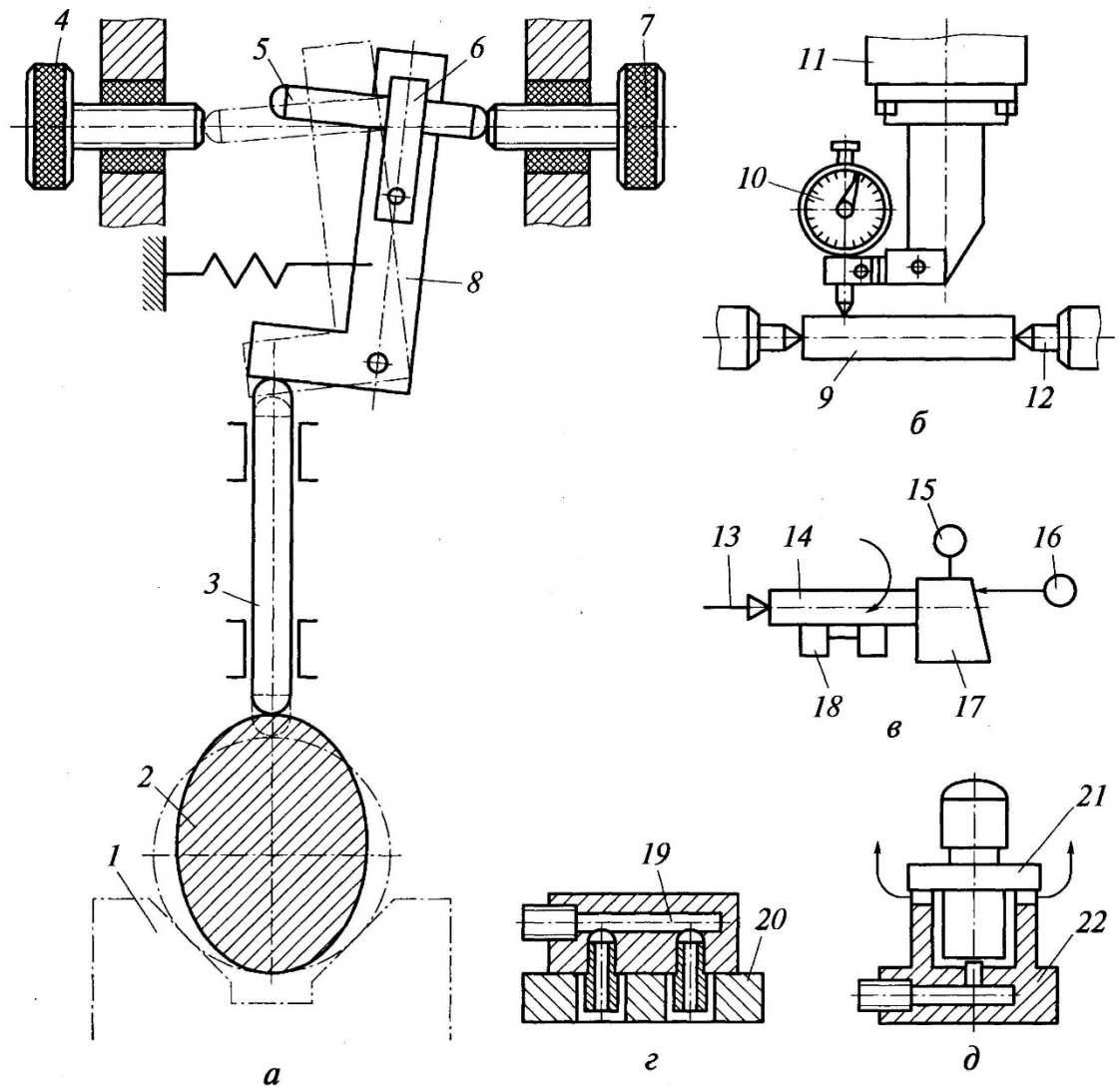


Рисунок 8.13 – Схеми контролю відхилень форми деталі:

1 – призма; 2, 9, 14, 17, 20, 21 – деталь; 3, 16 – шток; 4, 7 – контакти; 5 – мостик; 6 – сектор; 8 – важіль; 10 – індикатор; 11 – оправка; 12 – центр; 13 – упор; 15 – давач; 18 – призма; 19 – сопло; 22 – вимірювальна головка

При перевірці паралельності циліндричної поверхні деталі 17 відносно іншої 14 вимірювальну базову поверхню необхідно встановити в призму, а до поверхні, яка перевіряється підвести давач 15. При обертанні деталі в призмі відхилення положення вимірюваної поверхні вище допустимих меж, приведуть до замикання контактів давача. Для контролю відхилень від заданої форми можуть бути використані і пневматичні давачі, що контролюють відстань між двома отворами (рис. 8.13, в), розміри між торцем і буртиком (рис. 8.13, д) тощо. При контролі відстані між двома наскрізними отворами деталі 20 у вимірювальному соплі 19 калібру розміщуються два канали, що вводяться у вимірювані отвори. При різній міжосьовій відстані отворів вимірювальні канали будуть на різних відстанях від поверхонь отворів, що і

приведе до зміни тиску в робочій камері давача. При вимірюваннях відстані від торця деталі 21 до буртика деталь буртиком встановлюють на вимірювальну головку 22. У торці головки розміщується вимірювальне сопло. Залежно від відстані від буртика до торця торець буде ближче чи далі від вимірювального сопла, що і приведе до зміни тиску в робочій камері давача. Повітря виходить з головки через декілька отворів.

Для прискорення дії пневматичних контрольних пристроїв часто використовують пневмоелектроконтактні проміжні пристрої. На рисунку 8.14 показана схема такого пристрою з двома сиффонами. У сиффон 6 подається повітря постійного тиску, у сиффон 1 – повітря з робочої камери давача. Тиск повітря в кожному сиффоні приводить до його стискання чи розтягування. Залежно від різниці тисків у цих сиффонах переміщається зв'язана з ними каретка 14. При цьому повертається важіль 13 і замикаються контакти 8 чи 16, що налаштовуються на граничні розміри вимірюваної поверхні деталі. Щоб контролювати відхилення від геометричної форми, на каретку 14 встановлюють плаваючий штифт 3, що замкне послідовно контакти 2 і 5, якщо відхилення перевищать допуск. Упор 4 на каретці служить для обмеження переміщення самої каретки.

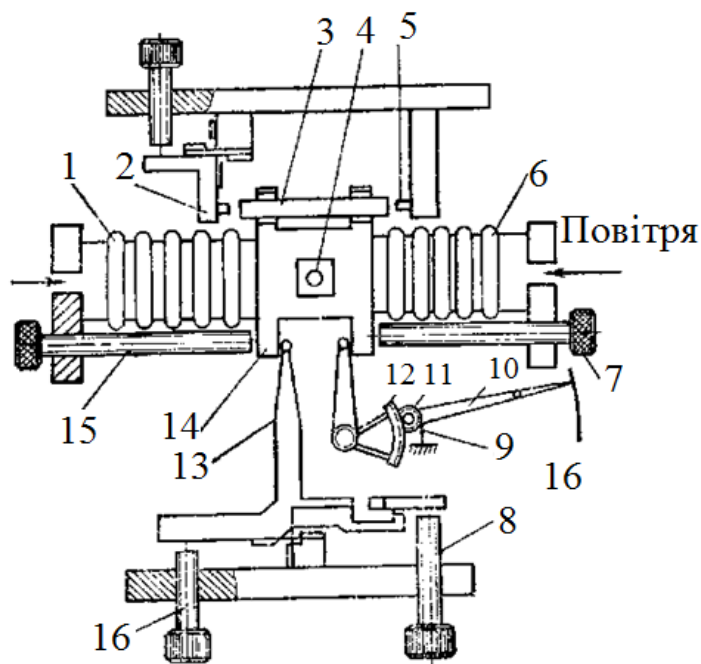


Рисунок 8.14 – Проміжний пневмоелектроконтактний перетворювач з двома сиффонами

Візуальне спостереження розмірів можна здійснювати за відліковим пристроєм у вигляді важеля 12 із зубчастим сектором, що входить в зачеплення з колесом 11, на осі якого закріплена стрілка 10. Мертвий хід механізму вибирають за допомогою спіральної пружини 9, а положення каретки 14 налаштовують гвинтами 7 і 15.

Для сортування деталей за групами відхилень форми можна застосовувати багатоконтактні давачі.

8.8 Завантажувальні і транспортні пристрої контрольних автоматів

Активний контроль – це, найчастіше, контроль у процесі обробки деталі, тому спеціального завантаження і переміщення деталі для контролю не потрібно. При пасивному контролі деталі завантажують у магазинні чи бункерні завантажувальні пристрої. Живильник магазину, що переміщається з перервами чи безперервно, подає деталь на робочу позицію контрольного пристосування. Іноді деталь контролюють безпосередньо на живильнику. Після контролю тим же живильником деталь переміщається до сортувального автомата.

Переривчастий рух може забезпечити такі режими переміщення деталі (виробу), як повільне спочатку, потім швидке, уповільнене при підведенні до контрольної позиції переміщення; зупинку на час безпосереднього контролю і знову переміщення на сортувальну позицію. При цій системі сам вимірювальний пристрій при безпосередньому контролі нерухомий чи здійснює лише невеликі переміщення.

При неперервному переміщенні деталі по колу, за складною траєкторією чи по прямій, контроль її відбувається у процесі руху. У цьому випадку сам вимірювальний пристрій може бути нерухомим чи рухомим.

Контрольні автомати бувають з вимірюванням виробу на одній чи в декількох позиціях. На рисунку 8.15, а показана схема транспортного пристрою однопозиційного автомата з переривчастим прямолінійним рухом виробу. З магазину 1 деталь надходить на основу. Живильник 2 переміщає деталь на контрольну позицію 7 під вимірювальну головку 8. Живильник рухається за допомогою вилки 4, шарнірно закріпленої на важелі 5. Важіль 5 одержує переміщення від кулачка 6, закріпленого на розподільному валу автомата. Профіль кулачка дозволяє одержувати рух живильника на різних ділянках з потрібними швидкостями.

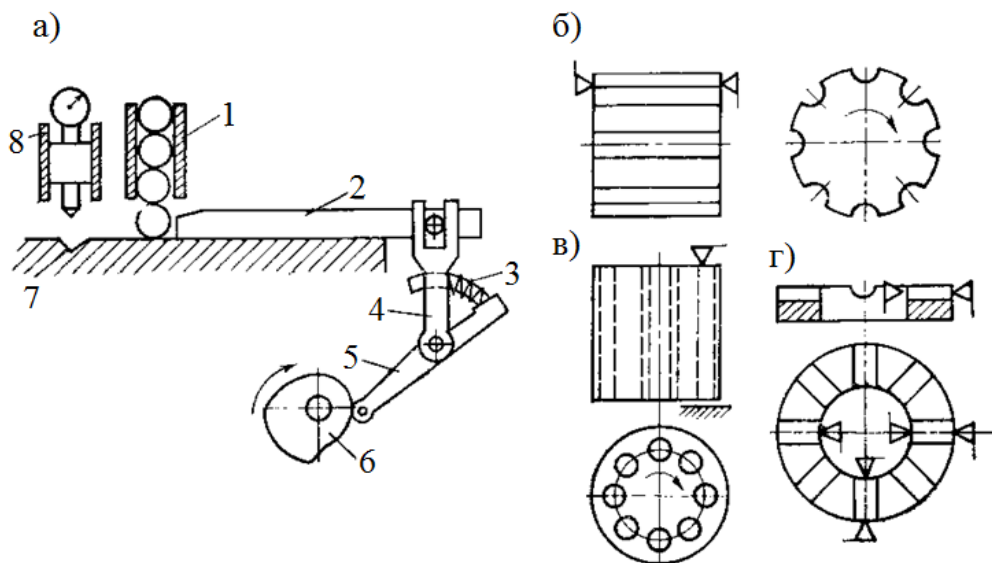


Рисунок 8.15 – Схеми транспортування виробів

Для попередження поломок автомата через попадання деталей із завищеними габаритами служить пружина 3, яка стискається при продовженні

руху важеля 5, зупинці живильника 2 і вилки 4.

Живильник має горизонтальну (рис. 8.15, б) чи вертикальну (рис. 8.15, в, г) осі обертання при транспортуванні виробу по колу. У гнізда живильника подаються деталі, що обертаються разом з живильником. До циліндричної чи торцевої поверхні пристрою підведені вимірювальні головки. Живильник періодично повертається на кут, що відповідає числу гнізд для деталей, за допомогою мальтійського хреста, храпового пристрою, крокового двигуна й інших пристроїв.

Неперервний рух транспортних пристроїв застосовують в автоматах для контролю й обробки деталей типу кульок тощо.

Схема одного з видів контрольних автоматів для розсортування кульок за групами представлена на рисунку 8.16. Кульки 1 завантажуються в бункер 2. Механізм живлення у вигляді обертового диска 3 з отворами-карманами подає кульки до отвору в дні 4 бункера. Диск 3 приводиться в обертання від двигуна за допомогою черв'ячної пари 7. Кулька випадає з отвору в дні бункера і надходить по лотку 5 на клиновий калібр 6, що становить собою дві похилі розбіжні лінійки. Під лінійками розміщені ємності, у які провалюються кульки, коли їхній розмір буде відповідати зазору між лінійками. Автомат забезпечує сортування кульок з точністю 1 мкм.

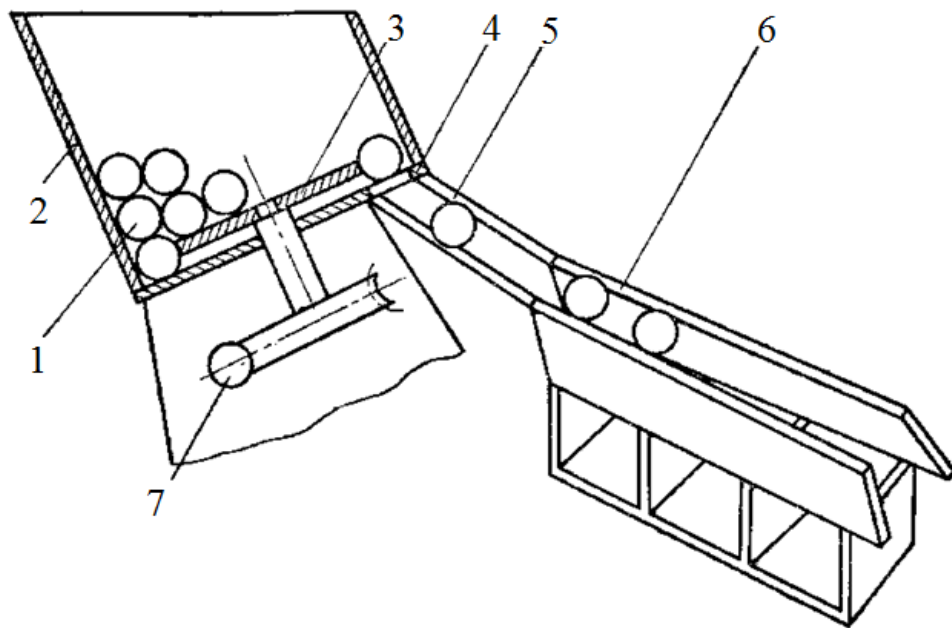


Рисунок 8.16 – Схеми автомата для контролю кульок

Багатопозиційні автомати контролюють на кожній із робочих позицій декілька розмірів виробів одночасно. В автоматі існує завантажувальна і розвантажувальна позиції, при цьому час на завантаження і розвантаження суміщається з часом на контроль. Продуктивність автомата надзвичайно висока і складається з часу контролю в найбільш тривалій позиції, часу на поворот блоку з виробами на одну позицію і підведення вимірювального штока. У кожній робочій позиції є лоток для скидання вимірюваного виробу, якщо його розміри не відповідають заданим. Скинутий таким чином виріб

надходить в ізолятор браку. Вироби з розмірами, що відповідають допустимим, надходять з однієї вимірювальної позиції на іншу, а потім на наступну операцію обробки чи на складання.

При перевірці у виробі відхилень від заданої геометричної форми необхідно передбачати пристрої, що будуть повертати виріб під час контролю. Для виробів з магнітних матеріалів широко застосовують магнітні патрони. Виріб притискається до торця патрона і при необхідності обертається разом з ним. Після перевірки виріб обов'язково проходить операцію розмагнічування, щоб не прилипнути до металевих частин і щоб до виробу не прилипла металева стружка.

8.9 Контрольні пристрої автоматичних ліній

В автоматичних лініях і на багатопозиційних автоматах деталей встановлюють за допомогою роботів чи автоматичних рук. У цьому випадку необхідно контролювати наявність деталі на позиції і правильність її встановлення, щоб запобігти браку при обробці і можливій поломці інструмента, підведеного до загартованої поверхні пристосування, а не до деталі.

На рисунку 8.17, *а* наведена схема контрольного пристрою для визначення положення обода балансу в операції свердління і нарізання різьби на автоматі А317. На пристосування 1 автоматична рука встановлює баланс. До балансу опускається контрольний пристрій, закріплений на руці 6, при цьому п'ята 2 стержня 8 притискається до верхньої площини балансу. Якщо баланс розташується вище норми, тому що автоматична рука посадила його на незнятий з верстата оброблений баланс, то стержень 8, піднімаючись, замкне контакт 5. Якщо через стружку в пристосуванні баланс встановиться з перекосом, то стержень 8, що відхилиться (положення зазначене пунктиром), замкне кільцевий контакт 4. В одному й іншому випадку контакти, що замкнулися, подають команду на зупинку верстата. Зазор між стержнем 8 і отвором кільця 4 регулюється шляхом заміни кілець, а між стержнем 8 і контактом 5 – переміщенням контакту 5. Люфт у шарнірі п'яти 2 регулюється деформацією пелюстків цанги 3 під дією пружини 7.

В автоматичних лініях застосовують пристрої для активного і пасивного контролю. Активні автоматичні пристрої найчастіше всього застосовують на фінішних операціях, де найважливіша функція автоматів – одержання необхідної точності виробів. Одержання визначених розмірів під час обробки, коли температура деталі вище 20°C, пов'язано з необхідністю обліку температурних деформацій. Тому існують два шляхи обліку зміни розмірів через нагрівання деталей. Перший – налаштувати пневмодавач на розмір, що враховує поправку, зв'язану з підвищеною температурою деталі. Попередніми вимірюваннями температури кожної деталі дослідної партії встановлюють її середнє значення і за розрахунками вносять поправку на розмір. Другий – вводить у контрольний пристрій автоматичний компенсатор температурної деформації.

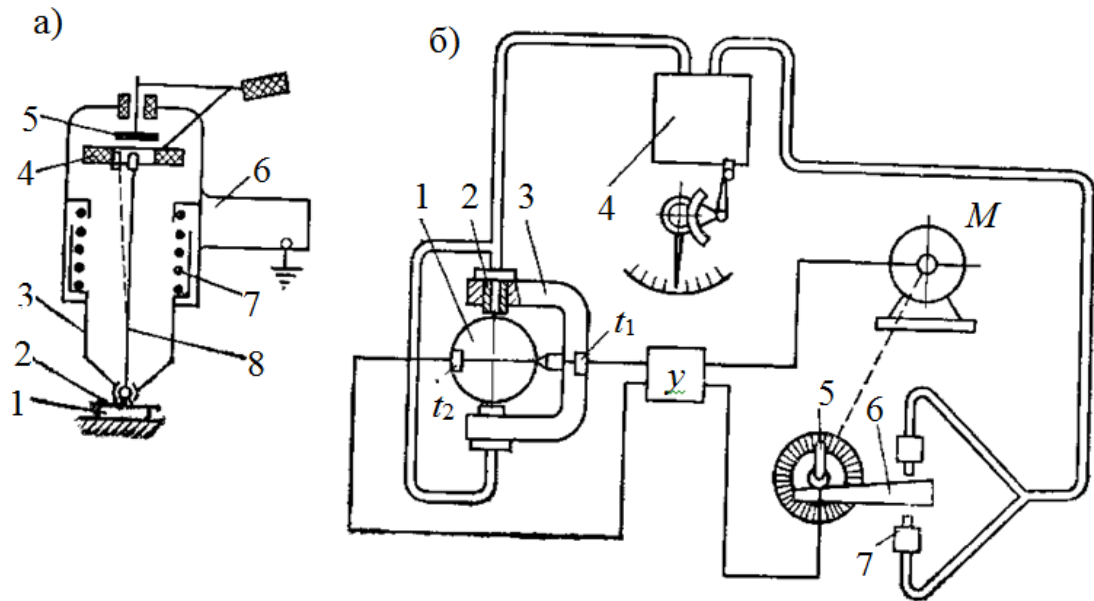


Рисунок 8.17 – Схема активного контролю положення деталі в пристосуванні і розміру деталі з термокомпенсатором

На рисунку 8.17, б показаний автомат для активного контролю з пневмодавачем і температурним компенсатором. Оброблювана деталь 1 вимірюється пневмоскобою 3. До деталі підводиться термоопір t_2 , а до скоби-термоопір t_1 . Термоопори включаються в плечі самобалансуючого моста. Скоба із соплами 2 із двох сторін підводиться до деталі. Сопла включені в одну ланку диференціального приладу 4, а допоміжні сопла 7 – у іншу ланку. При зміні температури деталі 1 порівняно зі скобою 3 серводвигун М переміщає двигун реохорда і через рейково-зубчасту передачу 5 клин 6, щоб змінити зазор між соплами 7 і клином 6 і, відповідно, тиск у правій ланці приладу 4. Кут клину 6 підбирають так, щоб при номінальному розмірі деталі зміні сумарного зазору під соплами 2 при зміні температури деталі і скоби відповідала б така ж зміна сумарного зазору під соплами 7.

Крім діаметральних розмірів дуже важливо забезпечити вимірювання довжини, ширини й інших розмірів оброблених поверхонь. В автоматичних лініях, агрегатних багатопозиційних верстатах і автоматах при обробці отворів у корпусних деталях (пластинах, мостах тощо) доводиться в різних позиціях виконувати свердління, зняття фасок, нарізання різьби. При цьому поломка свердла в одній позиції приведе до поломки зенкера і мітчика в наступних, тому що зенкер і мітчик будуть упиратися в поламає свердло, що залишилося в отворі. Щоб цього не відбулося, після свердлильної позиції повинна бути контрольна, у якій щуп вводиться в отвір і, якщо отвір не має заданої глибини, подається команда на зупинку верстата.

Наявність отвору заданої глибини можна перевіряти не тільки безпосередньо, але і по довжині установленого свердла. Для цього на автоматичній лінії (верстаті) установлюється радіаційний чи фотоелектричний давач, розташований у точці, що відповідає кінцю свердла. Якщо в позиції міститься свердло установленої довжини, то сигнал від давача відсутній. Якщо

свердло, яке повернулось після свердління, не має заданої довжини (поламалося), то давач подає сигнал і верстат зупиняється. У ряді випадків необхідно передбачати захисні пристрої для запобігання інструментів від поломки, контролю правильності положення заготовки в пристосуванні, наявності заготовок у магазині тощо. Наприклад, якщо при свердлінні отвору зростає зусилля подачі і відбудеться поломка свердла, захисний пристрій, що має у своєму складі силовий давач, зупинить лінію чи автоматичний верстат. Велике значення для безаварійної роботи лінії мають розміри заготовок, що надходять на обробку. Якщо розміри завищені, то припуски на обробку виявляться більше розрахункових, що може привести до поломки різальних інструментів і виникнення великих зусиль різання, що викличе швидке спрацювання лінії, появу великих деформацій елементів лінії, а тому необхідність частих підналагоджень лінії. Важливо також не допускати на лінію заготовки з заниженими розмірами. Тому перед завантаженням на лінію заготовки сортують за допомогою контрольних автоматів пасивного контролю. Такі автомати встановлюють іноді і на виході з лінії готових деталей, щоб розсортувати деталі за групами.

Конструктивно автоматичні контрольні пристрої виконують так, щоб вони зручно вписувалися в автоматичні лінії за розмірами і формою. Для зменшення контрольних позицій застосовують багатомірні вимірювання з найбільш надійними і простими в експлуатації розмірними давачами.

У деяких випадках використання засобів активного контролю затрудняється через складність вимірювання тощо. При такій ситуації замість 100%-ного ручного контролю доцільний статистичний контроль: від партії деталей, оброблених при одному налаштуванні верстата, вибирають з різних місць 50–100 шт. і перевіряють їх універсальним вимірювальним інструментом. Значення розмірів $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$, отримані при цьому, обробляють методами математичної статистики, обчислюючи середній розмір l_{cp} відхилення кожної деталі від середнього значення x_1, x_2, \dots, x_n , ($x_1=l_1-l_{cp}$; $x_2=l_2-l_{cp}$; ...; $x_n=l_n-l_{cp}$) і середньоквадратичне значення відхилення $s = \sqrt{(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)/n}$. За отриманим значенням вимірювань будують графік розподілу розмірів. За графіком і розрахунковими даними можна судити про відхилення розмірів усіх оброблених деталей. Якщо на графіку різниця найбільших і найменших розмірів знаходиться в межах верхнього і нижнього відхилень (допуску), то можна вважати, що вся оброблена партія складається з придатних деталей. За таблицями також можна визначити відповідність точності оброблених деталей, що вимагається. Для цього необхідно перевірити чи витримується співвідношення між допуском IT на розмір обробленої в операції деталі і його значенням S . При співвідношенні $IT \geq 6S$ уся партія деталей придатна.

8.10 Автоматична сигналізація і захист

Цей вид автоматичного контролю полягає в подачі світлового або звукового сигналу при досягненні контрольованим об'єктом граничних

заздалегідь встановлених значень. Крім того, при порушенні заданого режиму роботи машини або установки пристрої автоматичної сигналізації сповіщають про появу аварійних режимів роботи і неполадок.

Розрізняють чотири типи автоматичної сигналізації: командна, контрольна технологічна, попереджувальна і аварійна.

Командна сигналізація призначена для передачі типових командних сигналів від одного поста управління до іншого і назад. Найпростіший приклад командної сигналізації – це пристрій машинного телеграфу на кораблях. При повороті рукоятки машинного телеграфу, розташованого в рубці на верхній палубі, в положення, що відповідає певній команді, наприклад «Повний вперед», в машинному відділенні сигнальний пристрій виробляє цю команду.

Контрольна технологічна сигналізація призначена для автоматичного сповіщення про включення в роботу або зупинку окремих допоміжних механізмів, положення запірних органів на різних комунікаціях тощо. До подібних пристроїв відносяться, наприклад, контрольні лампочки на пульті управління великого верстата, які сповіщають про те, що насос системи працює тощо.

Попереджувальна сигналізація служить для автоматичного сповіщення персоналу про виникнення небезпечних змін режиму, які загрожують при подальшому їх розвитку аварією. Ці пристрої сигналізують, наприклад, про необхідність зупинки верстата або припинення руху подачі у випадках поломки ріжучого інструменту, надходження неякісної заготовки, неправильного встановлення заготовки на верстаті, невиконанні попередньої операції або переходу, наявності стружки в отворі, в якому повинна нарізатися різьба, або у випадках, які можуть привести до псування обладнання.

На рисунку 8.18 показано пристрій попереджувальної сигналізації, який контролює наявність в отворі стружки, яка може привести до поломки ріжучого інструменту (мітчика) при нарізанні різьби. Деталь з контрольованим отвором 5 встановлюють строго по осі контрольного щупа 4. Механізм сигналізації отримує поступальний рух від гідроприводу 1. При наявності стружки в отворі шток разом зі щупом 4 переміститься вліво відносно корпусу 3 і, вплинувши на кінцевий вимикач 2, замкне електричний ланцюг сигнальної лампочки. Якщо стружка відсутня, то механізм попереджувальної сигналізації, дійшовши до упору 6, повернеться в початкове положення. Пристрої аналогічної конструкції служать для визначення наявності отвору в деталі і для сигналізації про поломку свердел в робочих органах автоматів і автоматичних ліній.

Аварійна сигналізація, як правило, має комбінований сигнал (світловий і звуковий), який подається при порушенні технологічного режиму. Звуковий сигнал служить для привернення уваги обслуговуючого персоналу, а світловий сигнал вказує місце порушення.

Аварійна сигналізація призначена для автоматичного оповіщення персоналу про те, що сталося відключення обладнання.

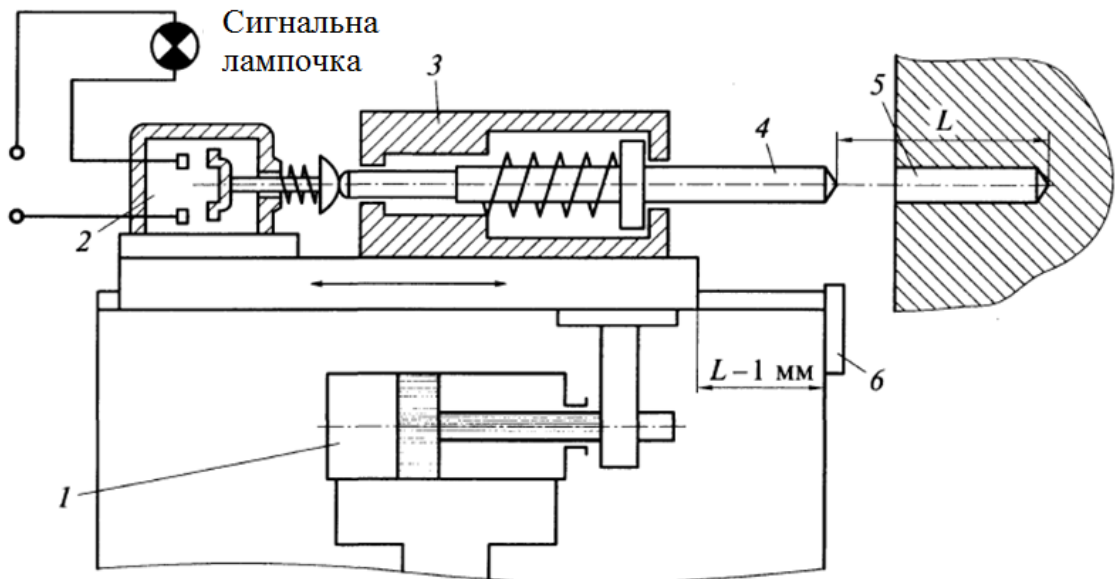


Рисунок 8.18 – Пристрій попереджувальної сигналізації:
 1 – гідропривід; 2 – кінцевий вимикач; 3 – корпус; 4 – щуп; 5 – деталь з контрольованим отвором; 6 – упор

Пристрої автоматичного захисту служать для відключення контрольованого об'єкта при порушенні нормальних режимів роботи, наприклад при перевантаженні електричного обладнання і коротких замикань в електричних ланцюгах, при підвищенні заданого тиску в резервуарах і поломки інструменту на верстатах автоматичної лінії.

Прикладом найпростішої автоматичного захисту можуть служити плавкі вставки, що представляють собою патрон з ізоляційного матеріалу зі вставкою з легкоплавкого металу, який при короткому замиканні розплавляється, розриваючи електричний ланцюг.

Особливим видом автоматичного захисту є захисно-блокувальні пристрої, які зупиняють верстат або припиняють подачу заготовок, попереджаючи аварію. Командою для спрацьовування захисно-блокувального пристрою є поломка і знос інструменту, неправильна установка заготовки, неякісний виліток і інші випадки.

Велике значення захисно-блокувальні пристрої мають в автоматичних лініях для запобігання поломки інструменту і обладнання. Якщо хоча б на одному верстаті автоматичної лінії відбудеться значний знос інструменту або з якої-небудь іншої причини буде не виконана операція, захисно-блокувальний пристрій зупинить лінію для усунення неполадок.

Пристрої автоматичного захисту особливо необхідні для створення безпечних умов роботи і для запобігання аварій.

Питання для самоконтролю

1. Які основні електричні методи застосовуються в техніці вимірювань лінійно-кутових розмірів?
2. Зміна якого параметра ємнісного перетворювача використовується у

якості інформативного?

3. У чому полягає суть індуктивного методу для визначення товщини шару покриття?

4. Чому, якщо застосовуються ємнісні перетворювачі, то перевага надається мостовим вимірювальним схемам?

5. Які види випромінювань застосовуються для реалізації локаційного методу вимірювання віддалей?

6. Що є інформативним параметром у модуляційних локаційних віддалемірах?

7. Які чинники можуть впливати на точність вимірювання, якщо використовується локаційний імпульсний метод?

8. Які основні напрямки автоматизації контролю?

9. Якими міркуваннями керуються при виборі автоматизованих засобів контролю?

10. Чим відрізняються один від одного пасивний і активний контроль?

11. Вкажіть відмінність і приведіть схеми пасивного та активного контролю.

12. Як побудовані автомати пасивного та активного контролю?

13. Як здійснюється автоматичний контроль лінійних розмірів деталі?

14. Наведіть схеми автомагічного контролю.

15. Наведіть схему автоматичного контролю зовнішнього діаметра і довжини а також діаметра отвору деталі.

15. Які структури контрольного та контрольного-сортувального автоматів?

17. Як влаштовані сортувальні пристрої контрольних автоматів?

18. Що таке «автоматична сигналізація» і «автоматичний захист»?

ТЕМА 9 МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ХІМІЧНОГО СКЛАДУ РЕЧОВИН

План

- 9.1 Вимірювання маси та ваги.
- 9.2 Вимірювання об'єму речовин, дозатори.
- 9.3 Вимірювання густини речовин.
- 9.4 Вимірювання в'язкості речовин.
- 9.5 Промислові і лабораторні віскозиметри.

9.1 Вимірювання маси та ваги

Маса, як особливого роду фізична величина була введена у фізику І. Ньютоном, який прирівняв її до кількості матерії, поміщеної в тілі, вираженому через об'єм та густину речовини цього тіла:

$$m = v\rho, \quad (9.1)$$

де m – маса тіла;

v – об'єм тіла;

ρ – густина речовини тіла.

Сила тяжіння F , яка є перпендикулярна до поверхні Землі і завжди прикладена в центрі ваги тіла C (рис. 9.1), визначається з 2-го закону руху Ньютона:

$$F = mg, \quad (9.2)$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

Сила P (рис. 9.1), з якою тіло під впливом сили тяжіння діє на підвіс в точці A або на підставку в точці B , називається вагою тіла.

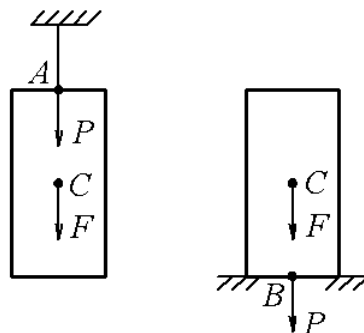


Рисунок 9.1 – Сила тяжіння і вага тіла

Процес вимірювання маси тіла відноситься до опосередкованих, бо визначити масу прямим вимірюванням не можна, а тому її знаходять шляхом вимірювання: 1) ваги тіла; 2) об'єму і густини речовини тіла; 3) прискорення, яке надається тілу певною силою; 4) періоду коливань тіла.

Процес вимірювання маси шляхом вимірювання ваги називається зважуванням, а прилади для вимірювання ваги – вагами.

Принцип зважування на основних типах механічних ваг – важільних і пружинних, показано на рисунку 9.2. Принцип зважування на гідравлічних, пневматичних, гідростатичних та електромеханічних вагах такий же, що й на пружинних вагах.

Зважування на важільних рівноплечих вагах (рис. 9.2, а), коли на одній

чашці знаходиться тіло масою m_Q , а на іншій – гирі вагою m_P , допускає припущення, що вимірювання є прямим. Але фізична суть процесу зважування дещо складніша, а саме: тіло вагою Q , діючи на плече a , створює момент $M_1 = Qa$, а гирі вагою P , які знаходяться на плечі b , – момент $M_2 = Pb$. Якщо ваги знаходяться у рівновазі, то $M_1 = M_2$, або $Qa = Pb$. Згідно з (9.2) $Q = m_Q g$ і $M_2 = m_P g$, відповідно, $m_Q g a = m_P g b$. Так як $a = b$, то $m_Q = m_P$. Таким чином, маса тіла визначається вимірюванням його ваги.

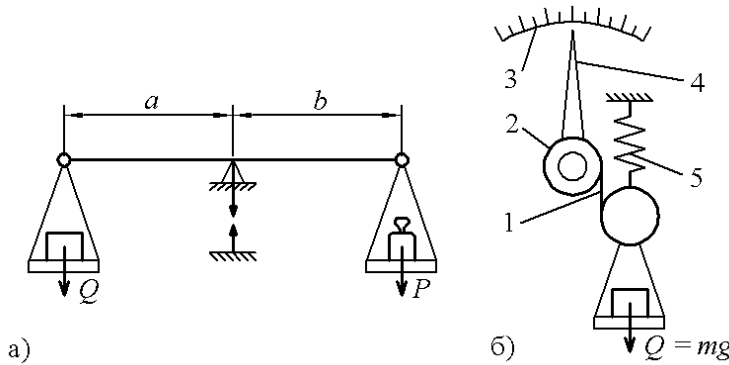


Рисунок 9.2 – Схеми зважування

Результати зважування на важільних вагах не залежать від місцезнаходження ваг на земній поверхні.

Під час зважування на пружинних вагах (рис. 9.2, б) вага тіла Q діє на пружину 5, деформація якої через зубчасту рейку 1 та зубчатку 2 передається на стрілку 4, що переміщується відносно шкали 3, проградуїрованої в одиницях маси. Деформація пружини пропорційна вазі тіла.

Покази пружинних ваг залежать від місця знаходження тіла на поверхні Землі. Це відбувається із-за того, що вага тіла $Q = m_Q g$ змінюється в залежності від значення g , яке різниться на різних географічних широтах.

Зважування, яким визначається кількість матерії, характеризується двома ознаками: принципом зважування та областю застосування.

За першою ознакою зважування поділяються на дискретні та неперервні.

Дискретним зважуванням визначається фактична маса тіла або зважується деяка частина матеріалу, і за сумою результатів визначається його сумарна маса, поміщена в ємкість – контейнер, ящик, вагон тощо.

У переважній більшості дискретними зважуваннями визначається не сумарна маса, а маса окремих доз або порцій матеріалу. У цьому випадку процес зважування називається дозуванням, а ваги називаються дозаторами дискретної дії.

Під час неперервного зважування результат отримують шляхом зважування матеріалу, який рухається по конвеєру.

Неперервним зважуванням наряду з сумарною масою може бути визначено кількість продукту, який пройшов по конвеєру за одиницю часу – секунду, хвилину, годину, тобто можуть бути визначені масові витрати, виражені в кг/с, кг/хв, Т/год. Ваги неперервної дії можуть також подавати в технологічний апарат певну кількість матеріалу за заданий інтервал часу. У цьому випадку вони називаються дозаторами неперервної дії.

За другою ознакою зважування поділяються на лабораторні, загального призначення, технологічні. Лабораторними або точними називаються зважування, похибка яких не перевищує 0,01%.

Такі вимірювання виконуються на лабораторних важільних і пружинних вагах в лабораторіях наукових і медичних закладів та промислових підприємств, для зважування дорогоцінних металів та каменів, хімікатів та ліків, а також в метрологічних лабораторіях для перевірки гир. В останньому випадку ваги називаються зразковими.

Зважування загального призначення, похибка яких складає 0,05 – 0,1%, виконуються у всіх галузях господарства, під час торгових, складських і транспортних операцій, на вагах загального призначення, норми точності яких регламентуються державним стандартом.

Технологічні зважування виконуються на промислових підприємствах для забезпечення правильності ведення технологічного процесу. Для технологічних вимірювань використовуються як точні, так і зважування загального призначення. До технологічних відносяться також ті зважування, які визначають не масу тіла або матеріалу, а іншу величину, пропорційну масі, наприклад, кількість деталей, товщину нитки або паперу, крохмальність або забрудненість картоплі тощо. Прилади, на яких виконуються такі зважування, називаються вагами спеціального призначення.

У кожній з трьох груп зважування вимірюються маси малі, середні та великі. До малих відносяться маси від часток міліграма до 2 Г, до середніх – маси від 2 Г до 50 кГ, до великих – маси понад 50 кГ.

Прилади для вимірювання маси – ваги – можуть бути класифіковані за наступними признаками: принципом зважування; методом створення зрівноважувального моменту; області застосування; ступені автоматизації; ступені точності та межами зважування – найбільшою (НМЗ) і найменшою (НмМЗ). За принципом дії ваги поділяються на ваги дискретної та неперервної дії.

У деяких випадках для промислових вимірювань використовуються ваги пневматичні, гідростатичні, з магніто-пружним давачем. В окремих конструкціях ваг використовуються два методи створення зрівноважувального моменту, наприклад, важільно-пружинні ваги або важільні ваги з вмонтованим тензорезистивним давачем.

За ступенем автоматизації ваги поділяються на: ваги ручної дії – неавтоматичні; напівавтоматичні; автоматичні.

9.2 Вимірювання об'єму речовин, дозатори

У багатьох випадках для оцінки кількості речовини (особливо, рідин) використовується не міра маси чи ваги, а міра об'єму.

Вимірювання кількості рідин здійснюється як дозами, що оцінюються сотими долями мілілітра, наприклад, в медицині, наукових досліджах, так і дозами, які оцінюються десятками, сотнями і тисячами кубічних метрів у промисловості та на транспорті. Окрім цього, рідини дуже різняться за своїми

фізико-технічними та хімічними властивостями. Це вимагає застосування найрізноманітніших методів вимірювання кількості рідин в одиницях об'єму, а також різноманітних методів повірки мір та приладів, які призначені для вимірювання кількості у цих одиницях.

Скляні міри місткості призначаються для вимірювання невеликої кількості рідин і використовуються для лабораторних якісних та кількісних аналізів, а також для повірок і в торгівлі. Для виготовлення скляних мір місткості використовується термічно та хімічно стійке безколірне скло. Скло має три хороші властивості: його поверхня легко піддається механічному та хімічному очищенню, забрудненість легко визначається візуально і, що важливо, коефіцієнт об'ємного теплового розширення скла є досить незначним і ним можна практично знехтувати під час вимірювання рідин, температура яких різниться з температурою градування міри.

Із скляних мір найбільше поширення отримали у лабораторній та повірочній практиці вимірювальні колби, вимірювальні піпетки і мікропіпетки, вимірювальні бюретки і мікробюретки, вимірювальні циліндри та мензурки. У торгівлі використовуються мірні кружки.

Металеві міри місткості широко використовуються в техніці вимірювання об'ємів і умовно поділяються на зразкові та технічні. Зразкові мірники мають номінальну місткість від 5 до 5000 л і більше. Мірники місткістю від 5 до 100 л в основному для повірки топливних колонок; місткістю від 50 до 500 л – для повірки технічних мірників; 500, 1000 л і вище – для градування залізничних і автомобільних цистерн, резервуарів, а також для повірки лічильників промислових рідин, в основному нафтопродуктів.

Стаціонарні технологічні резервуари часто використовуються для вимірювання кількості рідини, яка в них знаходиться. Таким чином, резервуари є одночасно сховищем для рідин і посудиною для вимірювання їх кількості. Для використання резервуарів з метою вимірювання необхідно знати залежність між висотою та об'ємом заповнення, а також мати пристрій для визначення висоти заповнення резервуара.

Для встановлення залежності між висотою заповнення і об'ємом виконується градування резервуарів, в результаті чого складається градувальна таблиця – індивідуальна для кожного резервуара. У цій таблиці приводиться об'єм наповнення резервуара в залежності від висоти наповнення з кроком 1 см. Градування резервуарів виконується об'ємним або геометричним методами.

З метою автоматизації процесів зважування або відмірювання об'ємів застосовуються дозатори дискретної та безперервної дії. Вони класифікуються за призначенням, принципом дії та конструктивними особливостями.

За призначенням дозатори поділяються:

- а) для обліку матеріалів у потоці;
- б) для дозування матеріалів (дозатори).

За принципом дії:

- а) дискретні або порційні:

- які відважують однакові за масою або об'ємом порції матеріалу;
- які визначають фактичну масу порцій чи об'єму матеріалу;
- б) неперервної дії або конвеєрні:
 - які інтегрують масу продукту на конвеєрі;
 - які подають матеріал з заданою інтенсивністю.

9.3 Вимірювання густини речовин

До фізико-хімічних властивостей, автоматичний контроль яких здійснюється в хіміко-технологічних процесах, відносяться густина, в'язкість, коефіцієнт заломлення, тиск насичених парів, теплота згоряння.

Густиною ρ речовини називають фізичну величину, яка визначається відношенням маси m речовини до об'єму V , який вона займає:

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ [од. маси/ од. об'єму]}. \quad (9.3)$$

Питоною вагою γ речовини називають фізичну величину, що визначається відношенням ваги G речовини до об'єму V , який вона займає:

$$\gamma = \rho g = \frac{mg}{V}, \text{ [од. сили] / [од. об'єму]}, \quad (9.4)$$

де g – місцеве прискорення вільного падіння.

Визначення густини різних речовин – твердих, рідких та газоподібних, у лабораторних умовах виконується ареометрами, пікнометрами, а також методом гідростатичного зважування.

Найпростішим та найбільш поширеним є метод вимірювання густини рідини та концентрації розчинів за допомогою ареометра. Розрізняють ареометри повного та часткового занурення. Частіше використовуються ареометри часткового занурення, які поділяються на ареометри постійного об'єму або постійної маси. Ареометри постійного об'єму занурюються у рідину завжди на одну й ту ж глибину і на практиці застосовуються рідко.

Скляний ареометр постійної маси виконується у вигляді симетричного відносно поздовжньої осі подовженого тіла, що складається з пустотілого корпусу циліндричної (рис. 9.3, а) або веретеноподібної (рис. 9.3, б) форми, верхня частина якого закінчується стержнем. Стержень є циліндричною тонкостінною трубкою круглого перерізу з запаяним верхнім торцем.

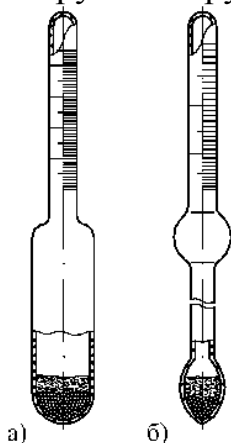


Рисунок 9.3 – Скляні ареометри загального призначення

Принцип дії вагових або пікнометричних механічних густиномірів полягає у неперервному зважуванні постійного об'єму речовини, яка аналізується у певній ємкості або трубопроводі, тобто густина визначається через питому вагу.

На практиці найбільше поширення отримали вагові густиноміри для рідини, у яких чутливим елементом служить рухома вимірювальна ділянка труби, розташована горизонтально і з'єднана з нерухомим технологічним трубопроводом за допомогою еластичних елементів.

Чутливим елементом вагового густиноміра служить U-подібна трубка 7 (рис. 9.4), виготовлена з нержавіючої сталі, з'єднана через тягу 3 з важелем 4. Кінці трубки через сильфони 2 з'єднані з нерухомими патрубками 1, через які подається рідина для аналізу.

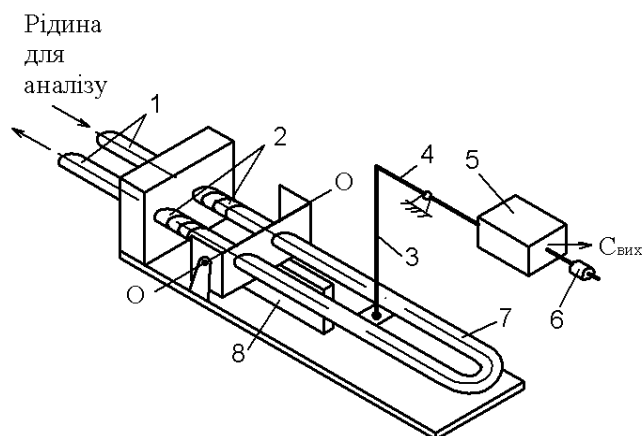


Рисунок 9.4 – Схема вагового густиноміра

Наявність сильфонів 2 дозволяє трубці 7 повертатись навколо осі O – O. Із збільшенням густини рідини збільшується маса трубки, що через важіль 4 передається до механоелектричного перетворювача 5, побудованому за принципом компенсації сил, вихідний сигнал $C_{вих}$ якого пропорційний зміні густини рідини. Протирівноваженню моменту сил, закріплена на важелі 4 служить для врівноваження моменту сил, на нижній границі вимірювання густини. Пристрій 8 служить для автоматичного введення поправки до сигналу густиноміра в залежності від температури рідини.

Густиноміри такої конструкції дозволяють вимірювати густину в інтервалі $0,5 - 2,5 \text{ Г/см}^3$. Максимальна температура рідини – $0 - 100^\circ\text{C}$, класи точності – $1 - 1,5$.

Принцип дії поплавкових густиномірів (рис. 9.5) оснований на неперервному вимірюванні виштовхувальної (піднімальної) сили, що діє на поплавок, який повністю або частково занурений у речовину, яка контролюється. Мірою густини є або величина переміщення поплавка, або величина сили виштовхування, що діє на поплавок.

Поплавок 2 занурений в рідину, яка знаходиться в ємкості 1. Через цю ємкість безперервно прокачується рідина для аналізу. За рахунок переливу через збірник 3, в ємкості підтримується постійний рівень. Якщо змінюється густина рідини, то змінюється й положення поплавка в ємкості 1. Досягнення положення рівноваги сил G_n і N забезпечується зміною довжини l стержня 4, зануреного у рідину. Переміщення поплавка перетворюється в електричний

сигнал за допомогою диференціального трансформатора 5.

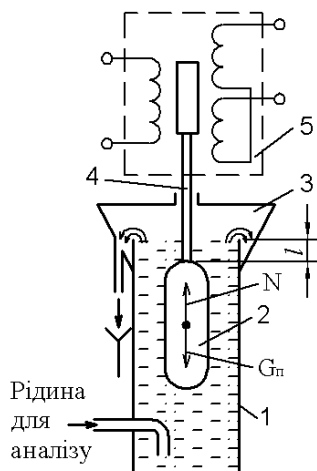


Рисунок 9.5 – Схема поплавкового густиноміра рідин

Схема гідростатичного густиноміра, принцип дії якого оснований на вимірюванні гідростатичного тиску шляхом продування стиснутого повітря, показано на рисунку 9.6.

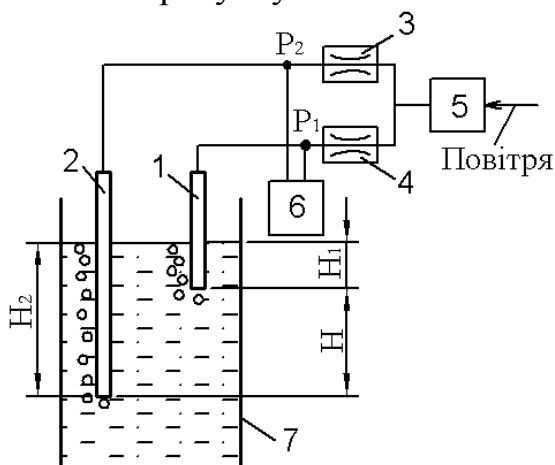


Рисунок 9.6 – Схема гідростатичного густиноміра рідин

Різниця тисків у трубках вимірюється дифманометром 6 з пневматичним або електричним вихідним сигналом. Цей перепад визначається виразом:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho g H_2 - \rho g H_1 = (H_2 - H_1) \rho g = H \rho g \quad (9.5)$$

Наявність двох трубок дозволяє виключити вплив на результат вимірювання можливих змін рівня рідини в апараті.

Оптимальний діаметр вихідного отвору трубок для подачі газу знаходиться в межах 4 – 8 мм.

9.4 Вимірювання в'язкості речовин

В'язкість (внутрішнє тертя) – властивість рідин і газів проявляти опір переміщенню однієї їх частини відносно іншої. Основний закон в'язкого протікання описується формулою Ньютона:

$$F = \eta S \frac{dW}{dn}, \quad (9.6)$$

де F – тангенціальна (дотична) сила, що викликає зсув шарів рідини (газу) один відносно іншого;

S – площа шару, по якому проходить зсув;

dW/dn – градієнт швидкості W потоку (швидкості зміни її від шару до шару)

по нормалі n .

Коефіцієнт пропорційності η називається динамічною в'язкістю. Він характеризує опір рідини зміщенню її шарів. Величину, зворотну динамічній в'язкості $\varphi = 1/\eta$ називають текучістю. Наряду з поняттям динамічної в'язкості використовують поняття кінематичної в'язкості $\nu = \eta/\rho$.

Одиниця динамічної в'язкості в СІ – Па·с, в системі СГС – П (пуаз); одиниця кінематичної в'язкості в СІ – м²/с, в СГС – ст (стокс). Відношення між цими одиницями: 1П = 10⁻¹ Па·с; 1ст = 10⁻⁴ м²/с.

Для вимірювання в'язкості використовуються віскозиметри, дія яких ґрунтується на методах: витікання, з падаючою кулькою, ротаційні та вібраційні.

Принцип дії капілярних віскозиметрів (віскозиметрів витікання) оснований на закономірності витікання рідин через капіляр, що описується законом Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi d^4}{128\eta l} (P_1 - P_2), \quad (9.7)$$

де Q – об'ємні витрати рідини; d і l – внутрішній діаметр та довжина капіляра; P_1, P_2 – тиск до та після капіляра по потоку.

Для постійних об'ємних витрат рідини вираз (9.7) можна подати у вигляді:

$$P_1 - P_2 = k\eta, \quad (9.8)$$

де $k = 128lQ/(\pi d^4)$ – постійний коефіцієнт для прийнятих витрат рідини.

Із (9.8) випливає, що для вимірювання динамічної в'язкості достатньо за постійних об'ємних витрат рідини вимірювати перепад тиску на капілярі.

У капілярному віскозиметрі витікання для створення постійних об'ємних витрат зі стабільним тиском, використовується насос з овальними шестернями 1 (рис. 9.7), який приводиться в рух синхронним двигуном 2. Із насоса контрольна рідина поступає в змійовик 3, де нагрівається до температури мастила, що заповнює термостат 6, а потім – в капіляр 4, розміри якого вибирають у залежності від діапазону вимірюваних значень в'язкості.

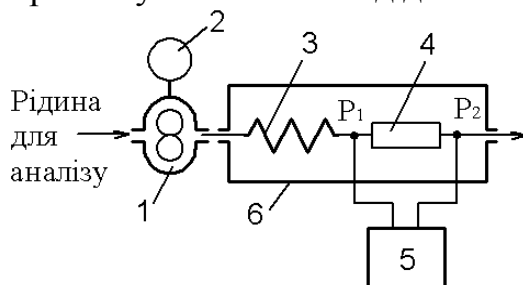


Рисунок 9.7 – Схема капілярного віскозиметра

Перепад тиску на капілярі вимірюється дифманометром 5 з електричним уніфікованим вихідним сигналом, що пропорційний динамічній в'язкості контрольної рідини. Температура в термостаті підтримується постійною і рівняється 50 або 100°С. Діапазони вимірювань від (0 – 2) 10⁻³ Па·с до (0 – 1000) 10⁻³ Па·с. Класи точності віскозиметра 1,5 – 2,5 в залежності від діапазону вимірювання.

9.5 Промислові і лабораторні віскозиметри

І для промислових і для лабораторних вимірювань часто використовуються ротаційні віскозиметри та віскозиметри з падаючим тілом. Принцип дії віскозиметрів з падаючим тілом (кулькові віскозиметри) оснований на вимірюванні швидкості або часу руху тіла (кульки) під дією сил притягання та тертя в контрольній рідині.

Цей рух описується законом Стокса:

$$W = \frac{2}{9} \frac{g(\rho_k - \rho)r^2}{\eta}, \quad (9.9)$$

де W – швидкість рівномірного падіння кульки;

ρ_k – густина матеріалу кульки ($\rho_k > \rho$);

r – радіус кульки.

Закон Стокса є справедливим тільки для ламінарного потоку рідини відносно кульки. Віскозиметр з падаючим тілом досить чутливий до забруднення рідини та наявності у ній бульбашок газу, а тому його можна використовувати для вимірювання в'язкості тільки однорідних рідин.

Якщо врахувати, що густина контрольної рідини змінюється несуттєво і що вона в декілька разів менша за густину кульки, то вираз (9.9) можна привести до виду:

$$W = k_1 / \eta, \quad (9.10)$$

де $k_1 = \frac{2}{9} g(\rho_k - \rho)r^2$ – постійний коефіцієнт.

Зазвичай вимірювання швидкості W зводиться до вимірювання відрізка часу, за який кулька, що падає з постійною швидкістю, проходить деякий постійний відрізок шляху l між двома прийнятими відмітками. У цьому випадку:

$$\tau = l/W = l\eta/k_1 = k\eta, \quad (9.11)$$

де $k = l/k_1$ – постійний коефіцієнт.

У схемі кулькового віскозиметра (рис. 9.8) рідина, в'язкість якої контролюється із апарата 7 або трубопроводу прокачується насосом 6 по трубці 1 із немагнітного матеріалу знизу вгору і під час руху піднімає кульку 4 від нижньої 11 до верхньої 5 обмежувальної сітки.

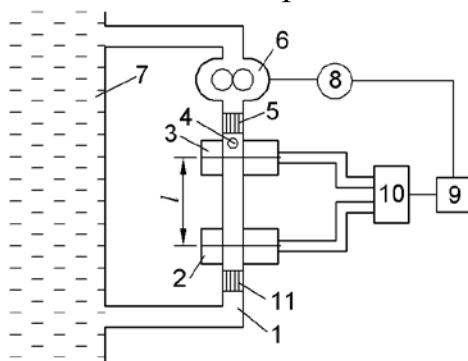


Рисунок 9.8 – Схема кулькового віскозиметра

Після відключення двигуна 8 насоса (періодичне включення і виключення здійснюється блоком управління 9) кулька падає в контрольну рідину. За

допомогою диференціальних трансформаторів 3 і 2 формуються електричні імпульси в моменти часу, коли кулька проходить дві вибрані відмітки, що знаходяться на віддалі l . За допомогою вимірювача часових інтервалів 10 вимірюється відрізок часу між вказаними імпульсами, значення якого і визначає динамічну в'язкість. Віскозиметр призначений для вимірювання в'язкості рідин до 100 Па·с.

Принцип дії ротаційних віскозиметрів оснований на вимірювання крутного моменту, що виникає на осі ротора, наприклад, циліндра або диска, занурених у контрольоване середовище, під час їх обертання.

Крутний момент у загальному випадку описується рівнянням:

$$M = k\omega\eta, \quad (9.12)$$

де k – постійний коефіцієнт, що залежить від конструкції ротора віскозиметра; ω – кутова швидкість обертання ротора.

Для вимірювань в'язкості використовується багато типів віскозиметрів, які відрізняються формою тіла обертання (рис. 9.9) та способом вимірювання крутного моменту.

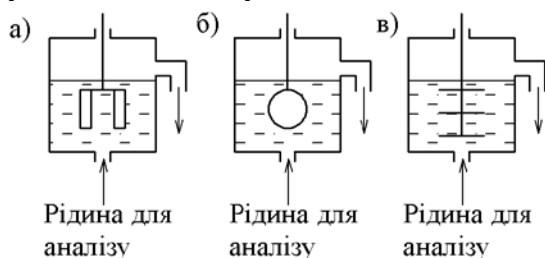


Рисунок 9.9 – Форма чутливих елементів ротаційних віскозиметрів: а) плоскі лопаті; б) куля; в) паралельні диски

Константи ротаційних віскозиметрів можна визначити аналітично або експериментально по еталонних рідинах.

За допомогою цих приладів можна вимірювати не тільки в'язкість у діапазоні від 10^{-3} до 10^{12} Па·с, але й інші реологічні характеристики неньютонівських рідин – пружність, повзучість, релаксацію напружень.

Питання для самоконтролю

1. У чому полягає фізична суть між визначенням маси та вагою матеріального тіла?
2. Яким чином, у загальному визначенні, пов'язані об'єм та вага фізичного тіла?
3. Яка суттєва відмінність між об'ємом, густиною та вагою фізичного тіла?
4. Для чого застосовуються у промисловості вагові та об'ємні дозатори?
5. На чому ґрунтується дія поплавкових густиномірів?
6. У чому полягають метрологічні переваги гідростатичних густиномірів рідин?
7. У чому полягає фізична суть в'язкості речовин?
8. Яку загальну назву мають прилади для вимірювання в'язкості?
9. Чому капілярні віскозиметри використовуються як основні у якості лабораторних приладів?
10. Що є чутливим органом ротаційних віскозиметрів?

ТЕМА 10 МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ СКЛАДУ РІДИН

План

- 10.1 Електропровідність розчинів електролітів.
- 10.2 Електрокондуктометричні аналізатори.
- 10.3 Принцип дії та класифікація оптичних аналізаторів речовин.
- 10.4 Потенціометричний метод аналізу.
- 10.5 Порівняльні та вимірювальні електроди.
- 10.6 Вимірювальні схеми рН-метрів.

10.1 Електропровідність розчинів електролітів

Метод вимірювання електричної провідності розчинів електролітів – кондуктометрія, широко використовується для хімічного аналізу, фізико-хімічних досліджень та автоматичного контролю технологічних процесів.

Принцип дії електрокондуктометричних аналізаторів (кондуктометрів), які класифікуються як електрохімічні засоби вимірювання, полягає у вимірюванні електричної провідності розчинів електролітів, за якою визначається концентрація розчинених речовин.

У розчинах електролітів частина молекул дисоціює на позитивні і негативні іони, або катіони та аніони. Це надає розчинам властивість проводити електричний струм. Якщо рідина є частиною електричного кола, то вона поводить себе як електричний опір, провідність k якого визначається виразом:

$$k = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{S}{l}, \quad (10.1)$$

де ρ – питомий опір;

S і l – площа і довжина перерізу провідника.

Питома електропровідність розведеного однокомпонентного розчину електроліту визначається законом Кольрауша:

$$\chi = \alpha c z (U_k + U_a), \quad (10.2)$$

де α – ступінь електролітичної дисоціації, що визначає частку молекул, які дисоціювали від загальної їх кількості у розчині;

c – еквівалентна концентрація розчину, виражена в грам-еквіваленті розчиненої речовини в 1 см^3 розчину;

z – валентність іонів;

U_k і U_a – рухомість катіонів та аніонів відповідно.

Вид функції, що зв'язує питому електропровідність розчину з концентрацією, повною мірою залежить від цієї концентрації. Ця функція лінійна тільки для розбавлених розчинів, доки сили електростатичної міжіонної взаємодії є незначними. Зі збільшенням концентрації вказана функція є нелінійною і навіть неоднозначною (рис. 10.1).

Електрична провідність рідини суттєвим чином залежить від температури. Для водних розчинів електролітів підвищення температури на

1 °С призводить до зростання електричної провідності на 1 – 2,5%, а тому в кондуктометричних приладах необхідно передбачити автоматичну температурну корекцію показів або контрольний розчин у процесі вимірювання повинен бути термостатованим.

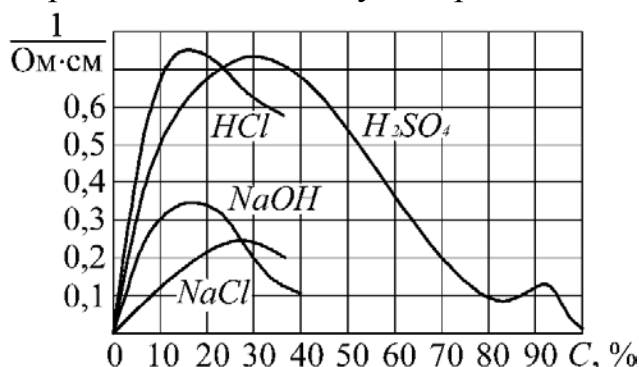


Рисунок 10.1 – Залежність питомої електричної провідності розчинів від їх концентрації (20°C)

Електрична провідність рідини зростає з підвищенням температури за експоненціальним законом:

$$\chi = Ae^{-B/T}, \quad (10.3)$$

де A, B – сталі;

T – абсолютна температура.

У вузькому температурному інтервалі буде справедливим лінійне наближення:

$$\chi_t = \chi_{t_0} [1 + \alpha(t - t_0)], \quad (10.4)$$

де χ_t, χ_{t_0} – електрична провідність за температури відповідно t та $t_0 = 18$ °С;

α – температурний коефіцієнт електричної провідності.

10.2 Електрокондуктометричні аналізатори

Чутливі елементи кондуктометрів, за опором яких визначається концентрація розчину, що аналізується, називаються електролітичними вимірювальними комітками. За конструкцією розрізняють контактні та безконтактні комітки. В контактних комітках розміщуються електроди, а у безконтактних використовується електромагнітна взаємодія з розчином, що аналізується.

За кількістю електродів у контактній вимірювальній комітці розрізняють дво-, три- і чотириелектродні комітки.

Найпростіша двоелектродна комітка – це камера 1 (рис. 10.2, а) з двома інертними металевими електродами 2 і 3, що заповнена або промивається контрольною рідиною. Якщо до електродів прикласти постійну різницю потенціалів, то на межі метал – електрод – електроліт утвориться так званий подвійний електричний шар, в межах якого і протікають електрохімічні процеси в комітці. Цей шар розглядають як плоский конденсатор, обкладками якого є заряджені поверхні металевих електродів та шар іонів протилежного знаку, що знаходяться поблизу поверхні електродів.

Якщо через вимірювальну комітку пропустити змінний струм, то явище поляризації електродів приблизно на два порядки менше спотворює результат

вимірювання електропровідності. Тому практично всі вимірювання електропровідності розчинів здійснюються на змінному струмі, а для зменшення похибки від поляризації частоту змінного струму збільшують.

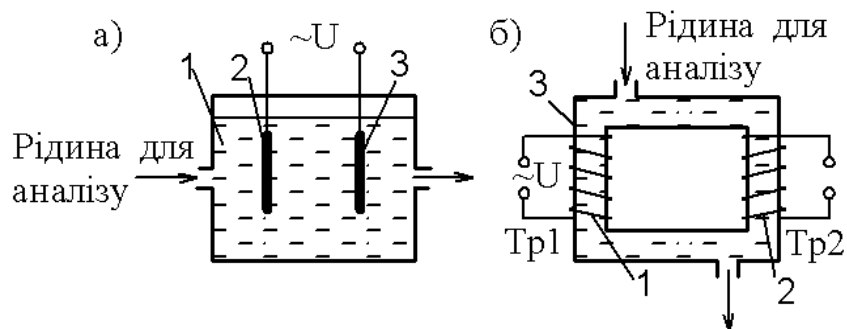


Рисунок 10.2 – Схеми електролітичних вимірювальних комірок:
а) контактна; б) безконтактна

Електричний опір вимірювальної комірки визначається виразом:

$$R = 1 / \chi K, \quad (10.5)$$

де K – константа вимірювальної комірки, що залежить від площі поверхні електродів, віддалі між ними та їх форми, яка визначається дослідним шляхом.

У безконтактній низькочастотній комірці (рис. 10.2, б) контрольна рідина поступає в трубку 3 з діелектрика, на яку ззовні намотані обмотки двох трансформаторів – збудження $Tr1$ та вимірювального $Tr2$. Обмотка 1 трансформатора $Tr1$ підключена до джерела змінного струму. Розчин контрольної речовини у трубці 3 утворює замкнутий рідинний виток і є вторинною обмоткою трансформатора $Tr1$. Під дією е.р.с., що наводиться первинною обмоткою 1 у замкнутому витку, у ньому протікає струм. Сила цього струму пропорційна електропровідності рідини, яка аналізується. Для вимірювального трансформатора $Tr2$ рідинний виток служить первинною обмоткою. Е.р.с., яка наводиться у його вторинній обмотці 2, залежить від сили струму, що проходить рідинним витком, тобто, визначається електропровідністю контрольної рідини.

У практиці автоматичного аналітичного контролю найпоширеніші кондуктометри з контактними вимірювальними комірками.

Вимірювальна комірка 1 (рис. 10.3) з опором контрольної рідини R_x , у яку з блоку підготовки поступає контрольна рідина, є одним з плечей врівноваженого моста.

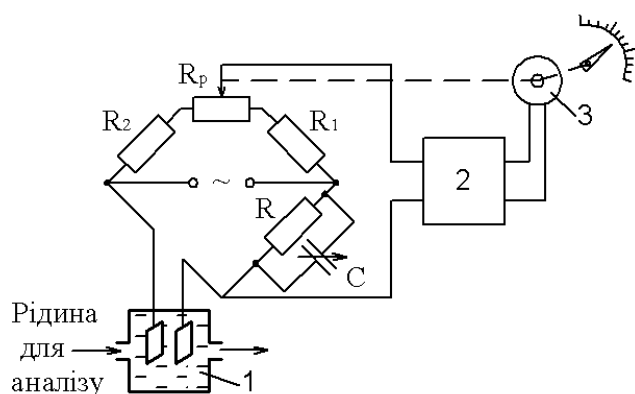


Рисунок 10.3 – Схема автоматичного кондуктометра

Суміжне плече складається з опору R і і змінної ємкості C , що служить для компенсації реактивної (ємкісної) складової вимірювальної комірки. Електронний підсилювач 2 та реверсивний двигун 3 служать для врівноваження моста шляхом зміни пліч від переміщення повзунка реохорда R_p . Такий кондуктометр може використовуватись тільки для постійної температури контрольної рідини. Якщо температура змінюється, то використовуються більш складні схеми з температурною компенсацією похибок вимірювання.

10.3 Принцип дії та класифікація оптичних аналізаторів речовин

Дія оптичних аналізаторів ґрунтується на використанні залежності зміни оптичних властивостей контрольної суміші від зміни концентрації компонента, що вимірюється.

Для вимірювання концентрацій використовується випромінювання практично всього спектру електромагнітних коливань, починаючи від радіохвиль і до γ -випромінювань. Найбільш широке застосування мають випромінювання інфрачервоної, видимої та ультрафіолетової областей спектру. Аналізатори, які працюють у цих областях спектру, називаються фотометричними. У аналізаторах використовуються явища поглинання, відбивання та розсіювання електромагнітного випромінювання речовиною, яка аналізується.

Поглинання (абсорбція) електромагнітного випромінювання кількісно описується законом Бугера – Ламберта – Бера:

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} e^{-k\delta} = I_{0\lambda} e^{-\varepsilon\lambda\delta c}, \quad (10.6)$$

де $I_{0\lambda}$ та I_{λ} – інтенсивність монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі λ , що входить у шар речовини, яка аналізується і виходить з нього (під інтенсивністю випромінювання вважається повний потік енергії випромінювання, що проходить за одиницю часу через одиницю площі і направлений до неї по нормалі);

k – показник поглинання випромінювання речовиною на довжині хвилі λ ;

δ – товщина шару речовини;

c – концентрація поглинаючого компонента;

ε_{λ} – коефіцієнт, що залежить від довжини хвилі випромінювання.

Вираз (10.6) можна подати у вигляді:

$$\ln(I_{0\lambda} / I_{\lambda}) = \varepsilon_{\lambda} \delta c = D_{\lambda}, \quad (10.7)$$

$$\ln(I_{\lambda} / I_{0\lambda}) = -\varepsilon_{\lambda} \delta c = T_{\lambda}. \quad (10.8)$$

Величини D_{λ} та T_{λ} називають відповідно оптичною густиною або екстинцією (послабленням) та прозорістю (пропусканням) шару речовини товщиною δ на довжині хвилі λ . Якщо речовина, що аналізується є сумішшю декількох компонентів, які поглинають випромінювання на довжині хвилі λ , то оптична густина суміші буде сумою оптичних густин компонентів.

Аналізатори, засновані на явищі поглинання електромагнітного випромінювання, називаються абсорбційно-оптичними або абсорбційно-метричними. Аналізатори рідин та газів, основані на явищі поглинання

електромагнітного випромінювання видимої частини спектру, називаються колориметрами або фотоколориметрами.

Гази або рідини, які включають різні частинки інших речовин, називаються дисперсними середовищами, наприклад, дим, туман, емульсія.

Аналізатори дисперсних середовищ, засновані на явищі розсіювання світла і зміні світлового потоку, що проходить через середовище, яке аналізується, називаються турбідиметрами. Аналізатори дисперсних середовищ, основані на явищі розсіювання світла і вимірюванні відбитого цим середовищем світлового потоку, називаються нефелометрами.

Спрощена схема абсорбційного оптичного аналізатора складу речовини, який працює на будь-якій довжині електромагнітних хвиль, приведена на рисунку 10.4.

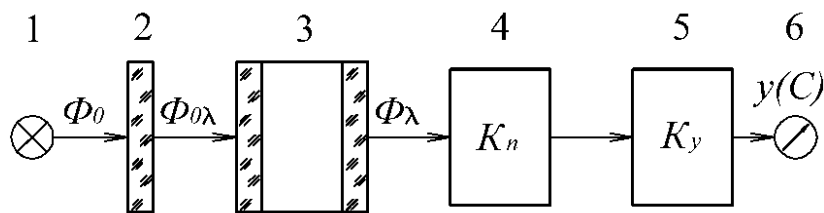


Рисунок 10.4 – Структурна схема спрощеного абсорбційно-оптичного аналізатора

Селективний оптичний фільтр 2 виконує функцію монохроматора і пропускає випромінювання $\Phi_{0\lambda}$ джерела 1 лише на вибраній довжині хвилі або у дуже вузькому інтервалі хвиль, що відповідає, як правило, максимальному коефіцієнту поглинання ε_λ компонента, що визначається. Фотоприймач 4 з лінійною характеристикою перетворює потік Φ_λ , що пройшов через кювету 3, у пропорційний електричний сигнал.

Інформативний сигнал $y(C)$, що вимірюється приладом 6 можна подати у вигляді:

$$y(C) = \Phi_0 s_\lambda T_\lambda(C) K_n K_y = U(1 - A_\lambda(C)), \quad (10.9)$$

де s_λ – спектральна характеристика (пропускання) оптичного фільтра;

K_n – коефіцієнт перетворення фотоприймача;

K_y – коефіцієнт підсилення підсилювача 5;

$U = \Phi_0 s_\lambda K_n K_y$ – узагальнений параметр аналізатора.

Відношення (10.9) описує математичну модель спрощеного абсорбційно-оптичного аналізатора і є рівнянням його статичної характеристики. З відношення (10.9) випливає, що за $C = 0$ вихідний сигнал аналізатора досягне максимального рівня, а зі зростанням концентрації $y(C)$ буде зменшуватись по експоненті.

Чутливість аналізатора до зміни концентрації компонента:

$$S = dy(C) / dC = -U \varepsilon_\lambda e^{-\varepsilon_\lambda C}. \quad (10.10)$$

Таким чином, чутливість S приладу зростає від збільшення параметрів Φ_0 , s_λ , K_n , K_y та зменшується по експоненті зі збільшенням концентрації C .

10.4 Потенціометричний метод аналізу

Принцип дії потенціометричних аналізаторів, що належать до електрохімічних засобів вимірювання, оснований на вимірюванні потенціалу електрода, поміщеного в електроліт, за яким визначається концентрація певного компонента у речовині.

Потенціометричні аналізатори використовуються для вимірювання концентрації іонів у рідинах – іонометрія, для контролю окислювально-відновлювального (редокс) потенціалу – редоксметрія, а також у газовому аналізі.

Потенціометричний метод найбільш широко використовується для визначення активності іонів водню, що характеризує кислотні або лужні властивості розчинів.

Поява водневих іонів у розчині викликається тим, що частина молекул води завжди дисоціюють на іони водню та гідроксилу:



Добуток концентрації іонів за постійної температури 22 °С – величина постійна і рівна:

$$[H^+] \cdot [OH^-] = 10^{-14}.$$

Якщо вираз прологарифмувати, отримаємо:

$$\lg[H^+] + \lg[OH^-] = -14,$$

звідси $\lg[H^+] = \lg[OH^-] = -7$, що відповідає нейтральній рідині.

Кислотність або лужність електролітів характеризується водневим показником pH :

$$pH = -\lg[H^+].$$

Згідно з цим, якщо $pH = 7$, то розчин нейтральний, якщо $pH > 7$ – лужний і якщо $pH < 7$ – кислотний.

Розглянуті залежності строго справедливі тільки для не дуже великих концентрацій. У концентрованих розчинах необхідно вводити поправочний множник – коефіцієнт активності f , який, як правило, менший одиниці.

Таким чином, уточнена формула водневого показника буде мати вигляд:

$$pH = -\lg a_H = -\lg(f_H [H^+]), \quad (10.12)$$

тобто, водневий показник рівний від'ємному логарифму активності водних іонів.

Зручність використання водневого показника привело до введення аналогічного показника pX , що використовується для вираження активної концентрації найрізноманітніших іонів у потенціометричних вимірюваннях з використанням іоноселективних електродів. У потенціометричному визначенні окислювально-відновлювальних властивостей рідких речовин використовується також поняття eH .

10.5 Порівняльні та вимірювальні електроди

Електродний потенціал вимірюють непрямим шляхом за величиною ЕРС гальванічного елемента, до якого входять вимірювальний (індикаторний)

електрод 1 та порівняльний (допоміжний або опорний) електрод 2 (рис. 10.5). Обидва електроди занурені в електроліт, що досліджується, наприклад, в рідину, яка аналізується, що перетікає через комірку 3.

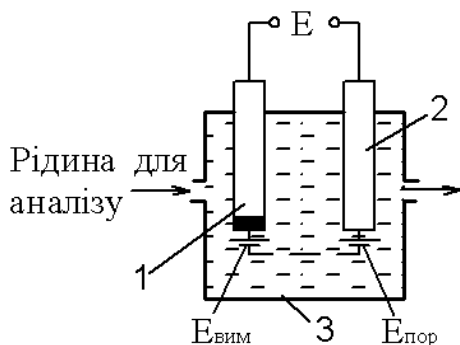


Рисунок 10.5 – Схема гальванічного елемента (комірки) потенціометричних аналізаторів

Потенціал вимірювального електрода $E_{вим}$ змінюється якщо змінюється концентрація іонів у рідині, а потенціал порівнювального електрода $E_{пор}$ залишається постійним, так як він не залежить від концентрації іонів. ЕРС такого гальванічного елемента E визначається різницею потенціалів електродів:

$$E = E_{вим} - E_{пор} \quad (10.13)$$

За постійного потенціалу $E_{пор}$, вимірювання цієї ЕРС дозволяє отримати інформацію про концентрацію іонів, які визначаються в рідині або про її окислювально-відновлювальні властивості.

У якості вимірювальних електродів застосовуються водневий, хінгідронний, сурм'яний та скляний. Для вимірювання величини pH у розчинах з температурою до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ найчастіше використовується скляний електрод.

Скляний електрод (рис. 10.6) – це тонкостінна колбочка 1, виконана із спеціальних сортів скла. Товщина стінки кулястої частини колбочки становить $0,05 - 0,1\text{ мм}$. Колбочка заповнена контрольним розчином 2 будь-якої солі і кислоти з відомим pH .

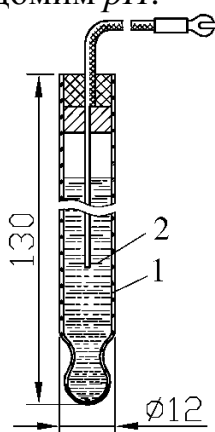


Рисунок 10.6 – Вимірювальний скляний електрод pH-метра

Якщо колбочку занурити у розчин, то на межі скло-розчин появляється потенціал, який залежить від концентрації у розчині іонів H^+ , тобто скляний електрод проявляє себе як водневий. Причиною виникнення потенціалу на межі скло-розчин є іонний обмін між розчином та склом. На поверхневому шарі скла проходить обмінне витіснення лужних іонів скла іонами водню до встановлення динамічної рівноваги.

Принципово однаково, яка з поверхонь кульки – внутрішня чи зовнішня використовується для зняття потенціалу. Так як проміжний шар скла між обома поверхнями за суттю є провідником, тому вимушено використовуються обидві поверхні колбочки.

У широкому діапазоні pH , приблизно від 0 до 10, для скляного електрода справедлива така ж лінійна залежність між потенціалом та величиною pH , як і для водневого електрода, і тільки для дуже великих значень pH лінійна залежність дещо порушується.

Матеріал для скла електрода вибирається у залежності від діапазону pH від 0 до 14,5. Скляний електрод є найбільш універсальним, так як дає можливість вимірювання будь-яких значень pH у розчинах будь-якого хімічного складу.

На відміну від індикаторного електрода, потенціал якого функціонально пов'язаний з активністю іонів у розчині, потенціал допоміжного електрода повинен завжди залишатись постійним.

У якості допоміжних електродів переважно застосовуються хлоросрібний і каломельний.

Хлоросрібний електрод виготовляється зі срібного стержня, на поверхні якого осаджений шар малорозчинної солі $AgCl$. Після занурення у розчин, що містить іони хлору, електрод приймає потенціал, величина якого є функцією активності іонів хлору.

Каломельний електрод (рис. 10.7) – це ємкість 2, на дні якої знаходиться шар 5 чистої металевої ртуті, покритий шаром 4 малорозчинної пасти каломелі (Hg_2Cl_2). Решта об'єму ємкості заповнена розчином 3 хлористого калію. Для контакту з ртуттю у дно ємкості впаяний платиновий контакт 6. Врівноважений потенціал цього електрода залежить тільки від активності хлору у розчині, яка визначається головним чином концентрацією солі KCl .

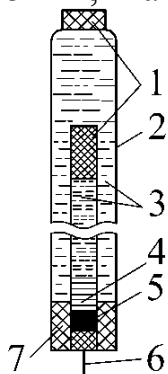


Рисунок 10.7 – Допоміжний каломельний електрод pH -метра

На практиці використовуються каломельні електроди з насиченим розчином хлористого калію, бо у цьому випадку легко підтримувати постійну концентрацію іонів хлору.

У всіх конструкціях каломельних допоміжних електродів контакт з розчином здійснюється через розчин хлористого калію, що забезпечує електролітичний контакт. У місці дотику контрольного розчину з електролітичним контактом встановлюються пористі перегородки 1, через які розчин хлористого калію поступово просочується у контрольний розчин. Електрод закритий пробкою 7.

10.6 Вимірювальні схеми рН-метрів

Специфічні особливості електродної системи зі скляним індикаторним електродом, і, зокрема, високий внутрішній електричний опір скляного електрода висувають ряд вимог до приладів, призначених для роботи у комплекті з електродними системами. Найважливіші з цих вимог – високий вхідний опір приладу – не менше 10^{12} Ом, та мізерно мала сила струму, що протікає через електродну систему під час вимірювання – менше 10^{-12} А.

Наведеним вимогам відповідають тільки спеціальні високоомні прилади, основним елементом яких є підсилювач постійного струму. Сучасні високоомні прилади, які використовуються для вимірювання pH , призначені для роботи з перетворювачами, внутрішній опір яких може мати до 10^9 Ом. У цьому випадку вхідний опір приладу щонайменше у 1000 разів більше опору перетворювача, що забезпечує практично відсутність похибок, пов'язаних з протіканням струму через електродну систему.

За принципом дії рН-метри можна поділити на три групи: прилади з безпосереднім відліком, прилади з астатичною компенсацією, прилади зі статичною компенсацією.

У потенціометричному аналізаторі (рис. 10.8), який включає вимірювальну комірку 3 з вимірювальним 1 та порівняльним 2 електродами, вимірювання сигналу здійснюється за допомогою автоматичного потенціометра з реохордом R_p , який живиться від джерела постійного струму 4.

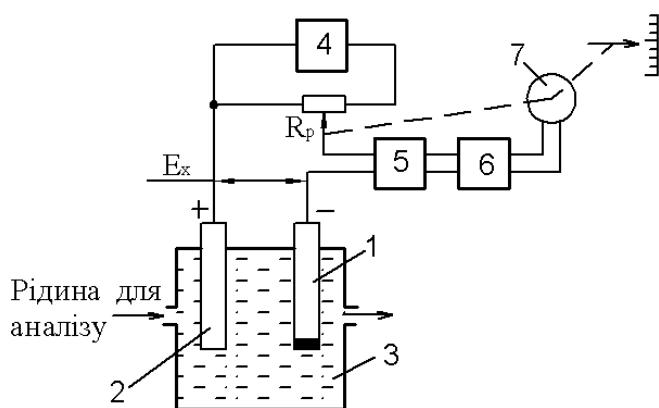


Рисунок 10.8 – Схема потенціометричного аналізатора рідини

У вимірюванні сигнал гальванічної комірки порівнюється зі спадом напруги на реохорді. Відмінність цього потенціометра полягає у тому, що крім підсилювача змінного струму 6, реверсивного двигуна 7 та інших вузлів він додатково включає електрометричний підсилювач 5, що має вхідний опір 600 МОм.

Електродний потенціал скляного електрода під час вимірювання змінюється в залежності від температури розчину. Внаслідок цього одній і тій же величині pH за різних температур розчину відповідають різні значення е.р.с. електродної системи. Залежність е.р.с. електродної системи від pH і температури виражається сімейством прямих, що пересікаються в одній точці.

Корекція показів рН-метра від зміни температури можна виконувати як вручну, так і автоматично за допомогою компенсаційних схем.

Питання для самоконтролю

1. Чим зумовлюється провідність електролітів та газів?
2. Як впливає на вимірювання концентрація та температура розчинів?
3. Як конструктивно виконуються чутливі елементи кондуктометрів?
4. Чому вимірювання провідності рідин виконується змінним струмом?
5. Яка вимірювальна схема використовується у автоматичних кондуктометрах?
6. До якої групи приладів належать потенціометричні аналізатори?
7. Чим виконується вимірювання електродного потенціалу електроліту?
8. У чому полягає проблема вимірювання е.р.с. електродної системи?
9. Який фізичний параметр найбільше впливає на точність рН-метрів?

ТЕМА 11 МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ СКЛАДУ ГАЗІВ

План

- 11.1 Методи та засоби вимірювання складу газових середовищ.
- 11.2 Дифузійні аналізатори.
- 11.3 Магнітні аналізатори.
- 11.4 Сорбційні аналізатори.
- 11.5 Іонізаційні та полум'яно-іонізаційні газоаналізатори.
- 11.6 Термохімічні та хемілюмінесцентні аналізатори.
- 11.7 Фотометричні аналізатори видимого випромінювання.
- 11.8 Оптико-акустичні аналізатори.

11.1 Методи та засоби вимірювання складу газових середовищ

Вимірювання концентрації окремого компонента у бінарних та псевдобінарних сумішах рідин і газів – одна з найпоширеніших задач автоматичного контролю якості потоків хіміко-технологічних процесів. Для її вирішення використовуються всі можливі методи фізичного, фізико-хімічного та хімічного аналізів. У загальному випадку вимірювання концентрації окремого компонента у бінарній суміші здійснюється шляхом вимірювання якоїсь фізико-хімічної властивості цієї суміші та виконання обчислень, необхідних для розв'язання системи рівнянь.

У теплоенергетичних установках переважно виникає необхідність вимірювання вмісту CO_2 , CO , H_2 , O_2 , CH_4 у газових сумішах.

Згідно з прийнятою у свій час класифікацією автоматичні газоаналізатори можна поділити на:

- 1) механічні:
 - а) статистичні газоаналізатори, основані на використанні хімічних реакцій (об'ємні), манометричні, об'ємно-манометричні, вагові – диференціальні та поплавкові;
 - б) динамічні газоаналізатори – відцентрові та ефузійні (густиномірні, в'язкометричні);
- 2) звукові і ультразвукові:
 - а) основані на вимірюванні швидкості поширення звуку у неперервному режимі – амплітудно-резонансні, фазові;
 - б) основані на вимірюванні швидкості поширення звуку в імпульсному режимі;
- 3) теплові:
 - а) термокондуктометричні, основані на зміні теплопровідності;
 - б) термохімічні – з реакцією у рідкій фазі і з реакцією у газовій фазі;
- 4) магнітні:
 - а) термомагнітні, основані на зміні термомагнітної конвекції;
 - б) магнітотермокондуктометричні, основані на зміні теплопровідності в магнітному полі;

- в) магнітовіскозиметричні, основані на зміні в'язкості в магнітному полі;
- г) магнітомеханічні;
- 5) електрохімічні:
 - а) амперметричні – гальванічні, деполяризаційні;
 - б) потенціометричні, включно з титроматичними;
 - в) кулонометричні;
 - г) кондуктометричні – електродні і безелектродні;
 - б) іонізаційні, основані на збільшенні або зменшенні іонного струму;
- 7) оптичні:
 - а) абсорбційні;
 - б) емісійні;
 - в) інтерферометричні.

Окрім наведених, все більшого поширення отримують мас-спектрометри, основані на використанні різниці мас молекул і атомів різних речовин, та хроматографи, у яких проходить розділення складних газових сумішей шляхом використання різниці у швидкостях руху компонентів по шару сорбента. Слід відмітити, що ступінь універсальності вказаних методів суттєво відрізняється.

11.2 Дифузійні аналізатори

Принцип дії дифузійних газоаналізаторів ґрунтується на процесі переносу речовини – компонента суміші, під дією градієнта його концентрації. Цей перенос може відбуватися під час дотику речовин однієї з іншою – дифузія, або через тверду речовину – трансфузія або проникнення. Процес переносу пов'язаний з хаотичним тепловим рухом молекул, що відбувається в напрямку зменшення концентрації речовини і приводить до рівномірного розподілу по займаному об'єму. Проникнення через тверде тіло визначається наявністю розривів у їх кристалічній решітці, нерегулярних щілин та пор у макроструктурі твердої речовини або розчиненням газів та парів у твердій речовині. Найшвидше процес переносу речовини під дією градієнта концентрації відбувається у газах, що визначає пріоритетне використання цього явища для автоматичного контролю концентрації газів.

Інтенсивність взаємного проникнення двох газів визначається коефіцієнтом їх взаємної дифузії, яка залежить від молекулярних мас цих газів і полярності їх молекул. Коефіцієнт взаємного проникнення збільшується із збільшенням температури та зменшується зі збільшенням тиску.

При дифузії газу через мембрану з твердої пористої речовини за умови відповідності довжини вільного пробігу молекул з діаметром пор коефіцієнт дифузії обернено пропорційний квадратному кореню із молекулярної маси газу.

Коефіцієнти дифузії через непористі матеріали, наприклад, кварц, скло, метали, полімери, які використовуються у якості мембран, індивідуальні для різних газів і залежать від механізму проникнення. У багатьох важливих для аналітичного контролю випадках можна вважати, що кожен компонент газової

суміші проникає через мембрану незалежно від інших компонент.

У газоаналізаторі (рис. 11.1) камери 2 і 1 розділені тонкою (10 – 20 мкм) мембраною із сплаву паладію з сріблом.

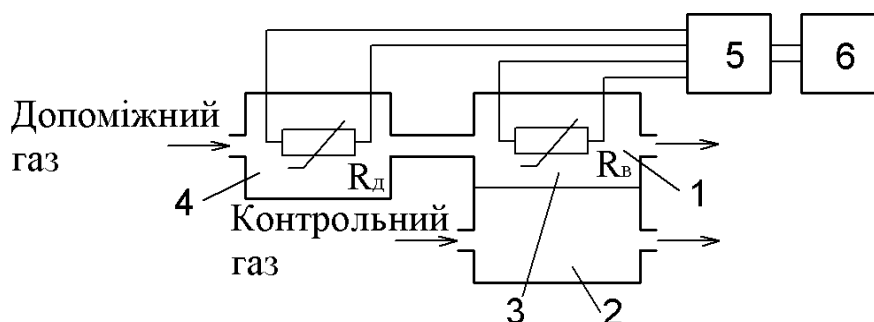


Рисунок 11.1 – Схема дифузійного газоаналізатора

Аналітичний пристрій аналізатора термостатується за температури 45°C. Через камеру 2 з постійними об'ємними витратами прокачується контрольний газ, що містить водень, а через камеру 1 – допоміжний газ, наприклад повітря або азот, який попередньо проходить через камеру 4. У камері 1 розміщений вимірювальний $R_{в}$, а у камері 4 – порівняльний $R_{д}$ терморезистори. Ці терморезистори підключені до невідновженого моста 5 і утворюють термокондуктометричний детектор.

Під час роботи аналізатора через мембрану із камери 2 у камеру 1 дифундує тільки водень, який добавляється до допоміжного газу і змінює теплопровідність газового потоку, що омиває вимірювальний терморезистор $R_{в}$. Це викликає зміну сигналу невідновженого моста 5, сигнал з якого вимірюється і реєструється самописним потенціометром 6.

Коли потік газу, що проникає через мембрану, малий – 2 – 3% заг. від витрат допоміжного газу, сигнал аналізатора описується рівнянням:

$$U = k_{\lambda} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{г}} \right) \frac{D_M S}{\delta Q_{г}} c_0 = K_D c_0, \quad (11.1)$$

де D_M – коефіцієнт дифузії через мембрану компонента, який визначається;

S і δ – площа і товщина мембрани;

λ – теплопровідність газу, який проникає через мембрану;

$K_D = k_{\lambda} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{г}} \right) \frac{D_M S}{\delta Q_{г}}$ – коефіцієнт перетворення аналізатора.

Вираз (11.1) свідчить про те, що сигнал аналізатора однозначно визначається концентрацією водню у багатокомпонентній газовій суміші. Аналізатор забезпечує селективне вимірювання концентрацій водню, дейтерію та гелію у діапазонах від 0 – 1 до 0 – 100% заг., має клас точності 3 і час реакції 10 – 15 с. Крім паладієвих мембран для селективних вимірювань можуть використовуватись тонкі (5 – 20 мкм) плівки із різних полімерних матеріалів.

11.3 Магнітні аналізатори

В основу роботи магнітних газоаналізаторів покладені різні явища, пов'язані із взаємодією компонентів газової суміші з магнітним полем.

Гази, які втягуються в магнітне поле, називаються парамагнітними, а ті гази, які виштовхуються із магнітного поля – діамагнітними. Кількісно магнітні властивості газів визначаються величиною, яка називається магнітним сприйняттям. Ця величина для парамагнітних та діамагнітних газів описується виразами:

$$\chi_n = \frac{c_K \mu P}{RT^2}, \quad (11.2)$$

$$\chi_d = \frac{\chi_d \mu P}{RT^2}, \quad (11.3)$$

де χ_n і χ_d – об'ємні магнітні сприйняття парамагнітних та діамагнітних газів;

c_K – постійна Кюрі;

μ – молекулярна маса;

P і T – абсолютний тиск і температура;

R – універсальна газова постійна;

χ_d – питоме магнітне сприйняття діамагнітного газу.

У термомагнітному аналізаторі газ, що підлягає аналізу, з блоку підготовки 1 надходить у кільцеву камеру 3 (рис. 11.2). По діаметру цієї камери встановлена тонкостінна скляна трубка 4 з намотаними на ній терморезисторами теплового витратоміра R_1 і R_2 . Якщо у контрольному газі відсутній кисень, то за горизонтального положення трубки 4 потік газу через неї не проходить.

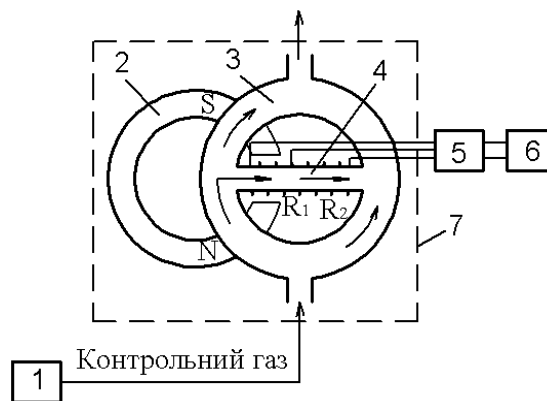


Рисунок 11.2 – Схема термомагнітного газоаналізатора

Якщо в контрольному газі є кисень, він втягується в магнітне поле, що створюється постійним магнітом 2 навколо лівого (за рисунком) кінця трубки 4. Потім кисень нагрівається терморезистором R_1 до температури вище точки Кюрі ($\sim 80^\circ\text{C}$), за якої він втрачає парамагнітні властивості, стає діамагнітним і виштовхується з магнітного поля. Виникає "магнітний вітер" – потік газу в трубці 4. Витрати газу в трубці 4 вимірюються тепловим витратоміром. Розбаланс невірноваженого моста 5, що визначається об'ємною концентрацією кисню в контрольному газі, вимірюється і реєструється

потенціометром 6. Аналітичний пристрій 7 аналізатора термостатується за температури 45°C.

Діапазони вимірювання термомагнітного газоаналізатора від 0 – 1 до 0 – 100% заг.; клас точності 2,5 – 5 в залежності від діапазону вимірювання, час реакції 120 с.

11.4 Сорбційні аналізатори

В основу роботи сорбційних газоаналізаторів покладено різні ефекти, що супроводжують процес сорбції – поглинання твердим тілом або рідиною речовини з зовнішнього середовища. Це явище давно використовується в аналітичному контролі. Так, широко поширені волосяні вологоміри повітря, у яких сигнал вимірювальної інформації формується за рахунок зміни довжини волосини від зміни вологості повітря.

У сорбційних газоаналізаторах використовуються механічні, теплові, оптичні та електричні ефекти, що супроводжують процес адсорбції газів та парів. У дилатометричному газоаналізаторі (рис. 11.3), призначеному для вимірювання концентрації водню, в камері 2, через яку прокачується контрольний газ, розміщена тонкостінна трубка 1, виготовлена з палладію.

Водень, що входить в контрольний газ розчиняється в палладії і трубка набухає та збільшує свою довжину. Верхній кінець трубки 1 закріплений на корпусі 2, а тому її нижній кінець переміщується. За допомогою ємнісного або індуктивного перетворювача переміщення 4 вимірюється переміщення пластини 3, закріпленої на нижньому кінці трубки. Це переміщення буде функціонально пов'язаним з концентрацією водню у контрольному газі.

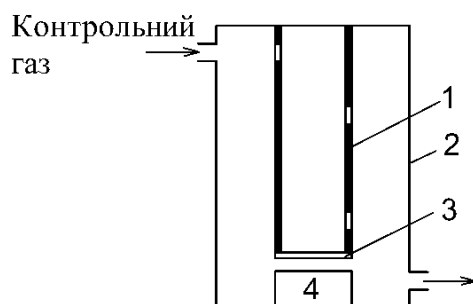


Рисунок 11.3 – Схема сорбційного газоаналізатора з дилатометричною трубкою

Відомі сорбційні дилатометричні (принцип перетворення – видовження електрода) газоаналізатори призначені для вимірювання концентрації пропану, бутану, двоокису вуглецю та інших технічних газів, у яких використовується стержень виготовлений з адсорбенту – активованого вугілля, алюмогелю, силікагелю.

Існує велика кількість конструкцій сорбційно-кондуктометричних газоаналізаторів. У них використовуються плівкові, діодні, тріодні чутливі елементи та чутливі елементи у вигляді гранул. У якості матеріалів у напівпровідникових плівкових чутливих елементах використовують в основному оксиди металів SnO_2 , Nb_2O_5 , CoO , ZnO , ZrO_2 , TiO_2 , а також

германій та кремній.

На схемі (рис. 11.4) показано схему газоаналізатора з плівковим чутливим елементом. У якості плівки 2 використовується оксид цинку, нанесений на боросилікатну підкладку. Товщина плівки 20 – 1000 Å, розміри її 20 x 4 мм. Через нанесені на неї контакти 3 плівка підкладки підключається до вимірювальної схеми. Під час протікання через камеру 1 контрольного газу, компонент, який визначається, сорбується на плівці і змінює його електричний опір.

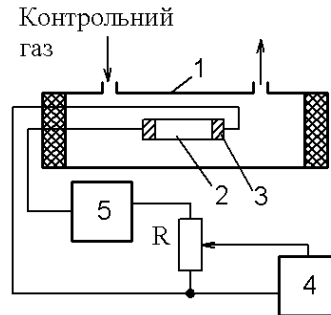


Рисунок 11.4 – Схема сорбційного газоаналізатора з провідною плівкою

Речовини, наділені донорними властивостями збільшують електропровідність, а речовини з акцепторними властивостями – зменшують її. Сигнал аналізатора визначається струмом, що створюється в колі стабілізованим джерелом 5, який перетворюється в уніфікований сигнал високоомним перетворювачем 4. Для отримання високої чутливості плівку нагрівають до температури 200 – 400 °С.

11.5 Іонізаційні та полум'яно-іонізаційні газоаналізатори

Принцип дії іонізаційних аналізаторів полягає в іонізації газу, який аналізується та у вимірювання іонного струму. У практиці аналітичного контролю знаходять застосування в основному, іонізаційні газоаналізатори, які розрізняються за способом іонізації газу, що аналізується: іонізація радіоактивних випромінювань, фотоіонізація, поверхнева іонізація, іонізація у тліючому розряді тощо.

У схемі аерозольно-іонізаційного газоаналізатора використовується хімічна реакція (рис. 11.5).

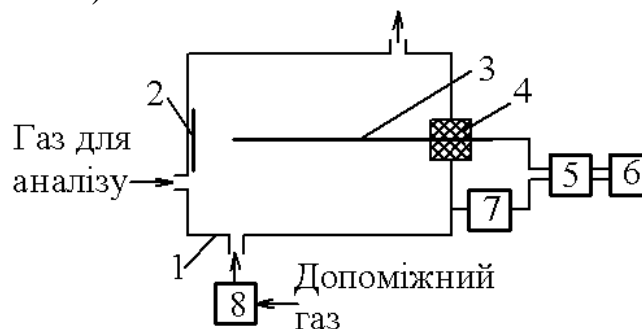


Рисунок 11.5 – Аерозольно-іонізаційний аналізатор: 1 – іонізаційна камера; 2,3 – електроди; 4 – ізолятор; 5 – електрометричний перетворювач; 6 – потенціометр; 7 – стабілізоване джерело живлення (100 – 300 В)

Цей аналізатор включає пристрій 8, у якому допоміжний газ (переважно, повітря) насичується парами реагенту, що служить для утворення аерозолу. Газовий потік із пристрою 8 поступає у камеру 1, де змішується з потоком контрольного газу. Утворена у результаті хімічної реакції компоненти, що визначається, та парів реагенту аерозоль змінює іонний струм в іонізаційній камері.

Аерозольно-іонізаційні аналізатори використовуються для контролю концентрацій мікродомішок шкідливих речовин, включно оксидів азоту, хлористого водню, аміаку, амінів. Діапазони вимірювання аналізаторів від 0 – 0,5 до 0 – 50 мГ/м³.

Явище поверхневої іонізації використовується в роботі аналізатора, схема якого показана на рисунку 11.6.

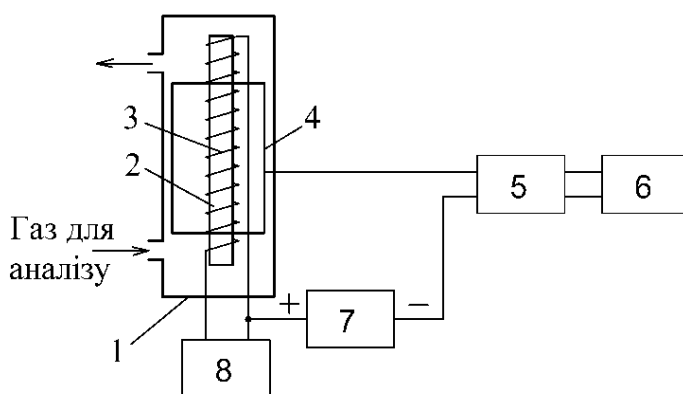


Рисунок 11.6 – Аналізатор з поверхневою іонізацією

Газ для аналізу поступає в камеру 1 з постійними і стабільними об'ємними витратами. У цій камері розміщені керамічний пористий циліндр 2, на якому намотана платинова нитка 3, яка нагрівається струмом джерела 8 до 800 – 1000 °С. Ця нитка служить анодом. У якості катоду служить платиновий циліндр 4. Між анодом і катодом прикладена напруга 50 – 500 В від джерела 7. Віддаль між електродами 1 – 2 мм. Іонний струм між електродами визначається в основному емісією лужноземельних металів від розігріву платинової нитки. Для забезпечення стабільності роботи керамічний циліндр 2 попередньо насичують їдким калієм – КОН.

Газоаналізатор, дія якого основана на поверхневій іонізації, має підвищену селективну чутливість до галогенних з'єднань, збільшення концентрації яких у газі приводить до зростання іонного струму. Значення іонного струму перетворюється електрометричним перетворювачем 5 в уніфікований електричний сигнал, що передається на потенціометр 6. Такі газоаналізатори використовуються переважно для виявлення місця витoku фреонів різних марок у холодильній апаратурі.

Полум'яно-іонізаційний метод аналізу застосовують як для визначення органічних мікродомішок на рівні токсичних концентрацій, так і для контролю вибухонебезпечних газових сумішей.

Дія полум'яно-іонізаційних газоаналізаторів (рис. 11.7) основана на явищі іонізації органічних речовин у водневому полум'ї.

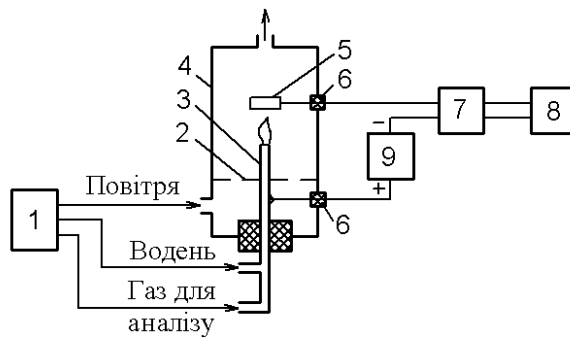


Рисунок 11.7 – Схема полум'яно-іонізаційного газоаналізатора

Перетворювач газоаналізатора – це водневий пальник, поміщений у електричне поле.

У полум'яно-іонізаційному аналізаторі газ для аналізу та водень для підтримки полум'я, подаються із блока підготовки газів 1 у мініатюрний пальник 3. Пальник встановлений у корпусі 4 на ізоляторі 6.

Повітря, яке необхідне для горіння водню, поступає у камеру 4 через розподільник 2. Над горілкою на фторопластовому ізоляторі 6 встановлено колекторний електрод 5 з платини або ніхрому. Між горілкою 3 і колекторним електродом 5 прикладається електричне поле від джерела 9 напруженістю 150 – 200 В/см. Від згоряння чистого водню іони майже не утворюються, а опір водневого полум'я близько 10^{16} Ом. Органічні речовини (гази й пари), що є у газі для аналізу, попадаючи у водневе полум'я, згоряють і викликають різке збільшення іонного струму. Цей струм перетворюється в уніфікований сигнал перетворювачем 7 з великим входним опором (10^8 – 10^9 Ом), а сигнал останнього сприймається автоматичним потенціометром 8.

11.6 Термохімічні та хемілюмінесцентні аналізатори

Принцип дії термохімічних аналізаторів полягає у використанні теплового ефекту хімічної реакції, яка протікає між компонентом суміші, який повинен бути визначений, та допоміжним реагентом. Сигналом вимірювальної інформації у термохімічних аналізаторах служить температура, значення якої залежить від теплового ефекту хімічної реакції. Для створення термохімічних аналізаторів використовуються хімічні реакції окислення на каталітично активній поверхні, у полум'ї і у газових потоках.

У термохімічному аналізаторі (рис. 11.8) газ, що аналізується, ежектором (струменевим насосом) 3 прокачується через кран 10 у камеру 1.

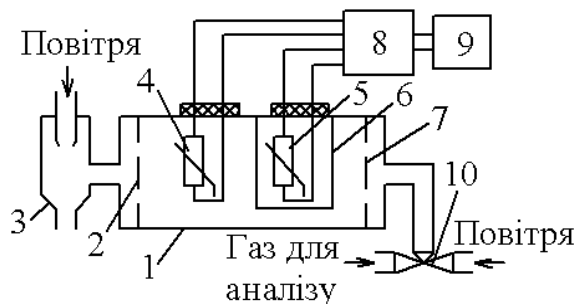


Рисунок 11.8 – Схема термохімічного газоаналізатора

У камері розміщені вибухозагороджувальні сітки 2 і 7, вимірювальний 4 та порівняльний 5 чутливі елементи. Порівняльний елемент закритий ковпачком 6 і служить для усунення впливу змін навколишньої температури на сигнал газоаналізатора. У якості чутливих елементів у цих газоаналізаторах використовуються платинові дротики з активованою поверхнею або пеллістори. Пеллістор – платиновий дріт діаметром 0,03 – 0,05 мм, поміщений у кульку або циліндр із окису алюмінію, покритий шаром платино-паладієвого каталізатора.

Чутливі елементи нагріваються струмом невірноваженого моста 8 до температури 200 – 500°C. Під час згоряння на поверхні чутливого елемента газу, який аналізується, температура елемента збільшується, що призводить до збільшення опору платинового дротика, а це, в свою чергу, викликає розбаланс електричного моста, що вимірюється вторинним приладом 9 та описується виразом:

$$\Delta U = k_1 \psi Q_n c = Kc, \quad (11.4)$$

де k_1 – постійний коефіцієнт для невірноваженого моста;

$K = k_1 \psi Q_n$ – коефіцієнт перетворення аналізатора.

Для перевірки та коректування нульового значення сигналу газоаналізатора через кран 10 у камеру 1 може бути направлено повітря, яке не включає горючих компонентів.

Принцип дії хемілюмінесцентних газоаналізаторів (рис. 11.9) заснований на явищі люмінесценції, яке супроводжує деякі хімічні реакції.

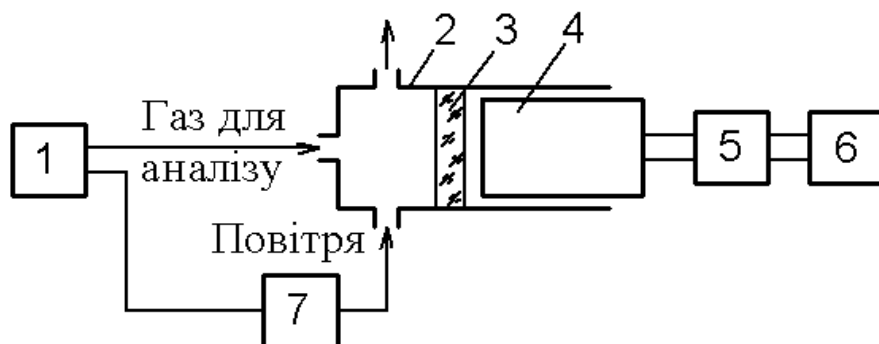


Рисунок 11.9 – Схема хемілюмінесцентного газоаналізатора

У хемілюмінесцентному газоаналізаторі газ, який аналізується і повітря із блоку підготовки газів 1 у реакційну камеру 2. Повітря попередньо проходить через озонатор 7, де під дією бар'єрного високовольтного розряду у повітрі утворюється озон.

Від взаємодії у камері 2 озону з компонентом, що визначається із суміші утворюються продукти реакції у збудженому стані. Під час переходу їх у стійкий стан відбувається випромінювання квантів люмінесценції. Електромагнітне випромінювання через вікно 3 попадає у фотопомножувач 4, сигнал якого перетворюється в уніфікований сигнал з допомогою перетворювача 5. Вихідний сигнал сприймається потенціометром 6.

11.7 Фотометричні аналізатори видимого випромінювання

Схемні та конструктивні вирішення аналізаторів, в роботі яких використовується випромінювання видимої частини спектру, досить різноманітні. Колориметричні аналізатори класифікуються в залежності від кількості джерел та приймачів випромінювання, кількості використовуваних променів та наявності попереднього перетворення речовини, яка аналізується.

Колориметричний аналізатор (рис. 11.10) має одне джерело освітлення – лампа 1, та два приймачі випромінювання – фотоелементи 6 і 9 і є двопробеним.

Випромінювання, що виходить з джерела 1, проходить фільтр 2 і розділяється на два промені, які через дзеркала 4 поступають у вимірювальну 5 та порівняльну 10 кювети. Через вимірювальну кювету прокачується речовина, що аналізується, а порівняльна заповнюється зразковою речовиною з відомою або рівною нулю концентрацією компонента, який визначається. Фотоелементи 6 і 9 включені на вхід підсилювача 7 зустрічно, тому різниця цих сигналів, перетворена підсилювачем в уніфікований сигнал, однозначно залежить від концентрації компонента в речовині для аналізу. Вихідний сигнал підсилювача 7 вимірюється та реєструється вторинним приладом 8.

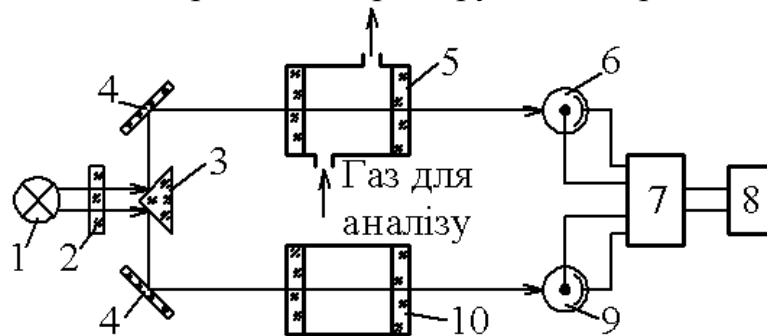


Рисунок 11.10 – Схема фотометричного аналізатора видимого випромінювання

На рисунку 11.11 показано схему турбідиметричного аналізатора вмісту частинок сажі у димових газах – димомір.

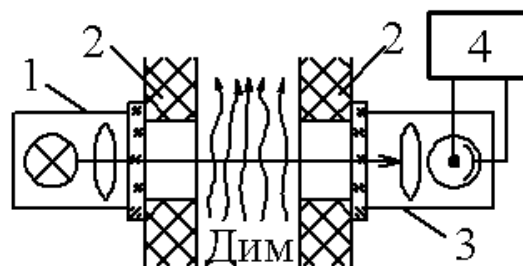


Рисунок 11.11 – Схема турбідиметричного аналізатора

Джерело 1 та приймач випромінювання 3 розташовані напроти один одного поза трубою 2, щоб зменшити забруднення скляних вікон. Сигнал приймача випромінювання сприймається вторинним приладом 4. Шкала вторинного приладу розділена на декілька поділок, що характеризують

ступінь забруднення димових газів. За постійної швидкості руху газового потоку, розмірах і густині мікрочастинок шкала вторинного приладу може бути відкалібрована у масових або об'ємних концентраціях.

11.8 Оптико-акустичні аналізатори

Дія оптико-акустичних аналізаторів ґрунтується на вимірюванні ступеня поглинання газом переривистого потоку інфрачервоної радіації. Випромінювання інфрачервоної області спектру поглинаються газами, молекули яких складаються двох або більше різних атомів та іонів. Практично ці газоаналізатори використовуються для вимірювання концентрації CO_2 , CO , CH_4 .

Оптико-акустичний ефект полягає у наступному: від дії на газ, який знаходиться у замкнутому об'ємі, переривистим потоком інфрачервоної радіації відбувається пульсація температури, а відповідно, і тиску цього газу. Ця пульсація сприймається мікрофоном і перетворюється в інформаційний сигнал.

На рисунку 11.12 наведено принципову схему оптико-акустичного аналізатора. Інфрачервоне випромінювання від двох джерел 1 направляється по двох каналах – робочому та порівняльному, проходить через обтюратор 2, який шість разів за секунду перериває обидва потоки одночасно. Переривисті потоки випромінювання проходять через фільтрові камери 3, заповнені тією сумішшю газу, з якої виключений компонент, що аналізується. Наявність фільтрових камер забезпечує зменшення похибки за рахунок можливого часткового накладання спектрів поглинання складових речовини: тієї, що аналізується і тієї що не аналізується.

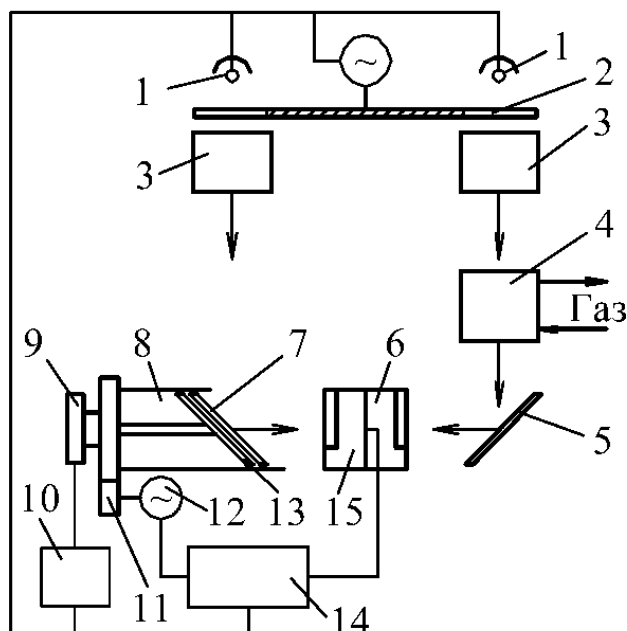


Рисунок 11.12 – Принципова схема оптико-акустичного аналізатора

Далі потік випромінювання, направлений по робочому каналу, проходить робочу камеру 4, через яку безперервно прокачується газова суміш, що

аналізується. Складова газу, яка визначається, поглинає частину енергії, в залежності від характеристичної здатності поглинання цього газу. Залишок променевої енергії після відбиття від пластини 5 поступає у праву частину приймача 6. Променевий потік, який проходить по порівняльному каналу, після фільтрової камери 3 попадає у компенсаційну камеру 8. Компенсаційна камера заповнена складовою сумішшю, що аналізується. На поверхні цієї камери вмонтовано вікна із спеціального скла (Li+F) 7, які вільно пропускають інфрачервоні промені. Всередині компенсаційної камери встановлено дзеркало 13, яке направляє променевий потік у ліву частину приймача 6.

Якщо у ліву і праву частини приймача променевої енергії 6 поступають різні за величиною переривисті потоки випромінювання, то конденсаторний мікрофон 15, вмонтований у приймачі, створює звуковий сигнал, який після підсилення підсилювачем 14 діє на реверсивний двигун 12.

Реверсивний двигун за допомогою редуктора 11 переміщує дзеркало 13 до того часу, доки потік порівняльного каналу не урівняється з потоком, що поступає в приймач робочим каналом. У момент рівності потоків звучання мікрофона припиняється. Переміщення дзеркала 13 всередині зрівнювальної камери приводить до зміни її об'єму, тобто, до зміни довжини шляху проходження газу, що викликає зміну поглинання променевої енергії. Одночасно з редуктором переміщується движок реохорда 9 вторинного приладу 10.

Такого типу газоаналізатори випускаються для діапазонів від 0 – 1% до 0 – 100% по об'єму компонента, що аналізується. Основна похибка лежить в межах від $\pm 2,5$ до ± 5 % від верхньої границі вимірювання.

Питання для самоконтролю

1. Що таке дифузія та трансфузія речовин?
2. Для чого виконується термостатування дифузійного газоаналізатора?
3. Як називаються гази, які взаємодіють з магнітним полем?
4. Що є інформативним сигналом термомагнітного аналізатора?
5. Яке фізичне явище використовується у сорбційних аналізаторах?
6. З якого матеріалу виготовляється трубка дилатометричного сорбційного газоаналізатора?
7. Яке основне призначення газоаналізаторів з поверхневою іонізацією?
8. Що служить інформаційним сигналом у термохімічних аналізаторах?
9. На чому ґрунтується дія хемілюмінесцентних аналізаторів?
10. Для аналізу яких газів використовуються оптико-акустичні прилади?

ТЕМА 12 МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ

План

- 12.1 Вологість газів.
- 12.2 Методи вимірювання вологості газів.
- 12.3 Психрометричний метод вимірювання вологості газів.
- 12.4 Випаровувальні аналізатори.
- 12.5 Конденсаційні аналізатори.
- 12.6 Вимірювання вологості твердих тіл і сипких речовин.

12.1 Вологість газів

Концентрацію парів рідин у газах прийнято характеризувати абсолютною або відносною вологістю.

Абсолютна вологість визначається як маса парів рідини в одиниці об'єму сухого або вологого газу в нормальних умовах.

Абсолютна вагова вологість A – маса водяної пари, вміщеної в одиниці об'єму парогазової суміші.

Абсолютна об'ємна вологість A_v виражається в об'ємних відсотках для малих концентрацій. Цю одиницю позначають *ppm* об'ємних, тобто "міліонна частка по об'єму" ($1 \text{ ppm об'ємн.} = 1 \cdot 10^{-4} \% \text{ об'ємн.}$).

Відносна вологість або ступінь насичення газу парами рідини, визначається як відношення маси парів в одиниці об'єму до максимально можливої маси парів в одиниці об'єму за тієї ж температури, вираженої в %:

$$\varphi = \frac{A}{A_n} \cdot 100, \quad (12.1)$$

де A – значення абсолютної вологості газу за даної температури;

A_n – максимально можливе значення абсолютної вологості за даної температури, що відповідає насиченню.

Для температури $T > 100^\circ\text{C}$ і тиску $P = 760$ мм рт. ст. гранична кількість водяної пари, що міститься у 1 м^3 газопарової суміші, відповідає густині пари, бо у цьому випадку замість суміші буде тільки пара:

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_{n.\text{max}}}, \quad (12.2)$$

де ρ_n – густина пари.

У процесах сушки використовується термін *вміст вологи* d , під яким приймається вміст водяної пари у пароповітряній суміші, що припадає на одиницю маси сухого повітря:

$$d = 1000 \frac{\rho_n}{\rho_c}. \quad (12.3)$$

12.2 Методи вимірювання вологості газів

Вимірювання вологості газів може виконуватись наступними методами:

- 1) *Психрометричний метод* ґрунтується на залежності швидкості

випаровування вологи у зовнішнє середовище від вологості цього середовища. Швидкість випаровування зростає зі зменшенням вологості газу.

2) *Метод точки роси* полягає у визначенні температури, до якої необхідно охолодити ненасичений газ для того, щоб привести його в стан насичення. Якщо відома температура точки роси, то за допомогою таблиць насиченої водяної пари можна визначити абсолютну вологість газу.

3) *Сорбційний метод* ґрунтується на поглинанні вологи із контрольного середовища деякою речовиною. Кількість поглинутої вологи визначається за зміною маси або інших параметрів цією речовиною. В залежності від зміни властивостей речовини розрізняють наступні види сорбційного методу:

- сорбційно-електролітичний – вологість визначається за зміною електричної провідності плівки з нанесеним на неї сорбентом, у якості якого найчастіше використовується хлористий літій або фтористий барій у суміші з вивареною або сегнетовою сіллю;

- сорбційно-кулонометричний метод – вологість визначається за кількістю електрики, що витрачається на електроліз вологи, яка поглинута плівкою частково гідратованою п'ятиокисом фосфору;

- сорбційно-кулонометричний дифузійний – сорбент відділяється від контрольного середовища пористою перегородкою – дифузійним бар'єром, що пропускає тільки частину вологи, маса якої визначається електролізом;

- п'єзосорбційний метод – використовується залежність власної частоти коливань кварцового резонатора від маси вологопоглинаючої речовини, нанесеної на поверхню кварцової пластини;

- сорбційно-деформаційний метод – використовується залежність розмірів деяких вологосорбуючих матеріалів від вологості середовища; чутливим елементом служить капронова нитка, плівки різних матеріалів;

- сорбційно-масовий метод – ґрунтується на властивості деяких речовин поглинати вологу – силікагель, хлористий кальцій, хлористий літій, фосфорний ангідрид; абсолютна вологість визначається за збільшенням маси сорбенту та кількості пропущеного через сорбент газу;

- сорбційно-термічний метод – ґрунтується на вимірюванні кількості теплоти, що виділяється від сорбції вологи гігроскопічним матеріалом.

4) *Конденсаційний метод* ґрунтується на охолодженні контрольного газу до повної конденсації вологи, що міститься у ньому. Кількість вологи визначається за об'ємом скрапленої води.

5) *Спектрометричний метод* – ґрунтується на використанні залежності поглинання випромінювань від вологості досліджуваного газу. Застосовується інфрачервоне, ультрафіолетове або радіоактивне випромінювання.

6) *Електрохімічний метод* (метод К. Фішера) – ґрунтується на вимірюванні електричного потенціалу, що виникає в розчині Фішера з виділення металевого йоду, безводного піридину та сухого сірчаного ангідриду у метанолі від потрапляння в нього води:
$$J_2 + SO_2 + 2H_2O \Leftrightarrow 2J^- + SO_4^{2-} + 4H^+.$$

7) *Метод теплопровідності* – ґрунтується на різниці теплопровідності

сухого та зволоженого тіла.

12.3 Психрометричний метод вимірювання вологості газів

Психрометричний метод є одним з найпоширеніших методів вимірювання вологості для позитивних температур. Він оснований на пониженні температури вільної поверхні, змоченої рідиною, в результаті витрат тепла на випаровування рідини в зовнішню атмосферу. Основу методу складає залежність між парціальним тиском (пружністю) водяної пари та різницею показів сухого термометра t_c і термометра, поверхня якого змочується водою, t_m (мокрый термометр). Ця залежність описується формулою:

$$P_n = P_{nn}^m - AP(t_c - t_m), \quad (12.4)$$

де P_{nn}^m – максимально можливий парціальний тиск водяної пари за температури t_m ;

A – психрометричний коефіцієнт;

P – атмосферний тиск.

Отже, відносна вологість буде визначатись, як:

$$\varphi = \frac{P_{nn}^m}{P_{nn}^c} - \frac{AP}{P_{nn}^c}(t_c - t_m), \quad (12.5)$$

де $P_{nn}^c = P_{nn}$ – максимально можливий парціальний тиск водяної пари за температури газу t_c .

За показами сухого і мокрого термометрів можна безпосередньо визначити відносну вологість φ , якщо відоме значення коефіцієнта A . З цією метою використовуються психрометричні таблиці, складені для деяких конструкцій психрометрів.

Психрометричний коефіцієнт залежить: від багатьох чинників, що впливають на тепло- і масообмін чутливого елемента мокрого термометра з оточуючим середовищем, розміру і форми чутливого елемента, виду та стану гноту, що підводить рідину і змочує його, теплопровідності його захисної оболонки та її захисту від випромінювання.

Серед зовнішніх чинників, що визначають роботу психрометра, найбільше значення має швидкість руху повітря біля мокрого термометра. З ростом швидкості повітряного потоку посилюється випаровування та зменшується спотворення впливів притоку тепла (променевого і від теплопровідності).

Залежність коефіцієнта A від швидкості руху повітря v наведена на рисунку 12.1 (крива 1); на цьому ж рисунку подана залежність показів електричного психрометра від швидкості руху повітря біля мокрого термометра за відносної вологості $\varphi = 29,5\%$ (крива 2). Коефіцієнт A швидко спадає з ростом швидкості повітряного потоку і при швидкості $v > 2,5$ м/с наближається до постійної величини. Для вказаних швидкостей покази психрометра практично не залежать від зміни швидкості руху повітря. На основі цього, у давчачах більшості сучасних психрометрів передбачені

пристрої для аспірації повітря з постійною швидкістю не нижче 3 – 4 м/с, що дає можливість стабілізувати покази психрометра.

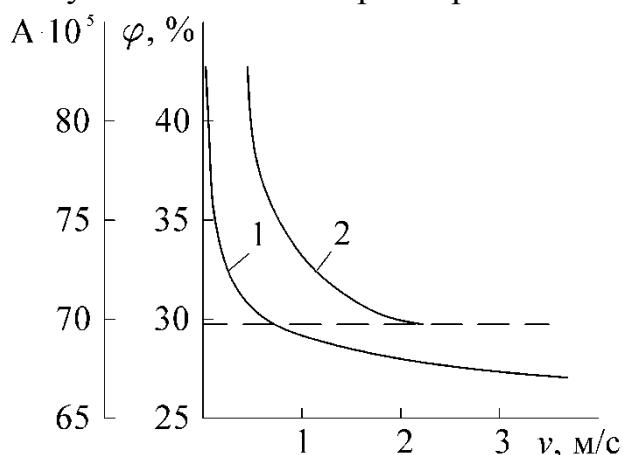


Рисунок 12.1 – Залежність від швидкості руху повітря:

1 – психрометричного коефіцієнта A ; 2 – показів електричного психрометра

12.4 Випаровувальні аналізатори

Одним з найпоширеніших газоаналізаторів (воломірів) є психрометр. Дія його основана на вимірюванні температури рідини під час її випаровування в контрольний газ. Психрометри можуть використовуватись для вимірювання концентрації парів будь-яких рідин в газах, але найчастіше використовуються як гігрометри – для визначення концентрації парів води.

Автоматичний психрометр, призначений для вимірювання відносної вологості повітря показано на рисунку 12.2. Повітря з допомогою вентилятора 1 із швидкістю 3 – 4 м/с прокачується через фільтри 4 і 5 до камер 2 і 6, у яких розміщені платинові терморезистори 3 і 8. Терморезистор 3 служить для вимірювання температури повітря, його називають *сухим термометром*. Термометр 8 обгорнутий бавовняною тканиною 7 (гнотом), кінець якого занурений у ванночку 9, заповнену дистильованою водою. Цей термометр називають *мокрим термометром*. Під час випаровування води з поверхні гноту в потоці повітря температура терморезистора 8 зменшується, і тим більше, чим менша його вологість. Опори терморезисторів 3 і 8 вимірюються спеціальним вторинним приладом 13.

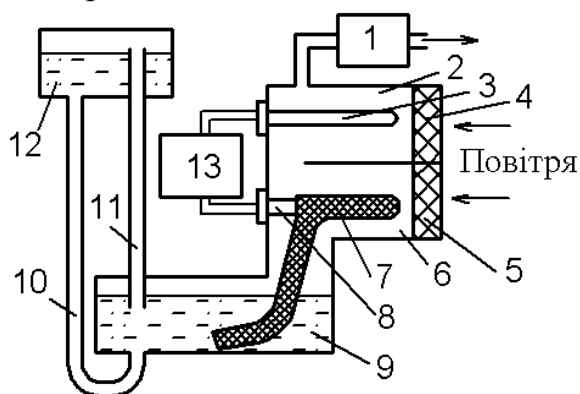


Рисунок 12.2 – Схема випаровувального аналізатора

Для підтримання у ванночці певного рівня води служить бачок 12 з трубками 10 і 11. По мірі випаровування води з гноту її рівень у ванночці 9 понижується, відкривається нижній кінець трубки 11, через нього в бачок поступає повітря і із бачка у ванночку 9 стікає вода. Коли вода перекриває нижній отвір трубки 11, в газовому просторі бачка поступово утворюється розрідження. Вода із бачка витікає до того часу, доки це розрідження стане достатнім для врівноваження гідростатичного тиску, що визначається різницею рівнів води в бачку та ванночці.

Визначення відносної вологості за температурами сухого t_c та мокрого t_m термометрів базується на наближеній залежності:

$$\varphi = f\left(\frac{t_m - a}{t_c - b}\right). \quad (12.6)$$

Обчислення відносної вологості за приведеним виразом здійснюється вторинним приладом 13.

Вимірювальна частина приладу (рис. 12.3) складається з двох вимірювальних мостів I і II. Обидва мости живляться змінним струмом від одного джерела живлення і мають два загальних плеча $R1$ та $R3$. Сухий термометр опору R_{TC} включений в плече моста I, мокрий – R_{TM} в плече моста II.

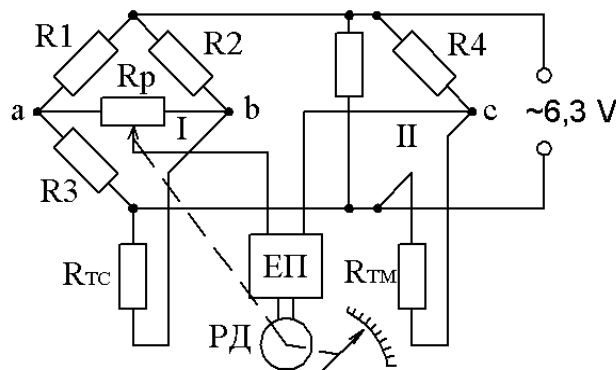


Рисунок 12.3 – Вимірювальна схема вторинного приладу

Міст I утворений постійними резисторами $R1$, $R2$, $R3$, R_{TC} , а міст II – резисторами $R1$, $R3$, $R4$, R_{TM} . Різниця потенціалів в точках a і b діагоналі моста I пропорційна температурі сухого термометра опору, а різниця потенціалів у точках a і c – температурі мокрого термометра опору.

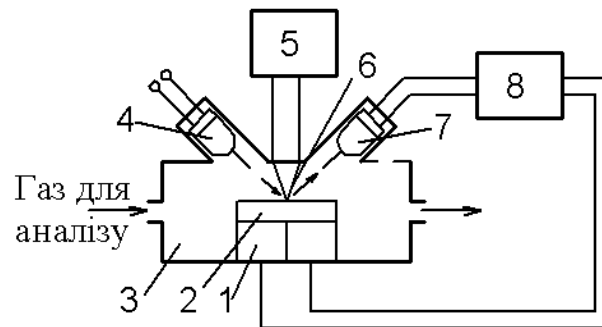
Спад напруги між точками b і c діагоналі подвійного моста пропорційний різниці температур сухого та мокрого термометрів опору. Рівновага вимірювальної схеми встановлюється автоматично зміною положення движка реохорда R_p , який приводиться в рух від реверсивного двигуна P_D . Одночасно зміщується стрілка відлікового пристрою.

Шкала приладу градуйована в одиницях відносної вологості (%). Якщо прилад працює за низьких температур, то для змочування мокрого термометра використовується 3% водяний розчин формальдегіду.

Діапазон вимірювання психрометра 20 – 100% відносної вологості, класи точності 4 – 6; час реакції 3 – 5 хв.

12.5 Конденсаційні аналізатори

Конденсаційні аналізатори використовуються, в основному, в якості гігрометрів, тобто приладів для визначення кількості водяних парів у повітряній атмосфері. Схема конденсаційного гігрометра, яка приведена на рисунку 12.4.



Рисунк 12.4 – Схема конденсаційного аналізатора

В основу роботи покладено вимірювання температури, за якої контрольний газ за незмінного тиску досягає стану насичення. Із нього випадає конденсат (роса) рідини, концентрація парів якої в газі вимірюється. Цю температуру називається *температурою точки роси* (або іній), а прилади, для вимірювання цієї температури – гігрометрами точки роси.

Газ для аналізу з постійними об'ємними витратами прокачується через камеру 3, в якій розміщено напівпровідниковий термоелемент (термопара) 1, що служить холодильником. У термопарі 1 використано принцип Пельтьє. Цей принцип полягає у підвищенні температури одного спаю та пониженні температури другого спаю від проходження струму у термоелектричному колі.

До холодного спаю цієї термопари припаяно металеве дзеркальце 2. До гарячого спаю термопари подається напруга постійного струму від автоматичного регулятора 8. Внаслідок протікання через термопару постійного струму її холодний спай, а з ним і дзеркальце 2, охолоджуються. Охолодження відбувається до того часу, доки на поверхні дзеркальця не утвориться конденсат (іній). Світловий потік, що поступає від лампи 4 до фотоприймача 7 зменшується за рахунок розсіювання на поверхні дзеркальця, покритого конденсатом. Це викликає зменшення вихідного сигналу регулятора та відключення або зменшення, у залежності від прийнятого закону регулювання, напруги живлення термопари 1 за рахунок теплоти, яка вноситься потоком контрольного газу в камеру 3, дзеркальце і холодний спай поступово нагріваються. Конденсат випаровується і світловий потік відновлюється до початкового стану. Регулятор 8 підключає або збільшує напругу живлення термопари і холодний спай знову починає охолоджуватись. Таким чином, температура дзеркальця автоматично підтримується рівною температурі точки роси. Ця температура перетворюється в уніфікований сигнал з допомогою термоелектричного чутливого елемента 6 та нормуючого перетворювача 5.

Існують вологоміри, у яких дещо змінений принцип дії. У цих вологомірах температура дзеркала підтримується постійною, а конденсат випадає на поверхню дзеркала від зміни тиску газу.

Гігрометри точки роси мають діапазон вимірювання від -80 до $+40^{\circ}\text{C}$ для тиску контрольного газу $0,05 - 10$ МПа. Абсолютна похибка вимірювання складає $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

12.6 Вимірювання вологості твердих тіл і сипких речовин

Вологість твердих тіл і сипких матеріалів характеризується або вмістом вологи:

$$d = \frac{M}{M_0}, \quad (12.7)$$

або вологістю

$$W = \frac{M}{M_1} = \frac{M}{M_0 + M}, \quad (12.8)$$

де M – маса вологи, що міститься у тілі;

M_0 – маса абсолютно сухого тіла;

M_1 – маса вологого матеріалу.

Іноді як вміст вологи d , так і вологість W виражають у відсотках. Для вимірювання вологості сипких речовин і твердих тіл (шкіри, паперу, дерева тощо) використовують, головним чином, електричні методи. У деяких випадках використовується метод гігрометричної рівноваги, що полягає у вимірюванні за допомогою електричних гігрометричних давачів вологості повітря, яке знаходиться у гігрометричній рівновазі з вологим твердим матеріалом. У цьому випадку відпадає необхідність у безпосередньому вимірюванні параметрів твердого матеріалу.

У електричних методах вимірювання використовується залежність різних електричних властивостей тіла від вологості. Розрізняють наступні електричні методи: кондуктометричний, діелектричних втрат, ємнісний.

Кондуктометричний метод ґрунтується на залежності питомої об'ємної провідності, що вимірюється на постійному струмі, від вмісту вологи. На рисунку 12.5 наведена характерна залежність логарифму активного опору комірки, заповненої дослідним матеріалом, від його вологості.

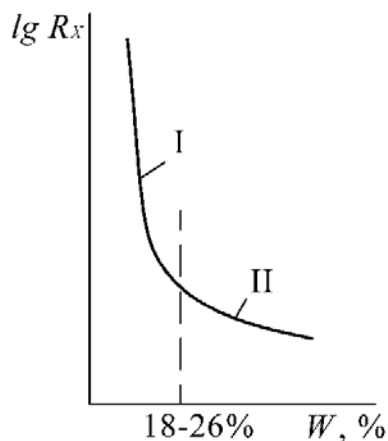


Рисунок 12.5 – Залежність опору давача кондуктометричного вологоміра від вологості матеріалу

На графіку різко проявляються дві області – перша I, де матеріал наділений малою і середньою вологістю. Для цієї області характерна висока чутливість методу (велика крутизна кривої). До вологості 18 – 26% наближено можна прийняти:

$$\lg R_x = a - bW, \quad (12.9)$$

де a і b – коефіцієнти, що залежать від матеріалу і умов вимірювання.

У другій області II – області з підвищеною вологою – чутливість невисока. Провідність вологого матеріалу, що вимірюється на постійному струмі, залежить від його в'язкості, концентрації електроліту, характеру структури і температури матеріалу. Позаяк за невеликої вологості опір комірки R_x , заповненої матеріалом, дуже великий ($R_x > 10^{12}$ Ом), то вимірювання його з великою точністю ускладнюється. Для вимірювання необхідно створювати однакові умови підготовки і введення зразка у міжелектродний простір, використовуючи або давачі зі спеціальним ущільнюючим пристроєм, або такі здавачі, у яких ущільнення забезпечується самим об'єктом, наприклад, рухомий транспортер. Очевидно, що здавачі другого типу простіші, а тому їх застосовують у автоматичних системах регулювання вологості.

Неавтоматичні кондуктометричні вологоміри виконані переважно у вигляді омметрів і мегомметрів, а автоматичні – у вигляді мостових електронних схем. Кондуктометричний метод дає можливість визначати вологість твердих і сипких матеріалів тільки наближено. Похибка вимірювання приблизно складає 6 – 8% і більше.

Ємнісний метод ґрунтується на лінійній залежності діелектричної проникності речовини ε від його вологості. Відомо, що діелектрична проникність для сухих речовин $\varepsilon \approx 2,0 - 5,0$, а для води $\varepsilon = 81,0$. Тому невелика зміна вологості призводить до значної зміни ε . Діелектрична проникність вологої речовини вимірюється через ємність конденсаторного давача. Для плоского конденсаторного давача, ємність [пФ]:

$$C = 0,08842\varepsilon \frac{S}{d}, \quad (12.10)$$

а для циліндричного:

$$C = \frac{0,2416\varepsilon}{\lg \frac{d_2}{d_1}}, \quad (12.11)$$

де d – віддаль між обкладинками конденсатора, см; d_1 – діаметр внутрішнього електрода, см; d_2 – внутрішній діаметр зовнішнього електрода, см; S – площа обкладинок конденсатора.

У вимірювальній схемі (рис. 12.6) ємність конденсаторного давача визначається за допомогою паралельного резонансного контуру з індуктивністю L і ємністю C_0 . Контур розмежований від генератора індуктивністю і ємністю. Індикатором резонансу служить електронний мілівольтметр РА.

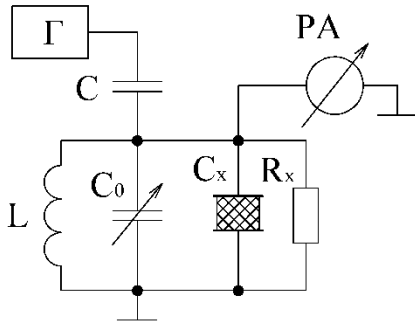


Рисунок 12.6 – Схема ємнісного індикатора вологості

Діелектричні втрати давача можна виразити опір R_x , що шунтує вимірювану ємність C_x .

Позитивною особливістю такої схеми є те, що резонансна ємність теоретично не залежить від величини опору, який шунтує конденсатор. В момент резонансу досягається максимум напруги. Величина еквівалентної ємності контуру:

$$C_{рез} = \frac{L}{R^2 + \omega^2 L^2}, \quad (12.12)$$

де L – індуктивність котушки, ввімкненої в контур;
 R – активний опір індуктивної котушки;
 ω – колова частота.

Величина опору R_x тільки змінює амплітуду максимальної напруги, але не змінює величину $C_{рез}$.

Резонансні схеми використовуються в основному як індикатори зміни ємності. Для створення приладів з неперервними показами необхідно суттєво ускладнити схему, бо вимагається автоматичне підналагодження ємності C_0 . У такому випадку доцільніше використовувати мостові схеми.

Питання для самоконтролю:

1. Що таке абсолютна та відносна вологість газів?
2. На яких фізичних явищах ґрунтуються основні методи визначення вологості газів та твердих тіл?
3. Чому у психрометрах використовуються два термометри?
4. Що собою являє вимірювальна схема автоматичного психрометра?
5. Як за точкою роси визначається відносна вологість газу?
6. Як поділяються прилади, що використовуються для аналізу вологості газів сорбційним методом?
7. Які методи використовуються для вимірювання вологості твердих тіл і сипких матеріалів?
8. Що служить вимірювальним перетворювачем у схемі для визначення вологості резонансним методом?

ТЕМА 13 МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ДЛЯ ХРОМАТОГРАФІЧНОГО ТА МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ

План

- 13.1 Хроматографічні методи та засоби автоматичного аналізу.
- 13.2 Газові та рідинні автоматичні хроматографічні аналізатори.
- 13.3 Мас-спектрометри.

13.1 Хроматографічні методи та засоби автоматичного аналізу

Для аналізу складних сумішей широко використовується хроматографічний метод, оснований на попередньому хроматографічному розділенні досліджуваної газової суміші на складові з використанням явища сорбції та наступним визначенням концентрації окремих складових досліджуваної суміші за допомогою будь-якого відомого методу аналізу.

Хроматографія ("запис кольору") – фізичний метод розділення багатоконпонентних сумішей, за якого компоненти суміші в процесі розділення розподіляються між двома фазами, одною з яких є нерухомий шар з великою поверхнею, а інший – потік, який фільтрується через нерухомий шар. Розділ компонентів відбувається за рахунок різниці їх швидкостей проходження через нерухомий шар, пов'язаної з різною сорбцією компонентів цим шаром.

У залежності від агрегатного стану рухомої фази хроматографічні аналізатори розділяють на газові (рухома фаза – газ) та рідинні (рухома фаза – рідина).

Розрізняють наступні види проявного аналізу:

- газоадсорбційний – рухома фаза – газ, нерухома – адсорбент;
- газорідинний – рухома фаза – газ, нерухома – твердий адсорбент, покритий рідиною;
- рідинно-адсорбційний – нерухома фаза – рідина, рухома – адсорбент;
- рідинно-рідинний – рухома фаза – рідина, нерухома – твердий носій, покритий рідиною.

Для автоматичного аналізу складу безпосередньо на потоках хіміко-технологічних процесів застосовують аналізатори, які реалізують проявний (елюентний) колонковий метод хроматографічного аналізу.

Суть методу полягає в наступному: через колонку 1 (рис. 13.1, а), наповнену нерухомою фазою 2, неперервно прокачується рухома фаза 3, яку називають речовиною-носієм або елюентом.

Послідовність розділення багатоконпонентної суміші проявним методом можна прослідкувати за рис. 13.1, б – д на прикладі розділення суміші із трьох компонентів А, В і С.

У колонці внаслідок взаємодії нерухомої фази з молекулами компонентів А, В і С останні набувають різних швидкостей руху – менших, ніж швидкість руху рухомої фази. Взаємодія компонентів з нерухомою фазою виражається у багатократному повторенні процесів сорбції молекул вказаних компонентів

нерухомою фазою та їх десорбції потоком рухомої фази.

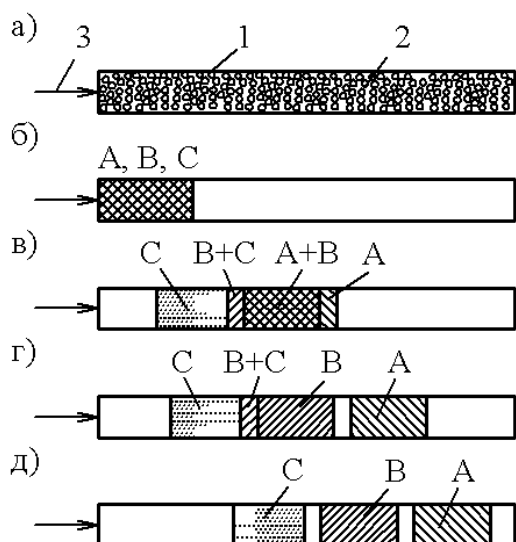


Рисунок 13.1 – Схема розділення трикомпонентної суміші хроматографічним проявним методом

Якщо компоненти мають різну величину сорбції у нерухомій фазі, то з просуванням по колонці вони будуть поступово розділятися. Так, на рис. 13.1, в показано типове розділення компонентів А, В і С, а на рис. 13.1, г видно, що за часткового розділення компонентів В і С відбулось повне відокремлення компонента А. За відповідного вибору довжини колонки, типу нерухомої та рухомої фаз можна добитись повного розділення компонентів А, В і С (рис. 13.1, д). Таким чином, у проявному хроматографічному аналізі в колонці утворюються зони бінарних сумішей компонента з рухомою фазою, розділені зонами чистої рухомої фази.

13.2 Газові та рідинні автоматичні хроматографічні аналізатори

Функціональна схема автоматичного газового хроматографа приведена на рис. 13.2.

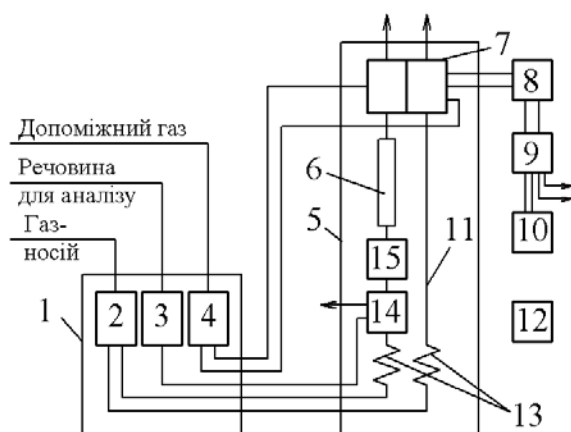


Рисунок 13.2 – Схема автоматичного газового хроматографічного аналізатора

Автоматичний хроматограф дозволяє здійснювати аналіз газоподібних та рідинних багатокомпонентних сумішей шляхом розділення їх газодсорбційним або газорідинним хроматографічним проявним методом. Основні блоки автоматичного хроматографа: блок підготовки газів та речовини, яка аналізується 1, аналітичний пристрій 5, масштабуючий вимірювальний перетворювач 8 сигналу детектора, пристрій оброблення вимірювальної інформації 9, самописний прилад 10 та пристрій управління 12.

Блок підготовки 1 включає вузол очищення та стабілізації параметрів (як правило, тиску і витрат) газу-носія 2, аналогічні вузли для речовини, яка аналізується 3 та допоміжного газу (газів) 4.

У аналітичному пристрої 5, температура якого автоматично стабілізується, розміщуються дозатор газу або рідини 14, випаровувач 15, хроматографічна колонка 6, диференціальний детектор 7 (детектором у хроматографі називають первинний перетворювач, на який діють фізико-хімічні властивості потоку газів), змійовики 13 для стабілізації температури потоків газу-носія, трубка 11, замість якої іноді використовується порівняльна або додаткова хроматографічна колонка. Пристрій управління 12 здійснює узгодження у часі роботу всіх блоків хроматографа (на рис. 13.2 функціональні зв'язки не показані), а також автоматичне регулювання температури аналітичного пристрою.

Блок підготовки і аналітичний пристрій встановлюються біля точки відбору речовини, яка аналізується, а решта блоків – в операторній. Автоматичний газовий хроматографічний аналізатор є пристроєм циклічної дії та має два режими роботи – "Підготовка" та "Аналіз".

Практична принципова схема газового хроматографа для аналізу багатокомпонентного газу подана на рис. 13.3.

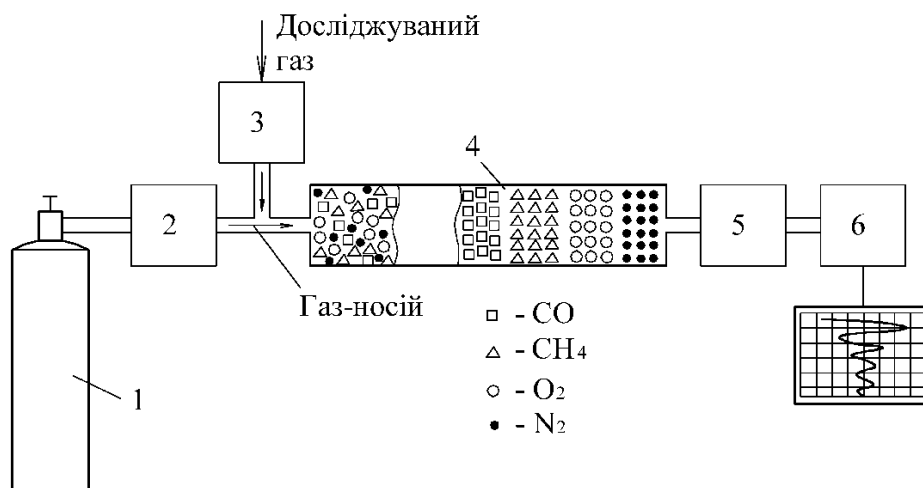


Рисунок 13.3 – Принципова схема газового хроматографа

Газ-носієй з балона 1 через регулятор подачі 2 надходить до хроматографічної колонки 4, захоплюючи певну дозу досліджуваної суміші, яка періодично вводиться дозатором 3. В хроматографічній колонці суміш розподіляється на складові, які рухаються через колонку і по черзі виносяться газом носієм у детектори 5, а з виходів детекторів – до вимірювально-обчислювальної системи 6 для оброблення результатів і хроматографічного аналізу. Результати аналізу реєструються самописцем.

Зміна сигналу детектора у часі на виході із хроматографічної колонки кожного з компонентів має форму піка, близьку до форми кривої нормального розподілу.

Послідовність сигналів детектора на 1, 2, ..., i, ..., n компоненти утворюють хроматограму (рис. 13.4), яка реєструється на діаграмній стрічці

самописного приладу.

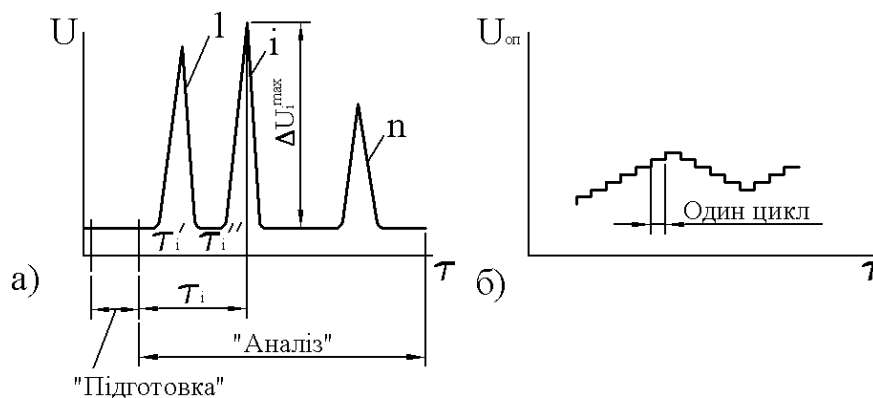


Рисунок 13.4 – Хроматограма (а) і вихідний сигнал автоматичного хроматографічного аналізатора (б)

Кожному компоненту за постійних умов роботи (постійний тиск і витрати, температура) відповідає точно визначений час утримання τ_i , значення якого визначається під час налагодження.

Для визначення концентрації кожного компонента у суміші використовується інформація про максимальну зміну ΔU_i^{\max} значення сигналу – висота піка або площі сигналу S_i цього компонента. Визначення висоти ΔU_i^{\max} та площі піка S_i виконується обчислювальним пристроєм і запам'ятовується на один цикл роботи. Тому, вихідний сигнал $U_{оп}$ змінюється ступінчато (рис. 13.4, б). Цей сигнал поступає на вихід аналізатора і реєструється самописним приладом. У сучасних автоматичних хроматографічних аналізаторах для управління роботою та для реєстрації та запам'ятовування і зберігання інформації використовується комп'ютерна техніка.

Час одного циклу роботи складає від декількох хвилин до однієї години. Відносна похибка вимірювання складає $\pm(2-5\%)$. Діапазон вимірювання концентрації від $10^{-5} - 10^{-2}$ до 100%. Температура аналітичного пристрою може стабілізуватись у діапазоні $40 - 300^\circ\text{C}$.

Використання рідинної хроматографії для аналізу складу рідких багатокомпонентних речовин має ряд переваг у порівнянні з газовою. Найважливіші з них: відпадає потреба нагрівання основних вузлів хроматографа до високих температур з метою недопущення конденсації парів рідини, яка аналізується; відсутність деструкції високомолекулярних рідких речовин; у більшості випадків велика швидкість аналізу та ефективність розділення.

Схему автоматичного рідинного хроматографічного аналізатора показано на рисунку 13.5.

Функції основних блоків та вузлів аналогічні функціям відповідних блоків та вузлів газового хроматографа. Відмінність полягає у тому, що у рідинному хроматографі відсутній випаровувач рідинної проби, а блок підготовки 1 речовини, яка аналізується та рідини носія включає: резервуар 2

для рідини носія, насос 3 для подачі рідини-носія та вузол 4 стабілізації параметрів речовини, яка аналізується.

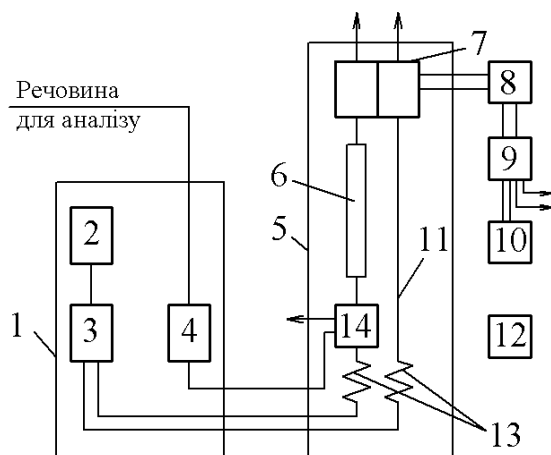


Рисунок 13.5 – Схема автоматичного рідинного хроматографічного аналізатора

У цих хроматографах використовуються дозатори переважно золотникового типу і прямі колонки довжиною до 1 м, заповнені сорбентом із середнім діаметром фракцій 5 – 50 мкм. У якості детекторів у рідинних хроматографах найчастіше використовуються перетворювачі, основані на поглинанні електромагнітного випромінювання в ультрафіолетовій області (185 – 2500 нм) та рефрактометричні детектори. За принципом дії вони аналогічні ультрафіолетовим адсорбційним аналізаторам і рефрактометрам. Відмінність детекторів від названих аналізаторів полягає у тому, що кювети детекторів мають менший об'єм, що не перевищує 10^{-2} см³.

У деяких випадках у рідинних хроматографах використовуються кодуктометричні, діелькометричні детектори, детектори теплоти сорбції. Принцип дії цих пристроїв аналогічний принципам роботи відповідних аналізаторів.

Важливою частиною рідинних хроматографів є вузол подачі рідини-носія (розчинника). З огляду на те, що колонки рідинних хроматографів для збільшення ефективності розділення та швидкості аналізу заповнюються дуже дрібною фракцією сорбенту, для прокачування рідини-носія через колонку необхідно створювати високий тиск – 10–30 МПа (100–300 кгс/см²). Для цього використовуються мініатюрні плунжерні, діафрагменні, ротаційні насоси.

Метрологічні характеристики рідинних хроматографів близькі до характеристик газових хроматографів.

13.3 Мас-спектрометри

В основі застосування мас-спектрометрів лежить використання основної характеристики речовини маси молекул і атомів цієї речовини. У мас-спектрометрі реєструються сфокусовані пучки іонів компонентів речовини. За інтенсивністю цих пучків склад речовини визначається з дуже великою точністю, що дозволяє визначити домішки до основного газу, яка складає 0,001%.

Принципову схему мас-спектрометра показано на рисунку 13.6.

Досліджуваний нейтральний атомний пучок вводиться у іонне джерело 1 через дозуючий пристрій. Для аналізу газів або парів широко

використовуються джерела, у яких іонний пучок виникає внаслідок дії на газ електронного пучка, що випускається розжареним вольфрамовим катодом.

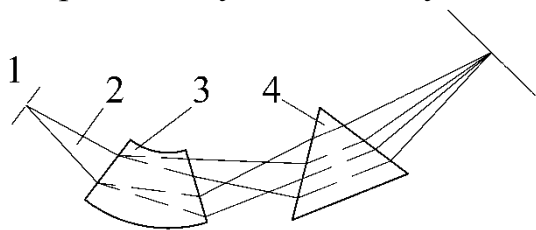


Рисунок 13.6 – Принципова схема мас-спектрометра

Іонний пучок 2, який вилітає з джерела, складається з частинок з різними значеннями енергії і різним відношенням m/q , де m – маса іона; $q = ke$ – заряд іона, виражений в одиницях заряду електрона e ; k – кратність іонізації.

Цей пучок попадає в іонізатор, у якому піддається дії електричного 3 і магнітного 4 полів. Форма і розміри полів вибрані такими, щоб всі іони з певною величиною m/q збирались в окремий сфокусований пучок. Таким чином, електричне поле формує пучки, які складаються з іонів з різними значеннями відношення m/q , але однаковими енергіями. Ці пучки, попадаючи у магнітне поле, направлене перпендикулярно до електричного поля, перетворюються у пучки, які складаються вже з іонів з різною енергією, але однаковим відношенням m/q .

У реєстраторі мас-спектрометра по чергово реєструється кожен пучок. Мас-аналізатори характеризуються діапазоном мас речовин, які аналізуються, і роздільною здатністю $M/\Delta M$, де M – максимальне масове число однієї з компонент газовой суміші; ΔM – мінімальна різниця між максимальним масовим числом і найближчим до нього масовим числом іншої компоненти, що дозволяє роздільно реєструвати ці компоненти газовой суміші.

Радіус траєкторії іонів, що рухаються у магнітному полі:

$$R = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{m}{q} U}, \quad (13.1)$$

де H – напруженість магнітного поля; U – напруга прискорення.

Мас-спектрометри застосовуються для аналізу не тільки газоподібних, але й рідких та твердих тіл. Можливості застосування мас-спектрометрії значно розширились із застосуванням комп'ютерної техніки.

Питання для самоконтролю

1. Як поділяються методи аналізу багатоконпонентних речовин?
2. У чому полягає основна суть методу розділення?
3. Що таке хроматографія?
4. Які дві фази розрізняють у хроматографічній колонці?
5. Яке призначення аналітичного пристрою хроматографа?
6. Які пристрої використовуються у рідинних хроматографах в якості детекторів?
7. Яке фізичне явище використовується для мас-спектрометричного аналізу речовин?
8. Чим характеризуються мас-аналізатори?

ТЕМА 14 МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ

План

- 14.1 Повірка та калібрування засобів вимірювання.
- 14.2 Метрологічне забезпечення засобів вимірювання температури.
- 14.3 Метрологічне забезпечення засобів вимірювання тиску та витрат.
- 14.4 Випробувальні установки для повірки лічильників кількості рідин.
- 14.5 Метрологічне забезпечення засобів вимірювання концентрації та складу речовин.

14.1 Повірка та калібрування засобів вимірювання

Для багатьох практичних та технологічних вимірювань однозначність вимірювань забезпечується однозначністю засобів вимірювань. Під однозначністю засобів вимірювань приймається такий стан вимірювань, коли вони проградуйовані в узаконених одиницях, а їх метрологічні властивості відповідають нормі. Однозначність засобів вимірювань забезпечується шляхом їх повірки.

Повірочна схема – затверджений документ, що встановлює засоби, методи та точність передачі розміру одиниць від еталона або вихідного зразкового засобу до робочих засобів вимірювання (рис. 14.1).

Повіркою засобів вимірювання називається визначення похибки засобів вимірювання і встановлення їх придатності до застосування.

Основою забезпечення однозначності вимірювань є відтворення, зберігання та передача розміру встановлених одиниць фізичних величин. Такі технологічні процедури здійснюються з допомогою еталонів та зразкових приладів. Призначення еталонів – відтворення й зберігання одиниць фізичних величин.

Передача розмірів одиниць від еталонів до робочих засобів вимірювання здійснюється за допомогою зразкових засобів вимірювання. Послідовність цієї передачі встановлюється повірочними схемами.

Для засобів технологічних вимірювань застосовуються наступні методи повірки: безпосереднього порівняння засобів вимірювання зі зразковим засобом вимірювання того ж виду; пряме вимірювання засобом, який повіряється величиною, відтвореною зразковою мірою.

Калібрування робочих засобів вимірювання виконується шляхом порівняння їх показів з показами зразкових засобів. Калібрування передбачає регулювання засобів вимірювання – виконання ряду операцій, метою яких є зменшення основної похибки до гранично допустимого значення шляхом зменшення систематичної складової похибки.

Калібрування, як правило, виконується в умовах експлуатації і може застосовуватись як для приладів, так і вимірювальних систем. Після калібрування може бути введена поправка до показів вимірювального приладу.

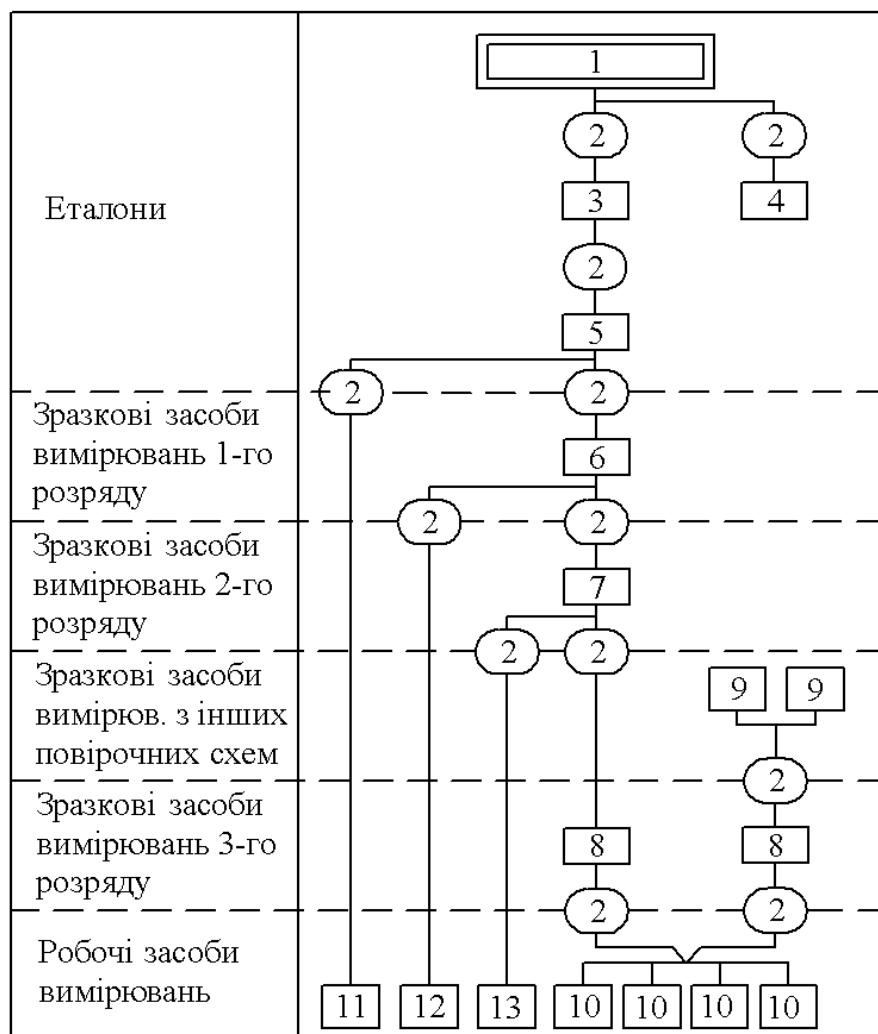


Рисунок 14.1 – Структура повірочної схеми:

1 – державний еталон; 2 – метод передачі розмірів; 3 – еталон – копія; 4 – еталон – свідок; 5 – робочий еталон; 6 – 9 – зразкові засоби вимірювання; 10 – робочі засоби вимірювання; 11 – робочі засоби вимірювання найвищої точності; 12 – робочі засоби вимірювання підвищеної точності; 13 – робочі засоби вимірювання високої точності

14.2 Метрологічне забезпечення засобів вимірювання температури

Оснoву метрологічного забезпечення засобів вимірювання температури в діапазоні 13,81 – 6300 К складають дві повірочні схеми, в основу яких покладено державні первинні еталони одиниць температури – кельвін (К). Принцип дії еталонів оснований на відтворенні реперних точок МПТШ-68. У діапазоні температур від 13,81 до 273,15 К передача розміру одиниці від еталону здійснюється зразковими засобами вимірювань, до складу яких входять платинові термоперетворювачі опору, напівпровідникові термоперетворювачі опору, мідь-копелеві та мідь-костантанові термоелектричні термометри та ртутні скляні термометри.

Передача розміру одиниць температури від еталона в діапазоні 273,15 – 6300 К здійснюється зразковими засобами вимірювань, які згідно з повірочною схемою поділяються на дві групи: термометри та пірометри. У

групу термометрів входять: ртутні скляні термометри, платинові термометри опору, платинородій-платинові і платинородій-платинородієві (гр. ПР30/6) ТЕТ та вольфрам-ренієві (гр. ВР5/20) ТЕТ, а в групу пірометрів – температурні лампи, пірометри повного випромінювання та візуальні монохроматичні пірометри.

Зразкові скляні рідинні термометри призначені для вимірювання температур в діапазоні 240,15 – 903 К. Зразкові ртутні термометри бувають палочні та з вкладеною шкалою.

Палочні – це капіляр з зовнішнім діаметром 6 – 8 мм та внутрішнім – 0,1 мм. Шкала нанесена безпосередньо на зовнішню поверхню. Зразкові ртутні термометри випускаються з ціною поділки 0,01; 0,02; 0,05; 0,1°C.

Зразкові термоперетворювачі опору виготовляються з платини. Для вимірювання опору чутливого елемента передбачено дві пари виводів. Одна пара виводів потенціальна, друга – струмова. Потенціальні виводи підключаються до вимірювального приладу, а струмові – до джерела струму. Зразкові термометри з абсолютною похибкою $\pm(0,03 - 0,07)$ К в діапазоні 273 – 903 К застосовують для перевірки робочих термометрів.

Зразкові термоелектричні термометри (ТЕТ) поділяють на платинородій-платинові, платинородієві та вольфрамренієві. Конструкція робочих та зразкових ТЕТ аналогічні.

Зразкові температурні лампи призначаються для відтворення температур за яскравістю та кольором. Температурні лампи з абсолютною похибкою $\pm(3 - 15)$ К призначені для перевірки робочих монохроматичних пірометрів та пірометрів спектрального відношення в інтервалі температур 1100 – 3100 К.

Зразкові пірометри повного випромінювання призначені для перевірки робочих пірометрів в діапазоні температур 300 – 2800 К. Абсолютна похибка складає $\pm(5 - 15)$ К.

Як зразкові міри електрорушійної сили використовуються нормальні елементи (НЕ) – високоточні гальванічні елементи. НЕ бувають двох типів – насичені та ненасичені.

Насичений елемент (рис. 14.2) складається з герметичної скляної ємкості Н-подібної форми. Позитивним електродом 1 служить ртуть, негативним 5 – амальгама кадмію.

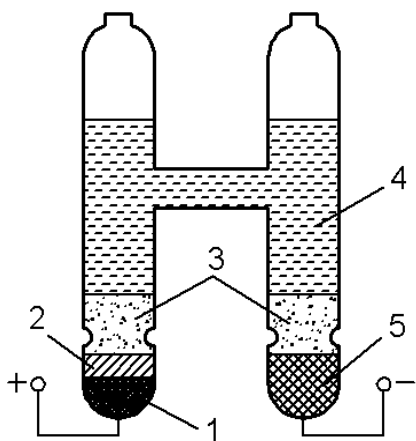


Рисунок 14.2 – Будова нормального елемента

Виводи з електродів, виконаних з платини, впаяні в нижні кінці ємкості.

Над ртуттю нанесено шар пасти 2 із суміші сірчаноокислої ртуті та сірчаноокислого кадмію. Паста є деполяризатором. Електролітом 4 служить насичений розчин сірчаноокислого кадмію. Насичення розчину забезпечується кристалами сірчаноокислого кадмію 3. В залежності від допустимої зміни е.р.с. в процентах за рік НЕ поділяються на класи 0,0002; 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005. Насичений НЕ дозволяє пропускати струм не більше 1 мкА.

Ненасичені НЕ відрізняються тим, що вони заповнені ненасиченим розчином сірчаноокислого кадмію.

Зразкові потенціометри постійного струму – це переносні потенціометри класу 0,05. Ці потенціометри призначені для безпосереднього вимірювання е.р.с.; повірки технічних ТЕТ, нормуючих вимірювальних перетворювачів та приладів, що працюють з ними в комплекті; отримання напруги постійного струму, яку можна плавно регулювати.

Електрична схема потенціометра з ручним врівноваженням (рис. 14.3) складається з трьох контурів: контролю I, компенсації II та вимірювання III. Контур контролю I включає нормальний елемент НЕ, резистор R_{HE} , тумблер T в положенні K (контроль) та нуль-гальванометр $НГ$.

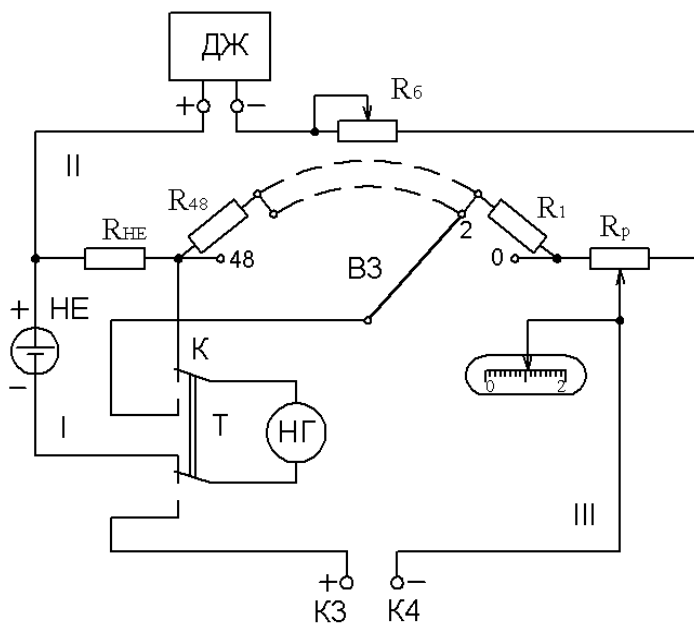


Рисунок 14.3 – Схема потенціометра з ручним врівноваженням

Контур компенсації II утворений змінним резистором R_6 , джерелом живлення ДЖ, резистором R_{HE} , резисторами $R_1 - R_{48}$ секціонованого перемикача $B3$ і реохордом R_p . Контур вимірювання III складається з затискачів $K3$ і $K4$, на які подається е.р.с, що вимірюється, резисторів $R_1 - R_{48}$ секціонованого перемикача $B3$, тумблера T в положенні I (вимірювання) та нуль-гальванометра $НГ$.

Як зразкові міри електричного опору застосовуються електричні котушки опору і магазини опорів класів точності 0,01 – 0,05. Вони широко використовуються для повірки логометрів, автоматичних електронних мостів та нормуючих перетворювачів, які працюють в комплекті з термометрами опору.

14.3 Метрологічне забезпечення засобів вимірювання тиску та витрат

Оснoву метрологічного забезпечення засобів вимірювання тиску складає група державних еталонів, до складу якої входять один первинний та п'ять спеціальних еталонів.

Державний первинний еталон одиниці тиску – це комплекс засобів вимірювання, що включає групу з п'яти поршневих приладів змінного складу, набору гир та спеціальну апаратуру для створення і підтримання гідростатичного тиску, який створюється вагою поршня та гир, що його навантажують.

У якості зразкових засобів вимірювання тиску використовуються рідинні компенсаційні, вантажопоршневі та деформаційні прилади.

До рідинних компенсаційних приладів відноситься універсальний рідинний мановакуумметр (прилад Петрова).

Прилад такого типу призначений для повірки дифманометрів-витратомірів змінного перепаду тиску, вакуумметрів, тягомірів та інших засобів вимірювання тиску й розрідження. Прилад включає дві пари сполучених посудин. Одна з них призначена для роботи на "воді", інша – на "ртуті".

Відносна похибка показів універсального рідинного вакуумметра для вимірювання тиску й розрідження в діапазоні 150 – 1000 мм вод. ст. і в діапазоні 75 – 1000 мм рт. ст. складає $\pm 0,3\%$. В діапазоні 0 – 150 мм вод. ст. абсолютна похибка не перевищує $\pm 0,5$ мм вод. ст., а для ртуті в діапазоні тисків 0 – 75 мм рт. ст. – 0,25 мм рт. ст. На даний час прилад Петрова має обмежене використання.

Принцип дії вантажопоршневих засобів вимірювання тиску оснований на рівноваженні зусилля, що створюється тиском, який вимірюється, на неуцільненому поршні, силою ваги вантажу, що навантажує поршень. Неуцільнений поршень – це поршень правильної циліндричної форми, поміщений у циліндр. Між стінками циліндра й поршня забезпечено рівномірний дуже незначний проміжок (1 – 5 мкм), заповнений робочою рідиною – трансформаторним або касторовим мастилом. У результаті поршень знаходиться у підвішеному стані і може проявляти на рідину тиск, зумовлений вагою поршня та вантажу, поміщеного на нього.

На рисунку 14.4 показано схему установки з вантажопоршневим манометром, оснащеним простим поршнем. Установка включає вантажопоршневий манометр I та гідравлічний прес II. Вантажопоршневий манометр – це ємкість циліндричної форми 1, заповнена робочою рідиною. У внутрішній порожнині циліндра розташовано поршень 2 з вантажоутримуючою тарілкою 6.

Гідропрес складається з поршня 11, що має манжетне ущільнення. Внутрішня порожнина преса з'єднується з вантажопоршневим манометром I і приладом 9, який повіряється, через канали, що перекриваються вентилями 7 і 10. Для заповнення гідравлічної системи робочою рідиною передбачено бачок 8 з запірним вентилям.

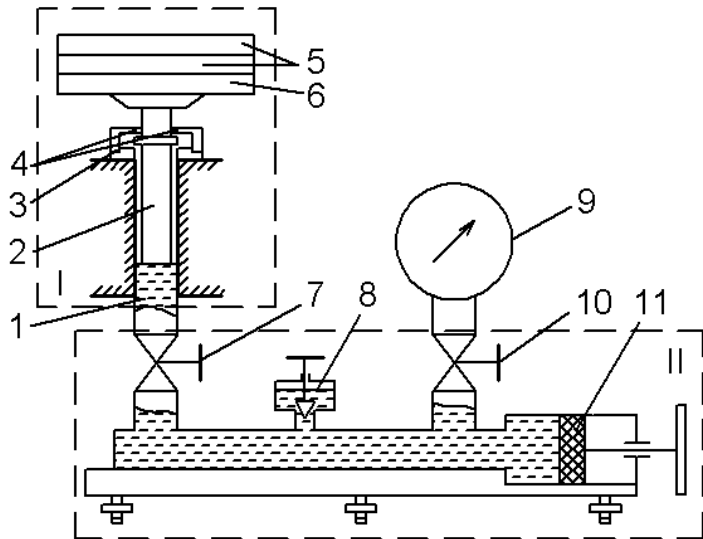


Рисунок 14.4 – Схема вантажопоршневого манометра

Під час вимірювання тиску P , що створюється гідропресом, вантажоутримуючу тарілку навантажують вантажами 5 до того моменту, доки поршень 2 не прийде в стан рівноваги. Про досягнення рівноваги судять по співпадінні рисок 4 на поршні і обмежувачі ходу 3 поршня. В стані рівноваги поршня буде справедливою рівність:

$$P = \frac{m_p + m_e}{F_{np}} (1 - \rho_n \rho_e) g, \quad (14.1)$$

де m_p , m_e – маса поршня та вантажів; ρ_n , ρ_e – густина повітря і матеріалу вантажів; F_{np} – приведена площа поршня.

На практиці F_{np} визначається експериментально і є основним метрологічним параметром вантажопоршневих манометрів. В сучасних манометрах приведена площа поршня – 0,5 см². Класи точності вантажопоршневих манометрів з простим поршнем – 0,02; 0,05; 0,2.

Принцип дії зразкових деформаційних манометрів і вакуумметрів аналогічний робочим манометрам і вакуумметрам. Відмінним елементом конструкції є коректор нуля та аретир. Шкала приладів кругова і має 100 або 250 умовних одиниць. Основною особливістю зразкового приладу є матеріал, з якого виготовлено пружний чутливий елемент.

Верхня межа вимірювання зразкових манометрів надлишкового тиску обмежені значеннями 0,1 – 60 МПа. Діапазон вимірювання зразкових вакуумметрів – 0,1 – 0 МПа. Класи точності зразкових деформаційних приладів 0,15; 0,2; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0.

Відтворення одиниць витрат газів та рідин здійснюється групою державних еталонів, в основу роботи яких покладено вимірювання об'єму або маси газу чи рідини за визначений проміжок часу. Передача розміру одиниці від еталонів до робочих засобів вимірювання витрат здійснюється зразковими засобами, до складу яких входять витратомірні установки та зразкові витратоміри.

У динамічні витратомірній установці (рис. 14.5) робоча рідина насосом 1 закачується у напірний бак 4, у якому компресором 2 створюється певний статичний тиск, що контролюється манометром 3.

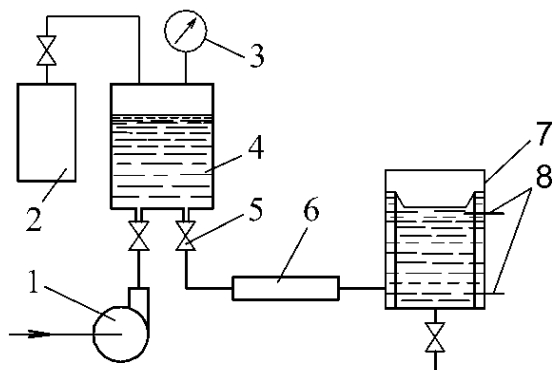


Рисунок 14.5 – Схема динамічної витратомірної установки

Під час повірки робоча рідина витискається із напірного бака через відкритий вентиль 5 та випробувальну ділянку 6, вихід якої під'єднано до мірної ємкості 7. Мірна ємкість оснащена датчиками рівня 8. Вимірюється час, протягом якого рідина займає фіксований об'єм між датчиками рівня, а потім визначаються дискретні значення витрат.

14.4 Випробувальні установки для повірки лічильників кількості рідин

Для повірки лічильників кількості рідини використовуються випробувальні установки двох типів: об'ємні і вагові, які відрізняються принципом вимірювання кількості рідини, що протікає через лічильник.

Об'ємна випробувальна установка (рис. 14.6) складається із:

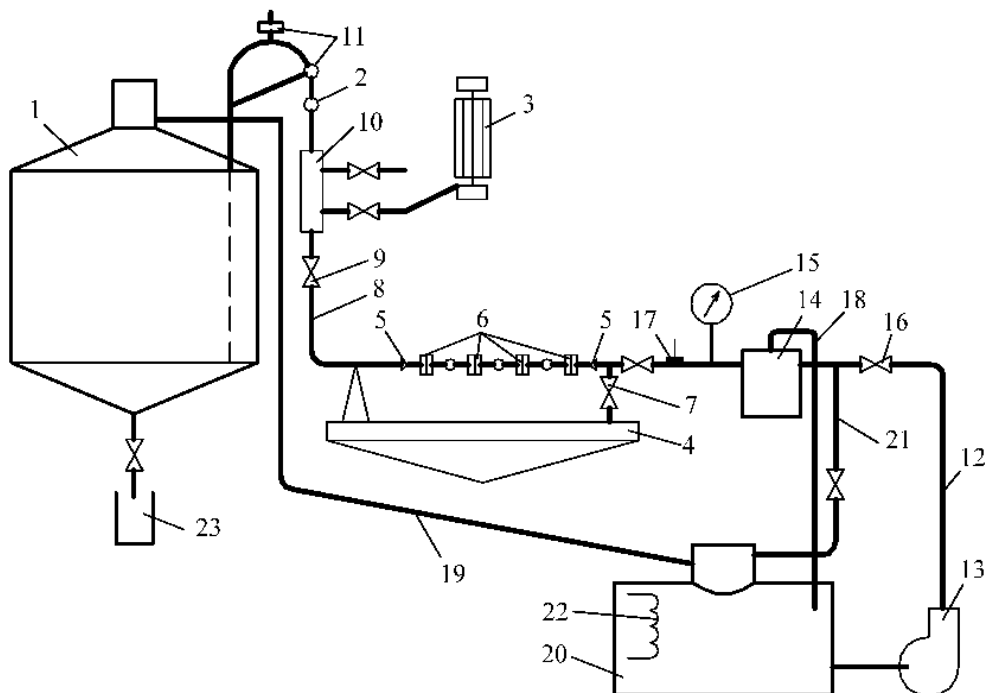


Рисунок 14.6 – Схема випробувальної установки для повірки лічильників кількості рідин

- мірного бака 1;
- пристрою для вимірювання витрат, що включає сопловий пристрій 2 і вказівник витрат 3;
- стола 4, оснащеного пристроєм 5 для під'єднання лічильників 6 до

трубопроводу, зі спускним краном 7;

- трубопроводу 8, що відводить рідину від лічильників у мірний бак, оснащеного регулювальною засувкою 9, візирним склом 10 і кранами 11 для з'єднання з атмосферою;

- трубопроводу 12, що підводить рідину від насоса 13 до лічильників, з встановленим на ньому фільтром-газовідділювачем 14, манометром 15, пусковим краном 16 і термометром 17;

- трубопроводу 18, що відводить повітря з мірного бака у сховище;

- трубопроводу 19, що відводить газу і повітря із фільтру-газовідділювача 14 у сховище 20;

- розвантажувального трубопроводу 21, що відводить частину рідини із трубопроводу 12 у сховище;

- сховища (зливного бака) 20, оснащеного пристроєм 22 для нагріву або охолодження робочої рідини;

- відстійника 23.

Як правило, робочий об'єм мірного бака вибирають рівним найбільшому з наступних двох об'ємів:

- об'єму рідини, що вимірюється лічильником за п'ять обертів великої стрілки його відлікового вказівника;

- об'єму рідини, що протікає через лічильник найбільшого для даної установки калібру за 2 хв. при максимальних повірочних витратах.

Якщо правильно спроектована, виготовлена, якісно повірена установка, то за умови нормальної експлуатації гранична похибка об'ємної випробувальної установки не перевищує $\pm 0,1\%$.

Вагові випробувальні установки відрізняються від об'ємних тим, що замість мірних баків для вимірювання кількості рідини у них застосовується вага. На вазі поміщено резервуар, який під час випробування заповнюється рідиною. Об'єм резервуара вибирається з тих же міркувань, що й для об'ємних випробувальних установок.

14.5 Метрологічне забезпечення засобів вимірювання концентрації та складу речовин

Основа метрологічного забезпечення засобів вимірювання концентрації газів – газоаналізаторів – складають суміші, стандартні зразки складу (повірочні газові суміші), стандартизовані методики повірки та зразкові газоаналізатори.

Повірка може виконуватись одним з методів:

а) шляхом аналізу повірочних газових сумішей;

б) фізичних еквівалентів газових сумішей.

При повірці по газових сумішах відомого складу порівнюються покази газоаналізатора зі значенням концентрації компонента, який аналізується, в повірочній газовій суміші.

При повірці методом фізичних еквівалентів замість атестованої газової суміші використовується імітатор – фізичний еквівалент тієї чи іншої фізико-

хімічної властивості газової суміші, яка аналізується.

Для приготування повірочних газових сумішей застосовуються манометричні, статичні та динамічні газозмішувальні установки.

Манометрична газозмішувальна установка призначена для приготування повір очних газових сумішей в діапазоні 0,1 – 99%. Принцип роботи установки полягає у заповненні за постійної температури газового балона до тиску P_1 контрольним газом, а потім до тиску P_2 газом-розбавлювачем. Під час заповнення тиск у газовому балоні визначається за показами зразкового манометра. Концентрація C контрольного газу у повір очній газовій суміші, що заповнює балон, обчислюється за формулою:

$$C = \frac{P_1}{P_1 + P_2} 100\% . \quad (14.2)$$

Похибка приготування повір очної газової суміші $\pm(1 - 4)\%$.

Статична газозмішувальна установка призначена для приготування повір очних газових сумішей на основі вибухонебезпечних компонентів, наприклад, водень – повітря, метан – повітря та інших, з концентрацією вимірюваного компонента у діапазоні 0,001 – 0,5%. Принцип роботи установки полягає у змішуванні за постійної температури T контрольного газу об'ємом V_1 з газом-розбавлювачем об'ємом V_2 та наступним визначенням концентрації C контрольного газу у повір очній газовій суміші, що заповнює об'єм $V_1 + V_2$:

$$C = \frac{V_1}{V_1 + V_2} 100\% . \quad (14.3)$$

Похибка приготування повір очної газової суміші $\pm(1 - 5)\%$.

Динамічні газозмішувальні установки призначені для створення мікроконцентрацій речовин в газах і поділяються на реометричні і дифузійні. Відмінною особливістю цих установок є формування повір очної газової суміші шляхом змішування потоку контрольного газу витратою Q_1 з потоком газу-розбавлювача Q_2 , тобто, формування повір очної газової суміші виконується в динамічному режимі. У реометричних газозмішувальних установках контроль за витратами газових потоків здійснюється за показами реометрів – капілярних витратомірів. Концентрація C контрольного газу у повір очній газовій суміші визначається за формулою:

$$C = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} 100\% . \quad (14.4)$$

У дифузійних газозмішувальних установках подача контрольної речовини у потік газу-розбавлювача здійснюється через дифузійних бар'єр. Витрати контрольної речовини визначаються шляхом вимірювання об'єму, що пройшов через дифузійний бар'єр, контрольної речовини у паровій фазі за певний інтервал часу. Контроль за витратами Q_2 газу-розбавлювача здійснюється капілярним витратоміром. Концентрація контрольної речовини у газі-розбавлювачі визначається за формулою (14.4). Похибка приготування повір очної газової суміші на динамічних газозмішувальних установках

$\pm(2 - 8)\%$.

Для приготування повірочних газових сумішей, що утримують у якості контрольного компонента вологу, застосовуються змішувальні установки, які називаються генераторами парогазової суміші – гігростатами. Гігростати є основними засобами повірки вологомірів газів. Розроблені і використовуються гігростати, основані на принципах: двох температур, двох тисків та змішування.

Формування газової суміші заданої вологості у гігростаті, заснованому на *принципі двох температур*, досягається шляхом зволоження газу до тиску насичення P_1 за температури t_1 . Потім температуру зволоженого газу підвищують до значення t_2 , за якої тиск насичення парів стає рівним P_2 . В результаті у робочій камері встановлюється відносна вологість $\phi = P_1/P_2$. Відтворення відносної вологості гігростатами цього типу $\pm(0,5 - 1)\%$.

У гігростатах, *основаних на принципі двох тисків*, газ насичується вологою за температури t_1 і тиску P_1 , а потім тиск зволоженого газу зменшується до значення P_2 . За постійної температури t_1 зменшення тиску P_1 до значення P_2 приводить до зменшення вологості газу. Гігростати, засновані на принципі двох тисків, дозволяють отримувати парогазові суміші з абсолютною вологістю $0,78 - 69 \text{ Г/м}^3$ та відносною похибкою $\pm(1 - 2)\%$.

У гігростаті, *заснованому на принципі змішування*, формування газу заданої вологості досягається шляхом змішування двох потоків газу, один з яких зволожений до насичення, а інший гранично висушений. Шляхом зміни співвідношення витрат вказаних потоків задана вологість досягається в межах від 10 до 100% з абсолютною похибкою $\pm(0,5 - 1)\%$.

Для повірки вологомірів газу з межами вимірювання від $2 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^{-2}\%$ застосовуються *дифузійні гігростати*, що виконані у вигляді циліндричної трубки або мембрани, що утворюють дифузійний бар'єр. З однієї сторони бар'єр омивається водою, а з іншої – осушеним газом. Кількість дифундуючої вологи визначається температурою і площею поверхні дифузійного бар'єру. Відносна похибка повірочної газової суміші, що формується дифузійним гігростатом, $\pm(2 - 5)\%$.

Основу метрологічного забезпечення засобів вимірювання концентрацій рідких середовищ кондуктометрів і рН-метрів складають зразкові засоби вимірювань та стандартні зразки складу.

Зразкові засоби вимірювань, що застосовуються для передачі розміру одиниці питомої електричної провідності (См/м) робочим засобам вимірювань, поділяються на два розряди.

Зразкові кондуктометри з межами вимірювань від $0 - 10^{-4}$ до $0 - 10^2$ См/м і межею допустимої відносної похибки $\pm(0,25-1)\%$ використовують для повірки кондуктометричних аналізаторів промислового призначення з межами допустимої відносної похибки $\pm(0,5 - 6)\%$.

Основну похибку кондуктометричних аналізаторів визначають комплексним або по елементним методом.

При комплексному методі проводять звірку показів аналізатори, що

повіряється, з показами зразкового кондуктометра. У якості зразкових рідин використовуються повірочні розчини.

При поелементному методі визначають основну похибку вимірювального блока аналізатора та сталу первинного перетворювача. Повірка виконується на повірочних установках з межами вимірювання $0 - 10$; $0 - 100$; $0 - 10^{-4}$; $0 - 0,1$ См/м.

Передача розміру одиниці рН від еталона робочим засобам вимірювання рН виконується зразковими засобами, що поділяються на чотири розряди, а також зразковими засобами вимірювання маси, об'єму та ЕРС постійного струму. Повірка рН-метрів виконується поелементним або комплексним методом. Повірка рН-метра поелементним методом включає роздільну повірку вимірювального перетворювача і електродів.

Основну похибку вимірювального перетворювача визначають методом звірки з показами зразкового потенціометра.

Вимірювальні електроди повіряються за зразковими буферними розчинами, а повірка допоміжних електродів виконується методом звірки зі зразковими електродами за допомогою компаратора.

Повірка рН-метра комплексним методом виконується шляхом порівняння показів рН-метра зі значенням рН зразкового буферного розчину.

Питання для самоконтролю

1. Як забезпечується однозначність засобів вимірювання?
2. Що називається повіркою засобів вимірювання?
3. У чому полягає основна відмінність зразкових засобів вимірювання?
4. Які засоби використовуються як зразкові для вимірювання температури?
5. На чому ґрунтується принцип дії вантажопоршневих манометрів?
6. Як повіряються лічильники витрат рідин?
7. З використанням яких методів виконується повірка засобів вимірювання концентрації газів – газоаналізаторів?
8. Які газозмішувальні установки використовуються у лабораторній практиці для приготування повір очних газових сумішей?
9. Яке призначення мають генератори парогазової суміші – гігростати?
10. Що складає основу метрологічного забезпечення засобів вимірювання концентрації рідких середовищ кондуктометрів і рН-метрів?

ТЕМА 15 АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ

План

15.1 Автоматизовані системи контролю та управління.

15.2 Застосування комп'ютеризованих вимірювальних засобів у технологічних процесах та енергетичних системах.

15.3 Класифікація методів та засобів автоматичного контролю якості продукції.

15.4 Структурні схеми автоматичних аналізаторів.

15.5 Способи підключення аналізаторів до технологічних потоків.

15.1 Автоматизовані системи контролю та управління

Автоматизація – один з напрямів науково-технічного прогресу, спрямований на застосування саморегульованих технічних засобів, економіко-математичних методів і систем керування, що звільняють людину від участі в процесах отримання, перетворення, передачі і використання енергії, матеріалів чи інформації, істотно зменшують частку цієї участі чи трудомісткість виконуваних операцій. Разом з терміном автоматичний, використовується поняття *автоматизований*, що підкреслює відносно великий ступінь участі людини в процесі.

Автоматизація, окрім об'єкта керування вимагає додаткового застосування давачів (сенсорів), керуючих пристроїв (контролерів із засобами вводу-виводу), виконавчих механізмів та, у переважній більшості, базується на основі використання електронної техніки та методів обчислень, що іноді копіюють нервові і розумові функції людини.

В основі комплексного контролю і автоматизації процесів лежить використання інформаційно-вимірювальних систем.

Інформаційно-вимірювальна система (ІВС) згідно означення – це сукупність функціонально об'єднаних вимірювальних, обчислювальних та інших допоміжних технічних засобів для отримання вимірювальної інформації, її перетворення, оброблення з метою подачі споживачу у необхідному вигляді, або автоматичного здійснення логічних функцій контролю, діагностики, ідентифікації.

Інформація, яка характеризує об'єкт вимірювання, сприймається ІВС, обробляє за деяким алгоритмом, в результаті чого на виході системи отримується кількісна інформація, що відображає стан даного об'єкта. Вимірювальні інформаційні системи суттєво відрізняються від інших типів інформаційних систем та систем автоматичного управління.

За характером взаємодії системи з об'єктом дослідження і обміну інформацією між ними ІВС можуть бути розділені на активні і пасивні. Пасивні системи тільки сприймають інформацію від об'єкта, а активні, діючи на об'єкт через пристрій зовнішнього впливу, дозволяють за короткий час автоматично і якнайповніше визначити його динаміку.

Для вимірювальних систем характерні:

- більш високі у відношенні до систем іншого виду вимоги щодо метрологічних характеристик;
- більш широкий спектр вимірюваних фізичних величин і особливо, їх кількості;
- необхідність у засобах подачі інформації, що пов'язано з тим, що основний масив інформації з виходу систем передається людині для прийняття їм рішення про зміну умов проведення експерименту, його продовження або припинення;
- більший об'єм зовнішньої пам'яті для систем, у яких оброблення та аналіз результатів вимірювання виконується після завершення процесу експерименту за допомогою набору різних засобів оброблення та подачі інформації.

15.2 Застосування комп'ютеризованих вимірювальних засобів у технологічних процесах та енергетичних системах

Кожному конкретного виду ІВС властиві численні особливості, обумовлені вузьким призначенням систем та їх виконанням.

За характером взаємодії системи з об'єктом дослідження та обміну інформацією між ними ІВС можуть бути розділені на активні і пасивні. Пасивні системи тільки сприймають інформацію від об'єкта, а активні, діючи певним чином на об'єкт шляхом зовнішніх впливів, дозволяють автоматично і найбільш повно за короткий час вивчити його поведінку. Такі структури широко застосовуються для автоматизації вимірювань та наукових досліджень різних об'єктів.

Залежно від характеру обміну інформацією між об'єктами і активними ІВС розрізняють системи без зворотного зв'язку та зі зворотним зв'язком за впливом. Вплив на об'єкт може здійснюватися за заздальгідь встановленою жорсткою програмою або за адаптивною програмою, яка враховує реакцію об'єкта. У першому випадку реакція об'єкта не впливає на характер вимірювальної дії, а отже, і на хід експерименту. Його результати можуть бути видані оператору після закінчення. У другому випадку результати реакції відображаються на характері вимірювальної дії, тому обробка інформації ведеться в реальному часі.

Такі системи повинні мати розвинену швидкодіючу обчислювальну мережу. Крім того, необхідне постійне подання інформації операторові у формі, зручній для сприйняття, з тим, щоб він міг втручатися в хід процесу.

Створення та експлуатація сучасних технологічних процесів вимагають організації великої кількості вимірювань та контролю. Наприклад, контроль за станом систем та апаратів АЕС виконується з використанням до 3000 первинних вимірювальних перетворювачів.

Вирішення таких задач традиційними засобами – підключення до кожного первинного вимірювального перетворювача індивідуального вимірювального пристрою є досить складною задачею, потребує великої кількості приладів, а оператор не в змозі слідкувати за їх показами.

Власне, сам процес вимірювання, контролю, використання інформативних даних для енергетичних систем і у технологічних процесах практично не відрізняється. Основна відмінність полягає в тому, що в енергетичних системах перевага надається збору достовірної інформації та її довготривале зберігання, а в системах автоматизації практично вся вимірювальна інформація використовується в реальному часі, а тому висуваються підвищені вимоги щодо швидкодії ІВС.

На практиці для вимірювання фізичних величин застосовуються електричні методи і, у багатьох випадках – неелектричні (наприклад, пневматичні, механічні, хімічні тощо). Фізичні величини можуть мати різну природу, наприклад, температура, об'ємні і масові витрати речовин, тиск, рівень речовини, час, швидкість переміщення, склад речовини (густина, вологість, вміст домішок тощо), напруга, сила струму.

Електричні методи вимірювання набули найбільш широкого поширення, так як з їх допомогою досить просто здійснювати перетворення, передачу, оброблення, зберігання, подання та введення вимірювальної інформації в ЕОМ. Робота комп'ютеризованої системи або комплексу взагалі можлива лише на основі використання електричних сигналів. Тому у випадку неелектричних вимірювань використовуються проміжні перетворювачі – "неелектричний параметр – нормований електричний сигнал".

15.3 Класифікація методів та засобів автоматичного контролю якості продукції

В основу автоматичного контролю якості продукції хіміко-технологічних процесів покладено хімічний аналіз, тому його часто називають автоматичним аналітичним контролем.

Хімічний аналіз – сукупність операцій, мета яких встановити, з яких речовин складається досліджуваний об'єкт (якісний аналіз), або у яких долях у нього входять ті або інші речовини (кількісний аналіз).

Розрізняють три групи методів аналізу: фізичні, фізико-хімічні та хімічні.

Фізичні основані на вимірюванні фізичних величин, властивих речовині, яка аналізується, наприклад, в'язкість, твердість тощо.

Фізико-хімічні методи аналізу основані на хімічних перетвореннях речовини, що аналізується та вимірюванні фізичних величин, що супроводжують ці перетворення, наприклад, температури або випромінювання в процесі окислення речовини.

Хімічні методи аналізу основані на хімічних перетвореннях та вимірюванні кількості продуктів цих перетворень.

У залежності від наявності попереднього впливу на речовину розрізняють: методи аналізу без перетворення речовини – безпосереднє вимірювання фізичних властивостей, і методи з попереднім перетворенням речовини – використовуються фізичні та хімічні методи перетворення речовини.

Фізичними називають перетворення, за яких вимірюються фізичні

властивості речовини, а склад залишається незмінним, наприклад, агрегатного стану речовини. Хімічними називаються перетворення, за яких змінюється стан речовини.

Вибірковими або селективними називають методи аналізу складу, що базуються на використанні фізичного явища або хімічної реакції, що вибірково (однозначно) залежить від концентрації в суміші певного компонента або групи компонентів одного класу.

Інтегральними (невибірковими) називають методи аналізу складу, що базуються на відмінностях у фізико-хімічних властивостях компонентів суміші.

Аналіз сировини й продукції здійснюється з допомогою засобів аналітичної техніки.

Аналізатор – вимірювальний прилад, установка або система, призначені для аналізу складу або властивостей речовини. Автоматичний аналізатор – у якому всі операції здійснюються автоматично.

Індикатор (визначник, сигналізатор) – аналізатор, що виробляє інформацію про якісний склад речовини, наприклад, про відсутність якогось певного компонента.

Аналізатор неперервної дії призначений для неперервного аналізу потоку речовини. Аналізатор циклічної дії – призначений для неперервного аналізу проб речовини, що змінюється в повному об'ємі з певною циклічністю.

15.4 Структурні схеми автоматичних аналізаторів

Автоматичні аналізатори – це складні вимірювальні системи, до складу яких, крім різноманітних вимірювальних засобів, входить ряд допоміжних пристроїв.

Спрощені схеми аналізаторів показані на рис. 15.1.

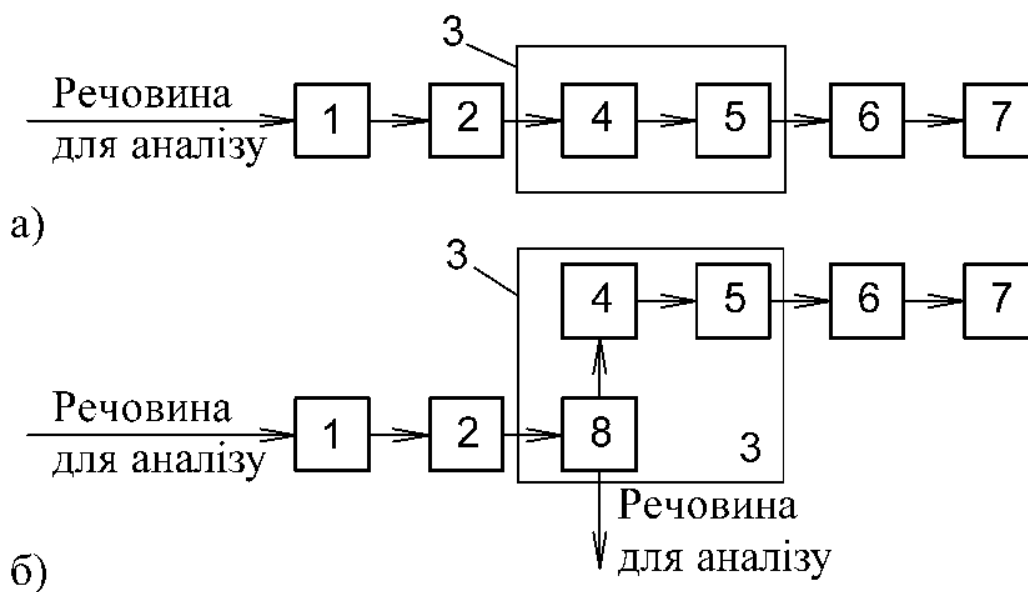


Рисунок 15.1 – Структурні схеми автоматичних аналізаторів:

а – неперервної дії; б – циклічної дії

Таблиця 15.1 – Класифікація аналізаторів за принципом дії

Метод аналізу	Принцип дії
Фізичний	механічний дифузійний акустичний тепловий аерозольний сорбційний магнітний радіоізотопний радіоспектрометричний рентгеноспектральний спектральний оптичний оптичний діелькометричний іонізаційний хроматографічний мас-спектрометричний
Фізико-хімічний	електрохімічний термохімічний емісійний іонізаційний хемілюмінісцентний
Хімічний	титрометричний об'ємний (волюметричний) манометричний

Речовина для аналізу поступає у первинний вимірювальний перетворювач 3 через пристрій відбору 1 та підготовки 2. Первинні вимірювальні перетворювачі, або аналітичні пристрої аналізаторів неперервної (рис. 15.1, а) та циклічної дії (рис. 15.1, б) різні.

В аналізаторі неперервної дії аналітичний пристрій 3 складається з пристроєм впливу на речовину 4 та чутливого елемента 5. Чутливий елемент 5 іноді називають детектором.

Аналізатори циклічної дії включають додатково дозуючий пристрій 8, вміщений до аналітичного пристрою 3. Дозатором із потоку речовини, яка поступає з пристроєм 2, відбирається постійна за об'ємом або масою проба. Ця проба піддається відповідному впливу у пристрої 4, після чого чутливий елемент здійснює перетворення фізико-хімічної властивості проби або параметра, що супроводжує таку дію, у вихідний сигнал.

Практично у всіх випадках сигнали аналізаторів потребують спеціального оброблення, що виконується з допомогою різних обчислювальних та запам'ятовувальних пристроїв, які включаються між масштабуючим перетворювачем 6 та вимірювальним приладом 7.

Форми сигналів чутливих елементів автоматичних аналізаторів циклічної дії можуть бути різними залежно від використаного принципу дії. Найпростіші за формою є сигнали у вигляді кривої нормального розподілу (рис. 15.2, а) або трапеції (рис. 15.2, б).

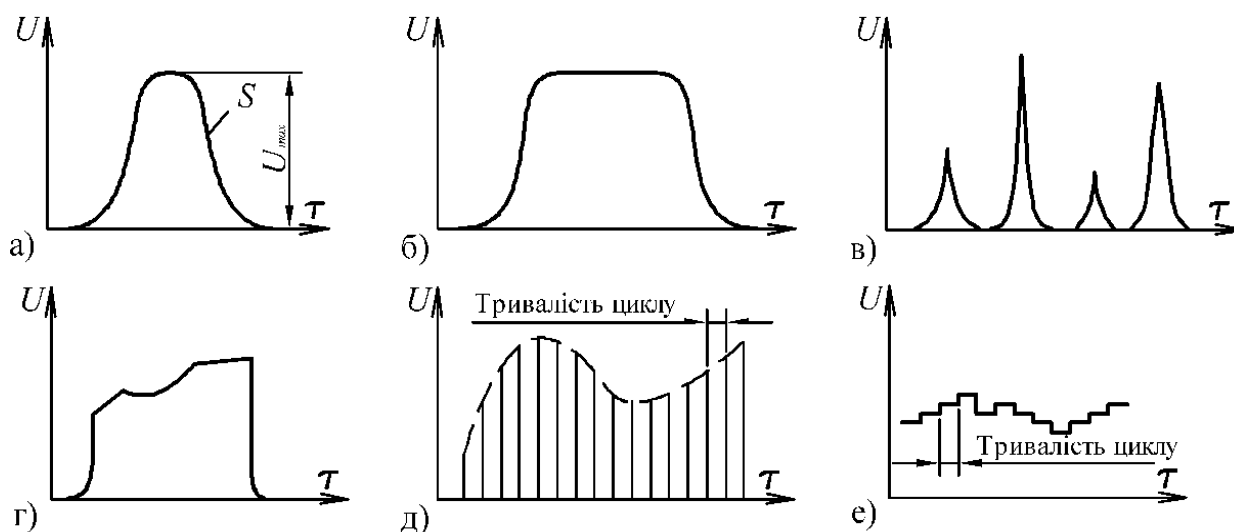


Рисунок 15.2 – Форми сигналів автоматичних аналізаторів

У першому випадку у якості інформативного параметра сигналу використовується амплітуда U_{max} або площа S сигналу, у другому – висота. Такі форми сигналів характерні для аналізаторів фізико-хімічних властивостей речовин і концентрації окремих компонент у бінарних та багатокомпонентних сумішах. Сигнал у вигляді спектру імпульсів, показаних на рис. 15.2, в, характерний для аналізаторів складу багатокомпонентних сумішей. Сигнали складної форми (рис. 15.2, г) характерні для аналізаторів показників якості.

Вихідний сигнал обчислювальних та цифрових пристроїв має форми, показані на рис. 15.2, д, е. Результат вимірювання у кожному циклі подається у вигляді піка або штриха. Огинаюча амплітуд цих піків дозволяє отримати інформацію про зміну параметрів сигналу у часі.

15.5 Способи підключення аналізаторів до технологічних потоків

Підключення автоматичного аналізатора до технологічного потоку визначається рядом чинників, серед яких найбільш важливі: принцип дії аналізатора; конструкція пристрою відбору речовини; вимоги щодо швидкості аналізу; характеристики потоку речовини.

Найбільш зручним є безконтактний спосіб (рис. 15.3, а), за якого речовина не вводиться в аналізатор, а контроль ведеться через стінку технологічного апарату.

Другий, відносно простий метод (рис. 15.3, б) – чутливий елемент 3 аналізатора 2 поміщується безпосередньо у технологічний апарат або в потік речовини 1.

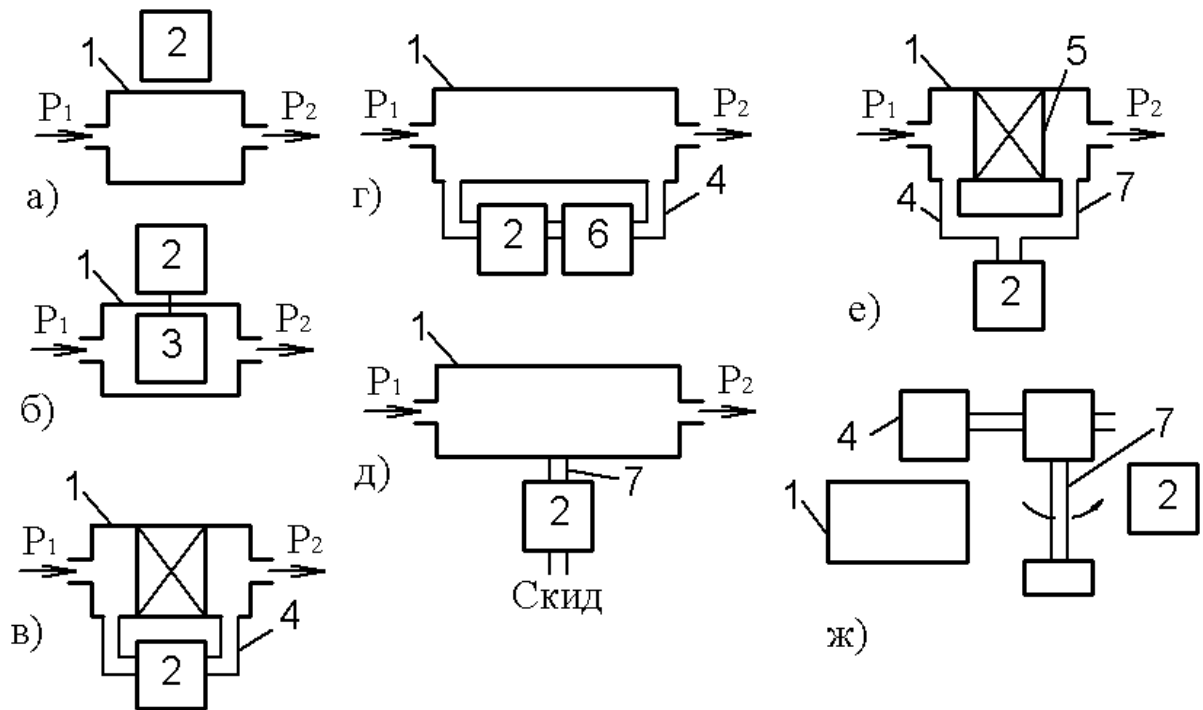


Рисунок 15.3 – Схеми підключення аналізаторів до технологічних потоків

У більшості випадків використовуються способи, подані на рисунку 15.3, в–е. Замкнутий спосіб підключення аналізатора (рис. 15.3, в, г) за якого аналізатор 2 встановлюється на байпасній лінії 4, реалізується або за рахунок наявності гідравлічного опору 5 між точками відбору, або за рахунок включення послідовно з аналізатором 2 в лінію 4 збуджувача потоку 6 (рис. 15.3, г).

На рисунку 15.3, д подано спосіб підключення аналізатора зі скидом речовини в атмосферу, каналізацію або спеціальну ємкість. Для зменшення значень часу транспортного запізнювання довжина лінії 7, що з'єднує апарат або потік 1 з аналізатором, повинна бути мінімальною. Компромісним і найчастіше застосовуваним способом є підключення аналізатора у вигляді комбінації двох попередніх (рис. 15.3, е).

Для відбору проб іноді використовують роботи. Робот 8 (рис. 15.3, ж) за допомогою спеціального захватного пристрою 9 забезпечує доставку проби речовини із технологічного потоку 1 в автоматичний аналізатор 2.

Для впорядкування застосування аналітичних вимірювальних засобів був створений комплекс аналітичної техніки АСАТ. АСАТ складається з підкомплексів засобів вимірювання хімічного складу, побудованих за принципом вимірювання. Для аналізу рідин визначені наступні підкомплекси: фотометричний, кондуктометричний, потенціометричний, полярографічний, хроматографічний, акустичний, діелектричний, а для газів – хроматографічний, рентгенівський, акустичний, діелектричний, тепловий, магнітний.

Питання для самоконтролю

1. У чому полягає суть автоматизації процесів?
2. Які проблеми дозволяє вирішити автоматизація вимірювань?
3. Яким чином параметри фізичних неелектричних величин адаптуються в комп'ютеризованих вимірювальних системах та комплексах?
4. Як поділяються методи аналізу речовин?
5. Які аналізатори називаються індикаторами?
6. У чому полягає суть автоматизації вимірювань?
7. Чим відрізняються аналізатори неперервної та циклічної дії?
8. Від чого залежить форма сигналу на виході чутливого елемента?
9. Чим визначається схема підключення аналізатора до потоку?

ЛІТЕРАТУРА

1. Дорожовець М. М., Мотало В. П., Стадник Б. І. Основи метрології та вимірювальної техніки : підручник: в 2 т. Львів : Львівська політехніка, 2018. Т. 1: Дорожовець М. М. Основи метрології. 532 с.
2. Дорожовець М. М., Мотало В. П., Стадник Б. І. Основи метрології та вимірювальної техніки : підручник: в 2 т. Львів : Львівська політехніка, 2018. Т. 2: Стадник Б. І. Вимірювальна техніка. 656 с.
3. Резніченко Т. П., Рубан О. В., Щелочинін Я. Б. Контрольно-вимірювальні прилади : лабораторний практикум. Київ : НАУ, 2016. 130 с.
4. Лут М. Т., Рубан О. В. Метрологія, технологічні вимірювання і прилади: навч. посіб. Київ : Компрінт, 2018. 192 с.
5. Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник. Херсон: Олді-плюс, 2019. – 538 с.
6. Поліщук Є. С., Дорожовець М. М., Яцук В. О. Метрологія та вимірювальна техніка : підручник. Львів : Львівська політехніка, 2019. 544 с.
7. Поджаренко В. О., Кулаков П. І., Ігнатенко О. Г., Войтович О. П. Основи метрології та вимірювальної техніки : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2016. 151 с.
8. Володарський Є. Т., Кухарчук В. В., Поджаренко В. О., Сердюк Г. Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : навч. посіб. Вінниця : Велес, 2016. 219 с.
9. Цюцюра В. Д., Цюцюра С. В. Метрологія та основи вимірювань : навч. посіб. Київ : Знання-Прес, 2018. 180 с.
10. Дорожовець М. М. Опрацювання результатів вимірювань : навч. посіб. Львів : Львівська політехніка, 2019. 624с.
11. Михалевич В. Т., Денисюк В. Ю. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади : навч. посіб. Луцьк : Волиньполіграф, 2019. 254 с.
12. Гусельников В. К., Кондрашов С. І., Осіна Т. Г., Опришкіна М. І. Аналогові вимірювальні прилади. Основи теорії та уніфікований практикум : навч. посіб. Харків : НТУ «ХП», 2021. 230 с.
13. Чинков В.М. Цифрові вимірювальні прилади : навч. посіб. Харків : НТУ «ХП», 2018. 508 с.
14. Дорожовець М.М., Івах Р.М, Мотало В.П. Метрологія та вимірювання: навч. посіб. Львів : Львівська політехніки, 2017. 312 с.
15. Левченко О.І, Цюцюра В.Д. Технологічні вимірювання та прилади у харчовій промисловості : навч. посіб. Київ : УДУХТ, 2018. 146 с.
16. Семенцов Г.Н., Когуч Я.Р. Горбійчук М.І., Дранчук М.М. Новітні засоби контролю і автоматизації технологічних процесів в бурінні : навч. посіб. Івано-Франківськ: Факел, 2019. 190 с.
17. Семенцов Г.Н., Когуч Я.Р., Когутяк М.І. Основи автоматизації виробничих процесів в бурінні : навч. посіб. Івано-Франківськ : Факел, 2019. 270 с.

18. Воробйова О.М., Флейта Ю.В. Технічні засоби автоматизації : навч. посіб. Одеса: ОНАЗ, 2018. 208 с.

19. Ладанюк А.П., Трегуб В.Г., Ельперін І.В., Цюцюра В.Д. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: підручник. Київ : Аграрна освіта, 2021. 224с.

20. Головка Д.Б. Основи метрології та вимірювань: підручник. Київ : Либідь, 2021. 408с.

Контрольно-вимірювальні прилади [Текст] : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня освітньої програми «Мікро- та наносистемна техніка» галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка денної та заочної форм навчання / уклад. В.Ю. Денисюк. – Луцьк : ЛНТУ, 2023. – 212 с.

Комп'ютерний набір

В.Ю. Денисюк

Редактор

В.Ю. Денисюк

Підп. до друку «__» 2023 р. Папір офс.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 13,25. Обл.-вид. арк. 13,25.
Тираж 30 прим.

Відділ іміджу та промоції
Луцького національного технічного університету
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Друк – ВІП ЛНТУ