Національний університет
водного господарства
та природокористування

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Національний університет водного господарства та природокористування

В.В. Кованько, В.В. Древецький,
А.О. Христюк

ЗАГАЛЬНОТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ І ПРИЛАДИ

Навчальний посібник

Рівне 2013

Національний університет водного господарства та природокористування

УДК 621.317.39 (075.8)
ББК 30.10+31.221я7
К56

Затверджено вченою радою Національного університету водного господарства та природокористування.
(Протокол № 14 від 28 грудня 2012 р.)

Рецензенти:
Квасніков В.П., д-р техн. наук, професор Національного авіаційного університету (м. Київ);
Безвесільна О.М., д-р техн. наук, професор Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" (м. Київ).

Кованько В.В., Древецький В.В., Христюк А.О.
К56 Загальнотехнічні вимірювання і прилади. Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2013. – 189 с.

Національний університет водного господарства та природокористування

Відповідно до навчальної програми, у навчальному посібнику представлено загальні відомості про вимірювання, вимірювальні перетворювачі неелектричних величин у електричні, наведено методи і засоби вимірювання температури, геометричних розмірів, тиску, кількості і витрат, рівня та аналізу складу рідин.

Посібник відповідає затвердженій робочій програмі дисципліни "Загальнотехнічні вимірювання і прилади" та призначений для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом підготовки 6.050202 "Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології".

Табл. 1. Іл. 115. Бібліогр. 19 назв.

УДК 621.317.39 (075.8)
ББК 30.10+31.221я7

© Кованько В.В., Древецький В.В., Христюк А.О., 2013
© НУВГП, 2013

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Зміст

Вступ 5

1. Загальні відомості 6
1.1. Вимірювання та засоби вимірювальної техніки 6
1.2. Електричний спосіб вимірювання неелектричних величин. Різновиди вимірювальних перетворювачів 12
1.3. Вимірювальні перетворювачі неелектричних величин з уніфікованим вихідним сигналом. Інтелектуальні вимірювальні перетворювачі 25
1.4. Передача вимірювальної інформації на відстань 31

2. Вимірювання температури 39
2.1. Термометрія за допомогою терморезистивних перетворювачів 39
2.2. Термометрія за допомогою термоелектричних перетворювачів 51
2.3. Термометрія за випромінюванням тіла 60

3. Вимірювання геометричних розмірів 69
3.1. Поняття про лінійні та кутові розміри 69
3.2. Вимірювання товщини шару покриття 77
3.3. Вимірювання відстані між об’єктами 84

4. Вимірювання тиску 92
4.1. Загальні положення. Рідинні прилади для вимірювання тиску 92
4.2. Вимірювання тиску за допомогою деформаційних приладів 104
4.3. Електричні манометри та вакуумметри 114

5. Вимірювання кількості та витрат 122
5.1. Вимірювання витрат за величиною тиску та рівня 122
5.2. Безконтактні витратоміри 132
5.3. Лічильники кількості 138

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

6. Вимірювання рівня 142
6.1. Поплавкові та гідростатичні рівнеміри 142
6.2. Електричні та радіоізотопні рівнеміри 152
6.3. Вимірювання рівня безконтактним способом 157

7. Методи і засоби для аналізу складу рідин 162
7.1. Загальні відомості 162
7.2. Методи аналізу розчинів 170

Висновок 187

Література 188

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Вступ

В сучасних умовах технічного прогресу вимірювання фізичних величин широко застосовуються не тільки в різних галузях науки і техніки, але й в промисловості, сільському господарстві, медицині, охороні довкілля тощо.

В процесі інженерної діяльності людини сформувалось три способи вимірювань, а саме: неелектричні вимірювання неелектричних величин, електричні вимірювання електричних величин та електричні вимірювання неелектричних величин. Причому останні вимірювання кількісно превалюють над двома іншими.

Питома вага вимірювань різних видів фізичних величин дуже відрізняється між собою, але в середньому, оціночно можна вважати, що на вимірювання температури припадає близько 50% від усіх вимірювань, масової та об’ємної витрат 15%, тиску 10%, рівня 5%, маси 5%, електричних та магнітних величин 4% і на всі інші вимірювання приходиться 11%.

Велика кількість різноманітних неелектричних величин, можливість вимірювання їх електричними вимірювальними засобами шляхом попереднього перетворення у функціонально зв’язані з ними електричні величини за допомогою відповідних вимірювальних перетворювачів, можливість передачі вимірювальної інформації на відстань – все це відводить зазначеним вимірюванням особливу роль.

У даному посібнику наведено загальні відомості про вимірювання, вимірювальні перетворювачі (ВП) неелектричних величин у електричні, зокрема ВП з уніфікованими вихідними сигналами та інтелектуальні ВП, аналіз загальної схеми передачі вимірювальної інформації на відстань, вимірювання температури, геометричних розмірів, тиску, кількості та витрат, рівня, а також методи і засоби аналізу складу рідин.

Запропонований посібник написано за програмою навчальної дисципліни "Загальнотехнічні вимірювання і прилади", що передбачає підготовку студентів напряму підготовки 6.050202 "Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології".

Національний університет
водного господарства
та природокористування

1. Загальні відомості

1.1. Вимірювання та засоби вимірювальної техніки

Під вимірюванням розуміють знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. Вимірювання здійснюють на природних або створених людиною об'єктах, які називають об'єктами вимірювання.

Фізична величина – це властивість загальна в якісному відношенні багатьом фізичним об'єктам, але в кількісному відношенні є індивідуальною для кожного з них.

Наприклад, під масою розуміють кількість речовини в тілі, міру інерції тіла відносно діючої на нього сили (загальна властивість). Але в кількісному відношенні вона може бути будь-якою: 0,5 кг; 100 кг; 350 мг тощо.

Густина – це маса тіла, що знаходиться в одиниці об'єму (загальна властивість). В кількісному відношенні вона також може бути різною: 1,02 кг/дм^3 – густина морської води; 1,29 кг/м^3 – повітря (при температурі 0 ^{0}С); 1,83 кг/дм^3 – сірчаної кислоти тощо.

За визначенням тиск є відношенням сили, що діє перпендикулярно поверхні до площі цієї поверхні (загальна властивість). Кількісно діапазон сучасних засобів вимірювання тиску сягає меж від 10^{-12} до 10^{11} Па.

Об'єкт вимірювання - це явище або процес, що характеризується множиною окремих фізичних величин (параметрів). Кожна з них може бути виміряною окремо, але в реальних умовах діє на вимірювальний засіб в сукупності з усіма іншими параметрами.

До загальнотехнічних вимірювань належить вимірювання широкого спектру параметрів технологічних процесів, таких як температура, геометричні розміри, тиск, кількість і витрати, рівень та склад рідин.

Фізичну величину, обрану для вимірювання, називають вимірюваною фізичною величиною (ВФВ).

Вимірювання включає в себе три етапи: підготовчий, проведення вимірювання та обробку його результатів.

В процесі проведення вимірювання об'єкт вимірювання і вимірювальний засіб, який здатний вимірювати обрану фізичну величину, призводять до взаємодії між собою.

Національний університет водного господарства та природокористування

В загальному випадку вимірювальним засобом називають технічний засіб, який використовується при вимірюваннях і має нормовані метрологічні характеристики (характеристики, які необхідні при оцінці точності результату вимірювань, узагальненою метрологічною характеристикою є клас точності).

Результат вимірювання фізичної величини X (струму I, тиску p, сили F) можна записати у вигляді формули, яка називається основним рівнянням вимірювання

$$X = A[x], \tag{1.1}$$

де A – числове значення фізичної величини; $[x]$ – одиниця фізичної величини.

Наприклад, I=5A; p =101 кПа; F=100 Н.

Вираз $A[x]$ називається результатом вимірювання.

Усі вимірювання можна розділити на прямі, непрямі, сукупні і сумісні.

Прямими називаються вимірювання, при яких шукане значення фізичної величини знаходять безпосередньо із експерименту. В процесі прямого вимірювання об'єкт вимірювання взаємодіє з вимірювальним засобом, по показах якого відраховується значення вимірюваної фізичної величини.

Аналітично результат прямого вимірювання можна описати рівнянням (1.1).

Приклад прямих вимірювань: вимірювання довжини лінійкою, маси з допомогою ваги, температури скляним термометром тощо.

До прямих вимірювань належать вимірювання більшості параметрів хіміко-технологічних процесів.

Непрямими вимірюваннями називають такі вимірювання, при яких шукане значення фізичної величини знаходять на основі відомих аналітичних залежностей за результатами прямих вимірювань.

Наприклад, вимірювання густини речовини ρ за її масою m та об'ємом V, $\left(\rho = \frac{m}{V}\right)$; електричного опору R за спадом напруги U та силою струму I, $\left(R = \frac{U}{I}\right)$ тощо.

Національний університет водного господарства та природокористування

Сукупними вимірюваннями називають здійснюване водночас вимірювання кількох одноіменних фізичних величин. При цьому шукані значення величин знаходять шляхом розв'язання системи рівнянь, добутих за прямими вимірюваннями. Приклад – вимірювання електричного опору r_x заземлення (рис. 1.1).

Оскільки пряме вимірювання тут неможливе, то попарно вимірюють опори трьох заземлень – основного r_x та допоміжних r_y і r_z. Результати записують у вигляді системи рівнянь (1.2), в яких ліві частини є виміряними і відомими.

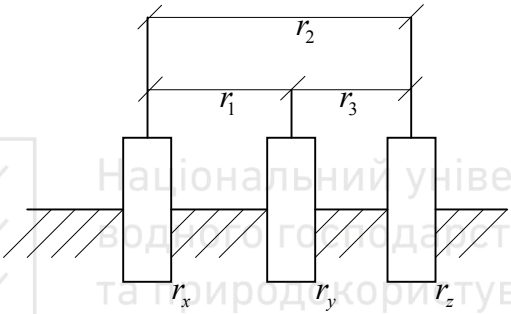


Рис. 1.1. Вимірювання електричного опору заземлення

$$\begin{cases} r_1 = r_x + r_y; \\ r_2 = r_x + r_z; \\ r_3 = r_y + r_z. \end{cases} \tag{1.2}$$

Розв'язавши систему рівнянь, знаходять шукане значення r_x

$$r_x = \frac{r_1 + r_2 - r_3}{2}.$$

Водночас можна визначити опори і допоміжних заземлень:

$$r_y = \frac{r_1 + r_3 - r_2}{2};$$

$$r_z = \frac{r_2 + r_3 - r_1}{2}.$$

Національний університет водного господарства та природокористування

Сумісними називають одночасні вимірювання двох або кількох різнойменних величин для знаходження залежності між ними.

Наприклад, залежність електричного опору r провідника від температури t має вигляд $r = r_0\left(1+\alpha t\right)$, де r_0 – опір резистора при $0\,^{\circ}C$; α – температурний коефіцієнт опору. Якщо треба знайти r_0 та α, то необхідно за певних значень температур t_1 і t_2 виміряти електричний опір r_1 і r_2, потім скласти і розв'язати систему рівнянь

$$\begin{cases} r_1 = r_0\left(1+\alpha t_1\right); \\ r_2 = r_0\left(1+\alpha t_2\right). \end{cases} \tag{1.3}$$

В результаті цього отримаємо

$$r_0 = \frac{r_1}{1+\dfrac{r_1 - r_2}{r_2 t_1 - r_1 t_2}}; \quad \alpha = \frac{r_1 - r_2}{r_2 t_1 - r_1 t_2}.$$

Класифікація засобів вимірювальної техніки.

Засобом вимірювальної техніки називають технічний засіб, який застосовується під час вимірювань і має нормовані метрологічні характеристики.

Згідно ДСТУ2681-94, до засобів вимірювальної техніки належать засоби вимірювань та вимірювальні пристрої.

До засобів вимірювань відносяться вимірювальні та реєструвальні прилади, вимірювальні канали, вимірювальні установки, вимірювальні системи та кодові засоби вимірювань.

Вимірювальні пристрої – це міри (фізичних величин), компаратори, вимірювальні перетворювачі, обчислювальні компоненти.

Засіб вимірювань реалізує процедуру вимірювань, зокрема вимірювальний прилад – це засіб вимірювань, в якому створюється візуальний сигнал вимірювальної інформації, а реєструвальний прилад – засіб вимірювань, в якому реєструється сигнал вимірювальної інформації.

Вимірювальна установка – це сукупність функціонально об'єднаних засобів вимірювальної техніки та допоміжних технічних

Національний університет водного господарства та природокористування

засобів (стабілізуючих, перемикаючих, регулюючих), яка призначена для одержання вимірювальних сигналів, придатних для безпосереднього сприймання вимірювальної інформації спостерігачем. Наприклад, установка для повірки амперметрів, манометрів, установка для дослідження феромагнітних матеріалів тощо.

Вимірювальний канал є сукупністю засобів вимірювальної техніки, засобів зв'язку та інших технічних засобів, призначений для створення сигналу вимірювальної інформації про одну вимірювану фізичну величину.

Під вимірювальною системою розуміють сукупність вимірювальних каналів і вимірювальних пристроїв, об'єднаних для створення сигналів вимірюваної інформації про декілька вимірюваних фізичних величин.

Вимірювально-інформаційна система (ВІС) – це сукупність засобів вимірювальної техніки, засобів контролю, діагностування та інших технічних засобів, об'єднаних для створення сигналів вимірювальної інформації та інших видів інформації.

Засіб вимірювань, в якому створюється кодовий сигнал вимірювальної інформації, називають кодовим засобом вимірювань, або аналого-цифровим перетворювачем (АЦП).

Вимірювальний пристрій, що реалізує відтворення та збереження фізичної величини заданого розміру, є мірою цієї величини, а вимірювальний пристрій, що реалізує порівняння однорідних фізичних величин – називають компаратором.

Вимірювальним перетворювачем неелектричної величини в електричну (ВП) називають вимірювальний пристрій, що реалізує перетворення вхідної неелектричної величини (температури, тиску, переміщення) у функціонально з нею зв'язану вихідну електричну величину. ВП, який контактує безпосередньо з вимірюваною фізичною величиною, називається первинним. ВП, призначений для передачі сигналу вимірювальної інформації на відстань, називається передаючим. Між названими перетворювачами знаходяться проміжні перетворювачі.

Подальший розвиток ВП прямує у напрямі створення і удосконалення вимірювальних перетворювачів з уніфікованим вихідним сигналом та інтелектуальних вимірювальних перетворювачів.

Національний університет водного господарства та природокористування

Датчиком (давачем, сенсором) називається первинний ВП, який перетворює контрольовану фізичну величину (тиск, температуру, витрату, швидкість тощо) в сигнал, зручний для вимірювання, передачі, обробки, зберігання, реєстрації, а також для дії ним на керовані процеси.

До складу датчиків входять сприймаючий орган та кілька проміжних перетворювачів. Часто датчик складається тільки з одного сприймаючого органу (термопара, термо- та тензорезистори). Вихідні сигнали датчика можуть бути електричні, механічні, пневматичні, гідравлічні тощо.

Вимірювальний пристрій, що є сукупністю засобів обчислювальної техніки та програмного забезпечення і виконує обчислювальні операції під час вимірювань, називається обчислювальним компонентом (компонентом засобу вимірювань) або числовим вимірювальним перетворювачем.

Запитання для самоконтролю

1. Що розуміють під вимірюванням?
2. Визначення об’єкта вимірювання.
3. Прямі вимірювання.
4. Непрямі вимірювання.
5. Сукупні вимірювання.
6. Сумісні вимірювання.
7. Що належить до засобів вимірювальної техніки?
8. Яке призначення вимірювальних перетворювачів неелектричних величин у електричні?
9. Що називають датчиком?
10. Який перетворювач називають числовим вимірювальним перетворювачем?

Національний університет водного господарства та природокористування

1.2. Електричний спосіб вимірювання неелектричних величин. Різновиди вимірювальних перетворювачів

В наш час доводиться вимірювати велику кількість неелектричних величин, зокрема параметрів технологічних процесів. Це:

- величини, що характеризують простір та час (геометричні розміри, час, параметри руху);
- механічні величини (маса, сила, момент сили, тиск, механічні напруження);
- теплові величини (температура, кількість теплоти, теплопровідність);
- світлотехнічні та енергетичні характеристики світла (сила світла, світловий потік, яскравість, потужність випромінювання, енергетична яскравість);
- акустичні величини (величини, що характеризують хвильовий рух у пружних середовищах – звуковий тиск, гучність звуку, акустичний шум);
- величини, що характеризують фізико-хімічні властивості речовин: хімічний склад, густину розчину, масову чи молярну концентрацію, активність (концентрацію іонів водню);
- величини, що характеризують іонізуюче випромінювання.

Вимірювання неелектричних величин електричними вимірювальними засобами передбачає попереднє їх перетворення у функціонально зв’язані з ними електричні величини за допомогою відповідних вимірювальних перетворювачів неелектричних величин у електричні та наявність вторинного електричного вимірювального приладу, а також допоміжних пристроїв (ліній зв’язку, вимірювальних підсилювачів, пристроїв корекції похибок тощо).

Методики вимірювання неелектричних величин поділяються на контактні та безконтактні.

При <u>контактних вимірюваннях</u> первинний перетворювач безпосередньо контактує з досліджуваним об’єктом. При цьому може спостерігатися зворотня дія вимірювального перетворювача на параметри досліджуваного об’єкта, що призводить до зростання похибок вимірювання.

При <u>безконтактних вимірюваннях</u> первинний перетворювач

Національний університет водного господарства та природокористування

безпосередньо не контактує з досліджуваним об'єктом і не впливає на його параметри. Однак у цьому випадку на результат вимірювання значно впливає середовище, що їх розділяє.

Основні переваги електричного способу вимірювання неелектричних велечин такі:

- можливість вимірювання кількох неелектричних величин за допомогою одного електричного вимірювального засобу (при використанні відповідних вимірювальних перетворювачів та комутатора);
- простота автоматизації вимірювання внаслідок того, що в електричних колах можна виконувати логічні та цифрові операції;
- можливість забезпечення високої чутливості, необхідної точності та швидкодії;
- дистанційність – можливість вимірювання параметрів досліджуваних об'єктів на будь-якій від них відстані завдяки можливості передачі електричних сигналів лініями зв'язку чи через випромінювання електромагнітних хвиль.

За фізичними закономірностями, покладеними в основу принципу дії, ВП діляться на наступні групи.

– Механічні пружні перетворювачі, які широко застосовуються як первинні перетворюючі – елементи динамометрів, манометрів, віброметрів та акселерометрів. Вхідними величинами цих перетворювачів є сила, тиск, обертовий момент, а вихідною – переміщення (лінійне або кутове) чи деформація.

В якості пружних елементів порівняно великих сил (понад 10 кН) застосовуються суцільні стержні. Порожнисті стержні дозволяють підвищити чутливість перетворювачів, однак межі їх перетворень є не нижчі ніж 0,5 кН. Недоліком таких перетворювачів є малі вихідні переміщення.

Певні переваги мають кільцеві пружні елементи, проте найчутливішими до дії сил є балкові пружні елементи.

– Резистивні перетворювачі механічних величин. Принцип дії таких перетворювачів грунтується на зміні їхнього електричного опору залежно від переміщення (під дією механічних сил) повзунка (рис. 1.2) реостата чи реохорда в реохордних перетворювачах, або внаслідок тензоефекту в тензорезистивних перетворювачах (рис. 1.3).

Реостатний (потенціометричний) перетворювач (рис. 1.2) вико-

Національний університет водного господарства та природокористування

наний у вигляді реостата, повзунок якого переміщується під дією вхідної (вимірюваної неелектричної величини x). Вихідною величиною є електричний опір R_x, який перетворюється в напругу $U_{вих}$.

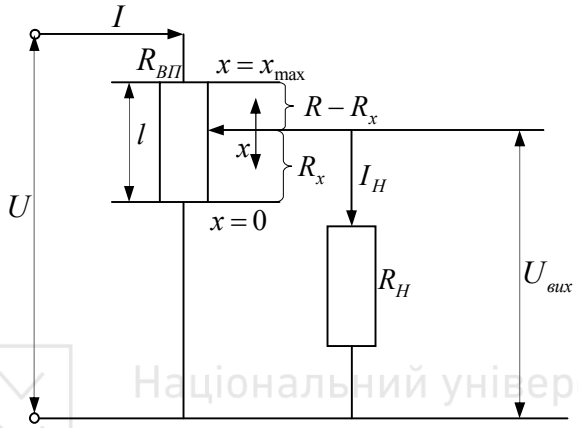


Рис. 1.2. Реостатний перетворювач:

U – напруга живлення; l – довжина котушки реостата; $R_{ВП}$ – опір котушки; $R_н$ і $I_н$ – відповідно опір навантаження і струм що протікає через нього; $U_{вих}$ – вихідна напруга

Якщо $R_н >> R_{ВП}$, то $I_H << I$ і ним можна знехтувати. Тоді після перетворень отримаємо

$$U_{вих} = \frac{U}{l} \cdot x = S \cdot x, \qquad (1.4)$$

де S – чутливість перетворювача ($S = \frac{U}{l}$).

Із (1.4) видно, що для даного випадку залежність $U_{вих} = f(x)$, статична характеристика, має лінійний характер.

Тензорезисторний перетворювач (рис. 1.3) складається з двох тонких плоско-паралельних пластин 1, виготовлених із діелектрика, між якими знаходиться тензочутливий елемент 2 (опір якого змінюється в межах 50…400 Ом), виконаний із тонкого дроту,

Національний університет
водного господарства
та природокористування

довжиною l, укладеного у вигляді плоскої одношарової решітки. До кінців тензочутливого елемента припаяні ніжки (виводи) 3.

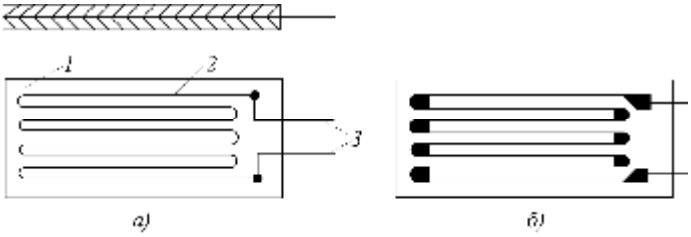


Рис. 1.3. Будова дротяного (а) та фольгового (б) тензорезисторів

При деформації досліджуваної конструкції, до якої жорстко прикріплено тензорезистор, відбувається відносна зміна довжини $\Delta l / l$, питомого опору $\Delta\rho / \rho$ та площі поперечного перерізу провідника 2, в результаті чого спостерігається зміна його електричного опору $\Delta R / R$ (Δl, $\Delta\rho$, ΔR – приріст довжини, питомого опору та опору провідника; l, ρ, R – відповідно його початкові довжина, питомий опір та опір).

Основною характеристикою тензорезистора є коефіцієнт тензочутливості k_T $\left(k_T = \dfrac{\Delta R / R}{\Delta l / l}\right)$, який являється паспортною величиною для відповідного типу тензорезистора $\left(k_T \approx 2\right)$.

Вимірювальні перетворювачі реактивного опору. До них належать індуктивні і ємнісні перетворювачі.

– Індуктивні перетворювачі трансформаторного типу. Їм властива висока чутливість і здатність реагувати на зміну знака вхідної величини. Принцип дії трансформаторних вимірювальних перетворювачів грунтується на залежності вихідної напруги $U_{вих}$ від положення якоря 2 (рис. 1.4, а). При постійному проміжку δ між осердям 1 і якорем 2 в його середньому положенні магнітні потоки Φ_1 і Φ_2 (які створені обмотками збудження ω_1 і ω_2, причому $\omega_1 = \omega_2$) будуть рівновеликими. Оскільки напрям їхнього

Національний університет
водного господарства
та природокористування

руху в стержні 3 протилежний, то результуючий магнітний потік дорівнюватиме $\Phi_p = \Phi_1 + \Phi_2 = 0$. Тобто, $u_{вих} = u_2 = -\omega_3 \dfrac{d\Phi_p}{dt} = 0$.

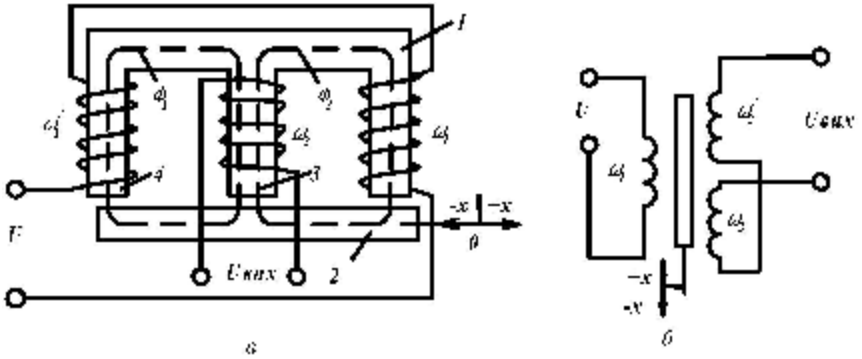


Рис. 1.4. Схеми трансформаторного вимірювального перетворювача з магнітопроводом (а) і соленоїдного типу (б)

Національний університет
водного господарства
та природокористування

При переміщенні якоря, наприклад, в сторону $+x$ від середнього положення $''0''$ зменшується площа S_{2-4} перекриття між якорем 2 і осердям 4, що обумовить збільшення опору магнітному потоку $R_{мп4}$ в стержні 4 (згідно формули $R_{мп} = \dfrac{l}{\mu_a \cdot s}$) і зменшення, згідно закону повного струму, магнітного потоку між стержнем 4 і якорем 2 ($\Phi_1 = \dfrac{I \cdot \omega_1}{R_{мп4}}$). Внаслідок цього результуючий Φ_p магнітний потік дорівнюватиме $\Phi_p = \Phi_1 - \Phi_2 = -\Delta\Phi$ і, згідно закону Фарадея, у вторинній обмотці ω_2 виникає ЕРС e_2, яка і є вихідною напругою $U_{вих}$

$$e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi_p}{dt} = \omega_2 \frac{d(\Delta\Phi)}{dt}.$$

При переміщенні якоря в напрямі $-x$ від $''0''$, буде зменшуватися площа S_{1-2}, що обумовить зменшення магнітного

Національний університет водного господарства та природокористування

потоку Φ_2, і результуючий потік дорівнюватиме $\Phi_p^{/} = \Phi_1 - \Phi_2 = \Delta\Phi^{/}$. Тоді $e_2^{/} = -\omega_2 \dfrac{d\Phi_p^{/}}{dt} = -\omega_2 \dfrac{d\left(\Delta\Phi^{/}\right)}{dt}$ буде в протифазі з e_2 (рис. 1.5). Звідси даний перетворювач є реверсивним.

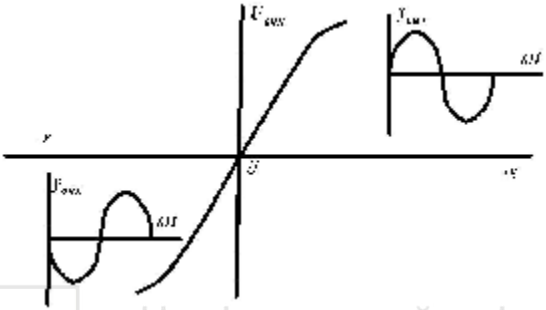


Рис. 1.5. Статична характеристика і хвильові діаграми $y = f\left(t\right)$ диференціально-трансформаторних перетворювачів

Національний університет водного господарства та природокористування

Перетворювачі такого типу призначені для вимірювання незначних переміщень (до 10 мм). Для вимірювання значних переміщень застосовуються трансформаторні перетворювачі соленоїдного типу (рис.1.4, б). В них в результаті симетричного розташування вторинних обмоток відносно середини соленоїда досягається можливість вимірювання значних переміщень стального осердя. При цьому, за рахунок зустрічного вмикання вторинних обмоток ω_2 і $\omega_2^{/}$ $\left(\omega_2 = \omega_2^{/}\right)$ дізнаємося, що вихідна напруга $U_{вих}$ дорівнюватиме $U_{вих} = U_2 - U_2^{/}$. Оскільки величина магнітного потоку, який зчіплюється з витками обмоток ω_2 і $\omega_2^{/}$ залежить від положення осердя, то і величини U_2 і $U_2^{/}$ також залежать від його положення. Тому при зміні положення осердя від $+x$ до $-x$ зміниться фаза вихідної напруги, як показано на рис.1.5.

Перевагою індуктивних перетворювачів є відсутність ковзаючого контакту, велика чутливість і довговічність.

Основними недоліками є обмеженість лінійної частини

Національний університет водного господарства та природокористування

характеристики, залежність коефіцієнта перетворення від величини напруги живлення обмотки збудження.

– Ємнісні перетворювачі (електричні конденсатори). Їхня дія грунтується на залежності електричної ємності конденсатора від відстані між електродами, площі їхнього перекриття та діелектричної проникності середовища, що знаходиться між електродами.

Для плоскопаралельного конденсатора електрична ємність C визначається як

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{\delta}, \tag{1.5}$$

де ε_0 – електрична стала; ε – діелектрична проникність середовища між обкладками конденсатора; S – площа перекриття обкладок; δ – відстань між обкладками.

Із (1.5) видно, що перетворювач може бути побудований на основі використання залежностей: $C = f_1(\varepsilon)$; $C = f_2(S)$; $C = f_3(\delta)$.

Відповідно до цього схематично показано (рис. 1.6) конструктивні схеми різних ємнісних перетворювачів.

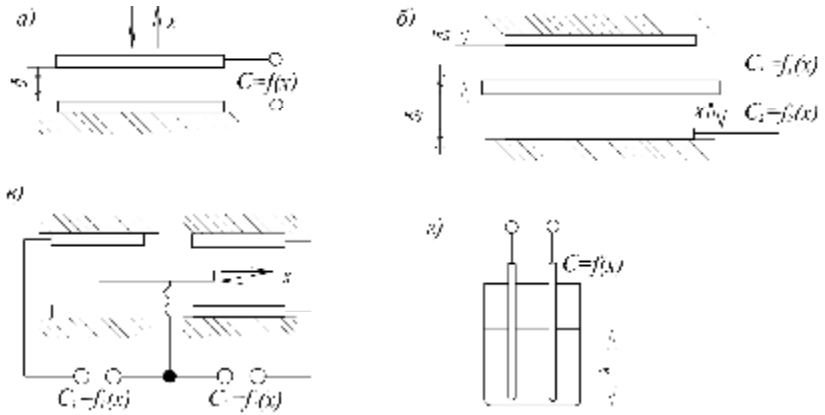


Рис. 1.6. Ємнісні перетворювачі:
а) зі змінною відстанню між обкладками; б) диференціальний;
в) диференціальний зі змінною активною площею обкладок;
г) зі змінною діелектричною проникністю середовища між обкладками

Національний університет водного господарства та природокористування

На рис. 1.6, а пертворювач являє собою конденсатор, одна (рухома) обкладка якого переміщується під дією вимірюваної величини x відносно нерухомої обкладки. Такі перетворювачі застосовуються для вимірювання малих переміщень (до 1 мм).

Диференціальний перетворювач з однією рухомою і двома нерухомими обкладками представлено на рис. 1.6, б. При дії вимірюваної величини x, у таких перетворювачів одночасно змінюються електричні ємності C_1 і C_2.

На рис. 1.6, в показано диференціальний перетворювач зі змінною активною площею обкладок. Ці перетворювачі застосовуються для вимірювання порівняно великих (більше 1 мм) лінійних та кутових переміщень.

Перетворювач ємнісного рівнеміра наведено на рис. 1.6, г. Величина ємності між електродами, зануреними у посудину з рідиною, залежить від рівня рідини x, оскільки останнє призводить до зміни середньої діелектричної проникності середовища «рідина - повітря» між даними електродами.

– Дія п’єзоелектричних перетворювачів грунтується на використанні прямого п’єзоефекта, який полягає в появі електричних зарядів на поверхні деяких кристалів (кварца, турмаліна) під впливом механічних сил.

Із кристалів кварцу вирізують пластинку, грані якої перпендикулярні оптичній осі $0z$, механічній осі $0y$ та електричній осі $0x$ кристала (рис. 1.7, а і б).

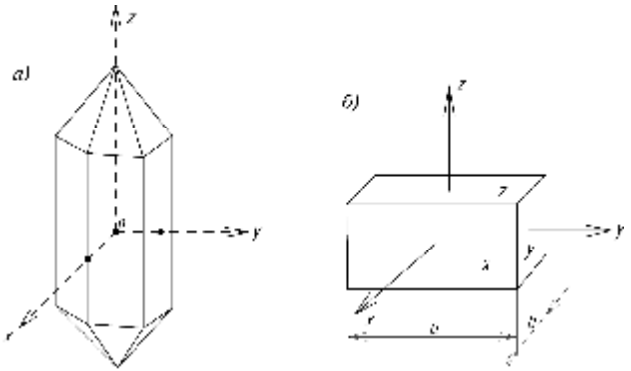


Рис. 1.7. Кристал кварцу (а) та пластинка (б), що вирізана з нього

Національний університет
водного господарства
та природокористування

При дії на пластинку сили F_x вздовж осі $0x$ на гранях x виникає заряд $Q_x = k \cdot F_x$, де k – п'єзоелектричний коефіцієнт. Застосовується даний перетворювач при вимірюванні сил і тиску.

– Індукційні перетворювачі. Принцип їхньої дії грунтується на використанні явища електромагнітної індукції, згідно якого ЕРС, що наводиться в котушці, яка має ω витків, дорівнює $e = -\omega \dfrac{d\Phi}{dt}$, де $\dfrac{d\Phi}{dt}$ – швидкість зміни магнітного потоку, зчепленого з котушкою. Вхідними (вимірюваними) величинами таких перетворювачів може бути швидкість лінійного або кутового переміщення вимірювальної котушки або швидкість зміни магнітного потоку.

Найбільшого застосування індукційні перетворювачі набули в приладах для вимірювання кутової швидкості (тахометрах) і приладах для вимірювання параметрів вібрації.

На рис. 1.8 наведено принципову схему індукційного перетворювача для вимірювання амплітуди, швидкості і прискорення зворотно-поступального руху.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

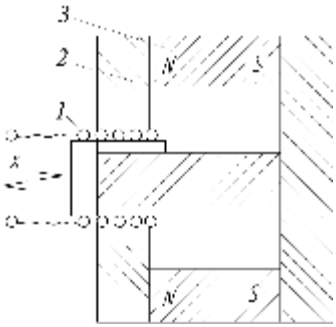


Рис. 1.8. Індукційний перетворювач

Перетворювач являє собою циліндричну котушку 1, що переміщується в зазорі магнітопроводу 2. Циліндричний постійний магніт 3 створює в зазорі постійне радіальне магнітне поле. Котушка, при переміщенні, перетинає магнітне поле і в ній наводиться ЕРС, пропорційна швидкості.

– Теплові вимірювальні пертворювачі (терморезистивні та термоелектричні перетворювачі).

Принцип дії терморезистивних перетворювачів грунтується на залежності електричного опору провідників чи напівпровідників від температури.

На практиці широко застосовують терморезистори, виготовлені з платинового та мідного дроту, рідше з нікелю та вольфраму.

Платинові терморезистори використовуються для вимірювання температури в межах від -260 до +1100 $^\circ C$, а мідні від -200 до +200 $^\circ C$.

Залежність електричного опору R_t від температури для платинового терморезистора є лінійною, для мідного вона також має вигляд прямої лінії (рис. 1.9, пряма 1) і описується формулою

$$R_t = R_0\left(1+\alpha t\right), \qquad (1.6)$$

де R_0 – опір терморезистора при $0\,^\circ C$; α – температурний коефіцієнт опору ($\alpha = 4{,}26\cdot 10^{-3}$ *град*$^{-1}$).

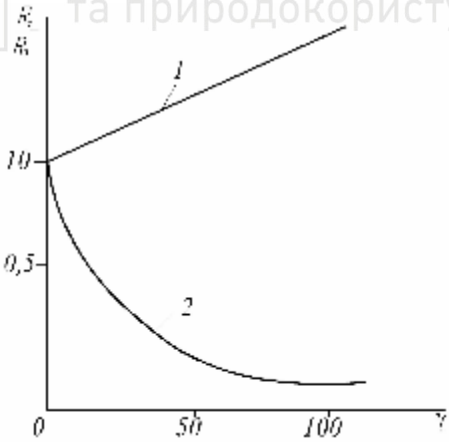


Рис. 1.9. Залежність електричного опору від температури:
1 – для мідних провідників; 2 – для напівпровідників

Температура вимірюється також з допомогою напівпровідникових терморезисторів, які, порівняно з металевими, мають менші розміри і більший коефіцієнт α. Залежність опору

Національний університет водного господарства та природокористування

напівпровідникового терморезистора від температури (рис. 1.9, крива 2) добре описується аналітичним виразом

$$R_t = R_0\, exp\left[B\left(1/t - 1/t_0\right)\right], \qquad (1.7)$$

де $B = const$, що визначає температурну чутливість; R_t і R_0 – опори терморезистора, які відповідають біжучому значенню температури t і початковому значенню t_o.

Робочий діапазон напівпровідникових терморезисторів сягає від -60 до +120 $^\circ C$.

Для вимірювання температури також застосовують термодіоди і термотранзистори, які дозволяють перетворювати температуру не тільки в напругу, але й в частоту змінного струму. До переваг останніх слід віднести малі габарити і можливість взаємозаміни.

Принцип дії термоелектричного перетворювача (термопари) грунтується на явищі термоелектричного ефекту, який полягає у виникненні термоелектрорушійної сили (термо-ЕРС) E_{AB} в колі, що складається з двох різних провідників А і В, якщо температура на їх кінцях t_1 і t_2 різна (рис. 1.10).

Національний університет водного господарства та природокористування

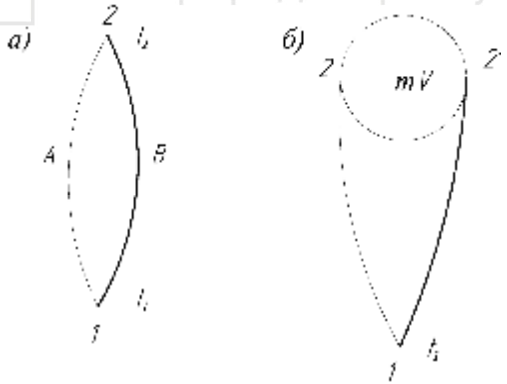


Рис. 1.10. Термопара (а) і спосіб увімкнення вимірювального приладу (мілівольтметра) в коло термопари (б)

Показане на рис. 1.10, а електричне коло називається термопарою, провідники А і В – термоелектродами, а місця їхнього з’єднання – спаями.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Отже, якщо $t_1 \neq t_2$ і, наприклад, $t_2 = const$, то $E_{AB} = f_1(t_1)$. Для вимірювання E_{AB} в коло термопари вмикають мілівольтметр (рис. 1.10, б).

Точку 1, з'єднання електродів, називають робочим кінцем термопари, а точки 2 і $2^{/}$ - вільними кінцями.

Для термопари, наприклад, з електродами хромель-алюмель, верхня межа вимірювань становить $1300^{\circ}C$; хромель-копель, відповідно, $800^{\circ}C$; вольфрамреній (5% ренія)-вольфрамреній (20% ренія) – більше $2500^{\circ}C$.

8. <u>Комбіновані перетворювачі</u>. Прості вимірювальні перетворювачі можна об'єднувати в складніші пристрої. Це стосується переважно перетворювачів, у яких вихідним сигналом є механічне переміщення (поплавкових, буйкових, манометричних трубчастих, сильфонних, мембранних, біметалевих та дилатометричних тощо).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

До названих первинних перетворювачів вмикають вторинні перетворювачі, наприклад, реостатні, тензорезистивні, п'єзоелектричні, індукційні, індуктивні або трансформаторні, котрі перетворюють механічне переміщення на електричний сигнал, який часто за допомогою нормуючих перетворювачів трансформують в уніфікований електричний сигнал.

На основі зазначених комбінованих перетворювачів створюються різноманітні прилади для електричного вимірювання нелектричних величин, наприклад, вимірювання механічних сил, тиску рідин чи газів, рівня рідин, а також відповідних систем автоматичного регулювання та сигналізації.

Запитання для самоконтролю

1. Контактні і безконтактні вимірювання.
2. Які основні переваги електричного способу вимірювання неелектричних величин?
3. Характеристика механічних пружніх перетворювачів.
4. Реостатний перетворювач та його статична характеристика.
5. Конструкція і принцип дії тензорезистивних перетворювачів.
6. Який принцип дії трансформаторного вимірювального

Національний університет
водного господарства
та природокористування

перетворювача з магнітопроводом?

7. Який принцип дії трансформаторного вимірювального перетворювача соленоїдного типу?

8. Який принцип дії ємнісних перетворювачів?

9. Охарактеризувати п’єзоелектричні та індукційні перетворювачі.

10. Терморезистивні вимірювальні перетворювачі.

11. Термоелектричні вимірювальні перетворювачі.

12. Комбіновані вимірювальні перетворювачі.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет водного господарства та природокористування

1.3. Вимірювальні перетворювачі неелектричних величин з уніфікованим вихідним сигналом. Інтелектуальні вимірювальні перетворювачі

Основні характеристики уніфікації

Одним із напрямів розвитку перетворювачів є подальше удосконалення первинних перетворювачів з уніфікованим вихідним сигналом (ВПУС).

Під ВПУС розуміють первинний перетворювач (ПП) та уніфікуючий перетворювач (УП), що поєднані між собою схемно, конструктивно і алгоритмічно для забезпечення уніфікації вихідного сигналу. Такий перетворювач називають перетворювачем з уніфікованим вихідним сигналом або нормувальним перетворювачем. Останнім часом в зарубіжній літературі з вимірювальної техніки дані перетворювачі називають кондиціонерами сигналів, а відповідні вимірювальні операції носять назву кондиціонування 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.

Наведене вище є складовою подальшого розвитку **державної системи промислових приладів і засобів автоматизації (*ДСП*).**

ДСП – це сукупність уніфікованих рядів блоків, приладів і засобів для одержання, опрацювання та використання інформації, які відповідають єдиним технічним і метрологічним вимогам і мають уніфіковані параметри, а також економічно обгрунтовану точність, надійність, довговічність та естетичність.

Засоби ДСП виготовляються на основі базових елементів з уніфікованими конструкціями, конструктивними параметрами, сигналами і елементами, забезпечують максимально можливий рівень уніфікації і стандартизації.

Нині в межах ДСП випускається понад 2000 типів промислових приладів та засобів автоматизації, які задовольняють потреби народного господарства у засобах автоматизації й у розробці на їх основі необхідних систем автоматичного контролю, керування та управління.

Уніфіковані системи ДСП

Уніфікація сигналів вимірювальної інформації забезпечує

Національний університет водного господарства та природокористування

гарантований зв'язок між засобами контролю і керування, передачу і обмін інформацією, а також дистанційний зв'язок між пристроями автоматики. На рис. 1.11 представлено класифікацію основних уніфікованих інформаційних сигналів ДСП.

Серед електричних сигналів найбільшого поширення набули уніфіковані сигнали постійного струму ($0 \div 5$ мА; $4 \div 20$ мА) і напруги ($0 \div 10$ мВ; $0 \div 100$ мВ; $0 \div 10$ В), пневматичний ($20 \div 100$ кПа) та частотні ($4 \div 8$ кГц) сигнали. Вони застосовуються як для передачі інформації від первинних перетворювачів до засобів контролю і керування, а від них до виконавчих механізмів, так і для обміну інформацією між окремими функціонально пов'язаними пристроями системи керування.

Меншою мірою використовуються уніфіковані інформаційні сигнали змінної напруги та частотні. Частотні сигнали, в основному, застосовуються в телемеханічних системах та спеціалізованих технічних комплексах.

Національний університет водного господарства та природокористування

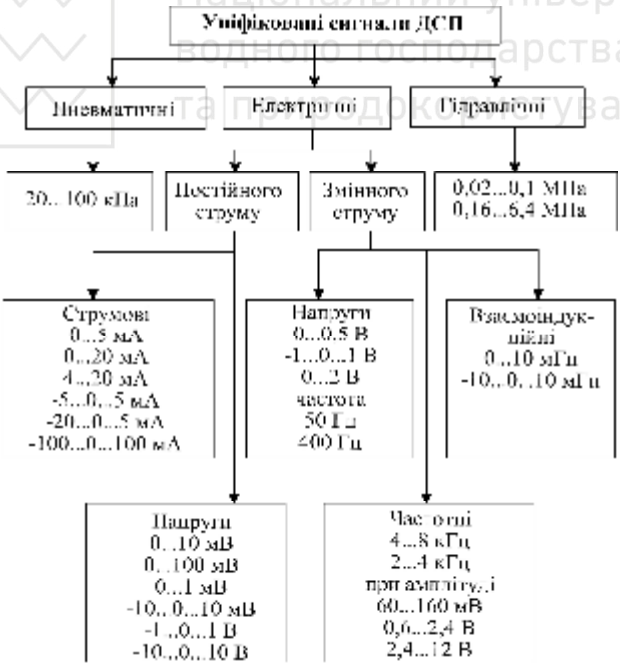


Рис. 1.11. Класифікація уніфікованих інформаційних сигналів ДСП

Національний університет водного господарства та природокористування

Спрощена структурна схема та принцип дії ВПУС

Одна із можливих структурних схем ВПУС має вигляд, представлений на рис. 1.12.

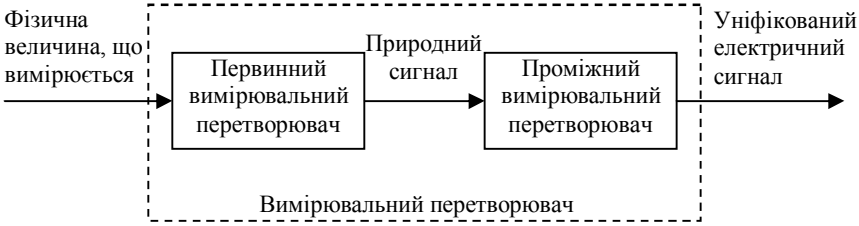


Рис. 1.12. Структурна схема ВПУС послідовного прямого перетворення

В даній структурній схемі прийнято розрізняти первинний вимірювальний перетворювач (чутливий елемент) і проміжні перетворювачі.

Первинний вимірювальний перетворювач контактує безпосередньо з вимірювальною фізичною величиною.

Проміжні перетворювачі можуть виконувати функції підсилення вихідного сигналу первинного перетворювача, лінеаризацію його функції перетворення (залежності вихідної величини від вхідної), перетворення типу відповідного сигналу тощо.

В якості прикладу розглянемо принципову схему термо-резистивного перетворювача з нормованим вихідним струмовим сигналом (наприклад, 0-5 мА), яка представлена на рис. 1.13.

До складу перетворювача (рис. 1.13) входять такі основні вузли: чотириплечий вимірювальний міст $ABCD$ постійного струму з джерелом стабілізованого живлення, напругою $U_{ж}$, електронний підсилювач ЕП та навантажувальний опір R. Вимірювальний міст складається з трьох манганінових резисторів R_1, R_2, R_3, терморезистора R_t та лінії зв'язку терморезистора з вимірювальною мостовою схемою. У діагональ живлення BD увімкнено, як зазначалось, джерело живлення постійного струму, напругою $U_{ж}$, а вимірювальна діагональ AC під'єднана до електронного підсилювача ЕП.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

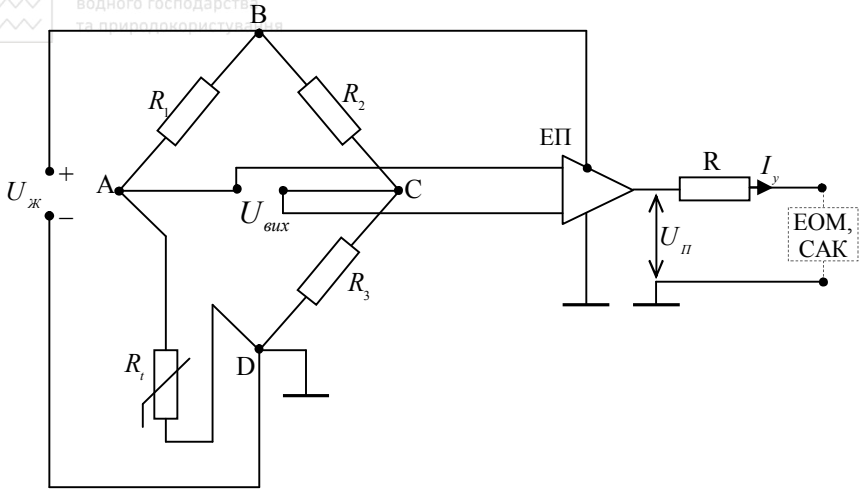


Рис. 1.13. Спрощена принципова схема терморезистивного перетворювача з вихідним уніфікованим струмовим сигналом 0-5 мА

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Початковому опору R_{t1} терморезистора відповідає у вимірювальній діагоналі AC сигнал напруги $U_{вих} = 0$. Оскільки на виході підсилювача напруга $U_П = K_U \cdot U_{вих}$, де K_U – коефіцієнт підсилення по напрузі підсилювача ЕП, то в цьому випадку $U_П = 0$, а отже і вихідний струм $I_y = 0$.

З підвищенням температури в об'єкті вимірювання збільшиться електричний опір терморезистора до величини R_{t2} ($R_{t2} > R_{t1}$). В цьому випадку $U_{вих}$ зростатиме ($U_{вих} > 0$). Звідси збільшуватиметься напруга $U_П$ ($U_П > 0$), а отже, вихідний струм I_y нормованого перетворювача також збільшуватиметься ($I_y > 0$). При цьому верхня межа діапазону 0-5 мА визначатиметься величиною опору навантажувального резистора R і напругою $U_П$

$$R = \frac{U_П}{I_y},$$

де $I_y = 5\,мА$.

Національний університет водного господарства та природокористування

Крім наведеного нормованого перетворювача, з'явилось багато нових перетворювачів теипературі, тиску та інших величин з уніфікованими сигналами постійного струму.

Інтелектуальні вимірювальні перетворювачі

Швидкий розвиток мікропроцесорної техніки, зростання потужності мікропроцесорів при одночасному здешевленні роблять економічно вигідним включення їх у вимірювальні перетворювачі різних типів. В останні роки за вимірювальними перетворювачами, до складу яких входить мікропроцесор, закріпилась назва "інтелектуальні вимірювальні перетворювачі".

Інтелектуальні вимірювальні перетворювачі мають багатоваріантну блочну структуру, один із можливих варіантів якої наведено на рис. 1.14.

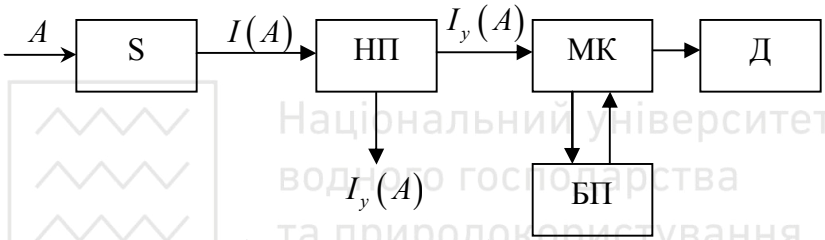


Рис. 1.14. Можливий варіант блочної структури інтелектуального вимірювального перетворювача

Тут A – вимірювальна фізична величина; S – сенсор (первинний вимірювальний перетворювач або чутливий елемент); НП – нормуючий перетворювач; $I_y(A)$ – уніфікований електричний сигнал; МК – мікроконтролер; Д – дисплей; БП – блок пам'яті.

Сучасні інтелектуальні вимірювальні перетворювачі набули широкого розповсюдження при вимірюваннях і контролі технологічних процесів в різних галузях промисловості, наприклад, при вимірюваннях і контролі рівня рідин, тиску, витрат, температури, лінійних та кутових розмірів деталей, хімічного складу розчинів, тощо.

Запитання для самоконтролю

1. Що розуміють під вимірювальним перетворювачем з уніфікованим вихідним сигналом (ВПУС)?

Національний університет
водного господарства
та природокористування

2. Аналіз структурної схеми ВПУС.

3. Що розуміють під державною системою промислових приладів і засобів автоматики (ДСП)?

4. Описати принципову схему терморезистивного перетворювача з вихідним уніфікованим струмовим сигналом.

5. Що розуміють під інтелектуальним вимірювальним перетворювачем?

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет водного господарства та природокористування

1.4. Передача вимірювальної інформації на відстань

Аналіз структурної схеми каналу передачі вимірювальної інформації.

На сучасному етапі розвтку виробничих технологій існує необхідніс не тільки отримувати інформацію про значення фізичних величин та параметри різних процесів, але й передачі цієї інформації на відстань для збору, аналізу та використання в системах автоматизації. Передачу інформації можна здійснювати на значні відстані як по провідниках, так і за допомогою безпровідникових технологій. Найпростішим способом передачі виміряної інформації на відстань є її попереднє перетворення в уніфікований струмовий сигнал та передача останнього за допомогою провідникових ліній зв'язку.

Засоби передачі вимірювальної інформації можна класифікувати за типом сигналу, що передається (аналоговий, цифровий) та характером лінії зв'язку (провідникові, безпровідникові).

Загальну схему передачі інформації на відстань представлено на рис. 1.15.

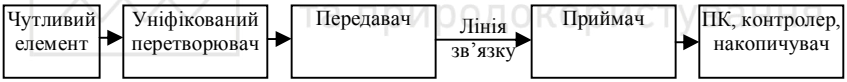


Рис. 1.15. Структурна схема каналу передачі вимірювальної інформації

Принцип дії каналу передачі вимірювальної інформації наступний. Чутливий елемент перетворює вимірювану фізичну величину у сигнал (зазвичай електричний), який надходить на вхід уніфікованого перетворювача. На виході його отримується аналоговий уніфікований сигнал, який в свою чергу надходить на вхід передавача. Останній служить для перетворення аналогового сигналу у сигнал, зручний для передачі та сприйняття на іншому кінці каналу зв'язку. Залежно від використаного в системі передавача можна отримати провідникову, радіо або GSM лінії зв'язку. Технічно, в якості передавача служать модем та модулі віддаленого вводу/виводу інформації. Сигнал з лінії зв'язку надходить до приймача, в ролі якого виступає модем або модуль вводу/виводу. Прийнята інформація поступає для обробки в ПК чи контролер, або зберігається на носії накопичувача.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Основні елементи систем збору даних та їх аналіз

Збір даних є процесом, в ході якого фізичні явища реального світу перетворюються в електричні сигнали, які в свою чергу вимірюються і перетворюються в цифровий формат, придатний для обробки, аналізу та зберігання.

Система збору даних та управління побудована з урахуванням потужності та гнучкості персональних комп'ютерів і може складатися із значної кількості різноманітних компонентів, які утворюють апаратне забезпечення та виготовлені різними виробниками. Задача розробника полягає у поєднанні окремих компонентів у завершену діюючу систему (рис. 1.16).

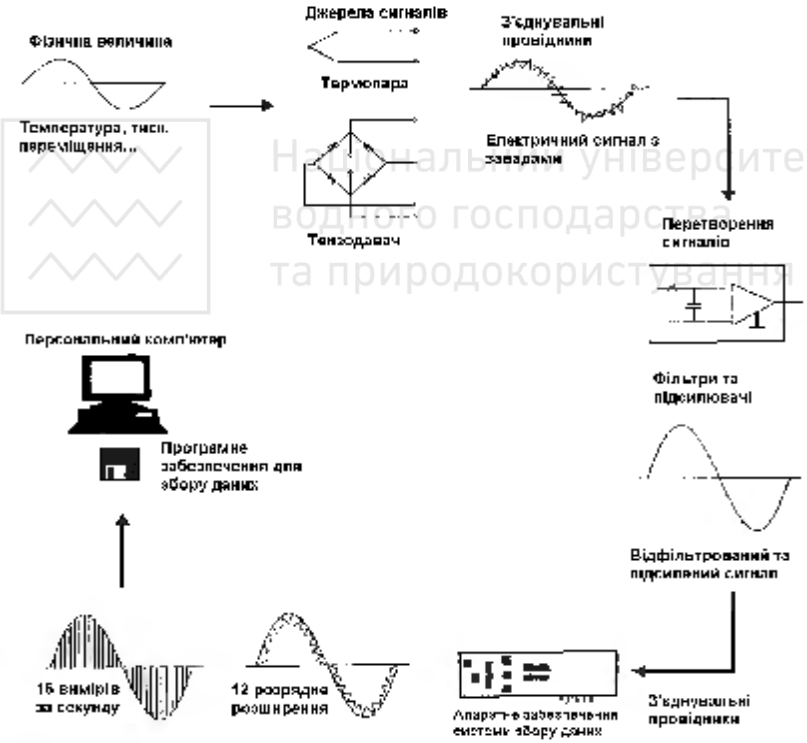


Рис. 1.16. Функціональна схема системи збору даних на основі персонального комп'ютера

Основними елементами системи збору даних, як показано на

Національний університет
водного господарства
та природокористування

рисунку, є:

- давачі і джерела сигналів;
- з'єднувальні провідники;
- перетворювачі сигналів;
- апаратне забезпечення збору даних;
- персональний комп'ютер;
- програмне забезпечення для збору даних.

Тут давачі та джерела сигналів забезпечують фактичний інтерфейс між зовнішнім середовищем та системою збору даних шляхом перетворення фізичних величин в електричні сигнали, які можуть бути передані до відповідних технічних засобів і сприйняті ними.

З'єднувальні провідники необхідні для фізичного з'єднання давачів та джерел сигналів з апаратним забезпеченням систем перетворення сигналів та збору даних. Якщо апаратне забезпечення таких систем віддалене від персонального комп'ютера, то з'єднувальні провідники забезпечують зв'язок між цими елементами апаратного забезпечення та комп'ютером. Якщо зв'язком є комунікаційним інтерфейсом, то такий тип зв'язку називається кабельним комунікаційним з'єднанням. Електричні сигнали, що виробляються давачами, часто потребують перетворення у форму, що сприймається апаратним забезпеченням системи збору даних.

Основними завданнями, які вирішуються при перетворенні сигналів, є фільтрація, підсилення, лінеаризація, електрична розв'язка та збудження.

Фільтрація. В умовах наявності завад слабкі сигнали (мілівольти і міліампери), що отримуються від давачів, спотворюються (корисний інформаційний сигнал супроводжується шумами). У зв'язку з цим пристрої перетворення сигналів часто містять фільтри нижніх частот, призначених для усунення високочастотних шумів, наявність яких може призвести до отримання неточних даних.

Підсилення. Після фільтрації вхідного сигналу, що приймається, його (для збільшення точності вимірювань) слід підсилити. Максимальна точність отримується шляхом підсилення вхідного сигналу до такої величини, щоб найбільше значення напруги вхідного сигналу дорівнювало вхідному діапазону аналогово-цифрового перетворювача системи збору даних. Розміщення

Національний університет водного господарства та природокористування

підсилювача якомога ближче до давача, послаблює дію завад на сигнальні лінії між перетворювачем і апаратурою збору даних.

Лінеаризація. Багато давачів, таких, як термопари, проявляють нелінійний зв'язок між фізичною величиною, для вимірювання якої вони використовуються та вихідним електричним сигналом. Іншими словами, їм притаманна нелінійність функції перетворення (нелінійна залежність між вхідними неелектричними і вихідними електричними величинами), що призводить до спотворення результату вимірювання. Для уникнення цього застосовують різні пристрої корекції, зокрема пристрої обробки сигналів, які виконують лінеаризацію функції перетворення за допомогою програмного забезпечення.

Апаратне забезпечення збору даних і управління може бути визначене як засіб, який виконує будь-яку з наступних функцій:

- введення, обробка та перетворення в цифрову форму (за допомогою АЦП) тих аналогових сигналів, які пов'язані з вимірюваною системою або процесом, з подальшою передачею даних в комп'ютер для відображення, зберігання і аналізу;
- введення цифрових сигналів, що містять інформацію про систему або процес;
- обробка та перетворення в аналогову форму (за допомогою цифро-аналогового перетворювача ЦАП) цифрових сигналів від комп'ютера і використання аналогових сигналів для управління системою або процесом;
- виведення цифрових керуючих сигналів.

Для збору даних застосовують різноманітне апаратне забезпечення від різних виробників. Найбільш поширеним елементом апаратного забезпечення систем збору інформації є змінні плати апаратного розширення, які під'єднуються безпосередньо до шини комп'ютера. До інших типів апаратного забезпечення систем збору відносяться автономні програмовані реєстратори та контролери, які можуть контролюватися, управлятися та налаштовуватися за допомогою комп'ютера або працювати незалежно.

Апаратура збору даних не може працювати без програмного забезпечення, оскільки саме воно дозволяє створити повну систему, яка проводить збір, аналіз, відображення даних і управління. Прикладне програмне забезпечення може бути повноекранною

Національний університет водного господарства та природокористування

інтерактивною панеллю, вузько спеціалізованою програмою управління введенням-виведенням, реєстратором даних, обробником комунікаційної інформації або комбінацією наведеного.

Персональний комп'ютер, що використовується в системі збору даних, багато в чому визначає швидкість, з якою вони можуть неперервно і точно збиратися в кожному конкретному випадку.

Деякі сучасні способи і засоби передачі інформації на відстань.

На практиці часто давачі повинні розташовуватися на певній відстані від комп'ютера, в якому проводиться обробка і зберігання даних. Особливо це відноситься до промислових умов, коли давачі і виконавчі механізми можуть знаходитися на суттєвих відстанях між собою, що доходять до сотень метрів. В умовах наявності завад слабкі сигнали, що отримуються від таких давачів як термопари і тензодавачі, важко передати на відстань без спотворень.

Альтернативою прокладання довгих та дорогих кабелів є застосування розподіленого вводу-виводу інформації (рис. 1.17), яке забезпечується у формі модулів формування сигналів, розташованих поблизу зв'язаних з ними давачів.

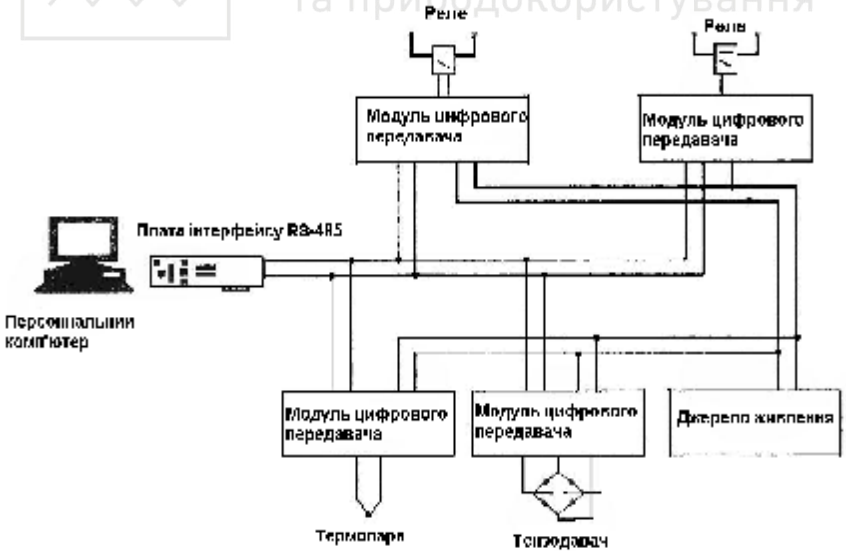


Рис. 1.17. Розподілене введення-виведення

Національний університет водного господарства та природокористування

Для кожного давача, що використовується, необхідним є один модуль, що дозволяє реалізовувати високий ступінь модульності (від однієї точки до сотень точок в одному знаходженні). Однак це може істотно збільшити витрати на системи з великою кількістю точок, що реєструються.

Одним з найзастосованіших видів розподіленого введення-виведення є цифровий передавач. Він, будучи програмованим пристроєм, виконує усі функції щодо перетворення сигналів (підсилення, фільтрація тощо), містить мікроконтролер та АЦП для виконання цифрового перетворення сигналу всередині самого модуля. Перетворені дані передаються в комп'ютер через комунікаційні інтерфейси RS-232 або RS-485. Використання багатоточкових мереж з інтерфейсом RS-485, як показано на рис.1.17, зменшує кількість кабелів, що прокладаються, оскільки кожен модуль формування сигналів використовує одну і ту ж їх пару. При застосуванні багатоточкових мереж з інтерфейсом RS-485 можливе під'єднання до 32 модулів, що здійснюють передачу інформації на відстань до 10 км.

Використання автономних реєстраторів-контролерів, поряд з перевагами програмування модулів перетворення сигналів та можливістю дистанційного прийняття рішень, підвищує надійність системи. Це пояснюється тим, що запрограмований один раз автономний реєстратор може продовжувати працювати навіть тоді, коли комп'ютер несправний або непід'єднаний. Фактично автономні реєстратори-контролери спеціально спроектовані таким чином, щоб працювати незалежно від персонального комп'ютера.

Автономні реєстратори-контролери є програмованими, продуктивними і гнучкими пристроями, що легко сполучаються з широким набором давачів, а також тому, що забезпечують керуючі цифрові входи і виходи для управління процесом.

Для прямого з'єднання комп'ютера та автономного реєстратора-контролера найчастіше застосовується послідовний інтерфейс RS-232. Він дозволяє виконувати програмування і реєстрацію даних на відстані до 50 м (рис. 1.18). Якщо автономний блок повинен знаходитися на більшій відстані, то в цій точці можна використати портативний персональний комп'ютер, реалізувати зв'язок по телефонній або радіокомунікаційні мережі, використовуючи при цьому модеми (рис. 1.19).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

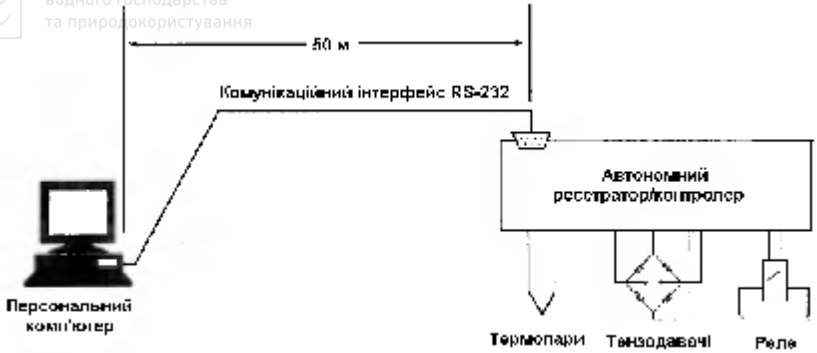


Рис. 1.18. Пряме під'єднання до автономного реєстратора-контролера через послідовний інтерфейс RS-232

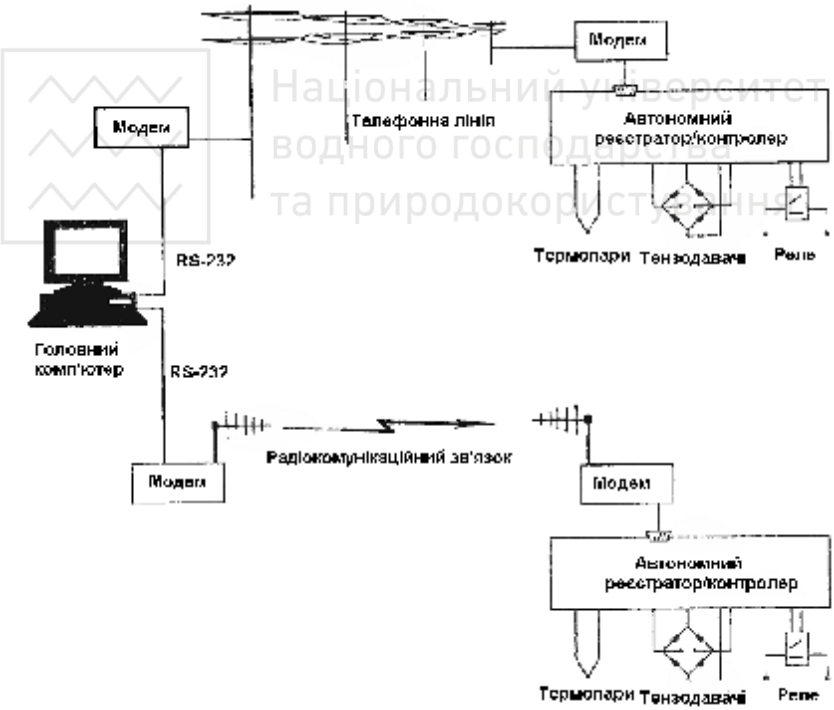


Рис. 1.19. Дистанційне під'єднання до автономного реєстратора-контролера через телефонну або радіокомунікаційну мережу

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Сучасні засоби вимірювальної техніки дозволяють значно полегшити процес її отримання, обробки, зберігання та передачі на відстань, що в свою чергу дозволяє прискорити процес реагування на відповідні зміни контрольованих параметрів та оптимізувати технологічний процес.

Запитання для самоконтролю

1. Аналіз структурної схеми каналу передачі вимірювальної інформації на відстань.
2. Принцип дії каналу передачі вимірювальної інформації.
3. Основні елементи системи збору даних про об’єкт.
4. Лінеаризація функції перетворення давачів.
5. Апаратне забезпечення збору даних.
6. Програмне забезпечення збору даних.
7. Суть розподіленого вводу-виводу інформації.
8. Пряме з’єднання комп’ютера з автономним реєстратором-контролером.
9. Дистанційне з’єднання комп’ютера з автономним реєстратором-контролером.
10. Переваги автономних реєстраторів-контролерів.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

2. Вимірювання температури

2.1. Термометрія за допомогою терморезистивних перетворювачів

Температурою називають фізичну величину, яка характеризує ступінь нагрітості тіла.

Практично всі технологічні процеси і ряд властивостей тіл залежать від температури. Вимірювати температуру можна лише непрямим шляхом, грунтуючись на залежності від температури таких фізичних властивостей тіл, які можливо безпосередньо виміряти. Ці властивості тіл називаються термометричними. До них належать: довжина, об'єм, термо-ЕРС, електричний опір тощо. В свою чергу речовини, які характеризуються термометричними властивостями, називаються також термометричними. Технічні засоби для вимірювання температури мають назву термометри.

Для створення термометра необхідно мати температурну шкалу. Найбільш розповсюдженими шкалами є шкали Фаренгейта, Ремюра, Цельсія і Кельвіна.

Результати вимірювання температури за цими шкалами записуються як: $t\,^{\circ}F$; $t\,^{\circ}R$; $t\,^{\circ}C$; $t\,^{\circ}K$.

Для перерахунку з однієї шкали в іншу використовують наступні співвідношення:

$$t\,^{\circ}C = 1.25\,^{\circ}R = (5/9)\left(t\,^{\circ}F - 32\right) = T\,^{\circ}K - 273.15 .$$

Межі вимірювання температур (найбільш уживаними типами термометрів) наступні.

Термоелектричні термометри: від $200^{\circ}C$ до $2200^{\circ}C$.

Терморезистивні термометри:

- на основі металевих терморезистивних перетворювачів від $-260^{\circ}C$ до $1100^{\circ}C$;
- на основі напівпровідникових терморезистивних перетворювачів від $-240^{\circ}C$ до $300^{\circ}C$.

Манометричні термометри (газові і рідинні) від $-150^{\circ}C$ до $600^{\circ}C$.

Національний університет водного господарства та природокористування

Вимірювальні кола з терморезистивними перетворювачами температури.

Найбільш розповсюдженими для промислового вимірювання температури в межах від -260 до $1100^{\circ}C$ є платинові терморезистивні перетворювачі температури, так звані термометри опору (ТО).

Позитивною стороною їх є висока точність і часова стабільність, недоліком – нелінійність функції перетворення, особливо в діапазоні низьких температур (від -260 до $0^{\circ}C$), в якому суттєво падає чутливість.

При високих температурах (понад $1000^{\circ}C$) на стабільність ТО впливає випаровування платини, що обмежує їх застосування.

ТО з міді, нікелю та інших металів мають меншу часову стабільність, що зумовлює їх нижчий клас точності.

При вимірюванні низьких і середніх температур використовуються ТО з високим номінальним опором (від 100 до 500 Ом), а при вимірюванні високих температур – низькоомні ТО з номінальним опором від 10 до 1 Ом.

Увімкнення ТО у вимірювальне коло з допомогою з'єднувальних провідників $R_л$ (рис. 2.1) впливає на точність вимірювання. Існують дво-, три- та чотирипровідні схеми увімкнення ТО у вимірювальне коло.

Для зменшення похибок, що з'являються через невідповідність опору $R_л$ з'єднувальних провідників їхньому градуювальному значенню, використовують термоперетворювачі з трьома і чотирма відводами і відповідне їх увімкнення у мостове або компенсаційне коло. Потрібно також враховувати можливість додаткових похибок, які виникають від нагрівання ТО вимірювальним струмом. Для цього необхідно, щоб вимірювальний струм був таким, щоб викликана ним зміна опору не перевищувала 0,1%.

В практиці технологічних вимірювань температури з використанням терморезистивних перетворювачів широкого застосування набули, зокрема, мостові кола (зрівноважені і незрівноважені мости).

Зрівноважені мости поділяються на неавтоматичні та автоматичні. В них використовується нульовий метод вимірювання.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

За допомогою неавтоматичних мостів вимірюють опори терморезисторів в межах від 0,5 до 10^7 Ом, зокрема проводять градуювання термоперетворювачів опору і вимірюють температуру.

Двопровідну схему зрівноваженого неавтоматичного мосту наведено на рис. 2.1.

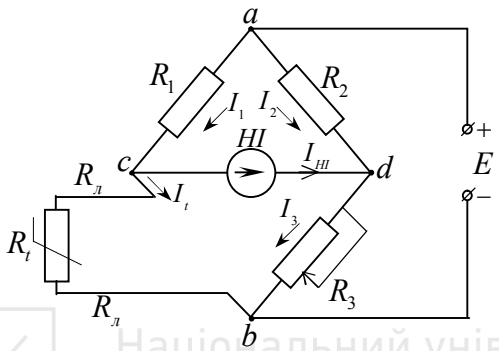


Рис. 2.1. Двопровідна схема зрівноваженого не автоматичного мосту:
R_1 і R_2 – постійні резистори; R_3 – змінний резистор; R_t – вимірювальний опір;
$R_л$ – опір з'єднувальних провідників

В діагональ живлення ab мосту увімкнено джерело струму, а у вимірювальну діагональ cd відповідно нуль-індикатор (НІ), зокрема нуль-гальванометр. Між точками підключення, різнойменних діагоналей знаходяться плечі моста, які складаються з постійних резисторів R_1 і R_2 та змінного резистора R_3, а в плече cd увімкнено вимірювальний опір R_t і два з'єднувальних провідника опором $R_л$.

Якщо міст зрівноважений, то струм I_{HI} в діагоналі cd дорівнює нулю, а струм $I_2 = I_3$ та $I_1 = I_t$. Як наслідок, маємо, що $-I_2 R_2 = I_1 R_1$ і $I_3 R_3 = I_t \left(R_t + 2R_л \right)$. Розділивши два останніх рівняння одне на друге з урахуванням рівності відповідних струмів, маємо:

$$R_2 \left(R_t + 2R_л \right) = R_1 R_3 , \qquad (2.1)$$

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Звідки R_t дорівнюватиме

$$R_t = \frac{R_1}{R_2} R_3 - 2R_л . \qquad (2.2)$$

З (2.2) випливає, що R_t можна знайти за значенням R_3 при постійному співвідношенні опорів плечей R_1/R_2 та при незмінному значенні $R_л$.

В той же час $R_л$ змінюється зі зміною температури зовнішнього середовища, що призводить до зменшення точності результату вимірювань R_t тим більше, чим менше значення R_t.

<u>Цей недолік може бути усунено шляхом трипровідного з'єднання терморезистивного перетворювача з мостом</u> (рис. 2.2).

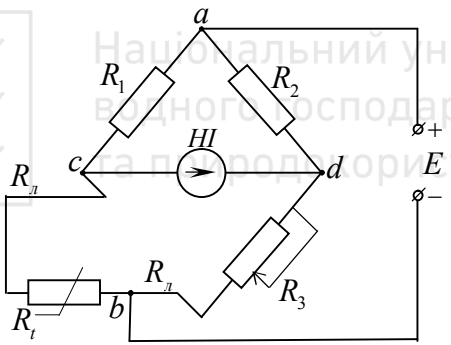


Рис. 2.2. Трипровідна схема з'єднання терморезистивного перетворювача з неавтоматичним мостом

При такому з'єднанні діагональ живлення мосту доводиться (точка b) до терморезистивного перетворювача. В результаті цього з'єднувальні провідники виявляються в двох різних плечах мосту. Один із опорів $R_л$ – в плечі мосту разом з опором R_3, а другий $R_л$ – в плечі разом з R_t.

Тоді умова рівноваги мосту запишеться:

$$R_1 \left(R_3 + R_л \right) = R_2 \left(R_t + R_л \right) . \qquad (2.3)$$

Звідки R_t визначиться як

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$R_t = \frac{R_1}{R_2}\left(R_3 + R_л\right) - R_л . \qquad (2.4)$$

Оскільки конструктивно приймається, що $R_1 = R_2$, то з (2.4) $R_t = R_3$. Іншими словами, результат вимірювання в цьому випадку не залежить від електричного опору з'єднувальних провідників $R_л$.

Трипровідну схему автоматичного зрівноваженого мосту для вимірювання температури наведено на рис. 2.3.

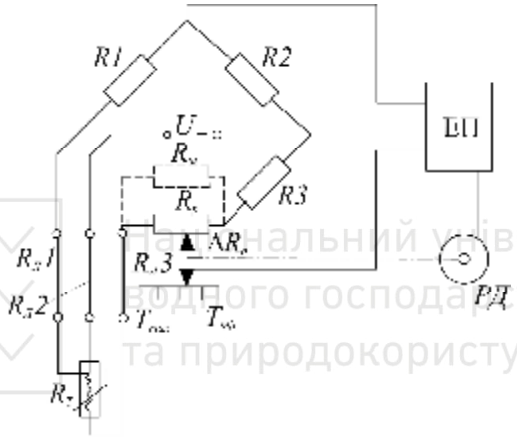


Рис. 2.3. Трипровідна схема автоматичного зрівноваженого мосту для вимірювання температури: R_1; R_2; R_3 – опори резисторів, увімкнених у відповідні плечі; R_p – опір реохорда; ΔR_p – зміна опору реохорда; $R_{л1}$; $R_{л2}$; $R_{л3}$ – опори з'єднувальних провідників; $ЕП$ – електричний підсилювач; $РД$ – реверсивний двигун; R_T – опір терморезистора; $R_Ш$ – опір шунта; U – напруга живлення

На схемі терморезистор R_T (рис. 2.3) вмикається у плече вимірювального мосту, що прилягає до реохорда R_p, який виконує вимірювальну функцію. При такому увімкненні рівняння рівноваги при початковому (2.5) і деякому проміжному значенні вимірювальної температури (2.6) без урахування опорів ліній і при

Національний університет
водного господарства
відсутності шунтуючого опору $R_{Ш}$, який служить для розширення границь вимірювання, має вигляд:

$$\left(R_{T0}+R_p\right)R_2=R_1\cdot R_3, \qquad (2.5)$$

де R_{T0} – опір терморезистора при температурі T_0 у вихідному стані, або

$$R_2\left[R_{T0}+\Delta R_T+\left(R_p-\Delta R_p\right)\right]=R_1\left(R_3+\Delta R_p\right). \qquad (2.6)$$

Розкриваючи дужки в (2.6) і виконавши відповідні перетворення, з урахуванням (2.5), отримаємо, що

$$\Delta R_p=\Delta R_T\frac{R_2}{R_1+R_2}. \qquad (2.7)$$

Із (2.7) випливає, що зміна опору реохорда ΔR_p в такому вимірювальному колі буде пропорційною зміні опору ΔR_T перетворювача, яке викликане зміною вимірювальної температури.

Для зменшення впливу опорів ліній в схемі застосовується трипровідне увімкнення ТО. Опір окремих з'єднувальних провідників вмикається відповідно в сусідні плечі моста і діагональ живлення. При такому увімкненні, для деякого значення R_{TC} (при якому міст буде симетричним), вплив опорів лінії $R_{л1}=R_{л3}=R_л$ і їхньої зміни будуть повністю вилучені. Справді, для симетричного мосту, коли $R_3+\Delta R_p=R_2$ з умови його рівності

$$\left[\left(R_{TC}+R_p-\Delta R_p\right)+R_л\right]R_2=\left(R_3+\Delta R_p\right)\left(R_1+R_л\right). \qquad (2.8)$$

Знайдемо, що

$$\frac{R_{TC}+R_p-\Delta R_p+R_л}{R_1+R_л}=\frac{R_3+\Delta R_p}{R_2}=1. \qquad (2.9)$$

Тобто, в чисельнику і знаменнику лівої частини (2.9) опори $R_л$ додаються до опорів $\left(R_{TC}+R_p-\Delta R_p\right)$, які за величиною дорівнюють опору R_1, що не порушує умову рівноваги.

Принцип дії данного вимірювального мосту полягає у

Національний університет
водного господарства
та природокористування

наступному. При зміні температури від початкового значення T_0 (коли міст зрівноважений) до деякого значення T_c, зміниться і опір R_{TC} терморезистора, що викличе розбаланс мостової схеми. У зв'язку з цим, у вимірювальній діагоналі, куди увімкнено підсилювач ЕП, з'явиться напруга розбалансу мосту. Данна напруга підсилюється до величини, необхідної для того, щоб ротор реверсивного двигуна РД почав обертатись у відповідну сторону залежно від знака розбалансу.

Вал РД, будучи зв'язаним через редуктор з движком реохорда, переміщуватиме його доти, поки напруга розбалансу не дорівнюватиме нулю. Одночасно з цим переміщується стрілка (покажчик) відносно шкали, проградуйованої в $^{\circ}C$. Вона і вкаже на величину вимірювальної температури.

Незрівноважені мости (рис. 2.4) застосовуються в пристроях вимірювання температури рідше ніж зрівноважені. До недоліків незрівноважених мостів належить нелінійність їхньої функції перетворення та залежність вихідної напруги від напруги джерела живлення. Проте через виняткову простоту (при наявності стабілізованих джерел напруги) незрівноважені мости застосовуються для вимірювання температури у вузькому температурному діапазоні, коли нелінійністю функції перетворення можна знехтувати або зробити вихідний прилад з нелінійною шкалою.

Для мостового кола, зображеного на рис. 2.4, вихідна напруга $U_{вих}$ визначиться як

$$U_{вих} = \frac{U\left(R_{TO} + \Delta R_T\right)}{R_{TO} + \Delta R_T + R_3 + R_{л3}} - \frac{U\left(R_1 + R_{л1}\right)}{R_1 + R_{л1} + R_2}. \qquad (2.10)$$

Із аналізу наведеного видно, що опори ліній $R_{л1}$ та $R_{л4}$ на результат вимірювань не впливають. Опори ліній $R_{л1}$ та $R_{л2}$ додаються не до опору терморезистора R_T, а до опорів плеч мосту, величини яких можна вибрати суттєво більшими за опори лінії. У зв'язку з цим вираз (2.10) можна переписати, як

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$U_{вих} = U \frac{\left(R_{TO} + \Delta R_T\right) R_2 - R_1 R_3}{\left(R_{TO} + \Delta R_T + R_3\right)\left(R_1 + R_2\right)}. \qquad (2.11)$$

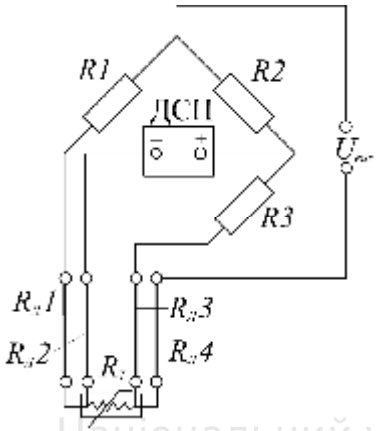


Рис. 2.4. Схема незрівноваженого мосту для вимірювань температури

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Якщо міст зрівноважений при початковому значенні опору R_{TO} (коли $R_{TO} R_2 = R_1 R_3$), то для будь-якого іншого значення опору термоперетворювача можна записати

$$U_{вих} = U \frac{R_2 \Delta R_T}{\left(R_1 + R_2\right)\left(R_{TO} + \Delta R_T + R_3\right)}. \qquad (2.12)$$

Якщо $\Delta R_T << \left(R_{TO} + R_3\right)$, то вихідну напругу можна прийняти пропорційною зміні опору ΔR_T, а нелінійність функції перетворення мосту досягне значення

$$\frac{\Delta R_T}{R_{TO} + R_3} \cdot 100\%. \qquad (2.13)$$

Наприклад, для мідного термометра опору ($\alpha_T = 0{,}0043 \ 1/^\circ C$) при $R_3 = R_{TO}$ нелінійність в діапазоні $\left(t \pm 5\right)^\circ C$ приблизно дорівнюватиме 1%.

При точних вимірюваннях високих температур із застосуванням

низькоомних терморезистивних перетворювачів та при вимірюванні низьких температур, коли опір термоперетворювача співвимірний з опором з'єднувальних провідників, зменшення впливу опору останніх набуває суттєвого практичного значення. Для таких вимірювань застосовують компенсатори змінного струму (рис. 2.5).

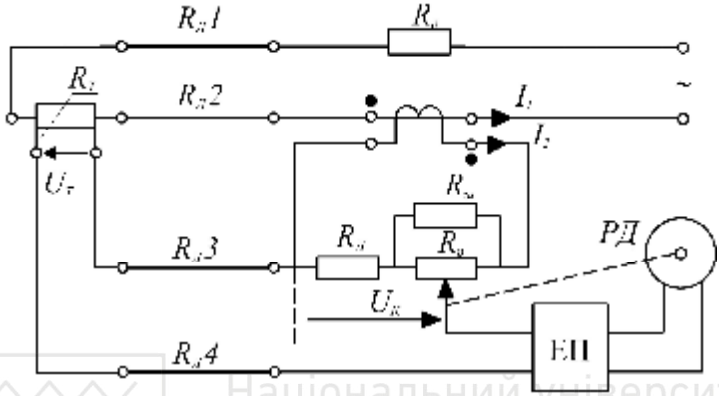


Рис. 2.5. Схема автоматичного компенсатора для вимірювань температури

На схемі термоперетворювач R_T живиться від джерела змінної напруги, яке створює в колі даного термоперетворювача струм I_1. Компенсаційне коло живиться від вторинної обмотки вимірювального трансформатора струму, первинна обмотка якого увімкнена в коло послідовно з термоперетворювачем. Значення компенсуючої напруги визначиться як

$$U_K = I_2\left(R_П + \Delta R_p \frac{R_ш}{R_ш + R_p}\right) = \frac{I_1}{k_I}\left(R_П + \Delta R_p \frac{R_ш}{R_ш + R_p}\right), \quad (2.14)$$

де k_I – коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму $\left(k_I = I_1/I_2\right)$.

Опір $R_П$ вибирається таким чином, щоб для початкового значення опору $R_{Tпоч}$ був справедливим вираз

$$I_1 R_{Tпоч} = I_2 R_П = \frac{I_1}{k_I} R_П . \quad (2.15)$$

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Тоді для інших значень R_T в заданому діапазоні вимірювань отримаємо

$$I_1\left(R_{Tпоч}+\Delta R_T\right)=\frac{I_1}{k_I}\left(R_П+\Delta R_p\frac{R_ш}{R_ш+R_p}\right). \qquad (2.16)$$

Звідси

$$\Delta R_p=\Delta R_T\frac{k_I\left(R_ш+R_p\right)}{R_ш}. \qquad (2.17)$$

З останнього виразу видно, що зміна опору реохорда лінійно залежить від зміни опору термоперетворювача.

Оскільки вимірювана напруга U_T $(U_T=I_1\left(R_{Tпоч}+\Delta R_T\right))$ і компенсувальна напруга U_K $(U_K=\frac{I_1}{k_I}\left(R_П+\Delta R_p\frac{R_ш}{R_ш+R_p}\right))$ створюються від одного джерела, то зміна напруги живлення (та струму I_1) практично не впливає на результат вимірювання. Усувається також вплив опору лінії: два проводи знаходяться в колі джерела живлення, а по двох інших, розміщених в компенсаційному колі, в момент компенсації (коли $\Delta U=0$) струм не проходитиме і на них не утворюється додатковий спад напруги.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Цифрові термометри

Задачі контролю температури з точки зору збору і аналізу даних про об’єкт найбільш ефективно можна вирішувати за допомогою електронних приладів. Їм характерний широкий діапазон вимірювання температури, максимально швидке отримання інформації в зручному для сприйняття вигляді, можливість інтегрування з будь-яким типом електронних систем.

В загальному випадку цифровий термометр складається з теплового чутливого елемента (наприклад, терморезистора); АЦП, призначеного для перетворення аналогового сигналу від терморезистора в цифровий сигнал; дисплея; засобів введення-виведення сигналів для взаємодії з іншими пристроями; елемента живлення.

Структурну схему цифрового термометра наведено на рис. 2.6.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

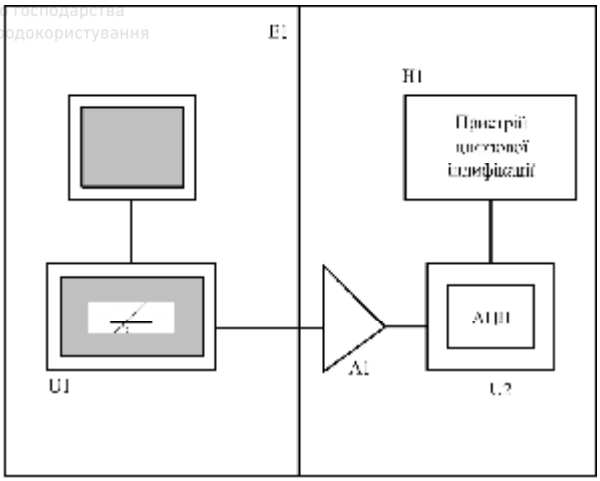


Рис. 2.6. Структурна схема цифрового термометра з терморезистивним перетворювачем

Національний університет
водного господарства
та природокористування

В таких термометрах зміна температури об'єкта, в якому розміщено терморезистор, викликає зміну його опору, який в блоці E_1 перетворюється у відповідну зміну напруги. Перетворювач U_1 живиться від стабілізатора струму. Вихідний сигнал блока E_1 підсилюється підсилювачем A_1 і надходить до аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) U_2, на виході якого знаходиться цифровий блок індикації H_1, який призначений для висвічування температури контрольованого об'єкта.

Запитання для самоконтролю

1. Термометри та температурні шкали.
2. Двопровідна вимірювальна схема зрівноваженого неавтоматичного мосту з терморезистивним перетворювачем температури.
3. Трипровідна схема з'єднання терморезистивного перетворювача з неавтоматичним мостом.
4. Порівняльний аналіз дво- і трипровідної схем зрівноваженого не автоматичного мосту.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

5. Аналіз трипровідної схеми автоматичного зрівноваженого мосту для вимірювання температури.

6. Принцип дії автоматичного зрівноваженого мосту для вимірювання температури.

7. Принципова схема незрівноваженого мосту для вимірювання температури.

8. Аналіз принципової схеми автоматичного компенсатора для вимірювання температури.

9. Результат вимірювання автоматичним компенсатором.

10. Аналіз структурної схеми цифрового термометра з терморезистивним перетворювачем.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

2.2. Термометрія за допомогою термоелектричних перетворювачів

Вимірювальні кола термоелектричних термометрів

Найпростіше вимірювальне коло термоелектричних термометрів (термопара, з'єднувальні провідники, мілівольтметр) наведені на рис. 2.7, а.

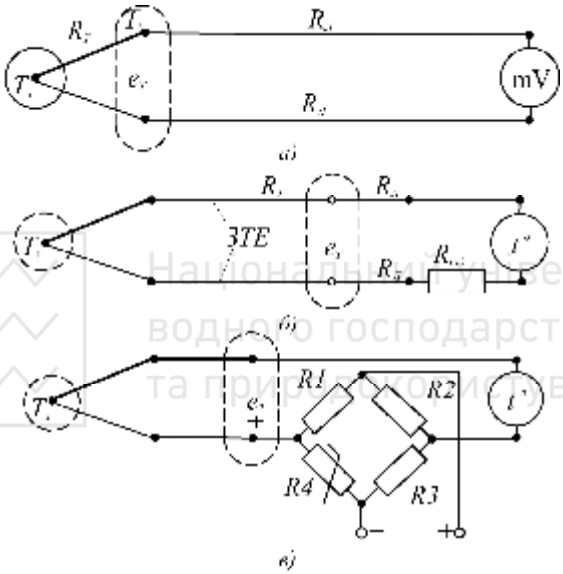


Рис. 2.7. Вимірювальні кола термоелектричних термометрів

Прийнявши, що температура T_0 вільних кінців термопари буде незмінною і опір всього вимірювального кола також незмінним, правомірно твердити, що покази мілівольтметра визначатимуться величиною вимірюваної температури T_x.

Для зменшення залежності показів приладу від електричного опору вимірювального кола необхідно дотриматись умови

$$R_{mv} >> R_T + 2R_л . \qquad (2.18)$$

Із рис. 2.7, а випливає, що

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$U_{mv} = I_{mv} R_{mv} = \frac{e_T}{R_{mv} + 2R_л + R_T} R_{mv} . \qquad (2.19)$$

В цьому випадку, з урахуванням (2.18) матимемо, що

$$U_{mv} = e_T .$$

Похибка δ_M, яка вноситься опором зовнішнього вимірювального кола, буде дорівнювати

$$\delta_M = \frac{R_T + 2R_л}{R_{mv}} 100\% . \qquad (2.20)$$

Наприклад, якщо R_{mv} дорівнює 300 Ом, то для отримання похибки $\delta_M < 1\%$ опір $R_T + 2R_л$ не повинен перевищувати 3 Ом.

Необхідно відзначити, що, оскільки функція перетворення термоелектричного перетворювача є нелінійною, то для переведення показів мілівольтметра у значення вимірюваної температури необхідно користуватись градуювальною таблицею даного перетворювача.

Оскільки мілівольтметр є складовою термометра і його шкала проградуйована в одиницях температури, то нелінійність функції перетворення термоперетворювача враховуватиметься в характері шкали приладу, яка відповідно також буде нелінійною. Для такого приладу вже немає необхідності в дотриманні умови (2.18).

При цьому необхідно дотримуватись забезпечення опору $R_{сум}$ всього вимірювального кола приладу його градуювальному значенню (такому значенню $R_{град}$, при якому прилад градуювався). Для підганяння опору кола використовується підстроювальна котушка опором $R_{під}$ (рис. 2.7, б).

У цьому випадку опір зовнішнього кола не спричинить до виникнення похибки. Остання буде зумовлюватись лише відхиленням сумарного опору від градуювального значення і спричинятись зміною опору з’єднувальних провідників внаслідок зміни температури довкілля. Аналогічно це можна записати як

$$\delta_M = \frac{R_{сум} - R_{град}}{R_{град}} 100\% . \qquad (2.21)$$

Національний університет водного господарства та природокористування

Причиною похибок вимірювання температури може бути також невідповідність температури вільних кінців термоперетворювача градуювальному значенню. Градуювальні характеристики термоелектричних перетворювачів складені для певної температури вільних кінців, зазвичай $0^{\circ}C$. Якщо температура вільних кінців не дорівнює градуювальній, то необхідно вводити поправку на зміну термо-ЕРС відносно градуювального значення.

Одним із способів усунення похибки від зміни температури вільних кінців є їх термостатування. Термостатувати головку термопари не є можливим. У зв'язку з цим необхідно продовжити її електроди, не спотворюючи термо-ЕРС для того, щоб відвести вільні кінці в зручне місце, для термостатування. Здовжуючі термоелектродні дроти ЗТЕ (рис. 2.7, б) виконані з більш дешевих матеріалів, ніж основні термоелектроди. Проте вони повинні бути термоелектрично ідентичними з відповідними електродами основної термопари. Це дозволить усунути виникнення паразитних термо-ЕРС.

Національний університет водного господарства та природокористування

В промислових умовах, для введення корекції на покази приладу звичайно застосовують пристрої автоматичного введення поправок. Таким пристроєм може бути мостове коло (рис. 2.7, в), яке складається з температуронезалежних манганінових резисторів R_1, R_2 і R_3 і резистора R_4 з міді чи нікелю, який змінює свій опір залежно від температури. Якщо температура термозалежного резистора, як і температура вільних кінців термопари, буде дорівнювати, наприклад $0^{\circ}C$, то міст повинен знаходитись у рівновазі. При відхиленні цієї температури від $0^{\circ}C$ зміна термо-ЕРС термопари буде компенсовуватись напругою розбалансування мосту, викликаною зміною опору R_4.

Для термоелектричного термометра за схемою рис. 2.1, в, напруга U, що надходить на вхід вимірювального приладу, дорівнює

$$U = e_T + e_{3T} + U_{CK}, \qquad (2.22)$$

де e_T – термо-ЕРС термопари; e_{3T} – паразитна термо ЕРС від неповної термоідентичності матеріалів ЗТЕ та основних

Національний університет водного господарства та природокористування

термоелектродів; U_{CK} – вихідна напруга розбалансу мостової схеми компенсації СК.

Відповідно похибка Δt такого термоелектричного термометра становитиме

$$\Delta t = \Delta_{ТП} + \Delta_{3T} + \Delta_{CK} + \Delta_{ВП}, \qquad (2.23)$$

де $\Delta_{ТП}$ – похибка термоперетворювача; $\Delta_{3T} = e_{3T}$ – похибка від неповної термоідентичності; Δ_{CK} – похибка схеми компенсації; $\Delta_{ВП}$ – похибка вимірювального приладу.

Необхідно підкреслити, що похибки Δ_{3T} та Δ_{CK} є співрозмірними з похибкою $\Delta_{ТП}$. В сумі з $\Delta_{ТП}$ вони сягають значень, більших за похибку сучасного вимірювального приладу. Похибка $\Delta_{ТП}$ може бути зменшеною лише конструктивно-технологічними методами. Тому при проектуванні таких термометрів перш за все необхідно подбати про зменшення похибки від неповної термоідентичності та похибки схеми компенсації.

В цифрових термометрах похибка від зміни температури вільних кінців може бути повністю усунена вимірюванням температури вільних кінців і автоматичного внесення відповідних поправок.

Автоматичні потенціометри для вимірювання температури.

На рис. 2.8 наведено схему автоматичного потенціометра, який призначений для вимірювань температури за допомогою термоелектричного перетворювача.

Принцип його дії наступний. Термо-ЕРС e_T термоелектричного перетворювача зрівноважується вихідною напругою $U_{АБ}$ потенціометра, виконаного за мостовою схемою. Якщо $U_{АБ} \neq e_T$, то напруга ΔU недокомпенсації після попереднього перетворення і підсилення подається на вхід реверсивного двигуна РД, який переміщує повзунок реохорда до моменту повної компенсації напруг. Одночасно переміщується стрілка відносно шкали приладу, який проградуйований в одиницях температури. Стабілізоване джерело живлення забезпечує незмінність робочого струму з похибкою близько 0,02%.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

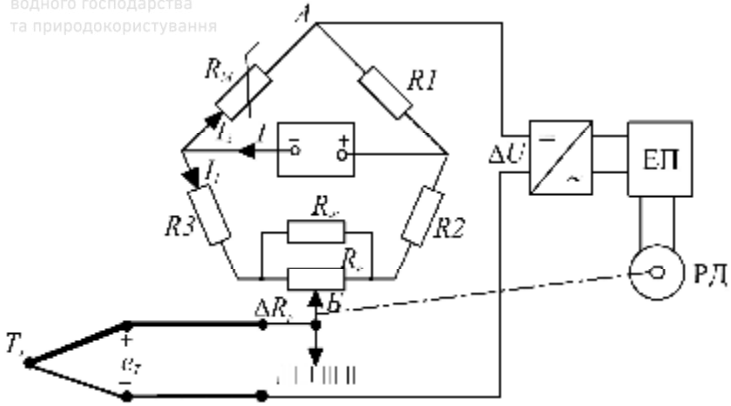


Рис. 2.8. Схема автоматичного потенціометра для вимірювань температури

Для автоматичного введення поправок на температуру вільних кінців термоперетворювача в одне з плечей мосту увімкнено термозалежний опір R_M із міді (всі інші опори – термонезалежні, виконані з манганіну). Термоперетворювач підключається до потенціометра за допомогою здовжуючих термоелектродних проводів. Забезпечується рівність температури вільних кінців термоперетворювача і резистора R_M. Величину опору R_M вибрано таким чином, щоб зміна спаду напруги ΔU на ньому при зміні температури на Δt градусів відповідала б зміні термо-ЕРС термопари при тій же зміні температури її вільних кінців, тобто виконувалась би умова

$$I_2 R_{MO} \alpha_T \Delta t = \Delta e_T , \qquad (2.24)$$

де I_2 – струм верхньої гілки мостового кола потенціометра; α_T – температурний коефіцієнт опору міді; R_{MO} – опір мідного резистора при $0^\circ C$; Δe_T – зміна термо-ЕРС термоперетворювача, викликана відхиленням температури вільних кінців на Δt град від $0^\circ C$.

Оскільки Δe_T навіть в обмеженому температурному діапазоні не є лінійною функцією від Δt, то при лінійній залежності

Національний університет
водного господарства

$\Delta U_k = I_2 R_{MO}\left(1+\alpha\Delta t\right)$ повна корекція впливу температури вільних кінців можлива лише для одного значення Δt. При інших значеннях буде спостерігатись деяка недокомпенсація, похибкою від якої можна знехтувати.

Цифрові вимірювачі температури (ЦВТ) складаються з двох частин – аналогової та цифрової (рис. 2.9).

Аналогова частина ЦВТ має перемикач полярності П, масштабний підсилювач МП, перетворювач напруги в інтервал часу ПНЧ, блоки опорної напруги E_0 та керування аналоговою частиною БКА. Остання екранована та гальванічно розділена з цифровою частиною за допомогою блока гальванічного розділення (БГР). Цифрова частина складається з блока керування БК, блока корекції адитивної похибки БАП, блока цифрової лінеаризації БЦЛ та блока відображення інформації БВІ.

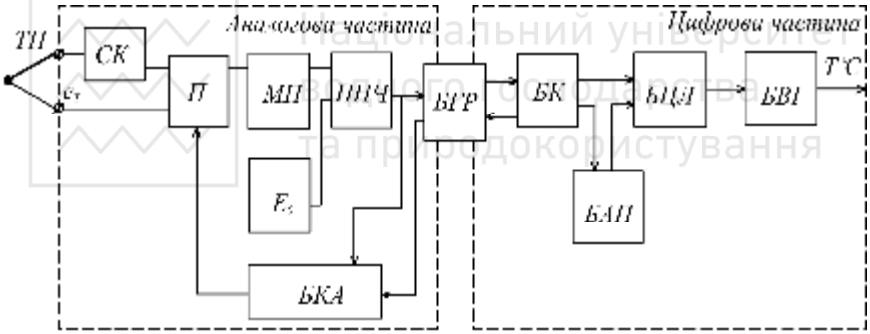


Рис. 2.9. Структурна схема ЦВТ з термоелектричним перетворювачем

Результат вимірювання отримують з аналітичного виразу

$$N_X = 2Tf_0 K_П K_{ЦЛ} \frac{e_T + U_{CK}}{E_0}, \qquad (2.25)$$

де T – тривалість часу інтегрування вхідної напруги; f_0 – опорна частота; $K_П$ – коефіцієнт передачі масштабного підсилювача МП; E_0 – опорна напруга АЦП; $K_{ЦЛ}$ – коефіцієнт перетворення блока цифрової лінеаризації; U_{CK} – вихідна напруга розбалансу мостової схеми компенсації СК.

Національний університет водного господарства та природокористування

Деякі аспекти нових напрямів термометрії.

Термошумовий метод вимірювань температури грунтується на рівнянні Найквіста, яке встановлює зв'язок між напругою теплових шумів, що виникають в резисторі, і його термодинамічною температурою T

$$U_{с.кв} = 4kTR\Delta f,$$

де $U_{с.кв}$ – середнє квадратичне значення шумової напруги; k – стала Больцмана, що дорівнює $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ $Дж/К$; R – опір резистора; Δf – смуга частот, в котрій виконуються вимірювання.

Термошумовий метод можна використовувати для вимірювань температури в межах від 0,001 К до 2000...2500 К. В якості вимірювальних перетворювачів застосовують резистори з платини, манганіну, константану, вольфраму, графіту, а також недротяні резистори.

Складність реалізації термошумового методу полягає в низькому рівні корисного сигналу, який становить частки або одиниці мікровольт. Основними чинниками, що обмежують точність термошумового методу, є залежність опору резистора від температури, власні шуми вимірювального каналу та завади в лінії.

Термочастотний метод вимірювань температури заснований на використанні залежності від температури частоти власних коливань різного роду резонаторів, параметрів RC або RL ланок з терморезисторами, швидкості розповсюдження звукових та ультразвукових коливань.

З термочастотних, найпоширенішими є методи, засновані на застосуванні резонаторних сенсорів, які є автогенераторами або генераторами з вимушеними коливаннями, частота яких настроюється в резонанс з частотою власних коливань резонатора, що змінюється з температурою.

Тепловізори. Теплобачення – це напрям в технічних вимірюваннях, що вивчає фізичні основи, методи та прилади, які забезпечують можливість спостереження слабонагрітих об’єктів. Такі прилади називаються тепловізорами (термографами). Тепловізори відносяться до оптикоелектронних приладів пасивного типу, що працюють в інфрачервоному діапазоні спектру вимірювання.

Національний університет водного господарства та природокористування

Діапазон інфрачервоного випромінювання поділяється на кілька піддіапазонів.

Таблиця 2.1

Довжина хвиль (мкм)	Назва піддіапазона
0,76 – 1,5	Ближнє інфрачервоне випромінювання
1,5 – 5,5	Короткохвильове інфрачервоне випромінювання
5,6 - 25	Довгохвильове інфрачервоне випромінювання
25 - 100	Дальнє інфрачервоне випромінювання

Принцип дії тепловізорів грунтується на перетворенні інфрачервоного випромінювання в електричний сигнал, який піддається підсиленню і автоматичній обробці, та перетворенню у видиме зображення теплового поля об’єкта (термограма) для його візуальної і кількісної оцінки.

Принципова схема тепловізора представлена на рис. 2.10.

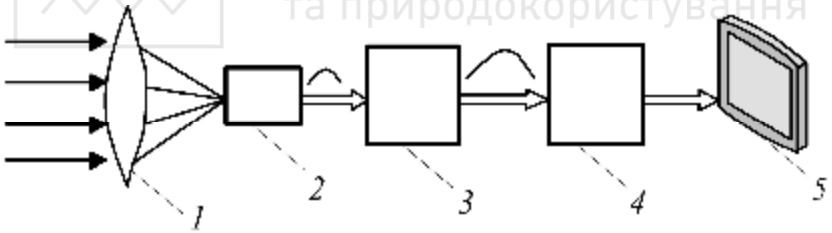


Рис. 2.10. Принципова схема тепловізора:
1 – лінза; 2 – фотоприймач; 3 – електричний підсилювач; 4 – мікропроцесор;
5 – блок відображення інформації

Інфрачервоне випромінювання концентрується системою спеціальних лінз 1 і потрапляє на фотоприймач 2, який вибірково чутливий до певної довжини хвилі інфрачервоного спектру. Потрапляючи на нього, випромінювання призводить до зміни електричних властивостей фотоприймача, реєструється і підсилюється електронним підсилювачем 3. Отриманий сигнал піддається цифровій обробці в мікропроцесорному блоці 4. Це значення передається на блок відображення інформації 5, що

Національний університет водного господарства та природокористування

представляє собою екран рідкокристалічного дисплею. Блок відображення інформації має кольорову палітру, в якій кожному значенню сигналу присвоюється певний колір. Після цього на екрані монітора з'являється точка, колір якої відповідає чисельному значенню інфрачервоного випромінювання, яке потрапило на фотоприймач. Скануюча система (дзеркала або напівпровідникова матриця) проводить послідовний обхід усіх точок у межах поля зору приладу, в результаті чого виходить видима картина інфрачервоного випромінювання об'єкта. Чутливість детектора до теплового випромінювання тим вище, чим нижче його власна температура, тому його поміщають у спеціальний термостатуючий холодильний пристрій. Один із способів охолодження здійснюється за допомогою елементів Пельтьє (напівпровідники, що дають перепад температур при пропусканні через них струму).

Висока чутливість тепловізорів реалізується завдяки наявності високочутливих напівпровідникових приймачів випромінювання з антимоніду індію $InSb$, ртуть-кадмій-телуру $Hg-Cd-Te$ тощо.

Національний університет водного господарства та природокористування

Запитання для самоконтролю

1. Вимірювальні кола термоелектричних термометрів.
2. Умова зменшення залежності показів термоелектричного термометра від електричного опору вимірювального кола.
3. Термостатування як спосіб усунення похибки від зміни температури вільних кінців термопари.
4. Принципова схема автоматичного потенціометра для вимірювання температури.
5. Аналіз принципової схеми цифрового вимірювача температури.
6. Термошумовий метод вимірювання температури.
7. Термочастотний метод вимірювання температури.
8. Принципова схема і принцип дії тепловізора.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

2.3. Термометрія за випромінюванням тіла

Усі фізичні тіла, температура яких є більшою за абсолютний нуль, випромінюють теплові промені. Засоби вимірювань, з допомогою яких визначають температуру тіл за їх тепловим випромінюванням, називаються пірометрами випромінювання або просто пірометрами.

Теплове випромінювання являє собою електромагнітне випромінювання речовиною за рахунок її внутрішньої енергії (на противагу, наприклад, люмінісценції, яка збуджується зовнішніми джерелами енергії).

У зв'язку з тим, що інтенсивність теплового випромінювання зменшується із зменшенням температури тіл, пірометри застосовуються в основному для вимірювання температур в межах від 300 до $6000^{\circ}C$. Для вимірювання температур вище $3000^{\circ}C$ методи пірометрії є практично єдиними, оскільки вони не вимагають безпосереднього контакту давача приладу з об'єктом вимірювання. Теоретично верхня межа вимірювання температури пірометрами випромінювання є необмеженою.

Більшість твердих і рідких тіл мають суцільний спектр випромінювання, іншими словами, випромінюють хвилі всіх довжин λ від 0 до ∞.

Видиме людським оком випромінення, яке називається світлом, знаходиться в межах довжин хвиль від 0,40 до 0, 75 мкм. Невидимі промені охоплюють інфрачервону ділянку спектру в межах від $\lambda = 0,75$ до $\lambda = 400$ мкм, за якою відбувається перехід в радіохвильовий діапазон. Хвилі з $\lambda < 0,40$ мкм є також невидимими і відносяться до ультрафіолетових, за якими знаходяться рентгенівські та гамма-промені.

В пірометрах випромінювання використовуються в основному промені видимого й інфрачервоного спектра випромінювання.

Пірометри повного випромінювання, радіаційні пірометри

Визначення температури за випромінюванням тіл грунтується на законах, які встановлюють зв'язок між температурою досліджуваного об'єкта і його спектральною світністю. Іншими словами, кількістю енергії, яка випромінюється за одиницю часу з одиниці поверхні досліджуваного об'єкта і яка знаходиться в

Національний університет водного господарства та природокористування

певному діапазоні довжин хвиль. Залежно від спектральної чутливості, пристрої для вимірювання температури за випромінюванням поділяють на радіаційні, квазімоно-хроматичні та спектрального випромінювання.

Теоретичною основою радіаційної пірометрії є закон Стефана-Больцмана, який встановлює зв'язок між інтегральним значенням спектральної світності, тобто енергетичною світністю R, і абсолютною температурою випромінювача. Пристрої, які грунтуються на цьому принципі, називаються пірометрами повного (або сумарного) випромінювання.

Радіаційні пірометри є прості за будовою, проте за точністю вони поступаються іншим приладам для вимірювання температури за випромінюванням. Конструктивно радіаційний пірометр складається з оптичної системи (телескопа), первинного перетворювача потоку випромінювання в електричний сигнал і вторинного вимірювального приладу. В якості первинного перетворювача використовують зачорнені термоелектричні перетворювачі (болометри), які є чутливими до всіх довжин хвиль потоку випромінювання, що ними сприймаються.

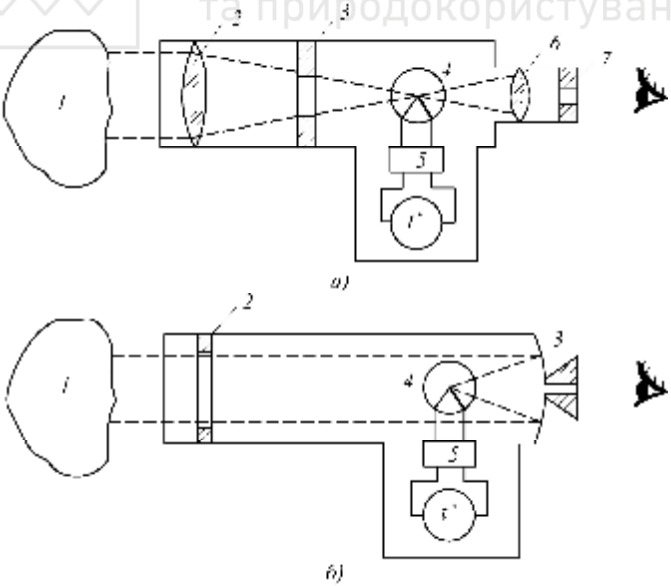


Рис. 2.11. Будова пірометрів повного випромінювання

Національний університет водного господарства та природокористування

Застосовують два різновиди оптичних систем радіаційних пірометрів: рефракторна (із заломлювальною лінзою) і рефлекторна (з відбивальним внутрішнім дзеркалом). В рефракторному пірометрі (рис. 2.11, а) випромінювання від досліджуваного об'єкта 1 надходить до об'єктива (лінзи) 2 і через діафрагму 3 фокусується на гарячому спаї термопари. Термо-ЕРС, що виникає, вимірюється мілівольтметром, який проградуюйований в одиницях вимірюваної температури. Для компенсації похибки від зміни температури вільних кінців термоперетворювачів використовують пристрій 5 автоматичної корекції похибки у формі, наприклад, мостової схеми. Для спрямування телескопа на об'єкт вимірювання служить окуляр 6 і діафрагма 7.

У рефлекторному телескопі (рис. 2.11, б) випромінювання від досліджуваного об'єкта 1 через діафрагму 2 надходить до рефлектора 3, відбивається і фокусується на гарячих спаях термопари. Вимірювальне коло в цьому випадку є ідентичним попередньому.

Національний університет водного господарства та природокористування

Радіаційні пірометри градуюються за чорним випромінювачем. Тому при вимірюванні температури реальних (не чорних) тіл в результаті їхньої меншої випромінювальної здатності, радіаційні пірометри показують не дійсну температуру T_x об'єкта, а нижчу (так звану радіаційну температуру T_p). За законами Стефана-Больцмана енергетична світність абсолютно чорного тіла R^* визначиться як

$$R^* = \sigma T_P^4 ; \qquad (2.26)$$

звідки радіаційна температура T_p дорівнюватиме

$$T_p = \sqrt[4]{R^* / \sigma} , \qquad (2.27)$$

де $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-2}$ $Дж / \left(м^2 \cdot с \cdot K^4 \right)$.

Для реального тіла енергетична світність R і дійсне значення температури T_x зв'язані між собою наступною залежністю

$$R = \varepsilon_0 \sigma T_x^4 , \text{ а } T_x = T_p \sqrt[4]{1 / \varepsilon_0 \sigma} , \qquad (2.28)$$

де ε_0 – коефіцієнт сумарного випромінювання, який дорівнює

Національний університет водного господарства та природокористування

відношенню енергетичної світності досліджуваного об'єкта до енергетичної світності чорного тіла при цій же температурі.

Отже, радіаційна температура T_p, що виміряна пірометром, зв'язана з дійсним значенням температури T_x досліджуваного об'єкта залежністю

$$T_p = T_x \sqrt[4]{\varepsilon_0}\ , \text{ а } \quad T_x = T_p \sqrt[4]{1/\varepsilon_0}\ . \qquad (2.29)$$

Поправка ΔT, яку необхідно додати до виміряної пірометром радіаційної температури T_p для отримання дійсного значення температури T_x досліджуваного об’єкта, визначається як

$$\Delta T = T_x - T_p = T_x - \left(1 - \sqrt[4]{\varepsilon_0}\right) = T_p\left(\sqrt[4]{1/\varepsilon_0} - 1\right), \qquad (2.30)$$

а відносна похибка $\delta T_{\varepsilon 0}$, яка викликана неврахуванням коефіцієнта сумарного випромінювання досліджуваного об'єкта

$$\delta T_{\varepsilon 0} = \left(\Delta T / T_x\right) \cdot 100\% = \left(\sqrt[4]{1/\varepsilon_0} - 1\right) \cdot 100\% \qquad (2.31)$$

становить для $\varepsilon_0 = 0,9$ наближено 3%, для $\varepsilon_0 = 0,8$ – близько 6%, а для $\varepsilon_0 = 0,3$ досягає 35%.

Для реальних фізичних об'єктів ε_0 визначається його властивостями і знаходиться в межах від 0,9...0,95 до 0,1. Тому радіаційні вимірювання температури для внесення поправок супроводжуються здебільшого попередньою оцінкою ε_0. Цього можна досягнути попереднім градуюванням радіаційного пірометра. Суть цього полягає в одночасному вимірюванні температури об'єкта за допомогою зазначеного пірометра та засобу, що вимірює не радіаційну, а дійсну температуру, наприклад, за допомогою термоелектричного термометра.

Пірометри повного випромінювання, наприклад, типу АПИР-С призначені для вимірювання температури в межах від 30 до 3000 $^\circ C$ з похибкою від 1,5 до 2%.

<u>Яскравісні пірометри.</u>

Пірометри, принцип дії яких грунтується на залежності від температури спектральної світності або пропорційної до неї спектральної яскравості (спектральної світності, віднесеної до

Національний університет
водного господарства
та природокористування

одиниці просторового кута), називають квазімонохроматичними або яскравісними. Найбільш розповсюдженими серед яскравісних пірометрів є пірометри із ниткою розжарення (рис. 2.12, а), які називаються також оптичними пірометрами. При вимірюванні такими пірометрами випромінювання від об'єкта 1 через об'єктив 2 фокусується на нитку розжарення пірометричної лампи 4. Між об'єктивом та пірометричною лампою при вимірюванні температури понад $1500^{\circ}C$ (допустима температура нитки розжарювання) ставиться поглинальне скло 3. Зображення об'єкта дослідження і нитки розжарення пірометричної лампи при вимірюванні температури спостерігається пірометристом через окуляр 6. Між окуляром і пірометричною лампою знаходиться червоний світлофільтр 5.

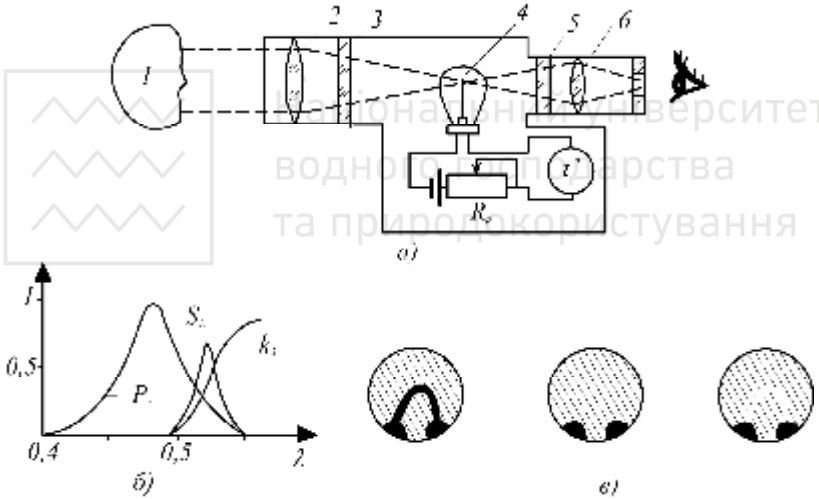


Рис. 2.12. Принцип дії оптичного пірометра

Розжарення нитки пірометричної лампи змінюють шляхом регулювання величини струму за допомогою регулюючого реостата R_p. Величина струму вимірюється приладом, проградуйованим в одиницях вимірюваної температури.

Даний пірометр чутливий до енергетичної світності (яскравості) дуже вузького діапазону довжин хвиль в області так званої ефективної довжини хвиль $\lambda_{еф} = 0.65\,мкм$. Спектральна

Національний університет
водного господарства
та природокористування

чутливість ока людини характеризується чутливістю $P_\lambda = f(\lambda)$, (рис. 2.12, б), а червоний світлофільтр – спектральним коефіцієнтом пропускання $k_\lambda = \varphi(\lambda)$.

Таким чином, ефективна чутливість такої системи $S_\lambda = F(\lambda)$ має максимум при $\lambda_{еф} = 0.65\,мкм$ і зменшується до нуля при довжинах хвиль, які відрізняються від $\lambda_{еф}$ навіть на $\pm 0,05\ мкм$.

Аналогічно пірометрам повного випромінювання, яскравісні пірометри градуюються за чорним випромінювачем. Тому так звана яскравісна температура $T_Я$ реального не чорного тіла з монохроматичним коефіцієнтом теплового випромінювання $a_\lambda < 1$ буде відрізнятись від дійсної T_x. Поправка $\Delta T_Я$, яку необхідно додати до виміряної яскравісної температури для визначення дійсного значення температури T_x, дорівнює

$$\Delta T_Я = T_X - T_Я = \frac{A_\lambda T_Я^2}{1 - A_\lambda T_Я}, \qquad (2.32)$$

Національний університет
водного господарства
та природокористування

де A_λ – монохроматичний коефіцієнт, який характеризує ступінь відхилення дійсної температури від яскравісної і відносну похибку δT_λ від нехтування коефіцієнтом a_λ теплового випромінювання

$$\delta T_\lambda = \frac{A_\lambda T_Я}{1 - A_\lambda T_Я} 100\%. \qquad (2.33)$$

Значення останнього для хвиль завдовжки $\lambda = 0,65\ мкм$ залежно від a_λ при вимірюванні температури близько 1000 К, становить для $a_\lambda = 0,9$ близько 0,5%, для $a_\lambda = 0,8$ близько 1%, а для $a_\lambda = 0,3$ близько 6%. За інших ідентичних умов, при $T_X = 2000\ K$ для $a_\lambda = 0,3$ ця похибка може наближатись до 20%.

У пірометрі з ниткою розжарювання, під час вимірювання температури змінюють температуру нитки пірометричної лампи. Існують конструкції, в яких розжарювання лампи при вимірюванні підтримується сталим. Змінюється уявна світність об'єкта за

допомогою поглинального клина, який розміщений між лампою та об'єктом дослідження. Поглинальний клин має змінний коефіцієнт пропускання, який залежить від положення клина. Останній виконується у вигляді кільця, яке повертається під час вимірювання температури навколо осі, змінюючи коефіцієнт пропускання. З клином пов'язана шкала, яка проградуйована в одиницях яскравісної температури. Пірометри з поглинальним клином відрізняються нижчою точністю, порівняно з пірометрами з регульованим розжаренням пірометричної лампи.

Монохроматичні візуальні пірометри із ниткою розжарення типу "Промінь" призначені для вимірювань температур в межах від 800 до 5 000 $^\circ C$. Їхня похибка при вимірюванні від 800 до 1 400 $^\circ C$ становить 14 $^\circ C$, в межах від 1 200 до 2 000 $^\circ C$ – 20 $^\circ C$, а в межах від 1 800 до 5000 $^0 C$ – 150 $^0 C$.

<u>Пірометри спектрального випромінювання.</u>

Візуальні пірометри, складовою вимірювального кола яких є око людини, непридатні для роботи в автоматичних системах вимірювання і регулювання температури. Тому дістали розповсюдження квазімонохроматичні фотоелектричні пірометри (як і фотоелектричні пірометри часткового випромінювання). У цих пірометрах фотоелемент в поєднанні з червоним світлофільтром підібрані так, щоб ефективна довжина хвилі такої системи дорівнювала $\lambda_{еф} = 0,65\ мкм$. Це забезпечує порівняльність результатів фотоелектричних і оптичних пірометрів.

Фотострум, що створюється фотоелементом є мірою температури. Такі пірометри конструктивно нескладні, але характеризуються низькою точністю. Досконалішими є пристрої, в яких фотоелемент використовується як пристрій в колі порівняння спектральних світностей двох джерел випромінювання: досліджуваного об'єкта і регульованого джерела світла.

Із залежності спектральної світності від температури випромінювача випливає, що в міру збільшення температури тіла максимум його спектральної світності зміщується в бік коротких хвиль. Це в зоні видимого спектра означає зміну кольорів променів максимальної інтенсивності, що наштовхнуло на ідею визначати температуру за кольором променів максимальної інтенсивності

Національний університет водного господарства та природокористування

(світності). Виміряна за цим методом температура називається колірною. Колірну температуру T_K визначають щодо світностей променів двох різних довжин хвиль в границях видимого спектра за допомогою так званих пірометрів відношення.

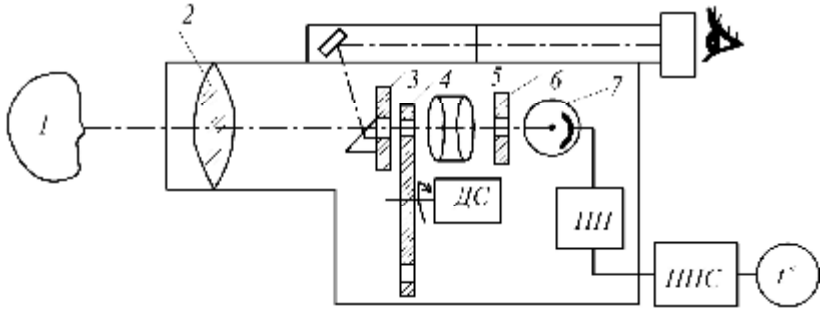


Рис. 2.13. Схема пірометра спектрального випромінювання

Національний університет водного господарства та природокористування

Реалізація пірометрів спектрального відношення значно складніша, ніж пірометрів часткового монохроматичного випромінювання. Спрощена схема такого пірометра наведена на рис. 2.13. Тут випромінювання від досліджуваного об'єкта 1 фокусується об'єктивом 2 в площині діафрагми 3 і через біхроматичний модулятор 4, оптичну систему 5 і діафрагму 6 потрапляє на приймач випромінювань 7, яким може бути фотодіод чи фоторезистор. Діафрагма 3 – це калібрований отвір в круглій пластині із дзеркальною поверхнею. Зображення об'єкта в площині діафрагми 3 спостерігається візирним пристроєм, який складається з дзеркала та стандартного мікроскопа. З біхроматичного модулятора на приймач випромінювань почергово потрапляють потоки випромінювання досліджуваного об'єкта в двох різних ділянках спектра. Для цього застосовують два світлофільтри, які закріплені на диску біхроматичного модулятора, що обертається, за допомогою двигуна ДС. Отже, сигнал з приймача випромінювань представляє собою послідовність імпульсів, що чергуються, і пропорційних енергетичній світності досліджуваного об'єкта в двох спектральних інтервалах. Ці імпульси, підсилені попереднім підсилювачем ПП, надходять до електронного блоку проміжного перетворювача сигналів ППС, який реалізує функцію перетворення

Національний університет
водного господарства
та природокористування

пірометра спектрального відношення і виробляє вихідний сигнал $U_{вих}$, зв'язаний з вимірюваною колірною температурою лінійною залежністю. Вихідним сигналом ППС є напруга постійного струму 0...1 В, яка може вимірюватись вихідним приладом $ВП_P$, проградуйованим в одиницях вимірюваної температури. Передбачено також вихід $0...100\ мВ$ для увімкнення автоматичного потенціометра.

Пірометри спектрального відношення, наприклад, типу "Веселка" відрізняються високими чутливістю і точністю. Діапазон вимірювань різних модифікацій цих приладів знаходиться в межах від 750 до 2900 $^\circ C$, а основна похибка становить 0,6%.

Запитання для самоконтролю

1. Пірометри як засоби вимірювання температури тіл за їх тепловим випромінюванням.
2. Пірометри рефрактори.
3. Пірометри рефлектори.
4. Яскравісні пірометри з ниткою розжарення.
5. Пірометри спектрального випромінювання.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет водного господарства та природокористування

3. Вимірювання геометричних розмірів

3.1. Поняття про лінійні та кутові розміри

Геометричні розміри – це широка група понять лінійних та кутових розмірів, площі та об’єму. У свою чергу, до лінійних розмірів відносять довжину, товщину покрить, відстань між об'єктами, рівень, шорсткуватість (нерівність) поверхні тощо. Головними кутовими розмірами є плоский та тілесний кути. Час є однією із семи основних одиниць СІ. Час, як і простір, – це одна із форм існування матерії. Вони нерозривно пов'язані між собою, характеризуючи, зокрема, параметри руху матерії, тобто динаміку її в просторі і часі. Лінійні та кутові переміщення, швидкість та прискорення характеризують просторово-часовий стан об'єктів одного відносно іншого, прийнятого за нерухомий. Одним із різновидів параметрів руху є витрати рідких та газоподібних речовин.

Вимірювання лінійних та кутових розмірів займають суттєве місце в різних галузях науки і техніки, зокрема в машино- та приладобудуванні, де на них припадає до 80% від всіх вимірювань. Завдання вимірювань лінійних та кутових розмірів можна розділити наступним чином:

- вимірювання лінійних розмірів в межах від часток мкм до десятків метрів та кутових розмірів від 0,1" до 360°. Найпоширенішими в цій групі є вимірювання розмірів деталей та відхилення їх розміру від заданого значення, а також вимірювання параметрів шорсткуватості поверхні і товщини покрить;
- вимірювання розмірів від часток до сотень метрів при визначенні рівня рідких та сипучих матеріалів в резервуарах, свердловинах та в баках транспортних засобів;
- визначення координат об’єктів та відстаней між ними, в межах від одиниць міліметра до мільйонів кілометрів.

В наш час під впливом інтенсивного розвитку мікропроцесорної техніки відбувся корінний розвиток і удосконалення засобів для вимірювання лінійних та кутових розмірів. Нові апаратні рішення призводять до появи нових методів вимірювань. Донедавна для вимірювань геометричних розмірів застосовували здебільшого аналогові прилади. На даний час, у зв’язку із значним прогресом в

Національний університет водного господарства та природокористування

галузі первинних вимірювальних перетворювачів та винятковими можливостями цифрової вимірювальної техніки, на перший план виходять цифрові засоби вимірювань цих величин. Їх основні переваги: можливість автоматизації вимірювального процесу і автоматичної обробки результатів вимірювань та неперервний запис результатів вимірювань. Тому, розглядаючи засоби та методи вимірювань геометричних розмірів, доцільно зупинитись тільки на електричних засобах, зокрема з цифровим виходом, не забуваючи при цьому, що основною ланкою засобів вимірювань геометричних розмірів є первинний вимірювальний перетворювач.

Основні електричні методи та засоби вимірювань лінійних та кутових розмірів

Основні електричні методи та відповідні їм засоби вимірювань лінійних та кутових розмірів, залежно від наявності чи відсутності механічного контакту між досліджуваним об'єктом та засобом вимірювань, поділяють на контактні та безконтактні, а залежно від принципу вимірювального перетворення – на електромеханічні, електрофізичні та спектрометричні (хвильові).

Електромеханічні методи залежно від первинного вимірювального перетворювача поділяють на резистивні, індуктивні, ємнісні, оптоелектронні тощо.

Електрофізичні методи вимірювань грунтуються на відмінностях електричних, магнітних теплових та інших властивостей досліджуваних речовин. Відповідно електрофізичні методи поділяються на електромагнітні, ємнісні, кондуктометричні тощо. Найпоширенішими з електромагнітних є вихрострумові та резонансні методи.

Спектрометричні методи та відповідні їм засоби вимірювань, залежно від довжини хвилі випромінювання, що використовується, поділяють на звукові, ультразвукові, радіохвильові, надвисокочастотні, оптичні (лазерні). Залежно від фізичних явищ, які використовуються при вимірюванні, спектрометричні методи поділяються на локаційні, інтерферометричні, рефрактометричні тощо.

Електромеханічні методи широко застосовуються для вимірювань розмірів деталей та нерівності їх поверхонь.

Вимірювання малих лінійних розмірів

В контактних мікрометрах та профілеметрах координати

досліджуваного об'єкта попередньо перетворюються в лінійне переміщення голкоподібного щупа, а потім в електричний сигнал за допомогою індуктивних, взаємоіндуктивних чи ємнісних перетворювачів.

На рис. 3.1 пояснюється принцип дії вимірювача малих розмірів за допомогою ємнісного перетворювача, який є елементом LC-контура кварцового генератора.

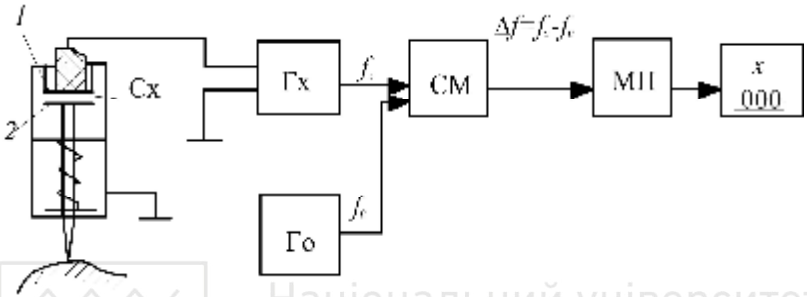


Рис. 3.1. Принцип дії ємнісного профілеметра

Ємнісний перетворювач плоско-паралельний конденсатор має нерухомий електрод 1 та рухомий електрод 2, який механічно з'єднаний з голкоподібним щупом, закріпленим в корпусі за допомогою пружини. Ємнісний перетворювач за допомогою кабелю з'єднаний з кварцовим генератором Γ_x, вихідна частота f_x якого є функцією ємності C_x $\left(f_x = F\left(C_x\right)\right)$ між рухомим та нерухомим електродами. Частота f_x та частота f_0 від опорного генератора частоти Γ_0 подаються на вхід суматора СМ, вихідна частота якого є Δf ($\Delta f = f_x - f_0$). Після лінеаризації функції перетворення за допомогою мікропроцесора МП, сигнал надходить на вхід цифрового пристрою відліку, проградуйованого в мікрометрах.

Оскільки

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}, \tag{3.1}$$

де L_0 і C_0 – відповідно індуктивність і ємність LC – контура

Національний університет
водного господарства
та природокористування

опорного генератора Γ_0, а при $C_x = C_{x0} + \Delta C = C_0 + \Delta C$, де C_0 і ΔC – відповідно початкова ємність та приріст ємності пернетворювача, f_x дорівнюватиме

$$f_x = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_x}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0\left(1+\frac{\Delta C}{C_0}\right)}}. \qquad (3.2)$$

Після перетворення виразу (3.2) отримаємо

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{1}{\sqrt{L_0 C_0\left(1+\frac{\Delta C}{C_0}\right)}} - \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}\right) \approx -\frac{1}{2}\frac{\Delta C}{C_0} f_0. \qquad (3.3)$$

За даною схемою розроблюють мікрометри з порогом чутливості в частки мкм та діапазоном вимірювань 0,1…1 мм. Такий мікрометр може використовуватись для вимірювань параметрів шорсткуватості поверхонь. Однак у цьому випадку можуть виникати значні похибки через деяку нелінійність в перетворенні шорсткуватої поверхні в лінійне переміщення щупа. Виникають також похибки через відривання щупа в деяких точках профілю поверхні та внаслідок деформації досліджуваної поверхні під дією сили з боку щупа. Ці похибки визначаються зусиллям, що створюється щупом. Зусилля загалом не є сталим і може змінюватись залежно від інерційності перетворювача, радіуса щупа, властивостей матеріалу та характеру профілю досліджуваної поверхні. В цьому відношенні, перевагу має віброконтактний метод, заснований на перетворенні в електричний сигнал коливань вібруючого щупа.

Віброконтактний метод дає змогу здійснювати вимірювання при незначних зусиллях дії щупа, який тільки періодично торкається досліджуваного об'єкта. Завдяки цьому можна використати тонкі щупи, що дозволяють вимірювати розміри деталей, які легко деформуються, а також об’єктів складної конфігурації.

Подібними за конструкцією та вимірювальним колом до ємнісних профілемірів є індуктивні мікрометри-профілеметри, в

Національний університет водного господарства та природокористування

яких вимірювальний щуп у своїй верхній частині має закріплений феритовий стержень, який при переміщенні штока змінює індуктивність вимірювальної котушки. Котушка, індуктивність L_x якої є функцією вимірюваного переміщення x, становить частотно-залежний елемент LC-генератора. Якщо частота f_0 опорного генератора визначається як

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}},$$

а частота f_x вимірювального генератора дорівнюватиме

$$f_x = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_x C_0}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0\left(1+\frac{\Delta L}{L_0}\right)}}, \qquad (3.4)$$

де L_0 та ΔL – відповідно початкова індуктивність та приріст індуктивності перетворювача, то після перетворень матимемо

$$\Delta f \approx -\frac{1}{2}\frac{\Delta L}{L_0} f_0. \qquad (3.5)$$

Національний університет водного господарства та природокористування

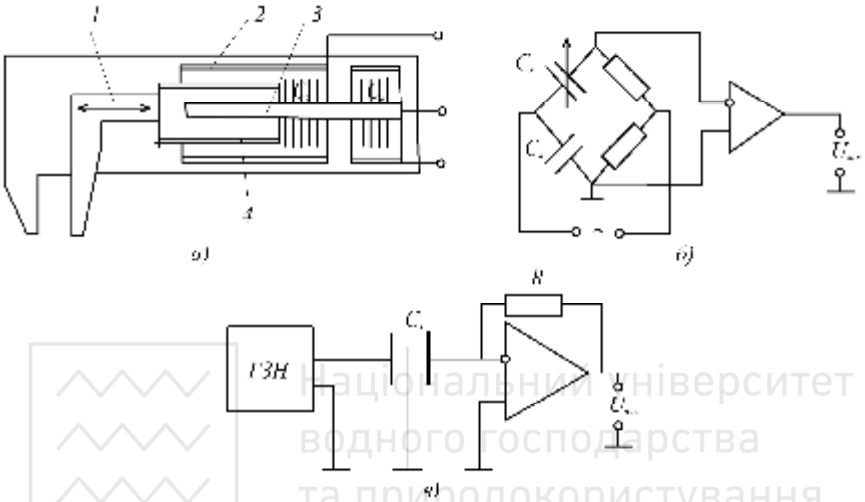
Мікрометри-профілеметри з індуктивним первинним перетворювачем дозволяють вимірювати мікронерівності поверхонь від 0,1 мкм, а їх верхня межа вимірювань становить декілька мм.

На практиці в приладо- та машинобудуванні часто необхідно вимірювати не всі значення розміру деталей, а лише його відхилення від деякого заданого значення. Ці відхилення звичайно не перевищують часток мм, а тому названі мікрометри можуть бути застосовані для таких потреб.

Для вимірювань розмірів в межах від частки міліметра до декількох сантиметрів застосовують штангенциркулі (рис. 3.2, а) з довгоходовим щупом 1 та ємнісним перетворювачем переміщень. Останній складається з циліндричних (зовнішнього 2 та внутрішнього 3) електродів і екрана 4 з електропровідного матеріалу, з’єднаного механічно з вимірювальним щупом. При переміщенні екрана ємність вимірювального конденсатора буде змінюватись пропорційно вимірюваному переміщенню. Для виключення впливу довкілля на результат вимірювань,

Національний університет
водного господарства
та природокористування

передбачений компенсаційний конденсатор, ємність C_K якого дорівнює ємності вимірювального конденсатора при $x = 0$. Приклади електричних вимірювальних кіл такого штангенциркуля наведені на рис. 3.2, б, в.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 3.2. Ємнісний штангенциркуль та його вимірювальні кола

<u>- Вимірювання кутових переміщень</u>

Прилад, призначений для вимірювання кутового переміщення, зображено на рис. 3.3. За принципом дії він являє собою диференціальний трансформаторний перетворювач, якір якого може повертатись на кут α. При положенні рухомого якоря (як це показано на рис. 3.3, а), значення вторинних напруг у обмотках w_2' та w_2'' будуть однакові. Оскільки ці обмотки увімкнені зустрічно (рис. 8.3, б), то вихідна напруга $U_{вих}$ дорівнюватиме

$$U_{вих} = w_2' - w_2'' \approx k\alpha\,, \qquad (3.5)$$

тут k – коефіцієнт пропорційності; α – кут відхилення якоря, $U_{вих} = 0$.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

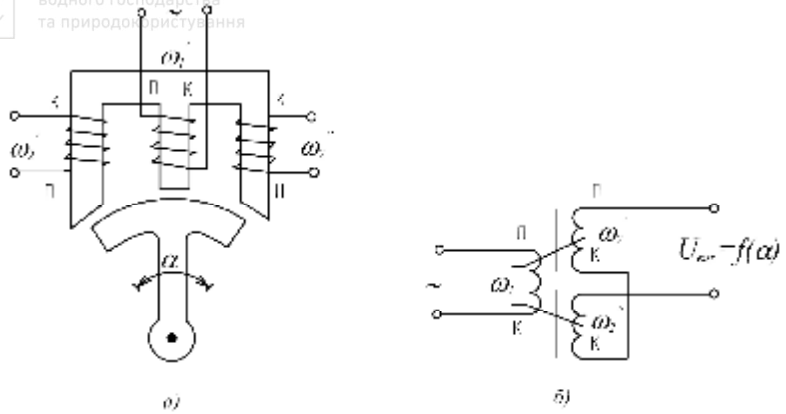


Рис. 3.3. Прилад для вимірювання кутового переміщення:
а) принципова схема; б) схема увімкнення обмоток диференціально-трансформаторного перетворювача: ω_1 – первинна обмотка; ω_2' і ω_2'' – дві однакові складові вторинної обмотки; $П, К$ – відповідно початок і кінець обмотки

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Відхилення якоря від середнього положення на деякий кут α спричинить до появи на виході вторинної обмотки диференціального трансформаторного перетворювача напруги $U_{вих} = f(\alpha)$. Причому, якщо якір відхиляється від вихідного положення вправо, то напруга в котушці ω_2'' буде більшою, ніж напруга в котушці ω_2'. В результаті цього $U_{вих} < 0$. Якщо ж якір відхилиться у протилежному напрямку, то напруга в котушці ω_2' буде більшою, ніж в котушці ω_2'', в результаті чого $U_{вих} > 0$.

Отже, $U_{вих}$ змінює свою полярність. Необхідно також підкреслити, що залежність $U_{вих} = f(\alpha)$ є лінійною.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Запитання для самоконтролю

1. Методи вимірювання лінійних та кутових розмірів.
2. Аналіз принципової схеми ємнісного профілеміра.
3. Індуктивні мікрометри-профілеміри.
4. Ємнісний штангенциркуль та його вимірювальне коло.
5. Вимірювання кутових переміщень за допомогою диференціально-трансформаторного перетворювача.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет водного господарства та природокористування

3.2. Вимірювання товщини шару покриття

- Руйнівні та неруйнівні методи вимірювання товщини шару покриття. Залежно від характеру покриття та фізичних властивостей матеріалу деталі застосовують різні методи вимірювань. Всі вони можуть бути розділені на дві групи: з руйнуванням покриття та без його руйнування. Найбільшу групу серед методів неруйнівного контролю становлять електрофізичні методи. Серед них можна назвати вихрострумові, індуктивні, магнітометричні, радіаційні, індукційні та ємнісні.

Вимірювання товщини шару покриття вихрострумовим методом може бути застосоване для вимірювань товщини нанесених на неферомагнітні (кольорові) метали ізоляційних покрить. За способом перетворення товщини у вихідний сигнал розрізняють генераторні (взаємоіндуктивні) та параметричні (індуктивні) вихрострумові перетворювачі. В останніх змінне електромагнітне поле, створюване вимірювальною котушкою, наводить у поверхневому шарі деталі із електропровідного матеріалу вихрові струми. Поле вихрових струмів, взаємодіючи з полем котушки, призводить до зміни її індуктивності L (та відповідно повного електричного опору), які є мірою вимірюваної товщини. Проте цей спосіб через свою недосконалість застосовується мало.

В ряді випадків вимірювань товщини вихрострумовим методом застосовують частотний спосіб отримання вимірювальної інформації. Вимірювальна котушка вмикається в LC– контур генератора високої частоти. Залежно від товщини покриття, а також від інтенсивності взаємодії поля вихрових струмів з вимірювальною котушкою змінюється її індуктивність і тим самим вихідна частота f_x вимірювального автогенератора, наближене значення якої може бути визначено як

$$f_x = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{C_0\left(L_0 - L_{вн}\right)} - \frac{\left(R_0 + R_{вн}\right)^2}{4\left(L_0 - L_{вн}\right)^2}}, \qquad (3.7)$$

де C_0 – ємність резонансного контуру; L_0 та R_0 – відповідно індуктивність та активний опір вихрострумового перетворювача за відсутності досліджуваного об’єкта; $L_{вн}$ та $R_{вн}$ – внесені

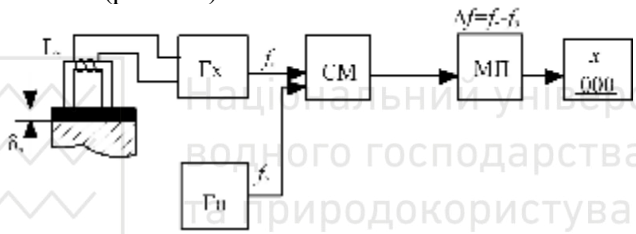
Національний університет
водного господарства
та природокористування

індуктивність і активний опір, зумовлені впливом вихрових струмів у досліджуваному об’єкті.

Найдосконалішою є двогенераторна схема (з вимірювальним та опорним генераторами) з формуванням вихідного сигналу у вигляді різниці частот. На цьому принципі побудований вихрострумовий товщиномір покрить типу "Радон". Він призначений для вимірювання товщини діелектричних покрить, нанесених на струмопровідну основу плоскої, випуклої та увігнутої форм. Прилад має межі вимірювань від 0 до 10 мм та граничну похибку, яка не перевищує 1%.

- <u>Вимірювання товщини покрить на феромагнітних деталях</u>

Для вимірювання товщини покриттів на феромагнітних деталях застосовують вимірювальні засоби з індуктивним первинним перетворювачем (рис. 3.4).



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 3.4. Принципова схема індуктивного товщиноміра

Індуктивний перетворювач ПП за допомогою кабелю з’єднаний з кварцевим генератором Γ_x, вихідна частота f_x якого є функцією індуктивності L_x. Частота f_x та опорна частота f_0 від опорного генератора Γ_0 надходить на вхід суматора СМ, вихідна частота якого Δf дорівнюватиме різниці частот f_x та f_0 $\left(\Delta f = f_x - f_0\right)$. Після лінеаризації функції перетворення за допомогою мікропроцесора МП сигнал надходитиме до цифрового відлікового пристрою, проградуйованого в мікрометрах, з якого і зчитується результат вимірювання товщини δ_K покриття на феромагнітній деталі.

Інформативним параметром такого індуктивного перетворювача є повний електричний опір Z намагнічувального кола або еквівалентна індуктивність цього кола, значення яких є функцією

Національний університет
водного господарства
та природокористування

комплексного магнітного опору Z_M магнітного кола перетворювача:

$$Z = R_0 + \omega \frac{w^2 X_M}{\left(R_M + R_\delta\right)^2 + X_M^2} + j\omega \frac{w^2 \left(R_M + R_\delta\right)}{\left(R_M + R_\delta\right)^2 + X_M^2}, \quad (3.7)$$

де R_0 – активний опір обмотки; w – кількість її витків; R_M та X_M – активна та реактивна складові комплексного магнітного опору Z_M магнітопроводу; R_δ – магнітний опір повітряного проміжку.

Якщо складова X_M, яка відображає втрати на гістерезис та вихрові струми у феромагнетику, мала порівняно з $R_M + R_\delta$, що практично завжди є присутнім в реальних конструкціях перетворювачів, то повний електричний опір можна записати у вигляді

$$Z = R_0 + \omega \frac{w^2 X_M}{\left(R_M + R_\delta\right)^2} + j\omega \frac{w^2 \left(R_M + R_\delta\right)}{\left(R_M + R_\delta\right)^2} = \\ = R_0 + \Delta R_{екв} + j\omega L_{екв}, \quad (3.8)$$

де $\Delta R_{екв} = \omega \frac{w^2 X_M}{\left(R_M + R_\delta\right)^2}$ – приріст еквівалентного електричного опору; $L_{екв} = \frac{w^2}{R_M + R_\delta}$ – еквівалентна індуктивність намагнічувального кола.

Враховуючи, що $R_M = \rho_M \frac{l_M}{S_M}$, а $R_\delta = \delta / \mu_0 S_\delta$ (при тому коли площі поперечного перерізу магнітопроводу та повітряного проміжку однакові, $S_M = S_\delta$), то еквівалентна індуктивність $L_{екв}$ дорівнюватиме

$$L_{екв} = \frac{w^2 \mu_0 S_M}{\rho_M \mu_0 l_M + \delta}. \quad (3.9)$$

Національний університет
водного господарства

Неважко переконатись, що зміна індуктивнсті $L_{екв}$, викликана зміною повітряного проміжку на величину $\Delta\delta$, буде дорівнювати

$$\Delta L = \frac{w^2 \mu_0 S_M}{\rho_M \mu_0 l_M + \delta}\left(1 - \frac{\rho_M \mu_0 l_M + \delta}{\rho_M \mu_0 l_M + \delta + \Delta\delta}\right). \qquad (3.10)$$

При невеликих δ, коли магнітний опір магнітопроводу значно менший за магнітний опір повітряного проміжку (коли правомірно вважати, що $\rho_M \mu_0 l_M << \delta$), еквівалентна індуктивність $L_{екв}$ дорівнюватиме

$$L_{екв} = \frac{w^2 \mu_0 S_M}{\delta}, \qquad (3.11)$$

а її зміна ΔL визначиться як

$$\Delta L \approx L_{екв} \frac{\Delta\delta}{\delta + \Delta\delta}. \qquad (3.12)$$

Отже, функція перетворення індуктивного перетворювача зі змінною величиною повітряного проміжку $Z = f(\Delta\delta)$ чи $L_{екв} = F(\Delta\delta)$, є нелінійною (рис. 3.5).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

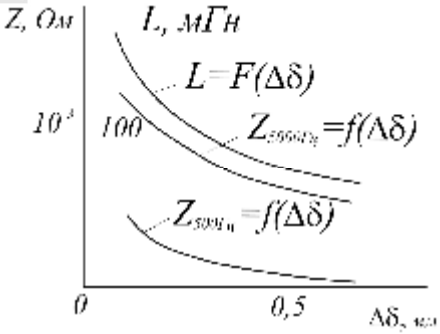


Рис. 3.5. Графічне зображення функції перетворення індуктивного перетворювача

Характер зміни $Z = f(\Delta\delta)$ залежить від частоти намагнічувального струму. Для низьких частот, коли індуктивний опір $\omega L_{екв}$ стає близьким величині активного опору R_0 обмотки, відносна зміна повного електричного опору суттєво зменшується.

Національний університет водного господарства та природокористування

Індуктивний перетворювач зі змінною величиною повітряного проміжку можна вважати практично лінійним перетворювачем лише при малих відносних змінах довжини цього проміжку $\Delta\delta / \delta$. В реальних конструкціях таких перетворювачів при $\Delta\delta / \delta = 0{,}1...0{,}15$ відносна зміна індуктивності не перевищує $0{,}05...0{,}1$ при нелінійності функції перетворення $1...3\%$.

- <u>Вимірювальні кола індуктивних товщиномірів</u>

Вимірювальні кола індуктивних вимірювачів товщини покрить можуть бути різноманітними.

Здебільшого застосовують мостові вимірювальні кола з індуктивним перетворювачем, розміщеним на деталі з покриттям, та компенсаційним перетворювачем, розміщеним на аналогічній деталі без покриття. Використання компенсаційного перетворювача, увімкненого у сусіднє плече моста, дає змогу усунути вплив зовнішніх чинників, зокрема температури, на результат вимірювань.

Національний університет водного господарства та природокористування

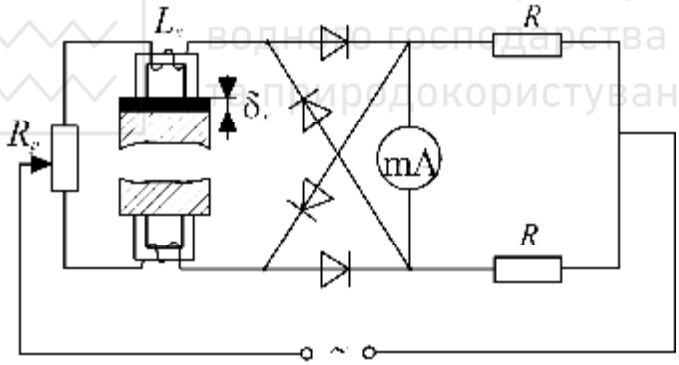


Рис. 3.6. Мостова схема індуктивного товщиноміра

У мостовій схемі (рис. 3.6) індикатором вимірюваної величини є магнітоелектричний мілівольтметр, увімкнений до виходу фазочутливої кільцевої схеми випрямлення. Резистор R_p змінного опору призначений для встановлення нульового показу мілівольтметра при нульовому чи заданому значенні вимірюваної товщини.

Похибка вимірювання товщини покриття із застосуванням

Національний університет водного господарства та природокористування

індуктивних перетворювачів доходить до 10%.

Із неруйнівних методів доцільно зупинитись ще на методі, заснованому на застосуванні взаємоіндуктивних перетворювачів, вихідним інформативним параметром яких є ерс e_2, наведена у вимірювальній обмотці (рис. 3.7).

$$e_2 = \omega w_2 \Phi = \omega w_2 \frac{I_1 w_1}{Z_M} \approx \frac{\omega w_1 w_2 I_1}{2\delta / \left(\mu_0 S\right)}, \qquad (3.13)$$

де w_1 та w_2 – кількість витків намагнічувальної та вимірювальної обмоток; I_1 – намагнічувальний струм; S – площа поперечного перерізу магнітопроводу; δ – товщина покриття**;** $Z_M = \left(R_M + R_{M\delta}\right) + jX_M \approx R_{M\delta}$ – комплексний магнітний опір магнітопроводу (тут X_M та R_M – реактивна та активна складові комплексного магнітного опору магнітопроводу, які є значно меншими за магнітний опір покриття, $R_{M\delta} = \dfrac{2\delta}{\mu_0 S}$**).**

Національний університет водного господарства та природокористування

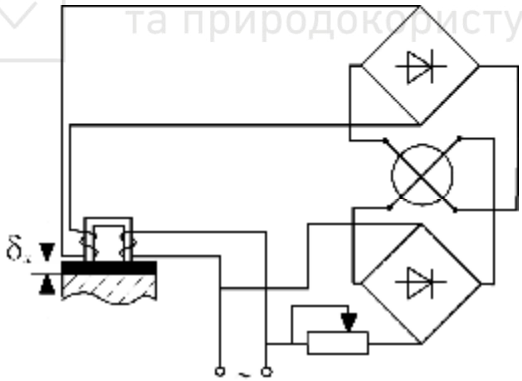


Рис. 3.7. Вимірювач товщини гальванічного покриття

На основі такого методу створено прилади для вимірювань товщини покриття в межах до 3 мм з похибкою 10... 15%.

Серед методів руйнівного контролю найпоширенішим є хімічний метод, який грунтується на усуненні покриття за допомогою спеціальних хімічних реактивів. За цим методом мірою товщини

Національний університет
водного господарства
та природокористування

покриття може бути час усунення покриття або його маса чи різниця між масою покритої деталі та масою деталі після усунення покриття.

Запитання для самоконтролю

1. Руйнівні та неруйнівні методи вимірювання товщини шару покриття на деталях.
2. Аналіз принципової схеми індуктивного товщиноміра.
3. Функція перетворення індуктивного перетворювача із змінним повітряним зазором.
4. Вимірювальні кола індуктивних товщиномірів.
5. Вимірювач товщини гальванічного покриття.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет водного господарства та природокористування

3.3. Вимірювання відстані між об’єктами

- Методи вимірювання відстані між об’єктами

Найточнішими методами вимірювань відстаней між об'єктами є спектрометричні методи, зокрема локаційний метод, заснований на вимірюванні часу проходження вимірюваної відстані променем, швидкість якого відома і залишається незмінною під час вимірювання. Практично для реалізації локаційного методу можна використати всі види випромінювань, але найпоширенішими є методи та засоби радіолокації, оптичної та акустичної локації. Локаційний метод, що грунтується на застосуванні звукових та ультразвукових хвиль, називають ехо-звуковим.

У локаційних засобах джерело випромінювання та приймач знаходяться на одній межі вимірюваного розміру, а на іншій межі – спеціальний відбивач або замість останнього використовується межа об'єкта, відстань до якого визначається.

Радіолокаційний та оптичний локаційний методи застосовуються для вимірювань великих відстаней – від десятків та сотень метрів до багатьох мільйонів кілометрів.

Акустична локація застосовується в твердих, рідких та газоподібних середовищах для вимірювань розмірів та відстаней від одиниць міліметрів до декількох кілометрів, тобто в діапазоні, в якому застосування радіо- та оптичної локації ускладнено через необхідність вимірювати дуже малі часові інтервали ($10^{-9}...10^{-11}$ с). Це зумовлено великою швидкістю розповсюдження електромагнітних хвиль або внаслідок швидкого загасання електромагнітних коливань в рідких та твердих середовищах.

Швидкість розповсюдження звукових та ультразвукових хвиль в повітрі дорівнює 333 м/с, в морській воді 1500 м/с, а в металах 3000...10 000 м/с. Це на 4...6 порядків менше від швидкості розповсюдження електромагнітних коливань, що дозволяє застосовувати акустичну локацію для вимірювання малих відстаней.

Інформація про відстань до контрольованого тіла, точніше до деякої відбиваючої зони, що належить поверхні контрольованого тіла, визначається часовим запізненням прийнятого сигналу, відносно випроміненого. Приблизно таким же чином кажани

орієнтуються в просторі. Вони випромінюють вперед направлений пучок ультразвукових коливань і приймають відбитий сигнал. Звукові хвилі розповсюджуються в повітрі з відомою швидкістю, тому за затриманням надходження відбитого сигналу можна судити про те, на якій відстані знаходиться предмет, який відбив звук.

- Акустична локація

Ультразвуковий далекомір (віддалемір) проводить вимірювання відстані до контрольованого тіла за схемою ехо-локації (рис. 3.8).

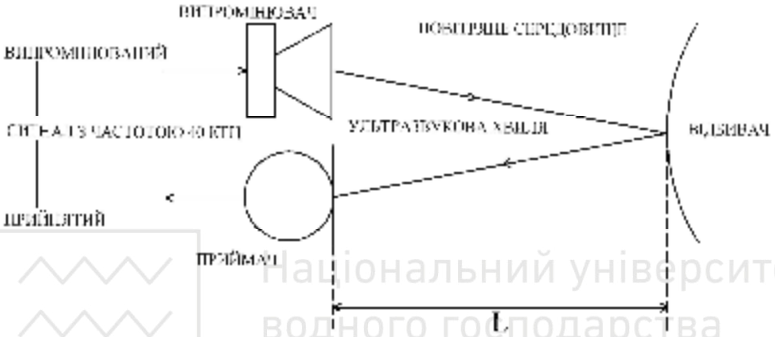


Рис. 3.8. Схема дії ультразвукового далекоміра, який працює за принципом ехо-локації

Часова діаграма ехо-локаційного вимірювального засобу наведена на рис. 3.9.

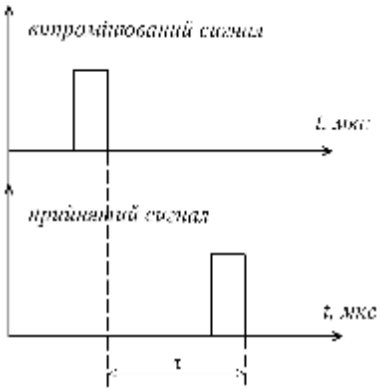


Рис. 3.9. Часова діаграма ехо-локаційного засобу: τ – час проходження ультразвукового променя від випромінювача до приймача

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Для вимірювання відстані L ($L = \tau v / 2$, де v – швидкість ультразвукового променя) в повітряному середовищі застосовуються п'єзокерамічні перетворювачі, що працюють на частоті 40 кГц. Два п'єзокерамічні перетворювачі (випромінюваний і приймальний) підібрані так, щоб резонансна частота випромінювання першого перетворювача співпадала з резонансною частотою другого перетворювача.

Перевагами застосування таких перетворювачів в повітряному середовищі є: простота випромінювання і прийому коливань, компактність, висока стійкість до шумового, хімічного і оптичного забруднення навколишнього середовища, можливість роботи в агресивних середовищах при високому тиску, можливість значного віддалення вторинної апаратури від місця вимірювань, тривалий термін служби, простота у використанні, порівняно мала вартість, нечутливість до електромагнітних перешкод, висока надійність, несприйнятність органів слуху людини до ультразвука частотою 40 кГц тощо.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Прикладами застосування ультразвукового далекоміра є: контроль дистанції між автотранспортом при його русі в умовах недостатньої видимості, вимірювання рівня заповнення резервуарів рідкою речовиною, рівня завантаження бункерів або кузовів автомобілів сипким або роздробленим матеріалом, контроль розмірів продукції, вимірювання дистанції від борту судна до причальної стінки тощо.

Розглянемо можливу схему і принцип дії ультразвукового віддалеміра (рис. 3.10, рис. 3.11).

При увімкненні живлення та виборі функції вимірювання відстані з допомогою відповідних кнопок кнопочного пульта КП (рис. 3.10) (на дисплеї вибирається функція Volume (рис. 3.11)) і відбувається процес вимірювання, тобто мікроконтролер МК (рис. 3.10) за програмою подає імпульс на блок випромінення, де він підсилюється і подається на пє'зоперетворювач ПВ, що випромінює ультразвуковий сигнал частотою 40 кГц. Відбитий сигнал приймається п'єзоприймачем ПП і підсилюється високочастотним трикаскадним транзисторним підсилювачем до необхідного рівня, оскільки амплітуда прийнятого сигналу внаслідок поглинання повітрям значно менша від випромінюваного. Піковий детектор виділяє із високочастотного прийнятого і

Національний університет
водного господарства
та природокористування

підсиленого сигнала імпульс вимірювання.

Оскільки в процесі вимірювання випромінений сигнал відбивається не тільки від поверхні, до якої необхідно виміряти віддаль, але й від інших навколишніх поверхонь, то для виділення інформативного сигналу після детектора вмикають компаратор. Компаратор відсікає багатократно відбиті сигнали від основного і на його виході з'являється рівень сигналу, подібний до логічного (до 5 В). Цей логічний сигнал надходить до мікроконтролера МК, який запускає програму для обробки процесу вимірювання і відображення результату в рядку 1 на дисплеї віддалеміра (рис. 3.11).

Крім вимірювання віддалей, ультразвуковий віддалемір може обраховувати площу та об'єм різноманітних об'єктів.

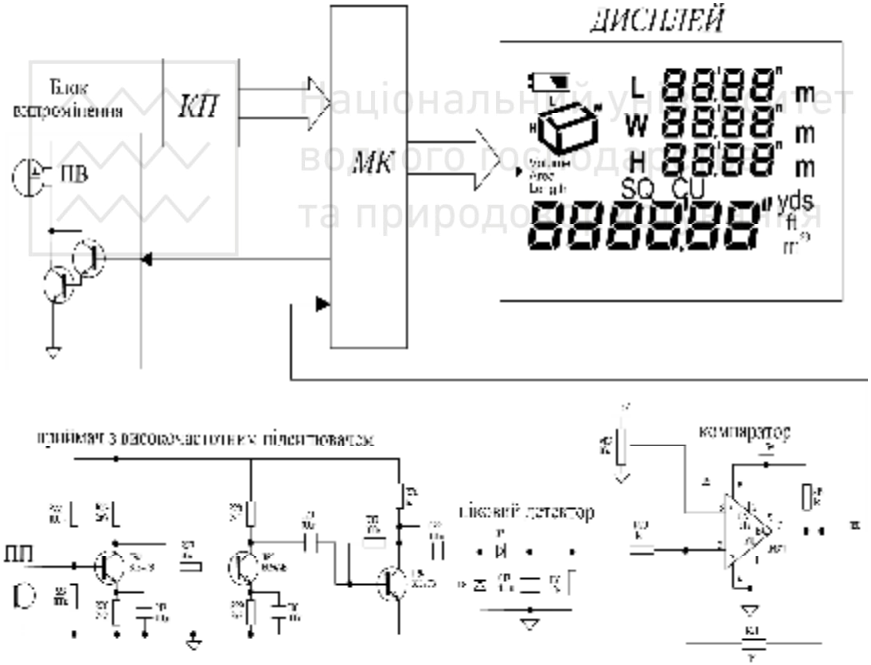


Рис. 3.10. Схема ультразвукового віддалеміра:
ПП – п'єзоприймач, ПВ – п'єзовипромінювач,
КП – кнопочний пульт, МК – мікроконтролер

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 3.11. Дисплей ультразвукового віддаленіра у збільшеному вигляді:
1 – рядок індикації результуючого вимірювання, 2 – покази режиму вимірювання, 3 – індикатор стану джерела живлення, 4 – позначення сторін об'єкта при вимірюванні площі і об'єму, 5 – рядок індикації віддалі L (при першому вимірюванні), 6 – рядок індикації ширини W (при другому вимірюванні), 7 – рядок індикації висоти H (при третьому вимірюванні), 8 – одиниці вимірювання

- Оптична локація

Є два основні способи реалізації локаційного методу: імпульсний та модуляційний (фазовий). В першому способі застосовується випромінювання у вигляді коротких імпульсів, а в другому – безперервне модульоване випромінювання, фаза якого містить інформацію про вимірювану відстань. На рис. 3.12 наведені спрощені принципові схеми оптичних локаційних світловіддалемірів, основаних на використанні імпульсного (рис. 3.12, а) та модульованого (рис. 3.12, б) випромінювань.

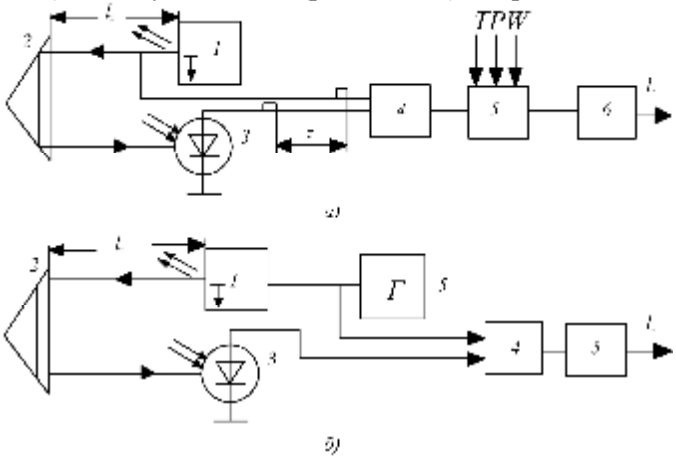


Рис. 3.12. Спрощені схеми оптичних локаційних світловіддалемірів на основі імпульсного (а) та модульованого (б) випромінювань

Національний університет водного господарства та природокористування

В імпульсних локаторах випромінювання у вигляді короткого імпульсу від джерела випромінювання – лазера 1 спрямовується на об'єкт 2, відстань до якого вимірюється. Відбитий від об'єкта імпульс приймається оптоелектронним чутливим елементом 3. Інтервал часу, протягом якого імпульс проходить подвійну вимірювану відстань, визначається вимірювачем інтервалів часу 4. Якщо відома швидкість v розповсюдження променя, то вимірювана відстань l_x визначається за допомогою обчислювального пристрою 5 за відомою формулою $l_x = \tau v / 2$ і безпосередньо відраховується відліковим пристроєм 6.

Швидкість розповсюдження електромагнітного випромінювання, зокрема оптичного, в повітряному середовищі визначається за формулою $v = c / n$, де $c = 299\,792\,458$ $м/с$ – швидкість світла у вакуумі; n – показник заломлення світла в середовищі, який залежить від його температури, тиску та вологості.

У сучасних високочастотних світловіддалемірах одночасно з вимірюванням відстаней здійснюються допоміжні вимірювання метеорологічних параметрів середовища (температури T, тиску p та вологості W) в декількох точках вздовж вимірюваної відстані, результати яких вводяться в мікропроцесор 5 для уточнення значення швидкості світла в даному середовищі в момент вимірювання відстані. Цей спосіб надзвичайно трудомісткий і використовується лише при дуже точних метрологічних вимірюваннях відстаней до декількох кілометрів, наприклад, в установках для відтворення одиниці довжини на ділянці 50... 1000 м.

Інший спосіб уточнення швидкості світла у цьому середовищі полягає у використанні двохвильового дисперсійного методу, при якому показник заломлення n визначають, вимірюючи відстані при двох різних довжинах хвиль із застосуванням двочастотного лазера. Цей спосіб використовується в світловіддалемірах для точних вимірювань великих відстаней (до сотень км).

У фазових (модуляційних) локаційних віддалемірах (рис. 3.12, б) використовується неперервне випромінювання лазера 1, модульоване за інтенсивністю синусоїдним сигналом з частотою f_M від генератора 5. Як інформативний параметр для визначення

Національний університет
водного господарства
часу проходження променем подвійної вимірюваної відстані l_x приймається кут фазового зсуву між напругою на виході приймача випромінювання 3 та модулювальною напругою, який вимірюється за допомогою фазометра 4 і здійснюється на частоті модуляції:

$$\varphi_\tau = 2\pi N + \Delta\varphi = \omega_M t_2 - \omega_M t_1 = 2\pi f_M \left(t_2 - t_1\right) = 2\pi f_M \tau \,, \quad (3.14)$$

де $\omega_M t_1$ та $\omega_M t_2$ – фази коливань відповідно в моменти часу t_1 та t_2; N – повна кількість фазових циклів; $\Delta\varphi$ – кут фазового зсуву в границях неповного фазового циклу; f_M – частота генератора.

Вимірювана відстань визначається в обчислювальному пристрої 5 за формулою

$$l_x = \frac{v}{2}\tau = \frac{v}{2}\frac{\varphi_\tau}{2\pi f_M} = \frac{v}{2f_M}\left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right) = \frac{c}{2nf_M}\left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right). \quad (3.15)$$

Отже, при вимірюваннях фазовими локаційними віддалемірами відстаней, більших від половини довжини хвилі модуляційного сигнала, необхідно визначити повну кількість фазових циклів і кут фазового зсуву в границях неповного (останнього) циклу. Частота модуляції лежить, звичайно, в межах від 10 до 100 МГц.

За допомогою оптичної локації та лазерів відстань від Землі до відбивачів, установлених на Місяці, була визначена з точністю до 2...6 см, тобто з похибкою, меншою за $2 \cdot 10^{-8}\,\%$.

Для вимірювання малих відстаней (від метра до долі мікрометра) застосовують лазерні інтерферометри.

На рис. 3.13 представлено лазерний прилад для вимірювання переміщення деталей.

Лазер випромінює світловий потік Φ, який поділяється на два потоки Φ_1 і Φ_2 за допомогою напівпрозорого нахиленого дзеркала 4. Потік Φ_1, відбиваючись від дзеркала 4, а потім від дзеркала 5, попадає на фотоелемент 3. Потік Φ_2 проходить через дзеркало 4, відбивається від об’єкта 1, потім від дзеркала 4 і попадає на фотоелемент 3. У фотоелементі 3 потоки складаються.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

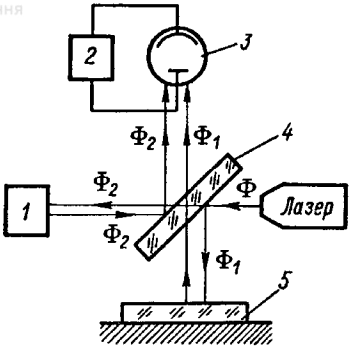


Рис. 3.13. Лазерний прилад для вимірювання переміщення деталей

При зміні відстані до об'єкта інтенсивність сумарного потоку буде змінюватись, що викликає модуляцію фотоструму. Число підрахованих за допомогою лічильника 2 періодів k фотоструму і переміщення деталі на відстань L_x пов'язані співвідношенням

$$L_x = k\lambda / 2, \qquad (3.16)$$

де λ – довжина хвилі світла ($\lambda = const$).

При зміні відстані до 1м похибка становить 0,1-1,0 мкм.

Запитання для самоконтролю

1. Методи вимірювання відстані між об'єктами.
2. Акустична локація.
3. Аналіз принципової схеми ультразвукового віддалеміра.
4. Оптичні локаційні віддалеміри на основі імпульсного та модульованого випромінювань.
5. Лазерний прилад для вимірювання переміщення деталей.

Національний університет водного господарства та природокористування

4. Вимірювання тиску

4.1. Загальні відомості. Рідинні прилади для вимірювання тиску

Тиск є важливим параметром хіміко-технологічних процесів, який суттєво впливає на характер і хід їхнього протікання та стан й режим роботи обладнання.

Під тиском розуміють відношення сили, яка діє перпендикулярно деякій поверхні тіла до площі цієї поверхні.

Розрізняють наступні різновиди тиску: атмосферний (p_δ), абсолютний (p_a), надлишковий (p_H) та вакуум, або розрідження ($p_в$).

Атмосферний (барометричний) тиск – це тиск, який зумовлений масою (вагою) повітряного стовпа земної атмосфери.

Абсолютний (вимірювальний) тиск є параметром стану речовини, наприклад, рідин, газів чи пари.

Надлишковий тиск визначається як різниця між абсолютним і атмосферним тисками ($p_H = p_a - p_\delta$).

Про вакуум (розрідження) кажуть у випадку, коли $p_a < p_\delta$. Його числове значення знаходиться як різниця між барометричним і абсолютним тисками ($p_в = p_\delta - p_a$).

В Міжнародній системі одиниць (СІ) за одиницю тиску прийнято паскаль (Па). Це тиск, що зумовлений силою один ньютон (1 Н), яка рівномірно розподілена по поверхні площею $1 м^2$ ($Па = \frac{Н}{м^2}$).

На практиці, поряд з системною одиницею тиску Па знайшли своє застосування і позасистемні одиниці, а саме: бар, міліметр ртутного стовпа (мм рт.ст.), кілограм-сила на квадратний сантиметр ($кг \cdot с / см^2$), кілограм-сила на квадратний метр ($кг \cdot с / м^2$) та міліметр водного стовпа (мм вод.ст.).

Для наближених розрахунків можна прийняти наступні співвідношення:

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$1\,ат = 1\,кг \cdot с / см^2 = 10^4\,кг \cdot с / м^2 = 0{,}97\,атм = 0{,}98 \cdot 10^3\,мбар =$$

$$= 0{,}98\,бар = 10^4\,мм\,вод.ст. = 10\,м\,вод.ст. = 735\,мм\,рт.ст. =$$

$$= 0{,}98 \cdot 10^5\,Па = 98\,кПа = 0{,}098\,МПа,$$

де $1\,ат$ – технічна атмосфера; $1\,атм$ – фізична атмосфера.

Класифікація засобів для вимірювання тиску

Засоби для вимірювання тиску класифікуються за принципом їхньої дії та родом вимірювальної величини.

За принципом дії їх можна розділити на:

- рідинні, дія яких грунтується на врівноваженні тиску, що вимірюється за допомогою гідростатичного тиску стовпа рідини (межі вимірювання від 10^{-2} до 10^6 Па);
- деформаційні, які вимірюють тиск за величиною деформації пружних елементів, або за силою, яку вони розвивають (межі вимірювання від 1 до 10^9 Па);
- електричні, в яких тиск перетворюється у відповідну електричну величину або під його дією змінюються електричні властивості матеріалів (межі вимірювання від 10^9 до 10^{11} Па).

За видом вимірювальної величини розрізняють:

- манометри – прилади для вимірювання абсолютного і надлишкового тисків;
- вакуумметри – прилади для вимірювання вакууму (розрідження) абсолютних тисків не менше 200 Па;
- мановакуумметри – прилади для вимірювання надлишкового тиску і вакууму;
- напірметри (мікроманометри) – прилади для вимірювання малих надлишкових тисків (до 40 кПа);
- тягометри (мікроманометри) – прилади для вимірювання малих тисків і розріджень (з діапазоном вимірювання від +20 до –20кПа);
- диференціальні манометри – прилади для вимірювання різниці двох тисків;
- барометри – прилади для вимірювання атмосферного тиску.

За галуззю застосування розрізняють:

- технічні (застосовують в промислових умовах);

- лабораторні (є підвищеної точності і застосовуються в лабораторних умовах);
- зразкові – для повірки технічних і лабораторних вимірювальних засобів;
- еталонні – для збереження одиниць тиску і передачі останніх зразковим засобам;
- спеціальні (застосовуються в нестандартних умовах).

За типом відображення результатів вимірювання поділяються на:

- показуючі (з аналоговою або цифровою шкалою);
- сигналізуючі (виробляють керуючий електричний сигнал при досягненні встановленого контрольованого значення тиску);
- реєструючі (записують у пам'ять зміну тиску в часі і відображають його значення на електронному табло).

Для забезпечення вимог сучасної автоматизації технологічних процесів створюються і дістають подальшого розвитку різні вимірювальні перетворювачі тиску (ВПТ), наприклад:

- деформаційні (перетворення переміщення пружнього чутливого елемента в електричний або електромагнітний сигнал);
- електричні (під дією вимірювального тиску на чутливий елемент змінюються його електричні параметри: електричний опір, індуктивність, ємність чи електричний заряд).

В останні роки розроблено нові принципи створення ВПТ: волоконнооптичні, гальваномагнітні, акустичні, дифузійні тощо.

Щодо вихідного сигналу, усі ВПТ можуть бути розділені на аналогові (з аналоговим уніфікованим пневматичним або електричним сигналом) і цифрові.

В наш час найбільшого розповсюдження набули аналогові ВПТ з уніфікованим струмовим сигналом 0…5 мА, 0…20 мА та 4…20 мА, проте вже досить чітко проглядаються контури переходу до ВПТ з цифровим виходом. При цьому бурхливого розвитку набуває інтеграція первинних перетворювачів з різновидами промислових мереж, наприклад, Foundation Fieldbus, Modbus, Profibus тощо.

Необхідно також підкреслити, що межі вимірювання тиску сучасними вимірювальними засобами надзвичайно великі від 10^{-12} до 10^{11} Па.

Національний університет водного господарства та природокористування

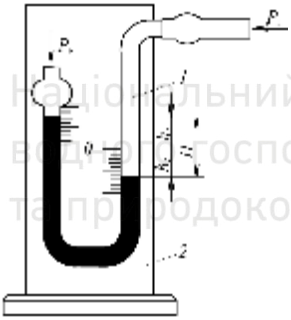
Нижче розглянуто найбільш розповсюджені засоби вимірювання тиску.

Рідинні прилади для вимірювання тиску

Дані прилади відрізняються простотою конструкції і порівняно високою точністю вимірювання. Вони застосовуються в якості лабораторних і технічних вимірювальних засобів тиску. Принцип їхньої дії, як вже зазначалось, грунтується на врівноваженні вимірювального тиску або розріджень тиском стовпа рідини.

Прилади видимого рівня

U-подібний манометр (рис. 4.1) представляє собою конструкцію, яка складається з скляної U-подібної трубки 1, заповненої рідиною (підфарбований спирт або ртуть) і шкали, які закріплені на стойці 2.



Національний університет водного господарства та природокористування

Рис. 4.1. Двотрубний U-подібний манометр:
1 – скляна U-подібна трубка з робочою рідиною; 2 – стойка

Один кінець трубки (відкритий) знаходиться під дією атмосферного тиску p_δ, а інший – під дією вимірювального тиску p_a досліджуваного об'єкта. Якщо $p_a > p_\delta$, то рідина перетікатиме із правої частини U-подібної трубки у ліву доти, поки вимірюваний тиск p_a не врівноважиться гідростатичним тиском стовпа рідини висотою H.

Аналітично це можна представити наступним чином

$$p_a S = p_\delta S + HSg\left(\rho - \rho_1\right), \qquad (4.1)$$

де S – площа поперечного перерізу U-подібної трубки ($м^2$); H –

Національний університет водного господарства та природокористування

висота стовпа рідини ($м$); g – прискорення сили земного тяжіння ($м/с^2$); ρ і ρ_1 – відповідно густина рідини в U-подібній трубці і речовини, що знаходиться над нею ($кг/м^3$). Звідси тиски p_a і p_δ вимірюються в паскалях (Па).

Оскільки, як зазначалось вище, $p_a - p_\delta = p_H$, то вираз (4.1) можна переписати наступним чином

$$p_H = Hg\left(\rho - \rho_1\right). \tag{4.2}$$

Якщо в манометрі над робочою рідиною знаходиться газ, то щільністю ρ_1 можна знехтувати.

Тоді

$$p_H = Hg\rho. \tag{4.3}$$

Звідси видно, що висота H стовпа рідини в манометрі відповідає величині надлишкового тиску p_H.

Національний університет водного господарства та природокористування

Визначивши із (4.3) значення p_H і враховуючи, що величина тиску p_δ відома, можна знайти абсолютний тиск p_a ($p_a = p_H + p_\delta$) в досліджуваному об'єкті.

Якщо тиск в досліджуваному об'єкті буде меншим за атмосферний $p_a < p_\delta$, то в цьому випадку висота стовпа рідини відповідатиме величині розрідження (вакууму).

При під'єднанні вільних кінців манометра до об'єктів з різним значенням абсолютного тиску, величина цієї різниці визначатиметься за різницею рівнів рідини в U-подібній трубці.

У випадку, коли даний манометр наповнений рідиною до нульової відмітки шкали, для визначення висоти стовпа рідини необхідно зробити два відліки: зменшення рівня рідини в одному коліні і підвищення рівня у другому коліні, після чого виміряні величини просумувати.

<u>Однотрубний прилад</u>. Даний різновид манометра отримав назву «чашечний» і являється модифікацією двотрубного U-подібного манометра, представленого на рис. 4.1. Один кінець його виконано у вигляді широкої чашкоподібної посудини 1, з'єднаної з об'єктом, де вимірюється тиск, діаметр якої перевищує діаметр вертикальної скляної трубки 2, що з'єднана з атмосферою (рис. 4.2).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

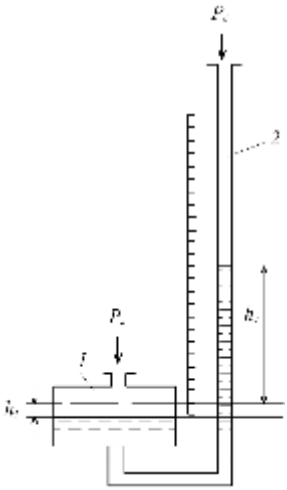


Рис. 4.2. Чашечний манометр:
1 – чашка; 2 – трубка

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Оскільки площа поперечного перерізу чашки S більша за площу поперечного перерізу трубки s (на практиці приймається $S \leq 400s$), то при вимірюваннях рівень h_1 рідини в чашці буде набагато меншим за рівень h_2 рідини в трубці, у зв'язку з чим першим можна знехтувати. Виходячи з цього, надлишковий тиск для чашечних манометрів визначається як

$$p_H = p_a - p_\delta = h_2 g\left(1 + \frac{s}{S}\right)\left(\rho - \rho_1\right). \qquad (4.4)$$

<u>Прилади без видимого рівня (поплавкові, кільцеві та «колокольні»)</u>

- <u>Поплавкові дифманометри</u>

Поплавкові дифманометри представляють собою U-подібні рідинні прилади, у яких одне з колін розширено і в ньому розміщено поплавок, який зв'язаний із стрілкою, що переміщується відносно шкали. Дані прилади призначені для вимірювання різниці тисків.

На рис. 4.3 наведено схему поплавкового дифманометра.

Якщо в лівій порожнині тиск p_1, а в правій p_2, то при $p_1 > p_2$

Національний університет
водного господарства
та природокористування

рівень рідини в лівій порожнині зменшиться на висоту h_2, а в правій порожнині збільшиться на висоту h_1.

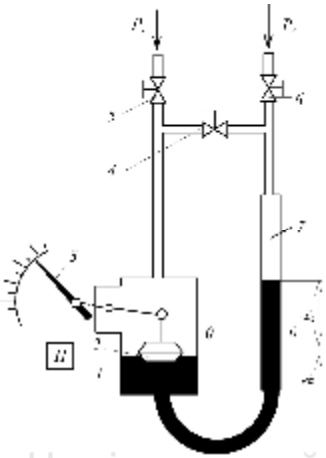


Рис. 4.3. Схема поплавкового дифманометра:
1 і 7 – більша і менша посудини; 2 – поплавок;
3 – покажчик; 4, 5, 6 – вентилі

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Різниця тисків $p_1 - p_2$ врівноважується стовпом рідини висотою H.

$$H = h_1 + h_2 . \tag{4.5}$$

Умова рівноваги аналітично запишеться так

$$p_1 - p_2 = Hg\left(\rho - \rho_1\right), \tag{4.6}$$

де g – місцеве прискорення вільного падіння; ρ і ρ_1 – відповідно густини робочої рідини і середовища, що вимірюється.

Для посудин циліндричної форми можна записати $h_2 \pi D^2 / 4 = h_1 \pi d^2 / 4$, де D і d – відповідно діаметри лівої і правої посудин приладу.

З останнього виразу маємо

$$h_1 = h_2 D^2 / d^2 . \tag{4.7}$$

Тоді з (4.5) і (4.7) випливає, що

$$H = h_2\left(1 + D^2 / d^2\right). \tag{4.8}$$

Національний університет водного господарства та природокористування

Підставивши в (4.6) із (4.8) замість H його значення, отримаємо

$$p_1 - p_2 = h_2 g\left(1 + D^2 / d^2\right)\left(\rho - \rho_1\right). \qquad (4.9)$$

Для даного приладу вирази $1 + D^2 / d^2$ та $\rho - \rho_1$ є постійними, тому їх можна представити через постійні коефіцієнти, відповідно як k та k_1.

Виходячи із цього, (4.9) перепишеться наступним чином

$$p_1 - p_2 = kk_1 h_2 \qquad (4.10)$$

або

$$\Delta p = kk_1 h_2 . \qquad (4.11)$$

З (4.11) видно, що різницю тисків Δp можна виразити величиною переміщення h_2 поплавка. Це вказує на те, що шкала такого приладу є рівномірною.

Поплавкові дифманометри застосовуються при статичних тисках вимірювального середовища не більше ніж 25 МПа. Клас точності цих приладів 1,0 та 1,5.

Для передачі на відстань інформації про значення вимірюваного перепаду тиску Δp, зазначені дифманометри оснащено (рис. 4.3) перетворювачами П переміщення покажчика 3 в уніфікований сигнал (електричний чи пневматичний) вимірювальної інформації.

- Кільцеві прилади призначені для вимірювання малих тисків, розріджень та різниці тисків. Кільцевий прилад показано на рис. 4.4.

Прилад складається з порожнинного замкненого кільця 1, розділеного перегородкою 2. Кільце підвішене на ножовій опорі 3 в її геометричному центрі. Патрубки 4 і 5 призначені для з'єднання кільця з порожниною, в якій вимірюється тиск або розрідження. До нижньої частини кільця прикріплено противагу 6. Порожнина кільця на половину заповнена рідиною (вода, масло, ртуть).

При з'єднанні обох порожнин кільця з об'єктами, в яких тиск дорівнює p_1 і p_2 (причому $p_1 > p_2$), рівень рідини в лівій половині кільця знижується, а в правій відповідно підвищується. Різниця рівнів h пропорційна різниці тисків

$$p_1 - p_2 = h\rho g , \qquad (4.12)$$

Національний університет
водного господарства
та природокористування

де ρ – густина рідини, яка заповнює кільце.

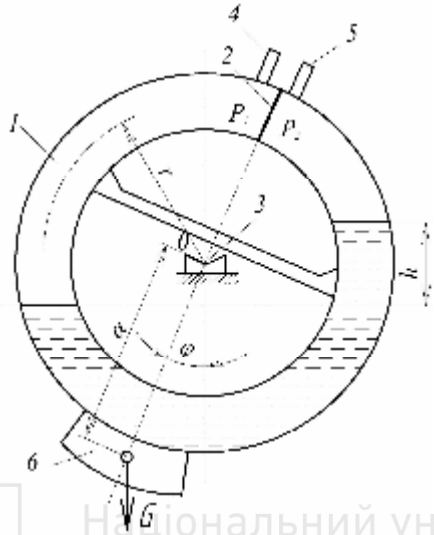


Рис. 4.4. Принципова схема кільцевого дифманометра

Водночас сила від різниці тисків $p_1 - p_2$, яка діятиме на перегородку, створює обертовий момент M_o

$$M_o = \left(p_1 - p_2\right) sr, \tag{4.13}$$

де s – площа поперечного перерізу перегородки; r – середній радіус кільця.

Протидіючий момент $M_П$ визначиться як

$$M_П = Ga \sin\varphi, \tag{4.14}$$

де G – сила дії противаги; a – плече; φ – кут повороту кільця.

При врівноваженні обох моментів ($M_o = M_П$) можна записати, що

$$p_1 - p_2 = \frac{Ga}{sr} \sin\varphi. \tag{4.15}$$

Оскільки $G = const$; $a = const$; $s = const$; $r = const$, то отримаємо

$$\Delta p = K \sin\varphi, \tag{4.16}$$

Національний університет
водного господарства
та природокористування

де $\Delta p = p_1 - p_2$; $K = \dfrac{Ga}{sr}$.

Із (4.16) видно, що вимірюваний перепад тисків Δp прямопропорційний синусу кута повороту кільця приладу. Звідси випливає, що шкала кільцевого дифманометра є нерівномірною.

Прилади кільцевого типу виготовляються показуючими, показуючо-самопишучими та з дистанційною передачею результатів вимірювання.

Дані прилади з водяним і масляним заповнювачами призначені для роботи з надлишковим тиском 49 кПа, а із ртутним заповнювачем – в межах від 980 до 9800 кПа. Клас точності даних дифманометрів становить 1,0 і 1,5.

- «Дзвінкові» дифманометри. Дифманометри цього типу представляють собою дзвін, що знаходиться в робочій рідині і переміщується під впливом різниці тисків. Протидіюча сила створюється за рахунок збільшення ваги дзвону при його підйомі і зменшення ваги при його опусканні. Це досягається за рахунок зміни гідростатичної підйомної сили, що діє на дзвін згідно закону Архімеда.

Принцип дії «дзвінкового» дифманометра пояснюється на рис. 4.5, а і б.

Якщо тиски у вимірювальних камерах 2 і 3 рівні між собою, то «колокол» 1 знаходиться у положенні, показаному на рис. 4.5, а. Якщо утворюється відповідний перепад тиску $p_1 - p_2$, то він почне підніматися. Піднімання проходитиме доти, поки зміна підйомної сили від перепаду тиску на «дзвоні» і зміна гідростатичної підйомної сили не врівноважаться.

Рівняння статичної характеристики даного дифманометра має вигляд

$$H = \frac{f}{\Delta f g\left(\rho - \rho_1\right)}\left(p_1 - p_2\right), \qquad (4.17)$$

де H – величина переміщення «дзвону»; Δf – площа поперечного перерізу стінок «дзвона»; ρ і ρ_1 – густина робочої рідини і вимірюваного середовища; f – внутрішня площа поперечного перерізу «дзвона».

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Оскільки f, Δf, g, ρ, ρ_1 є величинами постійними, то (4.17) можна переписати як

$$\Delta p = \bar{k} H \,, \tag{4.17}$$

де $\bar{k} = \dfrac{\Delta f g \left(\rho - \rho_1 \right)}{f}$; $\Delta p = p_1 - p_2$.

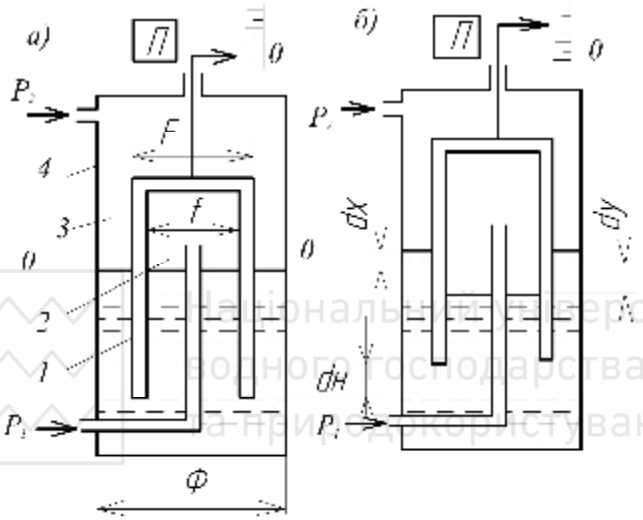


Рис. 4.5. Принципова схема «дзвінкового» дифманометра:
а) вихідне положення; б) стан рівноваги при підніманні «дзвону»

p_1 і p_2 – тиски в досліджуваних об'єктах; 1 – «дзвін»; 2 і 3 – внутрішня і зовнішня вимірювальні камери; 4 – поверхня камери 3; F – площа зовнішнього поперечного перерізу «дзвону»; dH – елементарне переміщення «дзвону»; dx – елементарне переміщення рідини в зовнішній посудині; dy – переміщення рідини під «дзвоном»; Φ – площа поперечного перерізу зовнішньої посудини; П – перетворювач переміщення покажчика в уніфікований сигнал

Із (4.17) випливає, що величина переміщення «дзвону» в даних дифманометрах пропорційна вимірюваному перепаду тисків.

«Дзвінкові» дифманометри мають високу чутливість і можуть застосовуватись для вимірювання малих тисків, перепадів тисків і розріджень.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Деякі модифікації «дзвінкових» дифманометрів оснащено перетворювачами П, з допомогою яких переміщення «дзвона» перетворюється в уніфікований сигнал вимірювальної інформації, який передається по каналу зв'язку.

Запитання для самоконтролю

1. Тиск як параметр хіміко-технологічних процесів.
2. Атмосферний, абсолютний та надлишковий тиск.
3. Класифікація засобів вимірювання тиску за принципом дії.
4. Класифікація засобів вимірювання тиску за видом вимірювальної величини.
5. Класифікація вимірювальних засобів тиску за галуззю застосування та типом відображення результатів вимірювання.
6. Двотрубний U – подібний манометр.
7. Чашечний манометр.
8. Поплавковий дифманометр.
9. Принципова схема і принцип дії кільцевого дифманометра.
10. Дзвінкові дифманометри.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет водного господарства та природокористування

4.2. Вимірювання тиску за допомогою деформаційних приладів

На практиці, для вимірювання тиску, широкого вжитку набули так звані деформаційні прилади – прилади з пружним чутливим елементом.

Принцип дії таких приладів грунтується на явищі деформації або згинаючого моменту різних пружних елементів під дією вимірювального тиску відповідного середовища і перетворення його в переміщення або силу, що в свою чергу перетворюється з допомогою передаючих механізмів у кутове або лінійне переміщення покажчика відносно шкали.

За видом пружного чутливого елемента пружинні прилади можна розділити на такі групи:

- прилади з трубчастою пружиною;
- мембранні прилади;
- сильфонні прилади.

До найбільш розповсюдженого виду деформаційних приладів належать манометри з трубчастою пружиною. Чутливим елементом таких приладів є зігнута дугою і запаяна з одного кінця трубка Бурдона 1 (рис. 4.6) еліптичного, плоскоовального або круглого поперечного перерізу.

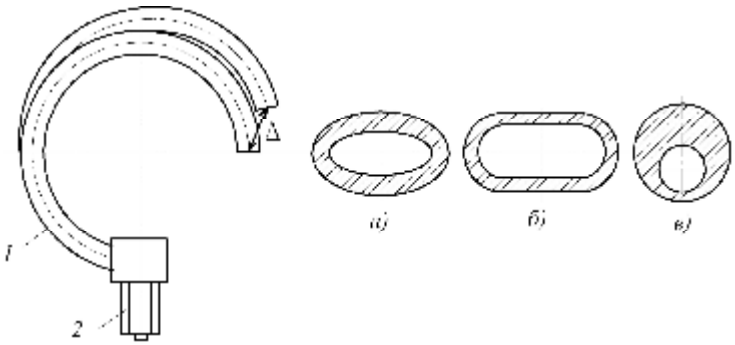


Рис. 4.6. Вид трубчастої пружини Бурдона:
а) еліптичного; б) плоскоовального; в) круглого поперечного перерізу
1 – трубка; 2 – утримувач

З другого кінця трубка 1 закінчується утримувачем 2 з різьбою

Національний університет водного господарства та природокористування

для з'єднання з порожниною, в якій вимірюється тиск. Якщо в трубку надходить рідина, газ або пар під надлишковим тиском, то кривизна трубки зменшуватиметься і вона розпрямлятиметься. При створенні розрідження всередині трубки кривизна її збільшуватиметься і остання скручуватиметься.

Під дією тиску всередині трубки вона, деформуючись, розкручуватиметься, що призведе до кутового переміщення її вільного кінця на деяку величину Δ.

В трубках круглого поперечного перерізу, завдяки ексцентричному каналу, надлишковий тиск, що діє на заглушку вільного кінця, створює момент, який викликає зменшення кривизни даної трубки. Можна прийняти, що в межах пружності величина переміщення Δ є пропорційною вимірювальному тиску p ($\Delta = kp$, де k – коефіцієнт пропорційності). При збільшенні тиску лінійна залежність порушується. Граничний тиск $p_г$, при якому ще зберігається лінійна залежність, називається межею пропорційності трубки.

Для запобігання виникненню залишкових деформацій найбільший робочий тиск p_{max} повинен бути меншим за $p_г$ ($p_{max} < p_г$). Відношення $p_г / p_{max} = k_з$ називається коефіцієнтом запасу ($k_з$ вибирають в межах від 1,35 до 2,50).

Переміщення Δ вільного кінця трубки є незначним, тому при створенні на її основі манометрів в конструкцію останніх вводять передавальний механізм, що збільшує це переміщення.

Схему манометра з трубчастою пружиною наведено на рис. 4.7.

Конструкція і принцип дії трубчастої пружини, яка є головною складовою манометра, показаного на рис. 4.7, описано вище. Щодо конструктивної схеми наведеного манометра, то тут необхідно вказати, що передавальний механізм, призначений для масштабування відхилення запаяного кінця 8 трубки, а тим самим і відхилення стрілки 10 відносно шкали, складається із зубчастого сектора 9 і тяги 11.

Даний тип манометрів застосовується для вимірювання тиску до 1000 МПа. При цьому, для вимірювання тиску до 5 МПа застосовуються трубчасті пружини, виготовлені з латуні чи бронзи. Для вимірювання тиску більше 5 МПа, трубчасті пружини

Національний університет водного господарства та природокористування

виготовляють зі сталі різного складу, а для тиску до 1000 МПа пружини виготовляють з легованої сталі 50 ХФА.

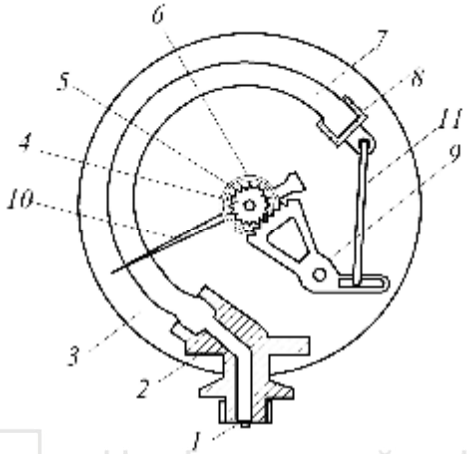


Рис. 4.7. Конструктивна схема манометра з трубчастою пружиною:
1 – ніпель; 2 – утримувач; 3 – корпус; 4 – вісь; 5 – шестерня; 6 – пружина;
7 – трубчаста пружина; 8 – запаяний кінець пружини; 9 – зубчастий сектор;
10 – покажчик (стрілка); 11 – тяга

Національний університет водного господарства та природокористування

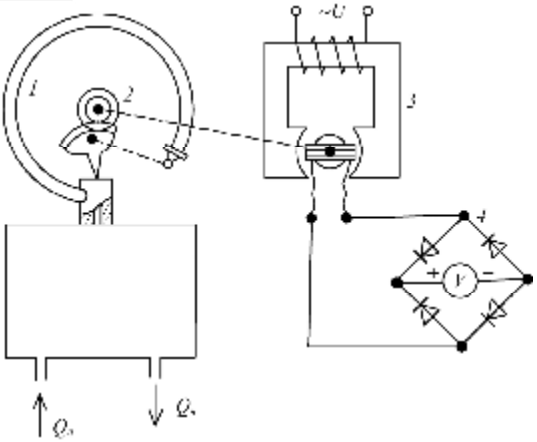


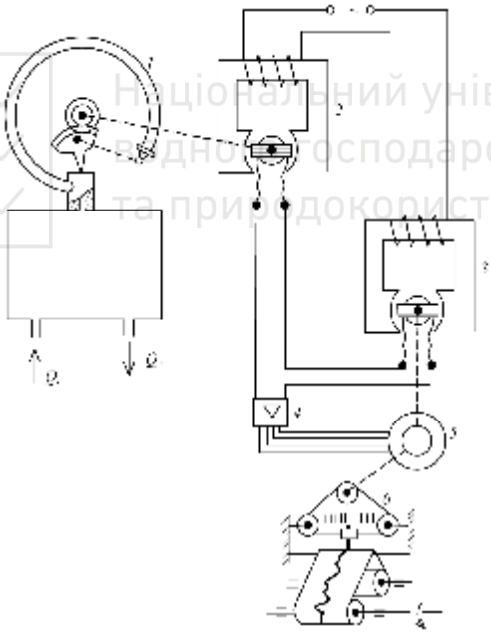
Рис. 4.8. Схема дистанційного вимірювання тиску:
1 – манометричний трубчастий перетворювач; 2 – зубчата передача;
3 – трансформаторний перетворювач із поворотною котушкою; 4 – містковий випрямляч; V – вольтметр магнітоелектричної системи

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Манометри з трубчастою пружиною широко застосовуються як для дистанційного вимірювання тиску, так і у вимірювальних системах з його реєстрацією.

Можлива схема дистанційного вимірювання тиску наведена на рис. 4.8.Внаслідок підвищення вимірюваного тиску в резервуарі манометрична трубка розпрямляється, зубчатий сектор повертатиметься на відповідний кут за годинниковою стрілкою, ведена шестерня повертатиметься проти годинникової стрілки; її рух передасться на рамку трансформаторного перетворювача, в якій з'явиться вторинна напруга. Ця напруга після випрямлення вимірюється вольтметром, шкалу якого доцільно проградуювати в одиницях тиску.

Вимірювальну систему з реєстрацією тиску наведено на рис. 4.9.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 4.9. Вимірювальна система з реєстрацією тиску:
1 – манометричний трубчастий перетворювач; 2, 3 – відповідно первинний і вторинний трансформаторні перетворювачі (давач і приймач); 4 – підсилювач змінного струму; 5 – сервоелектродвигун; 6 – покажчик та реєструючий пристрій

Коли котушка давача відхиляється від положення, наведеного на рисунку, то на вхід підсилювача надходитиме різницева напруга.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Ротор сервоелектродвигуна, обертаючись, примусить котушку приймача зайняти положення, яке є аналогічним положенню котушки давача. При цьому вторинна напруга приймача зрівнюється з вторинною напругою давача, різницева напруга зникне, і електродвигун зупиниться. Кожному значенню вимірюваного тиску відповідає певне положення ротора серводвигуна, що фіксує покажчик та реєструючий пристрій.

- Мембранні деформаційні прилади для вимірювання тиску

Вимірювальні засоби з чутливими елементами у вигляді плоских і гофрованих мембран, мембранних коробок і блоків застосовують для вимірювання невеликих надлишкових тисків і розріджень (манометри, напірметри та тягометри), а також перепадів тиску (дифманометри).

Мембрана являє собою тонкий переважно металевий диск, який жорстко кріпиться по периметру у вимірювальному блоці (рис. 4.10).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 4.10. Вигляд мембрани у вимірювальному блоці

При цьому, під дією вимірюваного тиску p_1, за умови, що $p_1 > p_2$, де p_2 – зовнішній тиск, відбувається прогинання мембрани на величину h, яке перетворюється, аналогічно попередньому, у відхилення стрілки відносно шкали показуючого пристрою.

Мембрани поділяються на «пружні» і «в'ялі». Перші виготовляють з тонких металевих пластин (сталь, бронза, латунь). Вони мають суттєву жорсткість. Їх статична характеристика $h = f\Delta p$, де $\Delta p = p_1 - p_2$ є нелінійною.

На практиці використовують плоскі і гофровані пружні мембрани (рис. 4.11).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

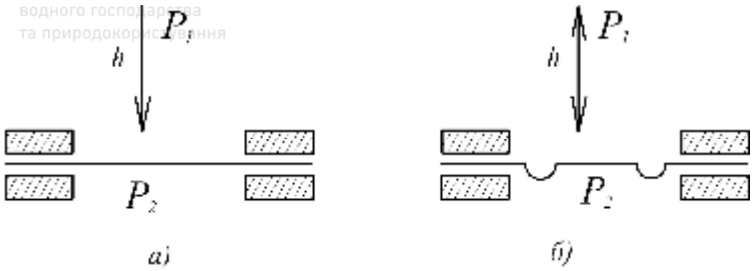


Рис. 4.11. Різновиди пружніх мембран: а) плоска; б) гофрована

Наявність гофри лінеаризує статичну характеристику мембрани.

В'ялі мембрани виготовляють з прорезиненої тонкої тканини (капрон. шовк). Вони повинні задовільняти двом вимогам – велика міцність та відсутність власної жорсткості, оскільки призначаються для перетворення великих перепадів тиску в силу при незначних переміщеннях (до сотих долей міліметра). Дані мембрани звичайно оснащуються металевим жорстким центром. Вони також виготовляються у двох варіантах – гофрованими і плоскими.

Величина прогину мембрани залежить від величини тиску, діаметра, товщини, числа і форми гофр та модуля пружності матеріалу, з якого її виготовляють. Тому через складність розрахунків характеристику мембрани підбирають дослідним шляхом.

Для збільшення прогину, при вимірюванні малих тисків, мембрани попарно з'єднуються (наприклад, зварюванням) у мембранні коробки (рис. 4.12, а). а самі коробки – у мамбранні блоки (рис. 4.12, б).

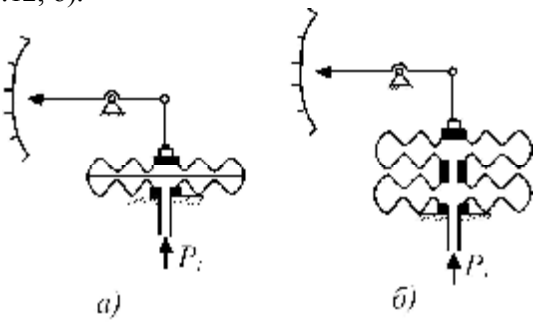


Рис. 4.12. Мембранні чутливі елементи:
а) мембранна коробка; б) мембранний блок

Національний університет водного господарства та природокористування

Мембранні манометри випускаються в основному показуючими. Принцип дії приладів полягає у перетворенні вимірюваного тиску або розрідження у переміщення жорсткого центру мембранного чутливого елемента, яке з допомогою передаючого механізму перетворюється у відповідне переміщення покажчика відносно шкали.

Максимальний діапазон вимірювань мембранних манометрів становить від 0 до 2,5 МПа, вакуумметрів – від -0,1 до 0 МПа. Клас точності приладів – 1,5 та 2,5.

Поряд із зазначеним, мембранні деформаційні засоби можуть застосовуватись і в системах автоматичної сигналізації відхилення тиску від заданої норми (рис. 4.13).

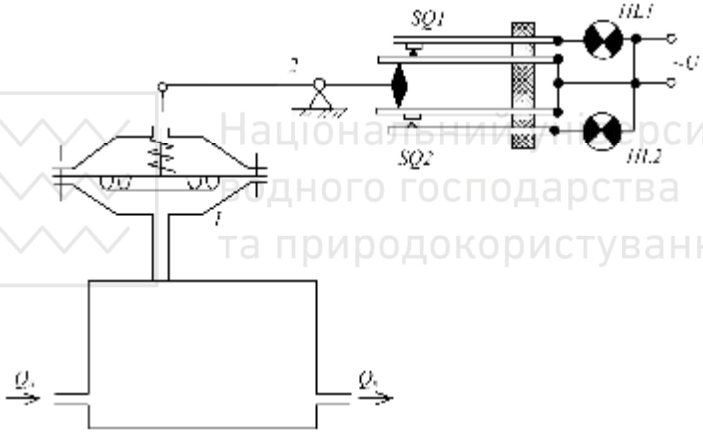


Рис. 4.13. Схема автоматичної сигналізації відхилення тиску від норми

На рисунку показано, що внаслідок підвищення тиску мембрана 1 прогинається вгору, важіль 2 замикає контакт $SQ2$, і спалахує сигнальна лампа $HL2$. Очевидно, що зниження тиску, порівняно з нормою, примусить засвітитися лампу $HL1$.

<u>- Сильфонні манометри</u>

Сильфон – це тонкостінна металева камера з гофрованою бічною поверхнею (рис. 4.14).

Сильфони виготовляють з латуні або нержавіючої сталі.

Він працює наступним чином. При дії зовнішнього p_2 або

Національний університет
водного господарства
та природокористування

внутрішнього p_1 тиску довжина його відповідно зменшується або збільшується (до десятків міліметрів). Вхідною величиною сильфона є тиск p_1, p_2 або Δp ($\Delta p = p_1 - p_2$), а вихідною – його переміщення h.

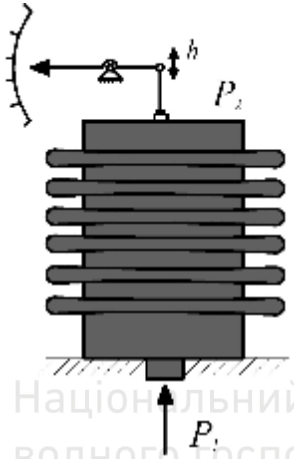


Рис. 4.14. Сильфон

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Суттєвим недоліком сильфонів є значний гістерезис і помітна нелінійність характеристики. Для зменшення впливу цих чинників всередині сильфона поміщають гвинтову циліндричну пружину, жорсткість якої в кілька разів більша за жорсткість сильфона.

Сильфонні манометри призначені для вимірювання надлишкового тиску, розрідження і різниці тисків. Їх виконують показуючими і самопишучими.

Схема самопишучого сильфонного манометра наведена на рис. 4.15.

Вимірювальний тиск через штуцер 11 подається в камеру 10, де знаходиться сильфон 9. Для збільшення жорсткості сильфона в його середині закріплена гвинтова циліндрична пружина 8. Під дією тиску p сильфон деформується, в результаті чого його дно переміщує вгору шток 7, що жорстко зв'язаний з важелем 6. Останній через систему важелів 5, 4 і 3 повертає вісь 12 і закріплений на ній П-подібний важіль 2, до якого прикріплено стрілку з пером. Записується вимірюваний тиск на дисковій

діаграмі, привод якої здійснюється за допомогою синхронного двигуна або годинникового механізму.

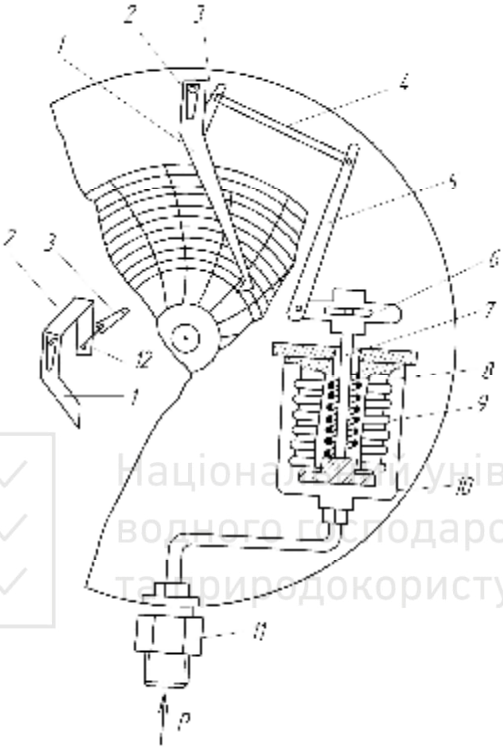


Рис. 4.15. Схема самопишучого сильфонного манометра

Межа вимірювань сильфонних приладів становить від 0,025 до 0,400 МПа.

Класи точності зазначених манометрів надлишкового тиску, вакуумметрів та мановакуумметрів становлять 1,5; 2,5.

В наш час широкого застосування набули деформаційні вимірювальні прилади тиску на основі вимірювальних перетворювачів з прямим перетворенням. Для перетворення переміщення деформаційного чутливого елемента в сигнал вимірювальної інформації використовують індуктивні, диференційно-трансформаторні, ємнісні, тензорезистивні та інші перетворювачі неелектричних величин в електричні.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Запитання для самоконтролю

1. Принцип дії трубчастої пружини Бурдона.
2. Манометри з трубчастою пружиною.
3. Принципова схема дистанційного вимірювання тиску.
4. Схема вимірювання тиску з реєстрацією.
5. Мембранні та сильфонні деформаційні прилади для вимірювання тиску.
6. Схема автоматичної сигналізації відхилення тиску від норми.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет водного господарства та природокористування

4.3. Електричні манометри та вакуумметри

Дія даних приладів грунтується на прямому чи непрямому перетворенні тиску в електричний параметр, який має з ним функціональний зв'язок.

Ці прилади застосовуються головним чином в лабораторній практиці для проведення відповідних досліджень.

- Манометри електричного опору

Дія приладу грунтується на зміні електричного опору провідника (одношарова котушка діаметром 8 мм намотана, наприклад, манганіновим проводом, діаметром 0,05 мм, електричний опір якої становить 180…200 Ом) під дією зовнішнього надлишкового тиску.

Якщо позначити електричний опір провідника (котушки) через R, тиск через p, а зміну опору через ΔR, то можна записати, що

$$\Delta R = kRp, \tag{4.18}$$

де k – п'єзокоефіцієнт, величина якого залежить від матеріалу (для манганіна він знаходиться в межах $(2,0...2,5)\cdot 10^{-7}\ м^2/Н$).

З (4.18) випливає

$$p = \Delta R/(kR). \tag{4.19}$$

Для вимірювання опору можна застосувати будь-який вимірювач електричних опорів, наприклад, електричний зрівноважений міст (рис. 4.16).

Іншим чутливим елементом манометра електричного опору є комбінований перетворювач з мембраною (рис. 4.11 і рис. 4.12) та тензорезисторним перетворювачем (рис. 4.16).

При вимірюванні тиску можна також користуватись формулою (4.19). Опір R тензорезисторного перетворювача при температурі $20^\circ C$ звичайно становить 80…600 Ом.

Електрична вимірювальна схема в цьому випадку аналогічна попередній (рис. 4.16).

На рис. 4.16 деформація вимірювальної мембрани під дією зовнішнього тиску p призводить до деформації тензорезисторного перетворювача R_1, який увімкнено в одне з плечей вимірювального мосту. В інші плечі увімкнено постійні резистори R_2, R_3 та R_4. В

результаті цього відбувається розбаланс вимірювального мосту, який перетворюється електронним блоком в уніфікований вихідний електричний сигнал, що надсилається до вторинного вимірювального приладу манометра.

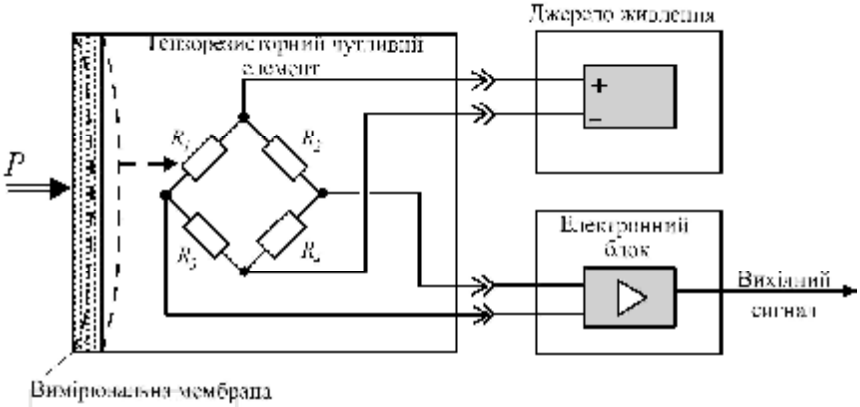


Рис. 4.16. Вимірювальна схема тензорезистивного манометра

До переваг тензорезистивних перетворювачів належить лінійність характеристики $R = f(p)$ та незначна інерційність, до недоліків – мала чутливість і залежність від температури.

- <u>Ємнісні манометри</u>

Схема вимірювального перетворювача тиску, оснащена мембраною та ємнісним перетворювачем, наведена на рис. 4.17.

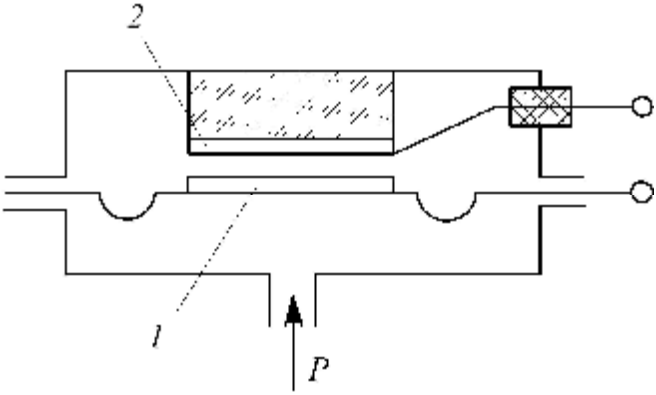


Рис. 4.17. Схема ємнісного перетворювача тиску

Національний університет водного господарства та природокористування

Вимірюваний тиск p сприймається металевою мембраною 1, яка є рухомим електродом ємнісного перетворюючого елемента. Нерухомий електрод 2 ізолюється від корпусу з допомогою ізоляторів. Залежність ємності C перетворювального елемента від переміщення δ визначається з (1.5).

Для перетворення $C = f(\delta)$ в сигнал вимірювальної інформації звичайно використовують вимірювальні мости змінного струму (високочастотні) або резонансні LC -контури.

Ємнісні манометри застосовують для вимірювання тиску до 120 МПа. Товщина мембрани дорівнює 0,05–1 мм. Основна похибка вимірювання становить $\pm(0,2-5,0)\%$.

- П'єзоелектричні манометри на основі п'єзоелектричного перетворювача тиску.

В основу дії цих перетворювачів покладено перетворення вимірюваного тиску в силу за допомогою деформаційного чутливого елемента і подальшого перетворення цієї сили в сигнал вимірюваної інформації.

На рис. 4.18 показано схему п'єзоелектричного перетворювача тиску в п'єзоелектричному манометрі.

Національний університет водного господарства та природокористування

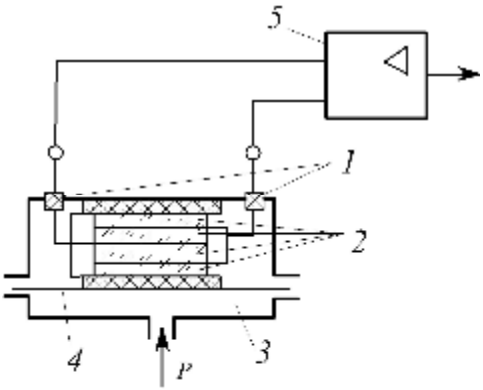


Рис. 4.18. Схема п'єзоелектричного перетворювача тиску

Вимірюваний тиск p перетворюється мембраною 4 в силу, яка викликає стискання стовпчиків кварцевих пластин 2, діаметром 5 мм і товщиною 1 мм.

Національний університет водного господарства та природокористування

Електричний заряд Q, що виникає, через виводи 1 подається на електронний підсилювач 5.

Величина заряду Q зв'язана з вимірювальним тиском p залежністю

$$Q = kFp, \tag{4.20}$$

де k – п'єзоелектричний коефіцієнт (для кварца $k = 2{,}1 \cdot 10^{-12}\ Кл / Н$); F – ефективна площа мембрани.

Для зменшення інерційності перетворювача об'єм камери 3 також максимально зменшують.

Оскільки частота власних коливань системи «мембрана-кварцеві пластини» складає десятки кілогерц, то вимірювальні перетворювачі цього типу мають високі динамічні характеристики, що обумовлює їх широке застосування при контролі тиску в системах з швидкоплинними процесами.

Межа вимірювання тиску такими манометрами становить 2,5–100,0 МПа.

Клас точності 1,5; 2,0.

У зв'язку з витоком заряда з кварцевих пластин вимірювальні засоби такого типу не використовують для вимірювання статичних тисків.

Національний університет водного господарства та природокористування

- Теплопровідні манометри

При низьких тисках, коли довжина вільного пробігу молекул співмірна з геометричними розмірами посудини, теплопровідність газу залежить від тиску.

Цю залежність використовують в теплопровідних манометрах, які застосовують для вимірювання тиску газів в межах від 0,0133 до 1333 Па.

Манометр складається з нагрівача і термометра (терморезистивного чи термоелектричного), який поміщено у посудину, де контролюється тиск.

На рис. 4.19 наведено схему теплопровідного манометра низького тиску з терморезистором, який увімкнено у мостову схему.

В два плеча мостової схеми увімкнено металеві або напівпровідникові терморезистори R_t і R_K, які нагріваються електричним струмом, а в інші плечі – постійні резистори R_1 і R_2.

Національний університет
водного господарства

Резистор R_t знаходиться у вимірюваному середовищі. Резистор R_K виконує роль температурного компенсатора і запаяний у балон.

Зі зміною тиску газу змінюється його теплопровідність, що призводить до зміни електричного опору R_t, а звідси – до розбалансу вимірювального мосту.

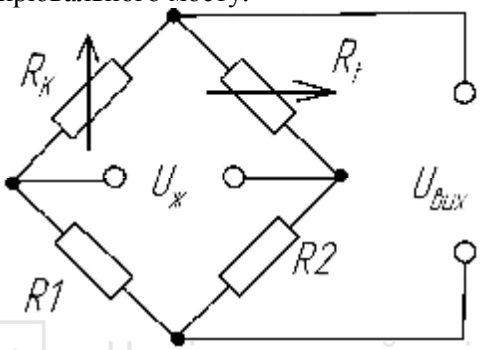


Рис. 4.19. Схема теплопровідного манометра з терморезистором

Національний університет
водного господарства
та природокористування

В манометрах з термоелектричним термометром (рис. 4.20) вимірюється не опір, а температура провідника. Температуру вимірюють термоелектричним термометром, термо-ЕРС якого є функцією вимірюваного тиску.

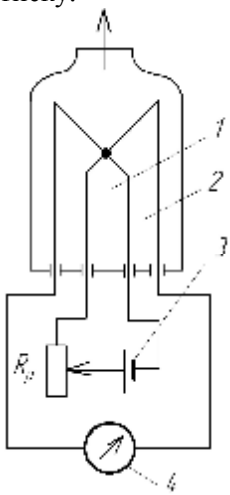


Рис. 4.20. Схема манометра з термоелектричним термометром

Національний університет водного господарства та природокористування

Манометр (рис. 4.20) складається з нагрівача 1 та термоелектричного термометра 2, що вимірює його температуру. Елемент нагрівається від джерела струму 3, термо-ЕРС термопари вимірюється мілівольтметром 4. Елемент 1 нагрівається до температури порядка $200^{\circ}C$.

Теплопровідні манометри градуюються по відповідному газу, для якого вони призначені.

- Іонізаційні вакуумметри і манометри

Іонізаційні вакуумметри з розжареним катодом призначені для вимірювання вакууму в межах від 133,3 до $133{,}3 \cdot 10^{-5}$ МПа.

Дія вакуумметра грунтується на іонізації молекул газу потоком електронів, які випромінює розжарений катод або радіоактивна речовина. В першому випадку перетворювачем є триелектродна манометрична лампа, балон 1 якої з'єднано з вимірюваним середовищем (рис. 4.21).

Національний університет водного господарства та природокористування

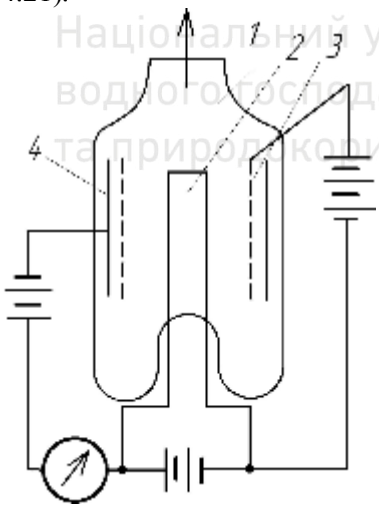


Рис. 4.21. Схема іонізаційного вакуумметра

В балоні знаходиться вольфрамова нитка (катод) 2, сітка 3 і анод-коллектор 4. Електрони, що вилітають з катоду, притягуються позитивно зарядженим анодом. Залежно від тиску p газу, електрони на своєму шляху іонізують більше чи менше число молекул.

Національний університет
водного господарства

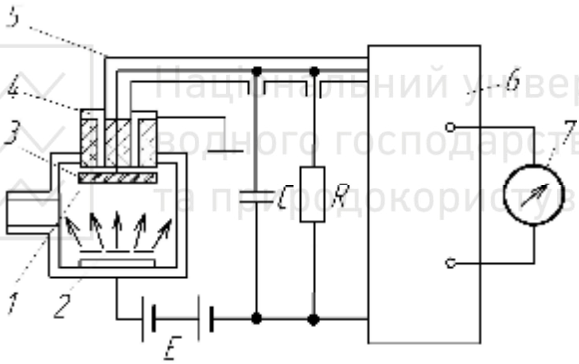
Іони збираються колектором і створюють струм, сила I_K якого пропорційна силі анодного струму I_a і тиску газу p

$$I_K = kI_a p, \tag{4.21}$$

де k – коефіцієнт пропорційності, який залежить від геометричних розмірів перетворювача і складу газу.

В іншому випадку при незначних вимірюваних тисках і невеликих розмірах радіаційних манометрів ефективніше застосовувати α -випромінювання, яке характеризується найвищою іонізаційною здатністю на 1 см довжини пробігу частинки.

Принципова схема приладу для вимірювання тиску газу з радіоізотопним іонізатором, який розміщено всередині камери, наведено на рис. 4.22.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 4.22. Схема α -іонізаційного манометра:
1 – іонізаційна камера; 2 – радіоактивний ізотоп (випромінювач); 3 – колектор іонів; 4 і 5 – екрани; 6 – подільник; 7 – вимірювальний прилад

Якщо розміри іонізаційної камери менші довжини пробігу α -часток, то сила іонізаційного струму I_i на від'ємно зарядженому колекторі буде лінійною функцією тиску p

$$I_i = kp, \tag{4.22}$$

де k – постійна приладу.

Для зменшення впливу зовнішніх чинників іонізаційні камери монтуються в одному корпусі з першим каскадом електронного підсилювача.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

В якості випромінювача можуть бути ізотопи радія, торія, полонія, тощо.

Запитання для самоконтролю

1. Принцип дії манометрів електричного опору.
2. Манометр електричного опору на основі комбінованого перетворювача "мембрана-тензорезистивний перетворювач".
3. Принципова схема тензорезистивного манометра.
4. Ємнісні манометри.
5. П’єзоелектричні манометри.
6. Теплопровідний манометр з терморезистором.
7. Принципова схема манометра з термоелектричним термометром.
8. Принципова схема іонізаційного вакуумметра.
9. Принципова схема α -іонізаційного манометра.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет водного господарства та природокористування

5. Вимірювання кількості та витрат

5.1. Вимірювання витрат за величиною тиску та рівня

- Загальні відомості

Вимірювання параметрів рідких та газоподібних речовин широко застосовують у різних галузях народного господарства, зокрема, в нафтодобувній промисловості, в нафтопереробних та нафтогазотранспортних системах, харчовій промисловості тощо.

Головними параметрами руху потоків рідин та газоподібних речовин є витрати – кількість речовини, що протікає через поперечний переріз трубопроводу за одиницю часу.

Розрізняють такі види витрат: об'ємні витрати $Q_V = \frac{V}{t}$, де V – об'єм; t – час; та масові витрати $Q_M = \frac{M}{t}$, де M – маса речовини. Співвідношення між масовими та об'ємними витратами визначається залежністю $Q_M = \rho \cdot Q_V$, де ρ – густина речовини. Одиницями об'ємних витрат можуть бути $м^3/с$, $м^3/год$, $л/с$, а масовими – $кг/с$, $кг/год$ тощо. Вимірювання витрат становлять понад 15% від усіх промислових вимірювань. Похибки вимірювань витрат в промислових умовах становлять 1–2%, хоча в окремих галузях спостерігається тенденція їх зменшення до рівня 0,2–0,5%.

Межі вимірювання витрат рідин можна розділити наступним чином: малі витрати – до $15 \cdot 10^{-4}\ м^3/с$, середні витрати – від $15 \cdot 10^{-4}\ м^3/с$ до $0{,}5\ м^3/с$ та великі витрати – понад $0{,}5\ м^3/с$.

Прилади для вимірювань витрат називаються витратомірами, а для вимірювання кількості речовини – лічильниками кількості або просто лічильниками.

- Витратоміри змінного перепаду тиску

Метод вимірювання витрат за перепадом тиску грунтується на застосуванні звужувального пристрою (діафрагма, сопло, труба Вентурі), що створює перепад тиску на ділянці трубопроводу, де він встановлений для звуження струменя рідини. В якості вторинного приладу, у цьому випадку, застосовується диференціальний

манометр, яким вимірюється перепад тиску.

На рис. 5.1, а наведено ділянку трубопроводу з дросельним завужувальним пристроєм у вигляді діафрагми, на рис. 5.1, б – характер розподілу тиску вздовж стінки трубопроводу. На початку перерізу А-А струмінь досліджуваної рідини починає звужуватись, а середня швидкість потоку зростає. Дещо зростає і тиск біля стінки звужувальної діафрагми. На деякій відстані після діафрагми, внаслідок інерції, струмінь продовжує звужуватися і досягає найбільшого звуження в перерізі В-В. Там же тиск потоку падає і досягає свого найменшого значення p_c. Після перерізу В-В струмінь починає розширюватися, швидкість потоку зменшуватися, а тиск зростає до деякого значення $p_c < p_a$.

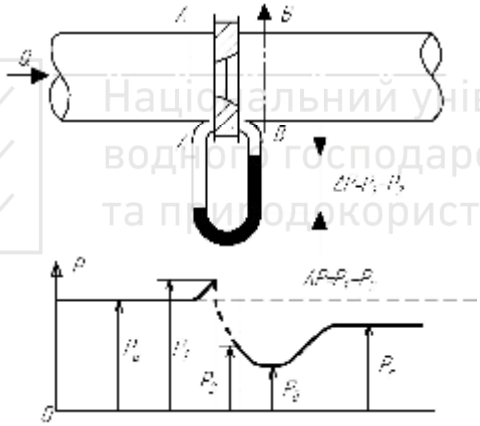


Рис. 5.1. Принцип дії витратоміра зі звужувальною діафрагмою

Дослідження даної моделі (рис. 5.1) дозволило отримати аналітичні вирази для визначення об’ємної Q_V та масової Q_M витрат.

Об’ємна витрата визначиться з виразу

$$Q_V = v_b S_b = \frac{S_b}{\sqrt{1-\left(\frac{S_b}{S_a}\right)^2}}\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = AS_0\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}; \qquad (5.1)$$

Національний університет
водного господарства
та природокористування

масова витрата – з виразу

$$Q_M = \rho Q_V = AS_0\sqrt{2\rho\Delta p}\,, \qquad (5.2)$$

де S_0 – площа звуженого отвору, A – коефіцієнт витрат, який характеризує співвідношення між перерізами S_0, S_a, та S_b і визначається експериментально.

В конструкціях витратомірів зі звужувальною діафрагмою вимірювання тиску здійснюється звичайно не в перерізах A та B, а безпосередньо до та після звужувальної діафрагми. У цьому випадку $\Delta p = p_1 - p_2$ відрізняється від $\Delta p = p_a - p_b$. Це враховується при експериментальному визначенні коефіцієнта А.

Вимірювальна схема витратоміра даного типу наведена на рис. 5.2. За допомогою звужувальної діафрагми 1 вимірювані витрати перетворюються у перепад тиску $\Delta p = p_1 - p_2$, а у диференціальному манометрі 2 цей перепад тиску перетворюється в силу F_x. Остання є пропорційною різниці даних тисків, а отже, пропорційною квадрату вимірюваних витрат $F_x = k \cdot Q^2$.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

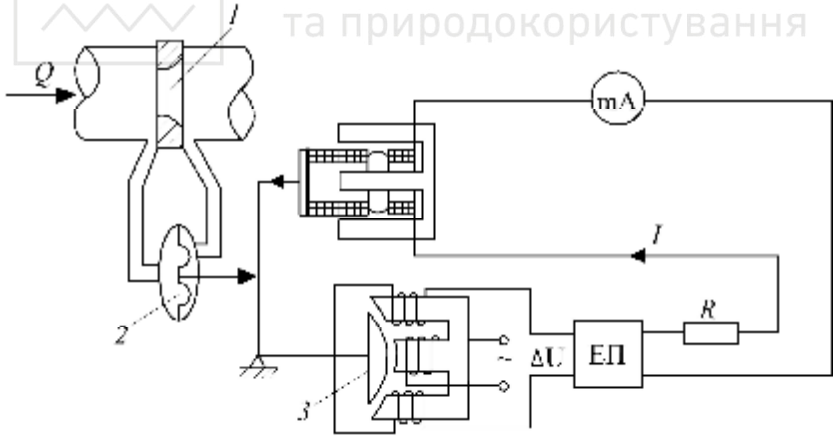


Рис. 5.2. Принципова схема витратоміра статичного зрівноважувального перетворення

Сила F_x, що діє на важіль осердя 3 диференціально-трансформаторного перетворювача, повертає його на деякий кут, внаслідок чого порушується баланс ЕРС у верхній та нижній

Національний університет водного господарства та природокористування

вторинних обмотках диференціально-трансформаторйого перетворювача, в результаті чого з'являється різниця напруг ΔU. Після підсилення ця напруга підводиться до обмотки зворотного феродинамічного перетворювача, в якому створюється сила компенсації F_k. Остання є пропорційною квадрату електричного струму I, що протікає через обмотки зворотного перетворювача

$$F_k = k_1 \cdot I^2 . \qquad (5.3)$$

Якщо сили F_x і F_k однакові, то значення вимірюваних витрат визначаються із виразу

$$Q_v = I \cdot \sqrt{\frac{k_1}{k}} = KI . \qquad (5.4)$$

Отже, покази міліамперметра в цьому випадку будуть прямопропорційними вимірюваним витратам.

Більшу точність мають витратоміри, в яких різниця тисків ΔP, яка створюється завужувальним пристроєм, зрівноважується тиском, що створюється компресором (рис. 5.3).

Національний університет водного господарства та природокористування

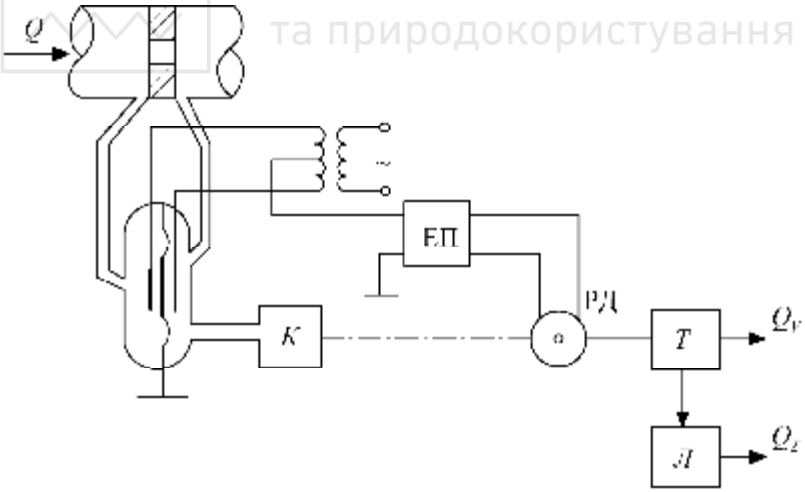


Рис. 5.3. Принципова схема витратоміра астатичного зрівноважувального перетворення

Оскільки тиск, що створюється компресором K, є прямопропорційним квадрату частоти обертання ротора

Національний університет водного господарства та природокористування

реверсивного двигуна *РД*, то остання, будучи виміряною тахометром *Т*, є пропорційною вимірюваним витратам. Загальна кількість обертів ротора, що визначається лічильником *Л*, вказує на кількість речовини, яка пройшла через трубопровід.

Вимірювання витрат за перепадом тиску є найпоширенішим методом вимірювання витрат рідких та газоподібних речовин в умовах високого тиску (до 100 *МПа*) та високих температур – до сотень градусів за Цельсієм. Недоліком цього методу є порівняно невисока точність. Похибка витратомірів змінного тиску становить 1–2%.

- Витратоміри сталого перепаду тиску

Серед витратомірів сталого перепаду тиску для вимірювань малих витрат рідини ($0{,}01-16\ м^3/год$) та газів ($0{,}01-40\ м^3/год$) у вертикальних трубопроводах найпоширенішими є так звані ротаметри. Ротаметр (рис. 5.4, а) – це вертикальна труба 1 конічного перерізу з розміщеним в ній поплавком 2.

Національний університет водного господарства та природокористування

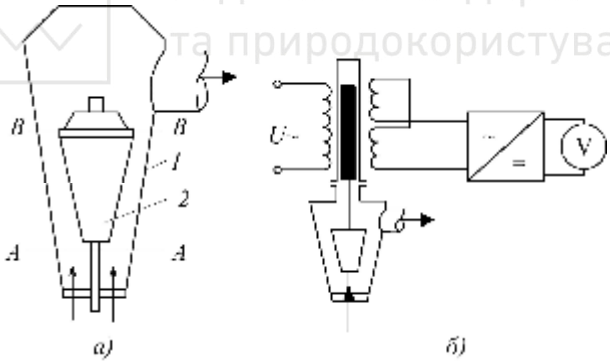


Рис. 5.4. До принципу дії ротаметрів

Поплавок звичайно має циліндричну форму з нижньою конічною частиною та верхнім бортиком з вирізаними в ньому скісними рівчаками. При протіканні через ці рівчаки досліджуваної рідини остання забезпечує обертання поплавка і його центрування вздовж осі трубопроводу, що усуває її тертя об стінки труби. Під дією струменя досліджуваної рідини поплавок буде підніматися вгору. В міру підняття поплавка площа S_b кільцевого проміжку між ним і

Національний університет водного господарства та природокористування

внутрішньою поверхнею труби збільшуватиметься до положення, при якому підйомна сила, що діє на поплавок, урівноважиться силою тяжіння поплавка.

Отже, певним витратам відповідатиме певна площа S_b кільцевого проміжку, тобто певна висота поплавка.

Рівняння, що зв'язує об'ємні витрати Q_V з площею S_b, записують у вигляді

$$Q_V = v_b S_b = \frac{S_b}{\sqrt{1-\left(\frac{S_b}{S_a}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_c}}, \qquad (5.5)$$

де S_a і S_b – площі струменя рідини відповідно в перерізах А-А та В-В; v_b – швидкість струменя в перерізі В-В (у завуженій частині); ρ_c – густина досліджуваного середовища; Δp – різниця тисків, що діють на поплавок знизу та зверху.

В правій частині наведеного вище рівняння всі величини є сталими, зокрема Δp. Дійсно, сила тяжіння поплавка в досліджуваному середовищі визначиться як

$$F_T = V_n g\left(\rho_n - \rho_c\right), \qquad (5.6)$$

а підйомна сила, викликана дією досліджуваного потоку як

$$F_n = S_n \Delta p, \qquad (5.7)$$

де V_n та S_n – об’єм та максимальна (перпендикулярна напряму потоку) площа перерізу поплавка, g – прискорення вільного падіння.

У зрівноваженому стані, коли $F_T = F_n$, матимемо

$$V_n g\left(\rho_n - \rho_c\right) = S_n \Delta p, \qquad (5.8)$$

звідки

$$\Delta P = \frac{V_n g\left(\rho_n - \rho_c\right)}{S_n}. \qquad (5.9)$$

Оскільки всі величини в правій частині останнього виразу є сталими, то і Δp є незмінним, незалежним від швидкості

досліджуваного потоку, тобто від витрат.

Отже, витрати однозначно визначатимуться площею струменя досліджуваного середовища в перерізі В-В і, відповідно, висотою підняття поплавка.

Звичайно, в ротаметрах використовуються скляні конічні трубки, на зовнішній поверхні яких нанесено шкалу. Показником є верхня горизонтальна площина поплавка. Такі ротаметри застосовуються для вимірювання витрат газів та прозорих рідин, що знаходяться під тиском не більше ніж 0,6 *МПа*.

Для вимірювань витрат середовищ, що знаходяться під високим тиском, застосовують ротаметри з металевою конічною трубкою. Такі ротаметри звичайно мають диференціально-трансформаторні (рис. 5.4, б) або пневматичні вторинні перетворювачі. Класи їх точності становлять 1,5 та 2,5.

- Витратоміри динамічного тиску

Вимірювання витрати такими приладами грунтується на залежності динамічного тиску (напору) від швидкості потоку контрольованого середовища.

Динамічний напір, а отже, і швидкість потоку вимірюють швидкісними трубами в комплекті з дифманометром (рис. 5.5).

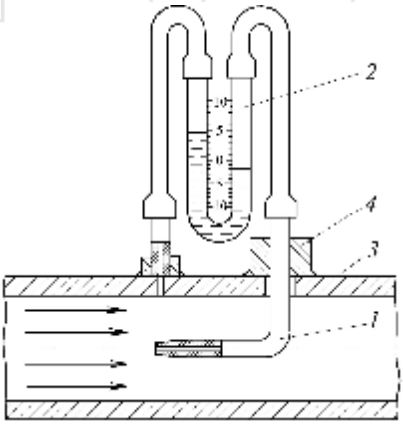


Рис. 5.5. Схема вимірювання динамічного напору:
1 – напірна трубка; 2 – дифманометр; 3 – трубопровід; 4 – сальник

В даній схемі за допомогою лівої трубки вимірюють статичний тиск, а правої (вигнутої під кутом) – повний тиск. Дифманометр 2,

Національний університет
водного господарства
та природокористування

який з'єднує обидві трубки, показує різницю між повним $p_П$ і статичним p_C тиском, іншими словами, динамічний тиск $p_д$ ($p_д = p_П - p_C$). Якщо при цьому різниця рівнів робочої рідини в дифманометрі дорівнює h, то швидкість $v[м/с]$ потоку визначається за формулою

$$v = \xi\sqrt{\frac{2g}{\rho}h(\rho_1 - \rho)}, \qquad (5.10)$$

де g – прискорення вільного падіння ($м/с^2$); ρ і ρ_1 – відповідно густина контрольованого середовища і робочої рідини в дифманометрі ($кг/м^3$); ξ – поправочний коефіцієнт, який враховує конструктивні особливості і неточність виготовлення трубок. Для числа Рейнольдса $Re > 700$ $\xi \approx 1$, для $Re < 700$, $\xi < 1$.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

При визначенні витрат Q швидкісними трубками спочатку необхідно визначити середню (по площі поперечного перерізу S трубопроводу) швидкість $v_{ср}$ потоку

$$v_{ср} = \xi\sqrt{\frac{2g}{\rho}h_{ср}(\rho_1 - \rho_2)}, \qquad (5.11)$$

де $h_{ср}$ – середнє значення різниці рівнів, яке відповідає середній швидкості потоку рідини.

Із наведеного отримаємо, що

$$Q = Sv_{ср}. \qquad (5.12)$$

Витратоміри динамічного напору застосовують тільки в лабораторних умовах та при проведенні експериментів.

<u>- Витратоміри змінного рівня</u>

Принцип дії таких витратомірів грунтується на залежності рівня рідини в посудинах при її втіканні і витіканні від витрати.

Витратоміри змінного рівня можуть бути застосовані для вимірювання витрати газонасиченої нафти, стічних вод та забруднених рідин.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

У витратомірах змінного рівня із затопленим отвором (рис. 5.6, а) вимірюваний потік надходить в посудину 3 через патрубок 4. На дні посудини в якості отвору витікання встановлюється діафрагма 1. Для запобігання забрудненню діафрагми та заспокоєння потоку рідини встановлюють перегородки 5. Рівень в посудині вимірюється за допомогою водомірного скла 2.

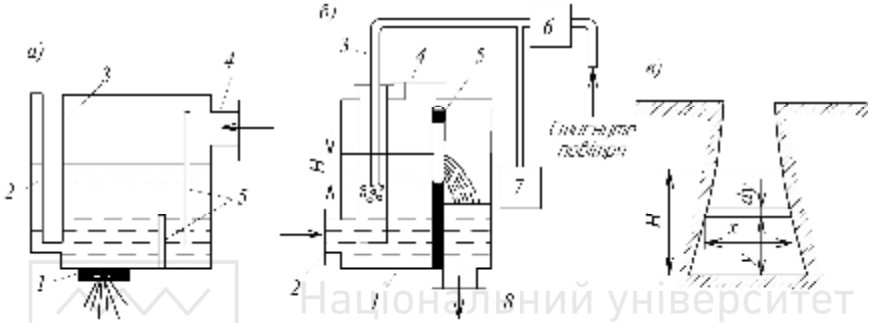


Рис. 5.6. Схеми витратомірів змінного рівня:
а) витратомір змінного рівня; б) витратомір з щілинним отвором; в) визначення форми отвору витікання

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Об'ємна витрата Q_V речовини, що витікає через діафрагму, площею поперечного перерізу F_0 визначиться як

$$Q_V = \alpha F_0 \sqrt{2gH}\,, \tag{5.13}$$

де α – коефіцієнт витрати.

Звідси випливає, що об'ємна витрата із посудини не залежить від густини рідини, а визначається тільки рівнем H.

При встановленні діафрагми в боковій стінці розрахункова формула (5.13) залишається тією ж, а рівень H відраховується від центра діафрагми.

Витратомір зі щілинним отвором (рис. 5.6, б) складається з посудини 1, в яку через патрубок 2 надходить вимірювана рідина. Всередині посудини знаходиться перегородка, оснащена щитом з зливною щілиною 5, через яку відбувається витікання рідини з лівої частини порожнини у праву з вихідним патрубком 8. Для вимірювання рівня H над нижньою кромкою щілини в захисному

Національний університет водного господарства та природокористування

чохлі встановлено п'єзометричну трубку 3, через яку неперервно продувається повітря, що попередньо пройшло систему підготовки газу 6. Тиск повітря в трубці 3, який вимірюється динамометром 7, служить мірою рівня H.

Необхідно зауважити, що залежність об'ємної витрати Q_V від рівня H визначається формою отвору витоку (рис. 5.6, в).

Для даного випадку отримати бажану лінійну залежність

$$Q_V = kH, \tag{5.14}$$

(де k – коефіцієнт пропорційності, який визначається з умови $k = Q_{max} / H_{max}$) можна у випадку коли ширина елементарної площадки x зв'язана з її висотою y співвідношенням

$$x = C / \sqrt{y}, \tag{5.15}$$

де C – конструктивна стала.

Аналіз останнього виразу вказує на те, що профіль щілини повинен мати гіперболічну форму.

Із наведеного можна зробити висновок, що для щілинних витратомірів, при вимірюванні об'ємної витрати, необхідно вимірювати рівень H рідини, а для отримання масової витрати – тиск гідравлічного стовпа $H\rho g$.

Національний університет водного господарства та природокористування

Запитання для самоконтролю

1. Об'ємна та масова витрати. Взаємозв'язок між ними.
2. Метод вимірювання витрат за перепадом тиску.
3. Принцип дії витратоміра зі звужувальною діафрагмою.
4. Принципова схема витратоміра статичного зрівноважувального перетворення.
5. Принципова схема витратоміра астатичного зрівноважувального перетворення.
6. Принцип дії ротаметрів-витратомірів сталого перепаду тиску.
7. Витратоміри динамічного тиску.
8. Витратоміри змінного рівня.

Національний університет водного господарства та природокористування

5.2. Безконтактні витратоміри

- Електромагнітні витратоміри

Принцип дії електромагнітних витратомірів грунтується на законі електромагнітної індукції – законі Фарадея, згідно якого в провіднику, який перетинає магнітні силові лінії, індукується ЕРС, що є пропорційною швидкості переміщення даного провідника.

Якщо використати в якості провідника потік електропровідної рідини, яка протікає між полюсами магніту і виміряти неведену в рідині ЕРС, то можна визначити швидкість потоку або об'ємну витрату рідини.

Схема електромагнітного витратоміра наведена на рис. 5.7.

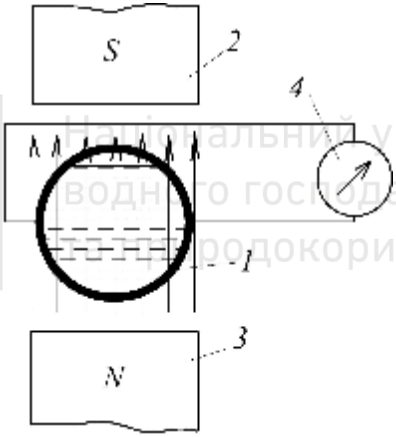


Рис. 5.7. Схема електромагнітного витратоміра з постійним магнітним полем:
1 – трубопровід; 2, 3 – полюси магніту; 4 – електровимірювальний прилад, шкала якого проградуйована в одиницях витрати

Трубопровід 1, виконаний з немагнітного матеріалу (фторопласт, ебоніт тощо), з рідиною, яка в ньому протікає, поміщено між полюсами 2 і 3 магніту (електромагніту) перепендикулярно напрямку силових ліній магнітного поля. В стінці трубопроводу діаметрально протилежно з внутрішньої поверхні труби змонтовані вимірювальні електроди. Під дією магнітного поля іони, що знаходяться в рідині, переміщуються і віддають свої заряди вимірювальним електродам, створюючи на

них ЕРС E, яка є пропорційною швидкості потоку рідини. До електродів підключено вимірювальний прилад 4 зі шкалою, проградуйованою в одиницях витрати.

Величина ЕРС E у випадку постійного магнітного поля визначиться з основного рівняння електромагнітної індукції

$$E = Bdv_{cp}, \tag{5.16}$$

де B – магнітна індукція в зазорі між полюсами магніту; d – внутрішній діаметр трубопровода (довжина провідника); v_{cp} – середня швидкість потоку рідини.

Швидкість v_{cp} можна визначити через об'ємну витрату Q_V

$$v_{cp} = \frac{Q_V}{S}, \tag{5.17}$$

де S – внутрішня площа поперечного перерізу трубопроводу ($S = \frac{\pi d^2}{4}$).

Підставивши в (5.16) значення v_{cp} з (5.17), отримаємо

$$E = \frac{4B}{\pi d} Q_V. \tag{5.18}$$

Оскільки $B = const$ і $d = const$, то вираз (5.18) можна переписати у вигляді

$$E = kQ_V, \tag{5.19}$$

де k – коефіцієнт пропорційності ($k = \frac{4B}{\pi d}$).

З (5.19) видно, що при однорідному магнітному полі ЕРС E прямопропорційна об'ємній витраті Q_V.

На теперішній час електромагнітні витратоміри застосовують тільки для рідин з електричною провідністю не нижче ніж $10^{-3} - 10^{-5}$ *См/м*.

Основним недоліком електромагнітних витратомірів з постійним магнітним полем є виникнення на електродах ЕРС поляризації, що призводить до значних похибок вимірювань.

Паразитна ЕРС поляризації може бути суттєво зменшена за

Національний університет водного господарства та природокористування

рахунок застосування електромагнітів, що живляться від джерела змінного струму.

Електромагнітним витратомірам притаманні такі переваги: на покази не впливають зважені в рідині частинки і бульбашки газу, а також тиск, температура, в'язкість і густина. Дані витратоміри є практично безінерційними і можуть бути застосовані при вимірюванні швидкозмінних потоків.

Електромагнітні витратоміри дозволяють вимірювати витрату в межах від 1 до 2500 $м^3/год$ для трубопроводів діаметром 10-1000 мм при лінійній швидкості потоку 0,6-10 $м/с$. Класи точності витратомірів 1,0 – 2,5.

- Калориметричні витратоміри

Принцип дії калориметричних витратомірів грунтується на нагріванні потоку рідини чи газу і вимірюванні різниці температур до і після нагрівача.

Схема калориметричного витратоміра наведена на рис. 5.8.

Національний університет водного господарства та природокористування

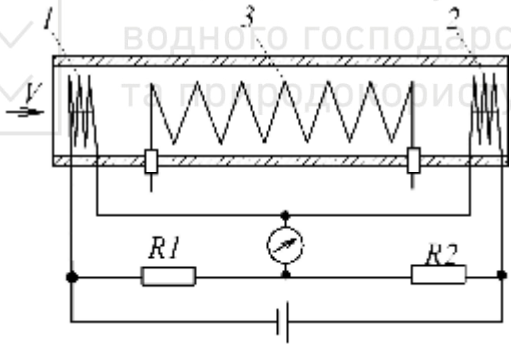


Рис. 5.8. Схема калориметричного витратоміра

У трубопроводі (рис. 5.8) встановлено нагрівач 3, на рівних відстанях від центру якого знаходяться терморезистивні термометри 1 і 2, які вимірюють температуру t_1 потоку до нагрівача і температуру t_2 після нього.

Якщо знехтувати теплотою, що віддається потоком в навколишнє середовище, то рівняння теплового балансу в цьому випадку запишеться

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$q_t = kQ_M c_p \Delta t\,, \tag{5.20}$$

де q_t – кількість теплоти, що віддається нагрівачем рідині чи газу; k – поправочний коефіцієнт на нерівномірність розподілу температур по площі поперечного перерізу труби; Q_M – масова витрата рідини чи газу; c_p – питома масова теплоємність при середньому значенні температури $t = t_1 + t_2 / 2$; Δt – різниця температур середовища до і після нагрівача $\left(\Delta t = t_2 - t_1\right)$.

В калориметричних витратомірах теплота до потоку рідини підводиться звичайно електронагрівачем. В цьому випадку

$$q_t = 0,24 I^2 R\,, \tag{5.21}$$

де I та R – відповідно величина струму та опір електронагрівача.

Із (5.20) і (5.21) масова витрата Q_M визначиться як

$$Q_M = 0,24 I^2 R / \left(kc_p \Delta t\right). \tag{5.22}$$

Отже, із (5.22) видно, що витрата Q_M визначається шляхом непрямого вимірювання на основі результатів прямих вимірювань струму I, що протікає по обмотці нагрівача і перепаду температур Δt.

<u>- Ультразвукові витратоміри</u>

Ультразвуковий (частота більше 20 кГц) метод вимірювання витрат грунтується на явищі зміщення звукових коливань рухомим рідким середовищем.

З двох сторін трубопроводу, по якому рухається вода, під кутом α встановлено п’єзоелектричні давачі даного витратоміра (рис. 5.9), які можуть перетворювати електричні імпульси в акустичні, і навпаки.

Вимірювання швидкості потоку води відбувається наступним чином.

Електричний імпульс із формувача Φ_1 надходить до давача $Д_1$, який перетворює його в акустичний сигнал (механічні коливання ультразвукової частоти). Даний сигнал проходить через воду і сприймається давачем $Д_2$ через час T_1, який визначиться як

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$T_1 = \frac{L}{c + v_1}, \tag{5.23}$$

де L – відстань між давачами $Д_1$ і $Д_2$; c – швидкість поширення ультразвукових коливань у воді; $v_1 = v / cos\alpha$; v – швидкість потоку води.

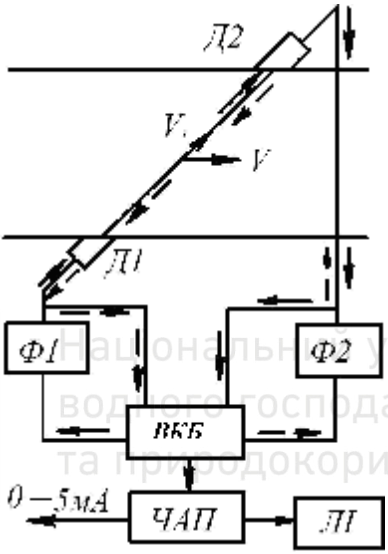


Рис. 5.9. Структурна схема акустичного витратоміра

Прийнятий акустичний сигнал перетворюється в електричний, підсилюється у вимірювально-керуючому блоці ВКБ і знову через $Ф_1$ надходить до давача $Д_1$. В результаті цього виникає автоциркуляція імпульсів по контуру, з частотою F_1

$$F_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{c + v_1}{L}. \tag{5.24}$$

Аналогічно відбувається автоциркуляція імпульсів і по контуру, показаному пунктирними стрілками. При цьому давач $Д_2$ випромінює, а давач $Д_1$ сприймає акустичні імпульси. Частота F_2 циркуляції імпульсів в цьому контурі буде дорівнювати

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$F_2 = \frac{c - v_1}{L}. \qquad (5.25)$$

Вимірювально-керуючий блок (ВКБ) керує роботою контурів і виділяє збільшену в 100 разів різницеву частоту ΔF

$$\Delta F = 100\left(F_1 - F_2\right) = 100\frac{2v_1}{L}. \qquad (5.26)$$

При підстановці у (5.26) $v_1 = v / cos\alpha$ і $L = d / sin\alpha$ отримаємо

$$\Delta F = 100\frac{v}{d} sin\, 2\alpha\ . \qquad (5.27)$$

При $\alpha = 45^0$

$$\Delta F = 100\frac{v}{d}. \qquad (5.28)$$

Оскільки $v = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2}$, то підставивши значення швидкості в (5.28), отримаємо

$$Q = 0,0025\pi d^3 \Delta F. \qquad (5.29)$$

Імпульси частотою ΔF надходять до частотно-аналогового перетворювача ЧАП з уніфікованим струмовим сигналом $0...5\ мА$ і на електронний лічильник імпульсів ЛІ, який фіксує кількість води, що проходить через витратомір.

Похибка ультразвукових витратомірів складає близько $\pm 2\%$.

Запитання для самоконтролю

1. Принцип дії електромагнітного витратоміра з постійним магнітним полем.
2. Переваги і недоліки електромагнітних витратомірів.
3. Принцип дії калориметричних витратомірів.
4. Ультразвуковий метод вимірювання витрат.
5. Принципова схема акустичного витратоміра.

Національний університет водного господарства та природокористування

5.3. Лічильники кількості

- Об’ємні лічильники

Об'ємні методи грунтуються на принципі послідовного додавання порцій досліджуваного потоку рідини чи газу, що проходить через вимірювальні камери, або на обертанні чутливого елемента під дією струменя досліджуваного середовища. Останній різновид об'ємного методу ще називається тахометричним.

На основі цього будують об'ємні лічильники, зокрема лічильники з овальними шестернями та ротаційні лічильники, турбінні (без вимірювальних камер).

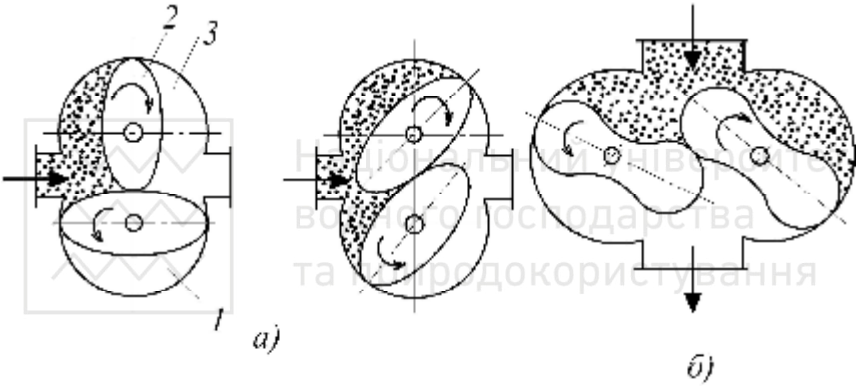


Рис. 5.10. Об’ємні лічильники

Лічильник з овальними шестернями (рис. 5.10, а) має вимірювальну камеру, в якій знаходяться дві овальні шестерні, що обкочують одна одну в зустрічних напрямках, оскільки мають зубчасте зачеплення. Крутний момент виникає під дією різниці тисків до та після вимірювальної камери. З кожним обертом шестерень переміщується відповідний об'єм досліджуваного середовища. Дані лічильники – швидкодіючі, дають змогу вимірювати значні об'ємні витрати. Виходячи із принципу дії таких витратомірів, можна формувати вихідні сигнали у вигляді імпульсів, струмових та частотних параметрів. Останнє може бути використаним як для дистанційної передачі вимірювальної інформації, так і в системах контролю та регулювання витрат технологічних установок.

Національний університет водного господарства та природокористування

У зв'язку з високою точністю (основна похибка 0,5%) вимірюваних витрат, незалежністю показів від в'язкості досліджуваного середовища, малими втратами тиску, значним крутним моментом та довговічністю лічильники з овальними шестернями широко застосовуються як побутові витратоміри рідин та газів, так і як первинні перетворювачі в системах автоматичного керування параметрів технологічних процесів.

Недоліком таких лічильників є високий рівень акустичного шуму, чутливість до забруднення досліджуваної речовини, що зумовлює необхідність її фільтрації.

Основними елементами роторного лічильника (рис. 5.10, б) є два гладкі ротори у формі вісімки, які обкочують один одного. Ротори з'єднані через редуктор з лічильником обертів.

Роторні лічильники використовують переважно для встановлення на магістральних газопроводах та для вимірювань витрат дорогих газів. Їх застосовування доцільне при низькому тиску газу та вимогах високої точності.

В розглянутих об'ємних лічильниках кожному повороту чутливого елемента відповідає точно обмежений об'єм досліджуваного середовища. В лічильниках, які будуть розглянуті нижче, в якості чутливого елемента застосовується турбінка з лопатками, яка обертається під дією досліджуваного потоку, а кількість її обертів пропорційна об'ємним витратам.

Об'ємні методи вимірювань, покладені в основу принципу дії так званих роторних лічильників витрат газу типу РЛ-1...РЛ-6 на експлуатаційний діапазон об'ємних витрат від 0,08 $м^3/год$ до 10,0 $м^3/год$. Границі допустимої відносної похибки таких лічильників у робочому діапазоні вимірювань становлять ±2,5%, поріг чутливості не перевищує 0,08 $м^3/год$.

- Швидкісні лічильники для рідин

Турбінні витратоміри (швидкісні лічильники) бувають двох типів: з аксіальною турбінкою, вісь якої збігається з напрямком досліджуваного потоку (рис. 5.11, а) і яка з'єднана передачею з лічильником обертів, і з вертикальною турбінкою - вісь якої безпосередньо зв'язана з лічильником обертів (рис. 5.11, б).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

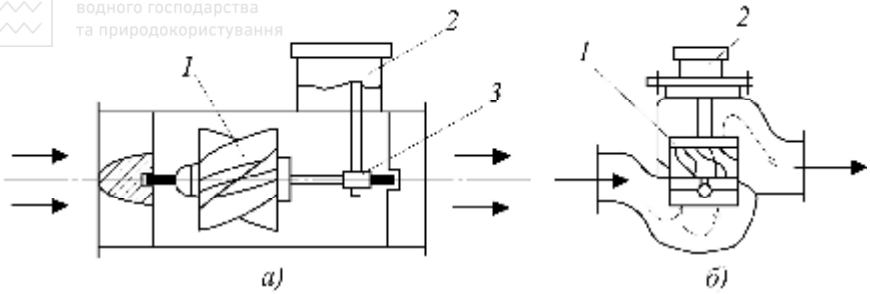


Рис. 5.11. Турбінні лічильники

Принцип дії лічильників обох типів грунтується на вимірюванні швидкості обертання турбінки під дією досліджуваного потоку.

Відомо, що об'ємна витрата Q_v рідини зв'язана з середньою швидкістю v_{cp} рухомого потоку співвідношенням

$$Q_v = v_{cp} s \,, \tag{5.30}$$

де s – площа поперечного перерізу потоку.

Кількість рідини, яка пройшла через прилад, пропорційна частоті n обертання турбінки, що знаходиться на шляху потоку. Вважають, що частота обертання турбінки є прямопропорційною середній швидкості потоку

$$n = c v_{cp} \,, \tag{5.31}$$

де c – коефіцієнт пропорційності, що характеризує конструктивні властивості приладу.

Враховуючи (5.30), отримаємо

$$n = c Q_v / s \,. \tag{5.32}$$

Отже, із (5.32) випливає, що частота обертання турбінки також прямопропорційна витраті рідини.

Для безперебійної роботи лічильників необхідна відсутність завихрень у потоці, що надходить на турбінку. Для цього використовують спеціальні випрямлячі струменя досліджуваної речовини, виконані у вигляді набору трубок або взаємоперпендикулярних схрещених пластин і вмонтованих по перерізу трубопроводу перед турбінкою та після неї.

Турбінні лічильники з механічним лічильним механізмом застосовують переважно для вимірювання витрат гарячої та

Національний університет водного господарства та природокористування

холодної води.

Турбінні лічильники (крильчасті водоміри) КВ-1,5 призначені для питної води (окремі модифікації для вимірювань витрат гарячої води) мають експлуатаційний діапазон об'ємних витрат від 0,06 $м^3 / год$ до 3 $м^3 / год$, границі допустимих похибок від ±2% до ±5%, поріг чутливості не перевищує 0,03 $м^3 / год$.

При вимірюванні малих витрат турбінними лічильниками з механічною передачею вимірювальної інформації виникають значні похибки, викликані механічним тертям. Ці похибки значно менші в індуктивних лічильниках турбінного типу. Одним з різновидів таких лічильників є лічильник, корпус якого виконано із неферомагнітного матеріалу, а в одну з лопаток турбіни вмонтовано постійний магніт. При обертанні турбінки магніт індукує у вимірювальній обмотці, розміщеній у зовнішній частині корпусу, імпульси напруги, частота яких пропорційна обертам турбінки.

В іншому конструктивному виконанні декілька пар лопаток і маточину турбінки виготовляють із феромагнітного матеріалу, а на зовнішній частині корпусу розміщають кілька сильних магнітів з індукційними котушками. При обертанні турбінки під дією досліджуваного потоку рідини змінюється магнітний потік, що призводить до наведення в обмотках змінної напруги, частота якої є пропорційною витраті.

Запитання для самоконтролю

1. Об’ємні лічильники з овальними шестернями.
2. Роторні лічильники.
3. Турбінні витратоміри (швидкісні лічильники).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

6. Вимірювання рівня

6.1. Поплавкові та гідростатичні рівнеміри

Вимірювання рівня при наповненні рідиною резервуарів та баків займає значне місце в різних галузях промисловості, науки та техніки.

Основними групами рівнемірів є: візуальні (за допомогою водомірного скла); гідростатичні (в яких рівень визначають за тиском рідини на дно резервуара з наступним вимірюванням дифманометром різниці даного і атмосферного тисків); електромеханічні та механічні, зокрема поплавкові та буйкові; електричні, в яких рівень перетворюється в зміну електричного опору (кондуктометричні) або зміну ємності (ємнісні).

Різновиди рівнемірів.

- Водомірне скло

Дія водомірного скла для рідин грунтується на принципі сполучених посудин.

Водомірне скло 1 (рис. 6.1, а) з допомогою арматури з'єднано з нижньою і верхнею частинами посудини.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

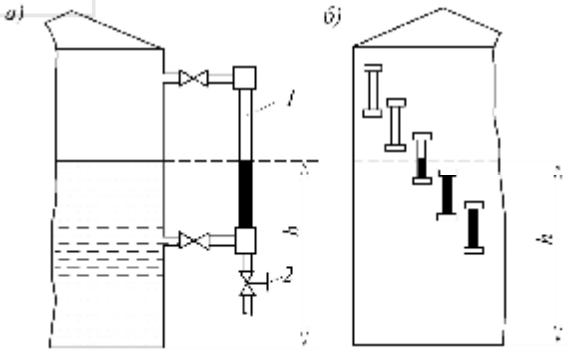


Рис. 6.1. Схема встановлення водомірного скла на технологічних апаратах

Спостерігаючи за положенням меніска рідини в трубі 1, судять про рівень рідини в посудині. Для виключення додаткової похибки через різницю температур рідини в резервуарі і скляній трубці, перед вимірюванням роблять промивку водомірної трубки за допомогою вентиля 2.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

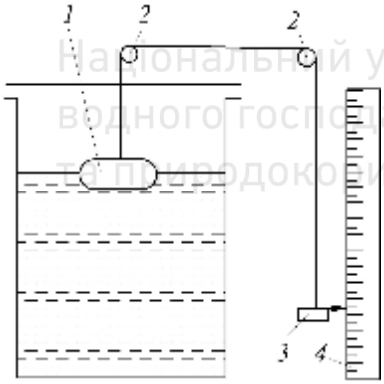
В результаті незначної механічної міцності водомірне скло застосовують довжиною не більше 0,5 м. Тому для вимірювання рівня у великих резервуарах (рис. 6.1, б) встановлюють кілька водомірних стекол з таким розрахунком, щоб вони перекривали одне одного.

Водомірне скло застосовується до тиску 2,94 МПа і температури 300 $^{\circ}C$.

Абсолютна похибка при вимірюваннях становить $\pm(1 \div 2)$ мм.

<u>- Поплавкові рівнеміри</u>

В поплавкових рівнемірах переміщення поплавка (чутливий елемент), густина якого менша за густину рідини, передається на показуючий пристрій (рис. 6.2) або перетворювач, наприклад, реостатний (рис. 6.3) для перетворення переміщення у вихідний електричний сигнал.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 6.2. Схема найпростішого поплавкового рівнеміра

Поплавок 1 (рис. 6.2) підвішено на гнучкому тросі, який перекинуто через ролик 2. На протилежному кінці тросу закріплено вантаж 3 та покажчик (стрілку), що показує на шкалі 4 рівень рідини.

Принципову схему поплавкового рівнеміра з реостатним перетворювачем та логометричним вимірювальним приладом, як зазначалось, наведено на рис. 6.3.

На даній схемі поплавок розміщено в баку з досліджуваним рівнем. Він механічно зв’язаний з повзунком реостатного

Національний університет
водного господарства
та природокористування

перетворювача $R_п$. Резистори R_1 і R_2 служать для узгодження параметрів перетворювача та логометра для забезпечення заданого діапазону вимірювань.

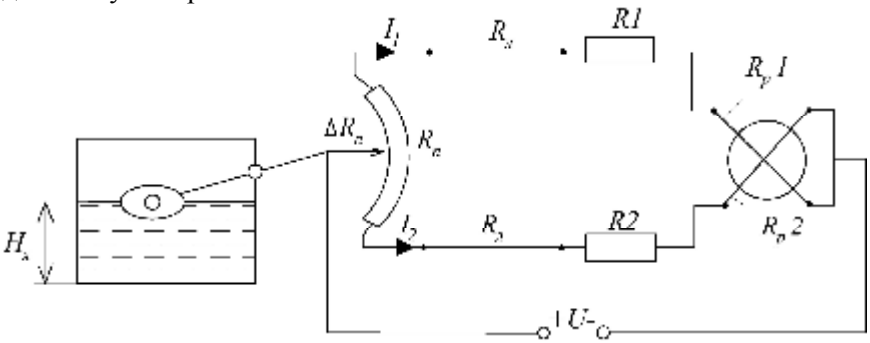


Рис. 6.3. Схема поплавкового рівнеміра з реостатним перетворювачем:
H_x – вимірюваний рівень; $\Delta R_П$ – зміна опору реостатного перетворювача, повний опір котушки якого становить $R_П$; I_1 і I_2 – струми, що протікають у колах першої і другої рамки логометра; $R_Л$ – опір з'єднувальних провідників; R_1 і R_2 – резистори для узгодження параметрів реостатного перетворювача та логометра; R_{p1} і R_{p2} – опори рамок логометра; U – напруга джерела живлення постійного струму

Національний університет
водного господарства
та природокористування

При зміні рівня H_x, а отже, відповідного положення поплавка повзунок реостатного перетворювача, змінюючи співвідношення опорів у колах рамок логометра, змінює в них співвідношення струмів I_1 та I_2, а тим самим і відхилення стрілки на кут α ($\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$), яка показує вимірюваний рівень.

<u>- Поплавкові рівнеміри з сельсинною і реостатною парами</u>

Систему дистанційного вимірювання рівня води в резервуарі показано на рис. 6.4.

Зміна рівня води спричиняє до обертання ротора сельсина-давача 4. Ротор сельсина-приймача 5, який віддалений від резервуара, повертається на той же кут α, що і ротор сельсина-

Національний університет
водного господарства
та природокористування

давача 4 ($\alpha = f(H)$), де H – вимірюваний рівень, що переміщує покажчик 7. Наведене дозволяє прочитати на шкалі шукане значення рівня води в резервуарі.

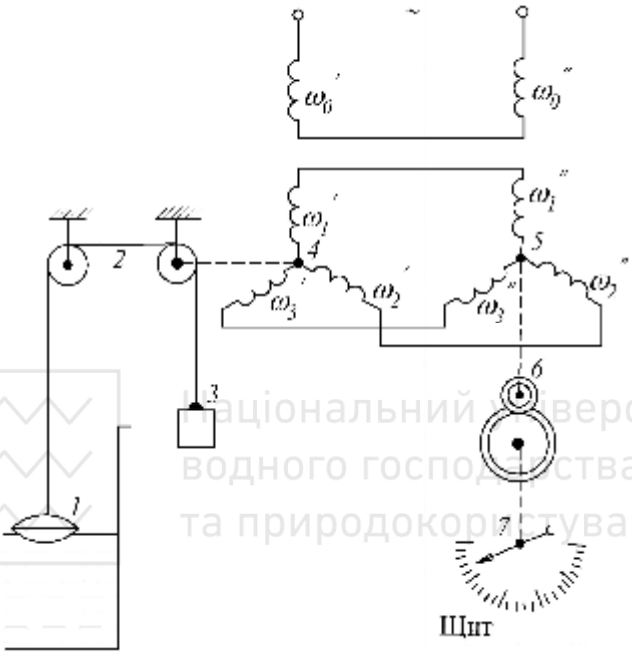


Рис. 6.4. Поплавковий рівнемір з сельсинною парою:
1 – поплавок; 2 – дротяний тросик; 3 – противага; 4 і 5 – відповідно сельсин-давач і сельсин-приймач; 6 – зубчастий редуктор; 7 – покажчик

Схему дистанційного вимірювання рівня води на основі поплавкового рівнеміра з реостатною парою показано на рис. 6.5.

В системі, наведеній на рис. 6.5, переміщення x поплавка ($x = H$) передається на пульт оператора наступним чином.

Внаслідок зміни рівня рідини потенціали точок C і D (φ_C і φ_D) відрізняються (у вихідному положенні $\varphi_C = \varphi_D$).

Різницева постійна напруги U_{CD} перетворюється на змінну з допомогою перетворювача 2, підсилюється підсилювачем 3 і вмикає серводвигун РД. Останній переміщує повзунок D таким чином,

Національний університет
водного господарства
та природокористування

щоб потенціал точки D (φ_D) відповідав новому значенню потенціала точки C (φ_C). Іншими словами, щоб $\varphi_D = \varphi_C$.

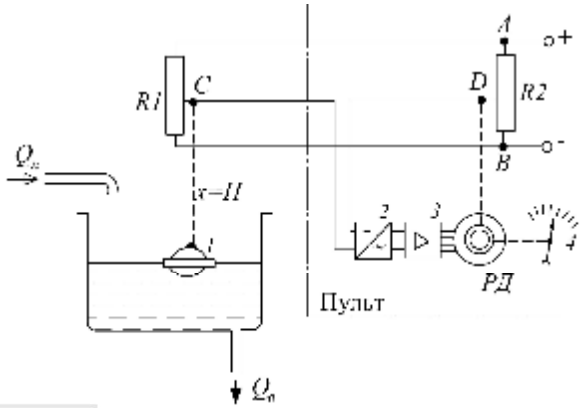


Рис. 6.5. Поплавковий рівнемір з реостатною парою:
1 – поплавок; 2 – перетворювач постійної напруги на змінну; 3 – підсилювач;
РД – реверсивний серводвигун; 4 – покажчик

Стале положення в цьому випадку ротора серводвигуна (і стрілки покажчика) дозволяє прочитати на шкалі величину рівня H рідини.

<u>- Поплавкові рівнеміри з пневматичною передачею показів</u>

Рівнемір такого типу наведено на рис. 6.6.

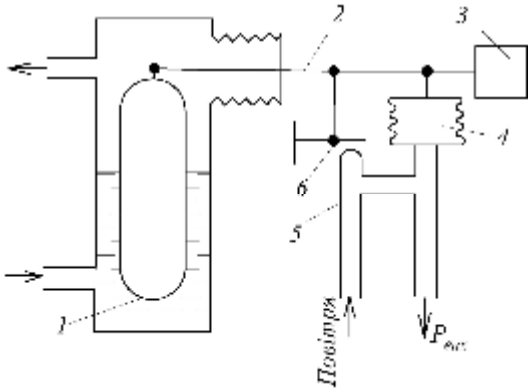


Рис. 6.6. Поплавковий рівнемір з пневматичною передачею показів на відстань

Національний університет водного господарства та природокористування

На даній схемі поплавок 1 підвішено до важеля 2, на кінці якого знаходиться зрівноважуючий вантаж 3.

Функцію перетворювача виконує система «сопло-заслінка» 5 і 6. Сильфон 4 реалізує зворотній зв'язок.

При збільшенні рівня рідини поплавок 1 переміститься вгору, сопло 5 більше перекриється заслінкою 6, в результаті чого тиск $p_{вих}$ збільшиться. При зменшенні рівня збільшиться відстань між соплом і заслінкою, в результаті чого $p_{вих}$ зменшиться. Отже, $p_{вих}$ функціонально залежить від рівня H ($p_{вих} = f(H)$).

Для рівнемірів з пневматичним вихідним сигналом застосовують вторинні прилади (манометри), які мають діапазон вимірювання 0,02–0,1 МПа.

- Буйкові рівнеміри і сигналізатори рівня

Їх робота грунтується на використанні виштовхувальної сили, що діє на занурене у рідину циліндричне тіло (буйок). Довжина його значно більша від його діаметра (рис. 6.7), а питома густина більша від питомої густини досліджуваної рідини.

Національний університет водного господарства та природокористування

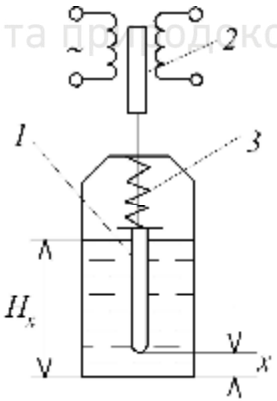


Рис. 6.7. Структура буйкового перетворювача рівня рідини

Буйок 1 механічно з'єднаний з чутливим елементом 2 вторинного перетворювача, а його переміщення обмежується за допомогою пружини 3, закріпленої одним кінцем до верхньої частини буйка, а іншим до нерухомої частини корпуса. Такий буйок, що вільно підвішений на пружині, є масштабуючим перетворювачем

Національний університет
водного господарства
та природокористування

достатньо великих змін рівня H_i (до 10–20 м) у порівняно невеликі переміщення буйка x та чутливого елемента вторинного перетворювача. Залежно від рівня рідини на буйок діятиме підйомна сила, внаслідок чого пружина стискатиметься, а чутливий елемент – плунжер індуктивного перетворювача – переміщуватиметься, змінюючи вихідну індуктивність (повний електричний опір) або вихідну ЕРС.

Вторинним вимірювальним приладом рівнемірів з буйковим перетворювачем (рис. 6.8) можуть бути прилади типу КПД чи КСД (з компенсаційним вимірювальним колом з диференціально-трансформаторними перетворювачами).

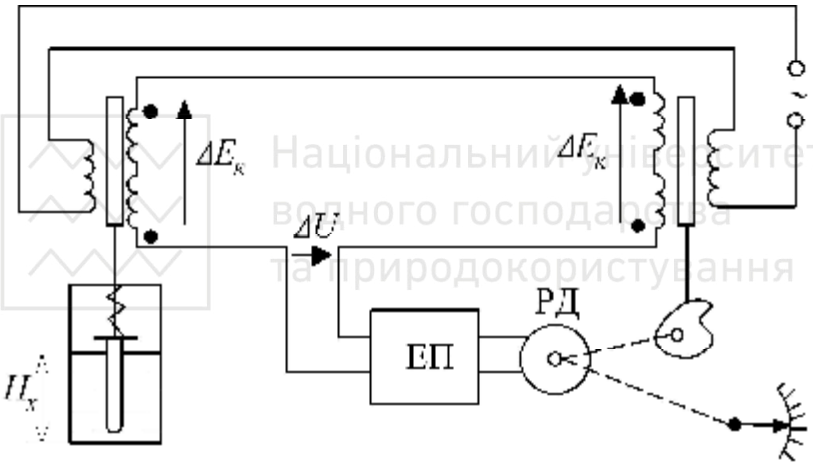


Рис. 6.8. Схема буйкового рівнеміра з диференціально-трансформаторним перетворювачем: H_x – вимірюваний рівень; ΔE_K – різниця електрорушійних сил вторинних обмоток обох диференційно-трансформаторних перетворювачів; $\Delta U = \Delta E_{K1} - \Delta E_{K2}$; ЕП – електронний підсилювач; РД – реверсивний двигун

Останнім часом широко застосовуються буйкові та поплавкові рівнеміри з силовою компенсацією, а також статичного зрівноважувального перетворення. Вихідною величиною в даних вимірювачах є струм. Буйкові рівнеміри такого типу з уніфікованим вихідним сигналом 0–5 мА та 0–20 мА призначаються для вимірювань рівня рідин в технічних ємностях з рівнем заповнення до 10– 16 м. Їхня зведена похибка наближається до 1,5%.

Національний університет водного господарства та природокористування

Одну з найпростіших систем автоматичної сигналізації рівня води в резервуарі показано на рис. 6.9.

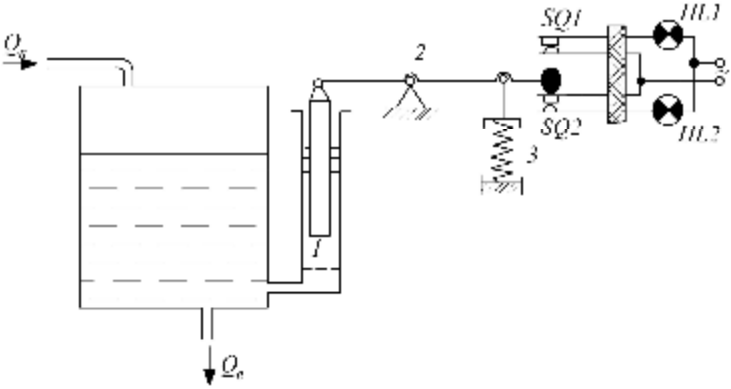


Рис. 6.9. Схема автоматичної сигналізації рівня води в резервуарі з буйковим перетворювачем: 1 – буйковий перетворювач; 2 – важіль; 3 – пружина; $SQ1$ та $SQ2$ – контактні перетворювачі; $HL1$ та $HL2$ – сигнальні лампи

На даній схемі відхилення рівня рідини від норми примушує засвічуватись відповідну сигнальну лампу. В разі зменшення рівня – світиться лампа $HL1$, а у разі збільшення рівня – відповідно лампа $HL2$.

<u>- Гідростатичні рівнеміри</u>

В цих приладах вимірювання рівня H рідини постійної густини ρ зводиться до вимірювання тиску p, який створює стовп цієї рідини

$$p = H\rho g, \tag{6.1}$$

де g – прискорення сили земного тяжіння.

З (6.1)

$$H = \frac{p}{\rho g}. \tag{6.2}$$

Існують гідростатичні рівнеміри з неперервним продуванням повітря або газу (п’єзометричні рівнеміри) з безпосереднім вимірюванням стовпа рідини.

Схему п’єзометричного рівнеміра представлено на рис. 6.10.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

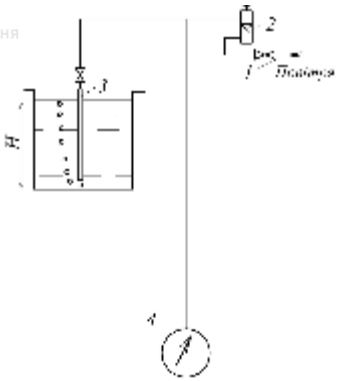


Рис. 6.10. Схема п’єзометричного рівнеміра

На даній схемі стиснене повітря, пройшовши через дросель 1 і ротаметр 2, надходить в п’єзометричну трубку 3, яка знаходиться в резервуарі.

У випадку, коли тиск повітря, який вимірюється манометром 4, дорівнюватиме тиску вимірюваного стовпа H рідини, з трубки в рідину почнуть надходити бульбашки повітря. Це є сигналом того, що необхідно взяти відлік по шкалі манометра. Величина цього тиску p підставляється у вираз (6.2), на основі чого і визначається рівень H.

На рис. 6.11 наведено схеми гідростатичних рівнемірів з безпосереднім вимірюванням стовпа рідини

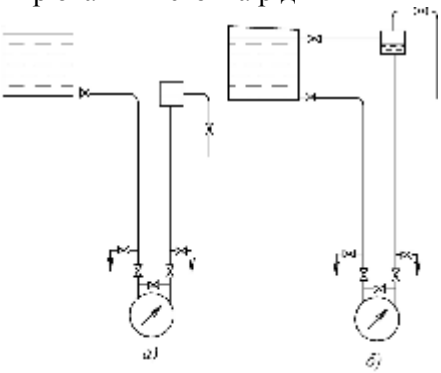


Рис. 6.11. Схеми гідростатичних рівнемірів з безпосереднім вимірюванням стовпа рідини:
а) у відкритому резервуарі; б) у резервуарі, що знаходиться під тиском

Національний університет
водного господарства
та природокористування

На рис. 6.11, а представлено схему вимірювання рівня у відкритому резервуарі і встановленні дифманометра нижче дна резервуара. В цьому випадку для вимірювання рівня обов'язково застосовують зрівнюючу посудину, яка наповнюється до відповідного (відомого) рівня рідиною, що знаходиться в резервуарі. Призначенням цієї зрівнюючої посудини є забезпечення постійного стовпа рідини в одному з колін дифманометра. Висота стовпа рідини в другому коліні дифманометра змінюється із зміною рівня в резервуарі. Кожному значенню рівня в резервуарі відповідає своє значення перепаду тиску.

Зазначене дозволяє по величині вимірюваного перепаду тиску судити про рівень рідини в резервуарі.

На рис. 6.11, б показано схему вимірювання рівня рідини в резервуарі, що знаходиться під тиском при встановленні дифманометра нижче дна резервуара. В цьому випадку зрівноважуюча посудина встановлюється на висоті максимального рівня і з'єднується з контрольованим резервуаром.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Запитання для самоконтролю

1. Основні групи рівнемірів.
2. Поплавковий рівнемір з реостатним перетворювачем.
3. Поплавковий рівнемір з сельсинною парою.
4. Поплавковий рівнемір з реостатною парою.
5. Поплавковий рівнемір з пневматичною передачею показів на відстань.
6. Структура буйкового перетворювача рівня рідин.
7. Схема буйкового рівнеміра з диференціально-трансформаторним перетворювачем.
8. Схема автоматичної сигналізації рівня води в резервуарі з буйковим перетворювачем.
9. Схема п'єзометричного рівнеміра.
10. Гідростатичні рівнеміри з безпосереднім вимірюванням стовпа рідини.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

6.2. Електричні та радіоізотопні рівнеміри

В електричних рівнемірах рівень рідини перетворюється у відповідний електричний сигнал. Із електричних рівнемірів найбільш розповсюдженими є ємнісні і омічні.

В ємнісних рівнемірах використовуються діелектричні властивості контрольованих середовищ, а в омічних – властивість контрольованого середовища проводити електричний струм.

- Ємнісний рівнемір

Перетворювачем ємнісного рівнеміра є електричний конденсатор, ємність якого залежить від рівня рідини.

Перетворювачі ємнісних рівнемірів виготовляють, в основному, циліндричного і пластинчастого типів (рис. 6.12).

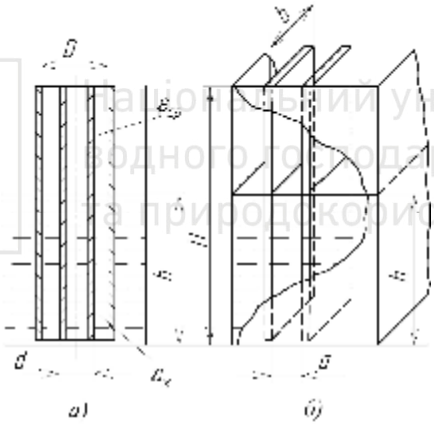


Рис. 6.12. Схеми ємнісних перетворювачів рівнемірів:
а) циліндричного; б) пластинчастого

У найпростішому випадку циліндричний ємнісний перетворювач (рис. 6.12, а) виконаний з двох концентрично розміщених труб, а пластинчастий (рис. 6.12, б) з двох паралельних пластин, між якими знаходиться рідина висотою h.

Ємність перетворювача дорівнює сумі ємностей двох ділянок C_h – тої, що знаходиться в рідині з діелектричною проникливістю $\varepsilon_{ж}$ і C_{H-h} – тої, що знаходиться в повітряному середовищі з

Національний університет
водного господарства
діелектричною проникливістю $\varepsilon_{ср}$ (для повітря $\varepsilon_{ср} = 1$).

Ємність C (пФ) циліндричного перетворювача дорівнюватиме

$$C = C_h + C_{H-h} = 0,241\frac{\varepsilon_{ж} h}{lg(D/d)} + 0,241\frac{\varepsilon_{ср}(H-h)}{lg(D/d)} = \\ = 0,241\frac{\varepsilon_{ж} h + \varepsilon_{ср}(H-h)}{lg(D/d)}, \quad (6.3)$$

де h – рівень рідини, що вимірюється (см); D і d – відповідно внутрішній діаметр зовнішньої обкладки і зовнішній діаметр внутрішньої обкладки циліндричного конденсатора (см); H – висота посудини, в якій знаходиться рідина, рівень якої дорівнює довжині обкладок конденсатора (см).

Ємність C (пФ) пластинчастого плоскопаралельного ємнісного перетворювача дорівнює

$$C = 0,088\frac{\varepsilon_{ж} hb}{a} + 0,088\frac{\varepsilon_{ср}(H-h)b}{a} = \\ = \frac{0,088b}{a}\left[\varepsilon_{ж} h + \varepsilon_{ср}(H-h)\right], \quad (6.4)$$

Національний університет
водного господарства
та природокористування

де a – відстань між пластинами (см); b – ширина пластини перетворювача (см).

При вимірюванні рівня агресивних, але неелектропровідних рідин обкладки перетворювача виконують з хімічно стійких сплавів або покривають вініпластом чи фторопластом. Покриття обкладок тонкими плівками – ізоляторами, застосовують при вимірюванні рівня електропровідних рідин.

В якості вторинних вимірювальних приладів в ємнісних рівнемірах застосовують високочастотні вимірювальні мости.

Ємнісні рівнеміри випускають класом точності 0,5; 1,0; 2,5.

Їх мінімальний діапазон вимірювань становить від $0-0,4$ до $0-20$ м; тиск робочого середовища $2,5-10$ МПа; температура від -0 до +100 $^{\circ}C$ та від 100 до 250 $^{\circ}C$.

- Омічні сигналізатори рівня використовують, головним чином, для сигналізації і підтримування в заданих межах рівня електропровідних рідин (кислот, лугів).

Національний університет водного господарства та природокористування

Принцип дії омічних сигналізаторів грунтується на замиканні електричного кола джерела живлення через контрольоване середовище, яке представляє собою ділянку електричного кола з відповідним омічним опором. Дані сигналізатори рівня можна застосовувати для середовищ з провідністю $2 \cdot 10^{-3}\ См/см$ і більше.

Прилад представляє собою електромагнітне реле, що вмикається в коло між електродом і контрольованим матеріалом.

Схеми увімкнення релейного сигналізатора рівня (рис. 6.13) можуть бути різними.

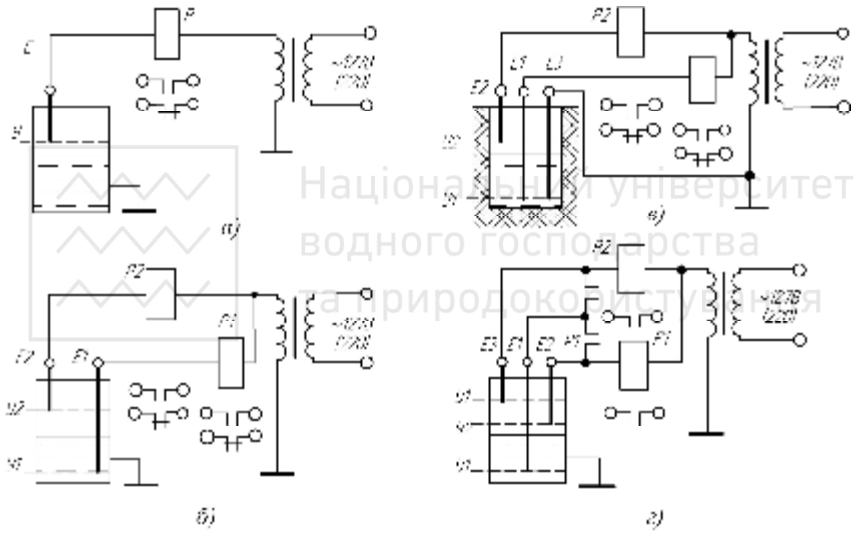


Рис. 6.13. Схеми увімкнення омічного релейного сигналізатора для контролю: а) одного рівня; б) двох рівнів; в) двох рівнів в об'єкті з ізоляційного матеріалу; г) трьох рівнів

На рис. 6.13, а показано схему увімкнення приладу в струмопровідний об'єкт. В цьому випадку для контролю одного рівня y можна використовувати один електрод *E*, одне реле P і один провід.

При контролі двох і більше рівнів (y_1 і y_2 – рис. 6.13, б) необхідно вдвічі більше число реле і електродів $P1$, $P2$ та *E1*, *E2*.

Національний університет водного господарства та природокористування

На рис. 6.13, в показано схему, яка застосовується, коли стінки резервуара неможливо використовувати в якості другого електроду.

При необхідності сигналізації про аварійний рівень, застосовують схему, наведену на рис. 6.13, г (наприклад, керування насосом, який відводить рідину з резервуара).

При заповненні резервуара до рівня y_2 через електрод *E2* вмикається реле $P1$ і своїм контактом утворює коло живлення через електрод *E1*. При цьому вмикається насос, який відкачує рідину до тих пір, поки рівень не знизиться до y_1. Якщо рівень рідини досягне відмітки y_3, то через електрод *E3* буде увімкнено реле $P2$, яке вмикатиме резервний насос в колі аварійної сигналізації. Вимкнення резервного насоса і сигналізації відбудеться при зменшенні рівня до відмітки y_1, оскільки реле $P2$ своїм контактом утворює додаткове електричне коло через електрод *E1*.

В якості електродів застосовують металеві стержні або труби і вугільні електроди.

Недоліком електродних приладів є неможливість їхнього застосування у в'язких середовищах і таких, що кристалізуються, в яких можуть утворюватися тверді осади а також відбувається налипання на електроди.

- <u>Радіоізотопні рівнеміри</u>

Рівень рідин в закритих резервуарах можна контролювати за допомогою γ-випромінювання. Вимірювання рівня грунтується на поглинанні γ-променів при проходженні їх через товщу речовини. Інтенсивність γ-випромінювання при поглинанні його речовиною виразиться залежністю

$$J_x = J_0\, exp\left(-\mu x\right), \qquad (6.5)$$

де J_x – інтенсивність γ-променів після проходження шару речовини товщиною x; J_0 – початкова інтенсивність γ-променів; μ – коефіцієнт ослаблення γ-променів, який залежить від природи і товщини шару речовини.

Найбільш застосовані ізотопи, що випромінюють γ-промені – це ^{60}Co і ^{173}Cs.

Національний університет водного господарства та природокористування

Можливі три принципові схеми радіоактивних рівнемірів (рис. 6.14).

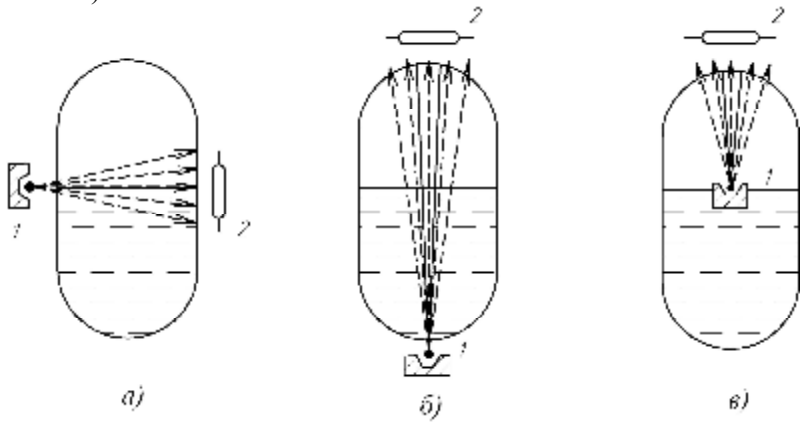


Рис. 6.14. Принципові схеми радіоізотопних рівнемірів

Національний університет водного господарства та природокористування

Схеми на рис. 6.14, а і б застосовують у випадках, коли випромінювач 1 не можна розмістити в резервуарі. Схему, наведену на рис. 6.14, а, можна застосовувати в якості сигналізатора максимального або мінімального рівня (при нерухомому випромінювачі 1 і приймачі випромінювання 2).

При невеликих висотах стовпа рідини (для легких рідин до 1 м) можливо застосовувати схему, показану на рис. 6.14, б.

Схему, наведену на рис. 6.14, в, доцільно застосовувати у випадках, коли в посудину можна помістити поплавок (випромінювач).

Запитання для самоконтролю

1. Схема циліндричного і пластинчастого ємнісних рівнемірів.
2. Омічні сигналізатори рівня.
3. Принципові схеми радіоізотопних рівнемірів.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

6.3. Вимірювання рівня безконтактним способом

- Ультразвукові і акустичні рівнеміри

Ультразвукові і акустичні рівнеміри дозволяють вимірювати рівень при відсутності контакту з контрольованим середовищем і у важкодоступних місцях. В цих рівнемірах застосовується принцип відбиття ультразвукових коливань від межі розділу двох середовищ з різним акустичним опором (різною густиною).

В ультразвукових рівнемірах використовується принцип відбивання ультразвукових коливань зі сторони рідини, а в акустичних – зі сторони газового середовища.

На рис. 6.15 наведено блок-схему ультразвукового рівнеміра, що працює на принципі відбивання звуку від границі розділу двох середовищ.

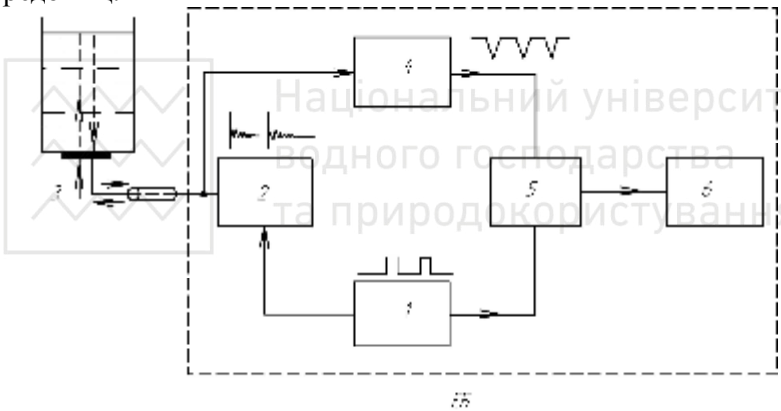


Рис. 6.15. Блок-схема ультразвукового рівнеміра

Прилад складається з п’єзоелектричного перетворювача 3 (випромінювача); електронного блоку, який в свою чергу складається з генератора 1, що задає частоту електричних імпульсів генератора 2, які надсилаються у вигляді механічних коливань ультразвукової частоти у контрольоване середовище з допомогою п’єзоелектричного перетворювача 3, приймального підсилювача 4, таймера 5 та вторинного вимірювального приладу 6 (наприклад, автоматичного потенціометра).

Генератор 1 керує роботою генератора 2 і схемою вимірювання часу. Частота імпульсів становить 300 Гц.

Національний університет водного господарства та природокористування

Генератор 2 формує короткі імпульси для збудження п'єзоелектричного випромінювача 3. Електричний імпульс, перетворений в механічний ультразвуковий п'єзоелектричним випромінювачем, розповсюджується в рідкому середовищі, відбивається від межі розділу «рідина-повітря», повертається назад, діє через деякий проміжок часу на той же випромінювач 3 і перетворюється ним в електричний. Обидва імпульси, надісланий і відбитий, які є розділеними у часі, надходять до підсилювача 4.

Рівень h рідини в резервуарі визначається за часом τ запізнення відбитого сигнала відносно надісланого.

$$\tau = 2h / a, \qquad (6.6)$$

де a – швидкість розповсюдження звуку в рідині.

Постійна напруга U, яка є пропорційною часу запізнення τ відбитого сигналу (рівню), що отримується в таймері 5, подається на вторинний вимірювальний прилад 6.

Як зазначалось вище, рівнеміри, в яких локація межі розділу двох середовищ здійснюється через газ, називаються акустичними.

Перевагою акустичних рівнемірів є незалежність їх показів від фізико-хімічних властивостей і складу робочого середовища. Це дозволяє використовувати їх для вимірювання рівня неоднорідних рідин, що кристалізуються і випадають в осад.

До недоліків слід віднести вплив на покази рівнемірів температури, тиску і складу газу.

Згідно наведеного, випромінювач-приймач в акустичних рівнемірах, на відміну від ультразвукових, знаходиться в газовому середовищі над рідиною (рис. 6.16).

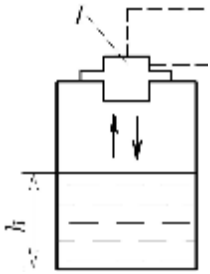


Рис. 6.16. Розміщення випромінювача-приймача акустичного рівнеміра в об'єкті

Національний університет водного господарства та природокористування

Із порівняльного аналізу схем ультразвукового і акустичного рівнемірів випливає, що для останнього вираз (6.6) дещо зміниться, а саме

$$\tau = 2\left(H - h\right) / a\,, \qquad (6.7)$$

де H – повна висота об'єкта з досліджуваним рівнем.

Для даних приладів вимірювання рівня можна проводити в межах від 0 до 3 м.

Клас точності становить 2,5. Температура контрольованого середовища повинна знаходитись в межах від 10 до 50 $^{\circ}C$. Тиск в технологічному апараті не повинен перевищувати 4 МПа.

- Рівнеміри для сипучих матеріалів

В ряді технологічних процесів в хімічній промисловості часто виникає необхідність неперервного вимірювання рівня сипучих матеріалів в бункерах. Для цього найчастіше застосовують поплавкові, ємнісні та вагові рівнеміри.

Дія поплавкового рівнеміра з поплавком постійного занурення грунтується на підтримуючій здатності сипучих тіл, яка виражається у тому, що опущений на відкриту поверхню поплавок приладу не провалюється вглиб сипучого матеріалу.

Схема поплавкового рівнеміра для вимірювання рівня сипучих тіл аналогічна наведеній на рис. 6.2.

Вагові рівнеміри сипучих матеріалів застосовуються у випадках, коли підвіска бункера не викликає конструктивних ускладнень, а завантаження і розвантаження матеріала проходять не періодично, а рівномірним потоком. В якості перетворювачів, у цьому випадку, можна використовувати різні вагові пристрої.

Так, в якості перетворювача граничного рівня, якщо бункер знаходиться на опорних пружинах, можливо застосувати кінцеві вимикачі. При навантаженні бункера відбувається стискання даних пружин і лінійне переміщення бункера по вертикалі. Штанга, закріплена на бункері, взаємодіючи з кінцевим вимикачем, забезпечує його спрацювання при наповненні і спорожненні бункера.

В якості перетворювачів у вагових рівнемірах можливим є застосування динамометричних давачів (ДД) або тензорезисторних.

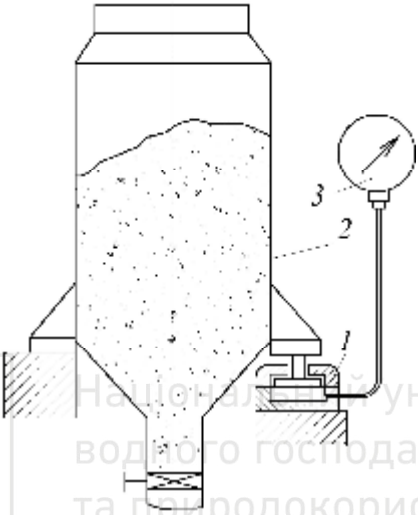
У першому випадку вимірюють тиск, який передається на опору бункера. Цей тиск є функцією степеня наповнення бункера

Національний університет
водного господарства
та природокористування

матеріалом.

В другому випадку вимірюють електричний опір тензорезистора, який є пропорційним рівню матеріала в бункері.

Схема установки наведена на рис. 6.17.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 6.17. Ваговий рівнемір з динамометричним давачем

Ваговий рівнемір складається з гідравлічного динамометричного давача ДД 1, з'єднаного трубкою з манометром 3, проградуйованого в одиницях маси чи рівня. Динамометричний давач ДД, будучи опорою однієї з лап бункера 2, представляє собою металевий корпус з поршнем, герметизованим гнучкою мембраною. ДД, з'єднувальна трубка і пружина манометра заповнені рідиною. Тиск в системі ДД-манометр дорівнює відношенню ваги бункера із заповнюючим його матеріалом до площі поршня ДД.

В манометрі даного рівнеміра положення стрілки на відмітці «нуль» відповідає порожньому бункеру. Звідси випливає, що покази манометра відповідають вазі матеріалу, який заповнює бункер.

- Сигналізатор рівня сипучих матеріалів

На рис. 6.18 наведено принципові схеми сигналізаторів рівня сипучих матеріалів, які грунтуються на застосуванні перетворювачів, що сприймають тиск контрольованої речовини.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

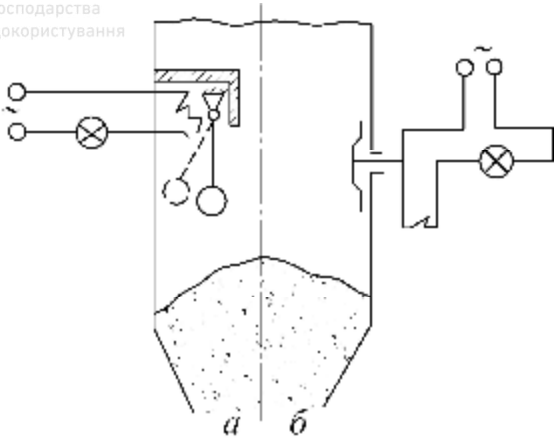


Рис. 6.18. Принципові схеми сигналізаторів рівня сипучих матеріалів з маятниковим (а) і мембранним (б) пристроями

На різній висоті в стінках бункера встановлюють мембрани (рис. 6.18, б) або підвішують на шарнірах маятники (рис. 6.18, а) з пластинкою або кулею на кінці. Під тиском сипучого матеріалу мембрана прогинається і переміщує за собою пружину, яка замикає контакти. Останні забезпечують подачу відповідного електричного сигналу. При зменшенні рівня пружина повертає мембрану і контакти у вихідне положення.

Аналогічне відбувається і у випадку з маятниковим пристроєм.

Запитання для самоконтролю

1. Ультразвукові рівнеміри.
2. Акустичні рівнеміри.
3. Рівнеміри для сипучих матеріалів.

Національний університет водного господарства та природокористування

7. Методи і засоби для аналізу складу рідин

7.1. Загальні відомості

В ході хіміко-технологічних процесів змінюється хімічний склад речовин, що перероблюються, а також їх властивості.

При контролі і автоматизації данних процесів аналізують, головним чином, рідкі і газоподібні речовини. Різноманітність аналізованих компонентів і сумішей, що знаходяться в умовах різного тиску і температур, визначають собою велику кількість вимірювальних засобів.

У загальному випадку під аналізом складу речовин розуміють визначення їх елементарного, функціонального або молекулярного складу. Також необхідно визначити їх фазовий склад.

Прилади для визначення складу речовин називаються аналізаторами. Аналізатори, призначені для визначення лише одного компонента в суміші, називаються концентратомірами.

Національний університет водного господарства та природокористування

Електропровідність розчинів. Основним розчинником хімічних речовин є вода. Молекула води H_2O може бути подана у вигляді двох різнополярних іонів: H^+ і OH^-. Зв'язок між цими іонами сильний, тому в дистильованій воді кількість вільних носіїв заряду обмежена, тобто дисоціація ($H_2O \rightleftarrows H^+ + OH^-$) проходить слабко. Оскільки вода є речовиною з високою діелектричною проникністю, то вона активно розщеплює молекули кислот, основ і солей на позитивні та негативні іони, іншими словами ці речовини активно дисоціюють у воді, утворюючи розчини.

Речовини, які розчиняються у воді (або в іншому розчиннику) з утворенням позитивних і негативних іонів, називають електролітами. Розчини кислот, солей і основ у воді або інших розчинниках є електропровідними і називаються провідниками другого роду.

Дисоціація може відбуватися і без участі розчинника, наприклад, при розплаві кристалів солей. В електрохімічному відношенні таке середовище поводить себе як розчин, і також є провідником другого роду.

Під дією електричного поля, яке утворюється при прикладенні до електродів напруги, позитивні іони (водню або металу)

Національний університет водного господарства та природокористування

рухатимуться до катода, а негативні (гідроксильні групи або кислотні залишки) – до анода. Електропровідність розчинів залежить від їх концентрації.

Розрізняють відсоткову, масову, молярну і нормальну (еквівалентну) концентрації. Перша виражає відсотковий вміст розчиненої речовини в масі розчину. Масовою концентрацією називають відношення маси розчиненої речовини до об'єму розчину (г/л). Молярна концентрація c визначається кількістю молів розчиненої речовини в одиниці об'єму розчину ($г-моль/л$, або $кг-моль/м^3$). Якщо концентрація дорівнює 1 $г-моль/л$, то розчин називають молярним. Таку концентрацію позначають 1 М. Нормальну концентрацію виражають в грам-еквівалентах розчиненої речовини в 1 л розчину (1 г-екв/л).

Розчин, що має концентрацію 1 г-екв/л, називають нормальним (1 н.). Інші значення концентрації виражаються як кратні молярній або нормальній, наприклад, 0,1 М; 0,01 М або 0,1 н.; 0,01 н.

Питома електропровідність γ розчину залежить від його концентрації і пропорційна хімічній активності розчину

$$\gamma = \lambda f c = \lambda a, \tag{7.1}$$

де f – коефіцієнт активності; λ – еквівалентна електропровідність; a – хімічна активність розчину; c – молярна концентрація.

Коефіцієнт активності f дорівнює одиниці, якщо концентрації розчинів дуже слабкі, і зменшується в міру підвищення концентрації. Отже, питома електропровідність є деякою функцією концентрації розчину.

Рухливість іонів залежить від температури розчину. Звідси електропровідність розчину також залежить від температури. Якщо концентрації невеликі (до 0,05 н.), то ця залежність описується виразом

$$\gamma = \gamma_0 \left[1 + \beta \left(T - T_0\right)\right], \tag{7.2}$$

де γ, γ_0 – електропровідності розчину при температурах відповідно T і T_0; β – температурний коефіцієнт електропровідності ($\beta > 0$).

При нормальній для хімічних процесів температурі ($+18\,^\circ C$)

Національний університет водного господарства та природокористування

приблизні значення β дорівнюють: 0,016 1/К для кислот; 0,019 1/К для основ і 0,024 1/К для солей. З підвищенням температури понад $40...50^{\circ}C$ температурна залежність електропровідності стає нелінійною, а значення β зменшується.

Електродні та граничні потенціали. Під час занурення металевого електрода в розчин матеріал останнього почне розчинятися. Позитивно заряджені іони металу переходитимуть у розчин, а на електроді утвориться надлишок електронів, у зв'язку з чим даний електрод заряджатиметься негативно відносно розчину. Потенціал електрода щодо розчину, в який він поміщений, називають електродним потенціалом.

Встановити безпосередньо значення електродного потенціалу неможливо, оскільки для його вимірювання необхідний інший електрод, розміщення якого в розчині призводить до виникнення його власного електродного потенціалу. Таким чином, може бути виміряна різниця двох електродних потенціалів. Приймаючи один з потенціалів за базовий, можна оцінити відносне значення другого потенціалу. За базовий приймають потенціал так званого водневого електрода відносно розчину з нормальною активністю водневих іонів.

В якості водневого електрода (рис. 7.1) використовують платиновий електрод, на поверхню якого адсорбують газоподібний водень.

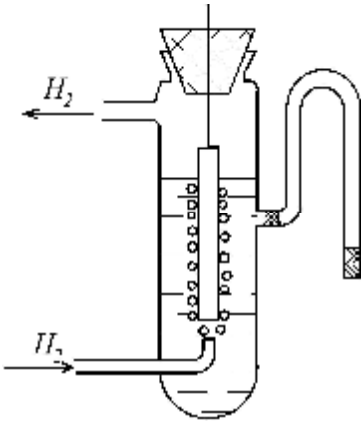


Рис. 7.1. Будова водневого електрода

Національний університет водного господарства та природокористування

Значення електродних потенціалів різних речовин відносно водневого електрода визначаються загалом властивостями самої речовини і залежать від концентрації та температури розчину (рівняння Нернста)

$$e = e_0 + \frac{RT}{nF} ln\left(fc\right), \tag{7.3}$$

де e_0 – нормальний потенціал електрода (електродний потенціал при $t = 18\,^{\circ}C$ і нормальній концентрації розчину); T – абсолютна температура розчину, R – універсальна газова стала; n – валентність іонів; F – стала Фарадея.

Враховуючи числові значення сталих R і F і переходячи до десяткових логарифмів, вираз для електродного потенціалу при $t = 18\,^{\circ}C$ можна записати у вигляді

$$e = e_0 + \frac{0,058}{n} lg\left(fc\right). \tag{7.4}$$

Значення нормальних електродних потенціалів знаходяться в межах від -3 до +3 В.

Електрохімічний перетворювач може складатись з двох електродів, вміщених у різні розчини (рис. 7.2). Кожна окрема комірка такого складового гальванічного елемента називається напівелементом. У загальному випадку ЕРС, що виникає між двома напівелементами, дорівнюватиме

$$e_{12} = e_1 - e_2 + \frac{RT}{nF} ln\left(\frac{f_1 c_1}{f_2 c_2}\right). \tag{7.5}$$

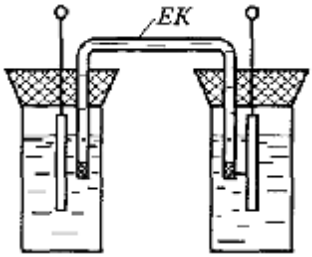


Рис. 7.2. Гальванічне коло з двох напівелементів

Національний університет водного господарства та природокористування

Якщо напівелементи відрізняються тільки концентрацією однойменних іонів, то ЕРС такого гальванічного елемента (оскільки $e_1 = e_2$) залежить тільки від співвідношення активностей розчину

$$e = \frac{RT}{nF} ln\left(\frac{f_1 c_1}{f_2 c_2}\right). \qquad (7.6)$$

На межі двох розчинів внаслідок різної активності іонів (різної швидкості дифузії) також виникає деяка різниця потенціалів. Це граничний або дифузійний потенціал, значення якого може досягти десятків мілівольт. Для зменшення дифузійної різниці потенціалів два напівелементи з'єднуються у гальванічне коло за допомогою електролітичного ключа ЕК (рис. 7.2) – трубки, заповненої концентрованим розчином з близькими за значенням рухливостями аніонів і катіонів, наприклад, KCl. Кінці електролітичного ключа закриваються напівпроникними корками.

– Гальванічні перетворювачі pH-метрів

Принцип дії гальванічних перетворювачів pH-метрів грунтується на залежності електродних потенціалів від активності водневих іонів, за якою можна визначити, наприклад, концентрацію водних розчинів.

На практиці активність водневих іонів характеризують водневим показником pH, який визначається як від'ємний логарифм активності іонів водню:

$$pH = -lg\left(a_{H^+}\right) = -lg\left(f_{H^+} c_{H^+}\right). \qquad (7.7)$$

Показник pH для водних розчинів при нормальній температурі змінюється від 0 (для сильно концентрованих водних розчинів кислот) до 14 одиниць (для концентрованих водних розчинів лугів). Для чистої води pH=7.

Прилад, призначений для вимірювання pH, називають pH-метром. Найточніший метод вимірювань pH грунтується на визначенні електродних потенціалів різних електродів, розміщених у досліджуваному розчині. Гальванічні перетворювачі pH-метрів складаються з двох напівелементів: скляного вимірювального, електродний потенціал якого є функцією pH_X досліджуваного розчину та допоміжного, електродний потенціал якого відомий і не залежить від властивостей досліджуваного розчину.

Національний університет водного господарства та природокористування

Скляний вимірювальний напівелемент (рис. 7.3, а) – це тонкостінна (0,05...0,1 мм) колба 1, нижня сферична частина 2 якої виготовлена із спеціального мембранного скла і заповнена розчином із відомим значенням pH_0. Всередині колби розміщений хлорсрібний допоміжний електрод 3 (платиновий стержень, покритий шаром хлористого срібла).

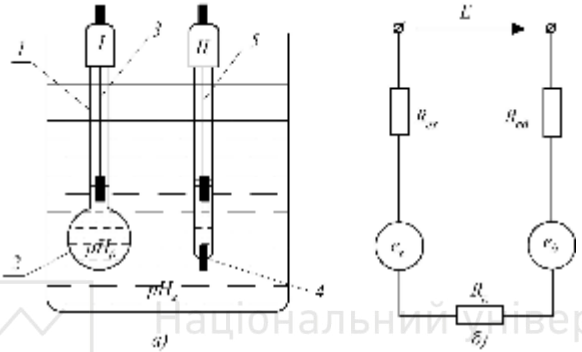


Рис. 7.3. Будова гальванічного перетворювача pH-метра та еквівалентна електрична схема

Національний університет водного господарства та природокористування

При зануренні такого скляного напівелемента в досліджуваний розчин на зовнішній стінці колби на межі скло – досліджуваний розчин виникає електродний потенціал e_1, значення якого є функцією pH_X. Це пояснюється процесами іонного обміну. Лужні іони скла (натрій чи літій) переходять у розчин, а їх місця займають рухливіші іони водню із розчину. Внаслідок цього поверхневий шар скла буде насичений водневими іонами, а скляний електрод набуде властивостей водневого електрода. Водночас на внутрішній стінці колби виникає електродний потенціал e_2, значення якого зумовлене властивостями буферного розчину, не залежить від pH_X і є незмінним при незмінній температурі. Ще один електродний потенціал e_3, незалежний від pH_X, виникає на хлорсрібному електроді. Результуючий електродний потенціал e_X вимірювального напівелемента дорівнюватиме алгебраїчній сумі трьох вищезгаданих електродних потенціалів і міститиме складову

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$e_0 = e_2 + e_3$, незалежну від pH_X, та складову e_1, що є функцією вимірюваної величини pH_X:

$$e_X = e_0 + e_1 = e_0 + e_{pH}\, pH_X, \qquad (7.8)$$

де e_0 – електродний потенціал вимірювального напівелемента при $pH_X = 0$; e_{pH} – коефіцієнт, значення якого зумовлене параметрами вимірювального напівелемента (питома ЕРС електрода, мВ/pH).

Шар скла між обома поверхнями колби є, по суті, провідником з великим електричним опором від 10^6 до 10^9 Ом, який з'єднує електрично два джерела ЕРС, а саме e_1 та e_0 (рис. 7.3, б).

За допоміжний може бути використаний розглянутий вище водневий напівелемент. Але його практичне застосування обмежене через необхідність безперервного насичення воднем. Тому на практиці використовують звичайно так звані хлорсрібні чи інші напівелементи.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Допоміжний хлорсрібний напівелемент (електрод) – це товстостінний скляний корпус, всередині якого знаходиться срібний електрод, поміщений в 3,5 н. розчин KCl, що містить кристал хлористого срібла. Від досліджуваного розчину внутрішня частина електрода ізольована гумовими мембранами, в просторі між якими знаходиться також 3,5 н. розчин KCl. Дифузійний потенціал на поверхні розділювальної мембрани досягає до 10 мВ. Загальний опір електрода не перевищує 20 кОм.

Допоміжний напівелемент може бути розміщений в досліджуваному розчині чи за його межами, але в обох випадках з'єднаний з досліджуваним розчином за допомогою відповідно розділювальної мембрани чи електролітичного ключа. На рис. 7.3, а допоміжний напівелемент II поміщений в досліджуваний розчин і електрично з'єднаний з ним за допомогою електролітичного ключа 4. Еквівалентна електрична схема такого гальванічного перетворювача наведена на рис. 7.3, б. Тут e_X і $e_д$ – відповідно електродні потенціали вимірювального та допоміжного напівелементів, R_{ex} та $R_{eд}$ – відповідно повні опори вимірювального та допоміжного електродів; $R_к$ – опір

Національний університет
водного господарства
та природокористування

електролітичного ключа.

Вихідною величиною такого гальванічного перетворювача буде різниця електродних потенціалів

$$E = e_x - e_д = e_0 - e_д + e_{pH}\,pH = E_0 + e_{pH}\,pH\,. \qquad (7.9)$$

Основними складовими похибками pH-метрів є температурна похибка, а також дифузійні потенціали. Для зменшення температурної похибки застосовують електричні кола температурної корекції, а для зменшення дифузійних потенціалів – з'єднання напівелементів через електролітичний ключ.

Запитання для самоконтролю

1. Електропровідність розчинів.
2. Електродні та граничні потенціали.
3. Що представляє собою водневий електрод?
4. Яка будова електрохімічного перетворювача?
5. Гальванічні перетворювачі.
6. Вимірювання pH.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет водного господарства та природокористування

7.2. Методи аналізу розчинів

- Кондуктометричний метод аналізу

Метод вимірювання електричної провідності розчинів електролітів (кондуктометрію) широко застосовують в лабораторній і виробничій практиці для хімічного аналізу і автоматичного контролю низки технологічних параметрів.

При розчиненні електроліти дисоціюють на іони.

Степінь дисоціації α визначається відношенням числа молекул n, що розпались на іони до загального числа молекул N (іонізованих n і неіонізованих n_a)

$$\alpha = n / N = n / \left(n + n_a\right). \qquad (7.10)$$

Якщо $\alpha = 0$, то речовина не є електролітом. Якщо $\alpha \to 1$, то речовина є сильним електролітом. Для слабких електролітів $0 < \alpha < 1$.

Здатність речовини проводити електричний струм характеризується питомою електричною провідністю χ_0 $\left[См/см\right]$, яка визначається як

$$\chi_0 = 1/\rho = \chi l / s, \qquad (7.11)$$

де ρ – питомий електричний опір ($\rho = Rs/l$); χ – електрична провідність речовини ($\chi = 1/R$, де R – електричний опір даної речовини); l і s – відповідно довжина і площа поперечного перерізу провідника.

Для вимірювання провідності використовують електролітичну вимірювальну комірку (рис. 7.4), яка представляє собою посудину, заповнену аналізованим розчином і в якій знаходиться мінімум два електроди.

Відношення l/s, $см^{-1}$ називається постійною комірки k ($k = l / s_{еф}$).

В кондуктометрії часто оперують поняттям еквівалентної електричної провідності λ, яка зв'язана з питомою електричною провідністю χ_0

$$\lambda = \chi_0 / c \text{ або } \lambda = \chi_0 V, \qquad (7.12)$$

Національний університет
водного господарства
та природокористування

де c – концентрація електроліту, (моль/мл); V – об'єм електроліта.

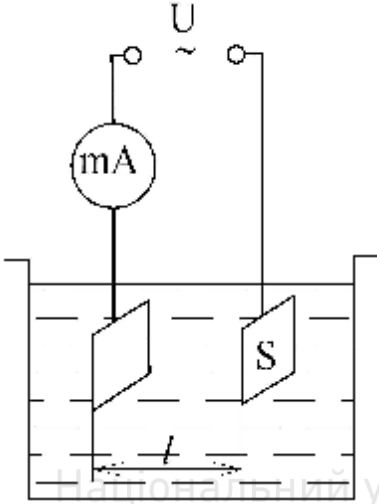


Рис. 7.4. Схема двоелектродної електролітичної комірки

Наявність функціональної залежності $\chi_0 = f(c)$ обумовлює широке застосування методу кондуктометрії для визначення концентрації електролітів.

В практиці вимірювання електричної провідності застосовують в основному кондуктометричні прилади таких типів: контактні з дво- і чотириелектродними комірками; безконтактні низькочастотні з вимірювальною коміркою у вигляді «рідинного витка» та безконтактні високочастотні з вимірювальними комірками ємнісного та індуктивного типів.

<u>- Контактні кондуктометричні прилади</u>

Вимірювальна схема двоелектродної кондуктометричної комірки (рис. 7.5) містить: $R1$, $R2$, $R3$ – постійні манганінові резистори та R_p – змінний компенсуючий резистор. Опір розчину кондуктометричної комірки позначено R_x.

При зміні концентрації контрольованого розчину змінюється опір R_x і в діагоналі ab мосту виникає різниця потенціалів. Сигнал розбалансу, пропорційний концентрації, підсилюється електронним

підсилювачем ЕП і надходить до реверсивного двигуна РД, який переміщує повзунок змінного резистора R_p та зв'язану з ним стрілку покажчика величини концентрації.

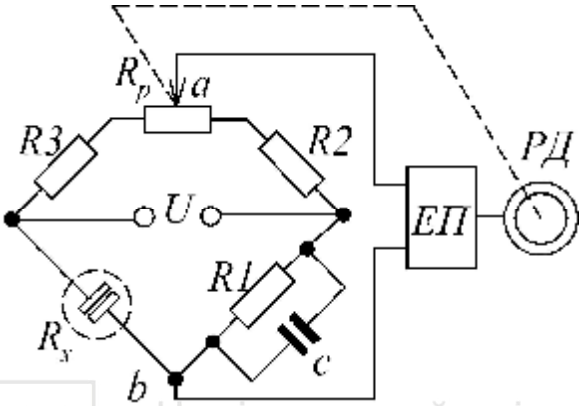


Рис. 7.5. Вимірювальна схема двоелектродної електролітичної комірки

Для компенсації температурної похибки застосовують автоматичні температурні компенсатори з використанням терморезистивного перетворювача R_t (рис. 7.6).

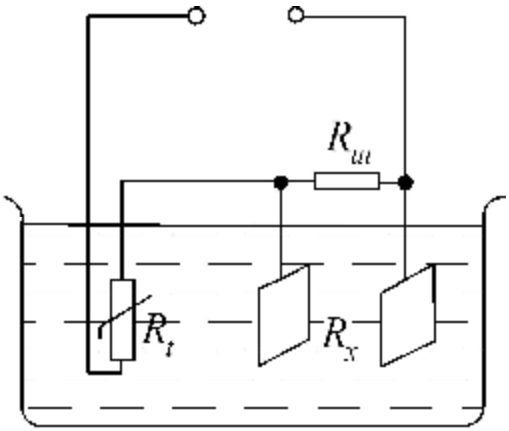


Рис. 7.6. Схема кондуктометричної комірки з терморезистивним перетворювачем

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Для температурної компенсації необхідно забезпечити рівність температурних коефіцієнтів опору контрольованого розчину R_x і терморезистора R_t. Для цього паралельно R_x вмикають резистор $R_ш$ – шунт з низьким температурним коефіцієнтом опору. У зв'язку з цим температурний коефіцієнт опору паралельного кола $R_x - R_ш$ зменшується порівняно з температурним коефіцієнтом розчину і наближається до температурного коефіцієнта R_t, але з протилежним знаком. Звідси, температурна компенсація зумовлена тим, що зі зміною температури зміна опору $R_x - R_ш$ компенсується опором R_t.

На рис. 7.7 наведено схему кондуктометра з чотириелектродною вимірювальною коміркою.

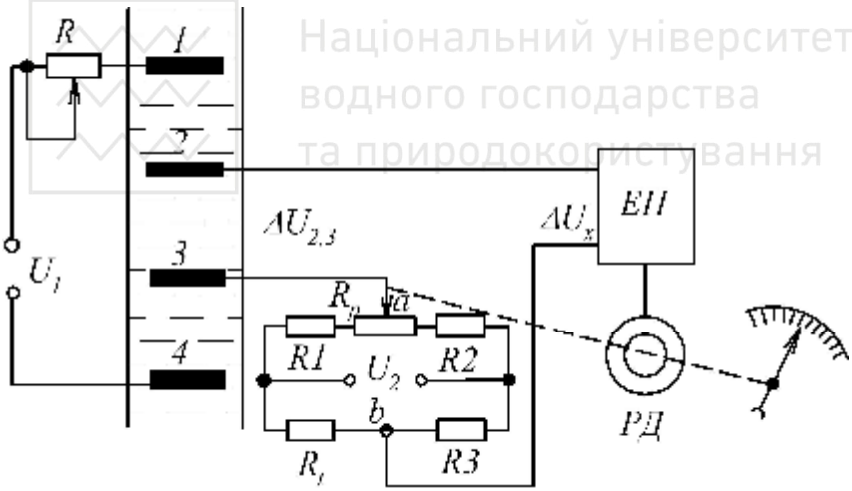


Рис. 7.7. Схема кондуктометра з чотириелектродною вимірювальною коміркою

На даній схемі струм у розчині протікає між двома зовнішніми електродами 1 і 4, які увімкнені до джерела живлення напругою U_1. Завдяки великому опору резистора R сила струму I в колі комірки є постійною і не залежить від зміни опору розчину. Два внутрішні електроди 2 і 3 виконують функції потенцометричних і призначені

Національний університет
водного господарства
для вимірювання спаду напруги $\Delta U_{2,3}$ в розчині

$$\Delta U_{2,3} = IR_я, \tag{7.13}$$

де $R_я = k / \chi_0$ – опір розчину між електродами 2 і 3; k – конструктивна константа чотириелектродної вимірної комірки.

Отже,

$$\Delta U_{2,3} = kI / \chi_0 = k' / \chi_0, \tag{7.14}$$

де $k' = kI = const$.

З (7.14) витікає, що різниця потенціалів між електродами 2 і 3 однозначно визначається концентрацією контрольованого розчину.

Вимірювана величина $\Delta U_{2,3}$ порівнюється з різницею потенціалів U_{ab} на вершинах a і b вимірювального мосту. Якщо $U_{ab} \neq \Delta U_{2,3}$, то на вхід підсилювача ЕП надходить сигнал розбалансу ΔU_x ($\Delta U_x = U_{ab} - \Delta U_{2,3}$), який після підсилення надходить до реверсивного двигуна РД. Останній зумовлює одночасне переміщення повзунка змінного резистора R_p і повертання стрілки відносно шкали, яка показує величину концентрації. Коли $U_{ab} = \Delta U_{2,3}$, то струм в колі електродів 2 і 3 буде відсутнім $\Delta U_x = 0$ і стрілка зупиниться.

Автоматичну компенсацію температури здійснюють за допомогою терморезистора R_t, який увімкнено в одне з плечей вимірювального мосту.

При зміні температури розчину змінюється R_t, в результаті чого U_{ab} також змінюється. Приріст $\Delta U_{ab} = f(\Delta t)$ при зміні R_t повинен дорівнювати $\Delta U_{ab}(\Delta t) = -\Delta U_{2,3}(\Delta t)$. Ця рівність досягається підбором опорів R_1, R_2 і R_3 вимірювального мосту і напругою U_2.

<u>- Безконтактні низькочастотні кондуктометри</u>

Особливістю таких приладів є відсутність гальванічного контакту електродів вимірювальної комірки з аналізованим середовищем (рис. 7.8).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

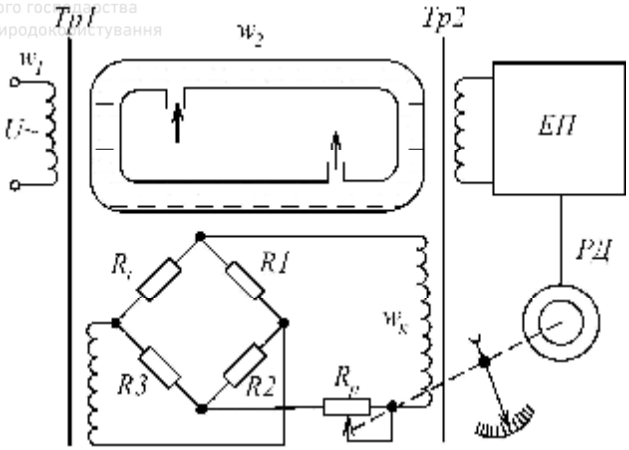


Рис. 7.8. Принципова схема низькочастотного кондуктометра з рідинним контуром зв'язку

На схемі трубка, виконана з діелектрика, утворює замкнений виток, який заповнено контрольованим розчином електроліту. Зовні на трубку намотано обмотки двох трансформаторів – збуджуючого $Tp1$ і вимірювального $Tp2$. Первинна обмотка $Tp1$ під'єднана до джерела змінного струму, напругою U. Замкнений виток з електролітом виконує функцію вторинної обмотки трансформатора $Tp1$. В результаті електромагнітної взаємодії в рідинному витку наводиться ЕРС E_p

$$E_p = Uw_1 / w_2 , \qquad (7.15)$$

де w_1 – кількість витків первинної обмотки трансформатора $Tp1$; w_2 – рідинний виток ($w_2 = 1$); U – напруга живлення первинної обмотки трансформатора $Tp1$.

Сила струму I_p, який протікає в рідині під дією ЕРС дорівнює

$$I_p = E_p / R = E_p \chi / k_p = \chi w_1 U / w_2 k_p , \qquad (7.16)$$

де R – опір рідинного витка; k_p – константа низькочастотної комірки.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

У виразі (7.16) усі величини, крім χ, є постійними, тому I_p пропорційний концентрації розчину.

Струм I_p вимірюється трансформатором $Tp2$, у якого рідинний виток є первинною обмоткою. ЕРС E_p у вторинній обмотці пропорційна концентрації.

Умова компенсації запишеться $I_K w_K = I_p w_2$. Оскільки $w_2 = 1$, то $I_K = I_p / w_K$. Положення движка реохорда і стрілки приладу пропорційне концентрації контрольованого розчину. Для компенсації температурної похибки призначений терморезистор R_t, який увімкнений в мостову коректуючу ланку $R_t - R_1 - R_2 - R_3$ і знаходиться в контрольованому середовищі.

Безконтактні низькочастотні кондуктометри частотою до 1000 Гц застосовуються для вимірювання концентрації як сильних електролітів (HCl, H_2SO_4, HNO_3, луги), так і слабких.

Широко також застосовуються безконтактні високочастотні кондуктометри.

<u>- Потенціометричний метод аналізу</u>

Метод потенціометричного вимірювання концентрації іонів в розчині грунтується на вимірюванні різниці електричних потенціалів двох спеціальних електродів, які поміщені в досліджуваний розчин гальванічної комірки. Причому один електрод – допоміжний, в процесі вимірювання має постійний потенціал, а потенціал іншого залежить від концентрації іонів.

Сигнал гальванічної комірки (різниця потенціалів), як зазначалось, зв'язяний з величиною pH лінійно, а сама ця величина є мірою активної концентрації рідини.

За принципом дії pH-метри на основі потенціометричного вимірювання концентрації іонів можна розділити на три основні групи: прилади з <u>безпосереднім відліком</u>, прилади з <u>астатичною компенсацією</u>, прилади зі <u>статичною компенсацією</u>.

Найпростіша принципова схема pH-метра з <u>безпосереднім відліком</u> наведена на рис. 7.9.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

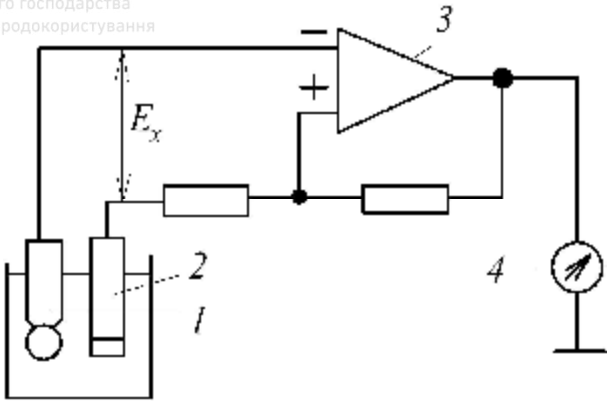


Рис. 7.9. Принципова схема pH-метра з безпосереднім відліком:
1, 2 – відповідно скляний і допоміжний електроди; 3 – операційний підсилювач; 4 – вимірювальний прилад або цифроаналоговий перетворювач

ЕРС E_x вимірювальної комірки, яка залежить від концентрації *c* розчину і знімається з електродів 1 і 2, подається на вхід операційного підсилювача 3 постійного струму, охопленого від'ємним зворотнім зв'язком. На виході підсилювача знаходиться вимірювальний прилад 4, який і показує величину концентрації.

Прилади з безпосереднім відліком досить прості. За точністю вони поступаються приладам компенсаційного типу.

Найпростіший pH-метр компенсаційного типу наведено на рис. 7.10.

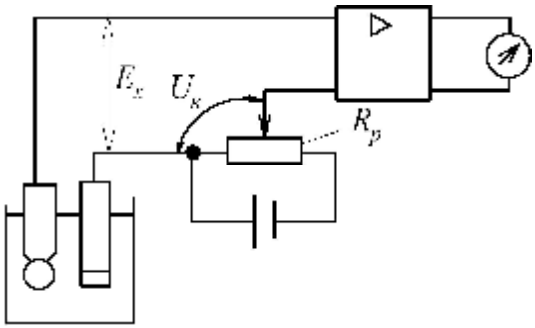


Рис. 7.10. Принципова схема pH-метра з ручною компенсацією вимірюваної ЕРС

Національний університет
водного господарства
та природокористування

В цьому приладі застосовують метод астатичної компенсації, коли послідовно з ЕРС електродної системи увімкнено рівну їй по величині і протилежну за знаком напругу компенсації U_K, яка знімається з компенсуючого резистора R_p або лабораторного потенціометра. Змінюючи за допомогою переміщення движка реохорда напругу U_K, досягають того, щоб вихідний сигнал підсилювача був таким же, як і при нульовому сигналі на вході. При цьому $U_K = E_x$. Шкала R_p проградуйована в одиницях pH.

Прилад, схема якого наведена на рис. 7.11, а, відрізняється від аналогічного pH-метра, що працює за методом «ручної компенсації» тим, що движок реохорда будучи механічно зв'язаним з покажчиком шкали, приводиться у рух реверсивним двигуном.

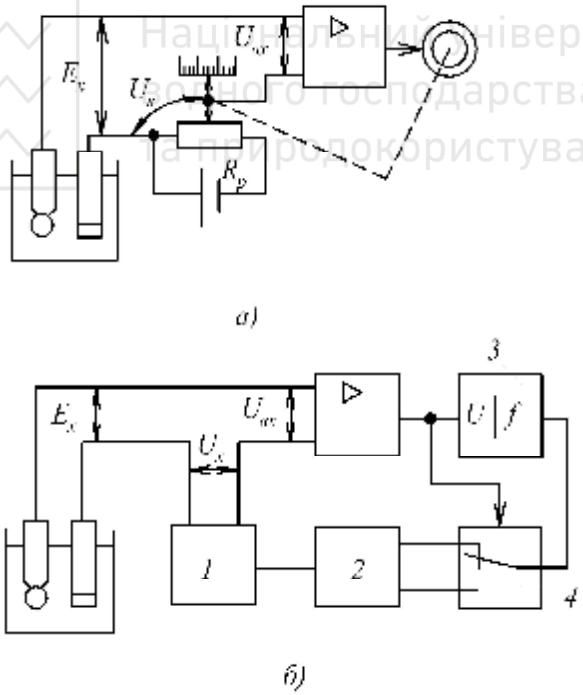


Рис. 7.11. Схема pH-метрів з автоматичною компенсацією вимірюваної ЕРС

Національний університет
водного господарства
та природокористування

В момент компенсації, коли $E_x = U_K$, напруга на вході $U_{вх}$ підсилювача дорівнює нулю, і реверсивний двигун, а значить і покажчик зупиняються.

Недоліком таких приладів є складність кінематичної схеми для привода движка реохорда.

Цей недолік відсутній у схемі pH-метра, показаного на рис. 7.11, б.

Тут компенсаційна напруга створюється цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП) 1, керованим реверсивним лічильником 2. Якщо вхідна напруга підсилювача $U_{вх} = E_x - U_K \neq 0$, то підсилена напруга перетворюється в серію імпульсів частотою f (в перетворювачі 3), які через перемикач 4 надходять, залежно від полярності вихідної напруги підсилювача, до сумуючого або віднімаючого входу реверсивного лічильника 2. В момент компенсації, коли $E_x = U_K$ напруга на виході підсилювача дорівнює нулю, імпульси на реверсивний лічильник 2 не надходять, а на виході ЦАП встановлюється постійна напруга U_K.

Поряд з приладами з астатичною компенсацією (повна компенсація ЕРС), застосовують pH-метри зі статичною (неповною компенсацією) вимірювальної комірки.

Принципова схема такого pH-метра наведена на рис. 7.12.

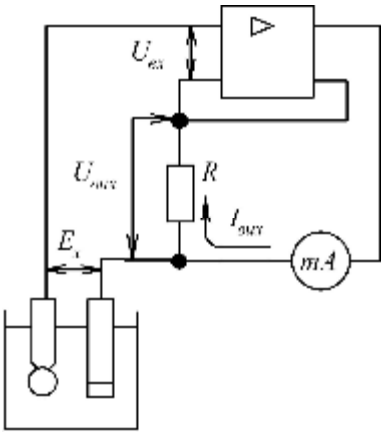


Рис. 7.12. Схема pH-метра зі статичною компенсацією

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Тут вимірювана ЕРС E_x порівнюється з напругою $U_{вих}$, яка утворюється від протікання вихідного струму $I_{вих}$ підсилювача по резистору R. На вхід підсилювача надходить різниця напруг

$$U_{вх} = E_x - U_{вих}. \qquad (7.17)$$

Якщо повний коефіцієнт підсилення $k = U_{вих} / U_{вх}$, то вираз (7.17) приводиться до виду $E_x = U_{вих}\left(1 + 1/k\right)$. При великому k

$$E_x \approx U_{вих} = I_{вих} R. \qquad (7.18)$$

Отже, сила струму, що протікає через останній каскад підсилювача, пропорційна вхідному сигналу від вимірювальної комірки. Вимірявши $I_{вих}$, легко знайти E_x, тобто pH розчину.

- Полярографічний метод

Полярографічний метод було розроблено в 1922 році чешським вченим Я. Габровським. Назву метод отримав відповідно до кривих *сила струму – напруга*, які також називаються полярограмами.

Найпростіша схема полярографа (рис. 7.13) складається з вимірювальної комірки, яка містить в собі електролізер 1, два електроди і аналізований розчин, посудину 2 з ртуттю, з якої вона гнучкою трубкою подається у вимірювальний електрод комірки, прилад для вимірювання сили струму 3, реостат 4, джерело напруги 5 і прилад 6 для вимірювання напруги.

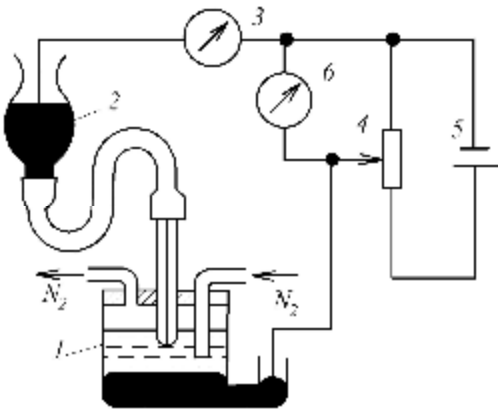


Рис. 7.13. Схема класичного полярографа

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Джерело напруги забезпечує зміну потенціалу вимірювального електроду в межах від +1 до -4 В.

Полярограма однокомпонентного розчину (рис. 7.14) складається з трьох характерних ділянок: I – залишкова сила струму, II – хвиля і III – гранична сила струму.

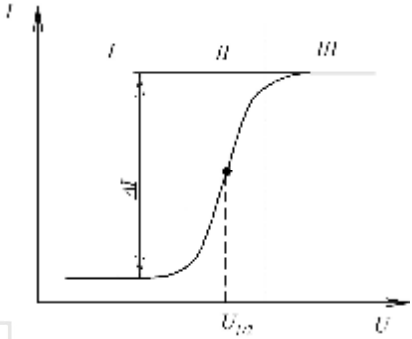


Рис. 7.14. Полярограма однокомпонентного розчину

Різниця граничної і залишкової сили струму ΔI, іншими словами, висота хвилі пропорційна концентрації розчину, а напруга, яка відповідає середній точці хвилі $U_{1/2}$ полярограми характеризує природу речовини. Цю напругу називають напругою півхвилі. Отже, полярограма містить повну інформацію про якість і кількість речовини в розчині. Якщо в розчині є кілька речовин, то полярограма має вигляд, показаний на рис. 7.15.

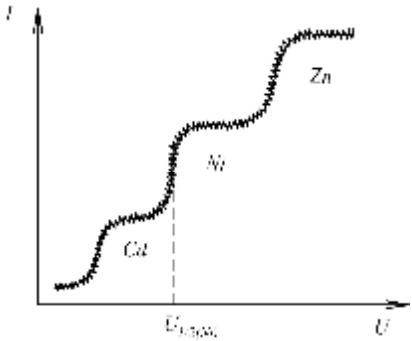


Рис. 7.15. Полярограма трикомпонентного розчину

Національний університет водного господарства та природокористування

Напруги півхвиль різних речовин наведено у відповідних довідниках. Порівняння цих даних з експериментально отриманими дозволяє встановити природу аналізованої речовини.

Основними характеристиками полярографа є межа визначення і роздільна здатність.

Під межею визначення в полярографії розуміють мінімальну концентрацію, яку прилад дозволяє визначити із заданою точністю.

Під роздільною здатністю розуміють відношення концентрацій супутнього (заважаючого) і аналізованого компонентів.

Полярографи класифікують за зміною напруги на комірці в часі: класичні, змінного струму, імпульсні, високочастотні, осцилографічні.

- Класичні полярографи

З допомогою полярографа, показаного на рис. 7.13, можна отримати полярограму класичного типу (рис. 7.14). В класичній полярографії на комірку накладається повільно змінна поляризуюча напруга.

Національний університет водного господарства та природокористування

Розглянемо явища, що проходять на ртутно-крапельному електроді.

Нехай до ртутного дна прикладено плюс джерела напруги, а до ртутної краплі – мінус. Розчином є електроліт, який містить в собі іони аналізованої речовини (рис. 7.16).

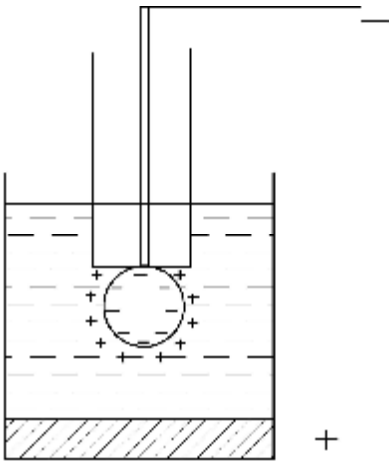


Рис. 7.16. Полярографічна комірка

Національний університет водного господарства та природокористування

В цьому випадку позитивно заряджені іони розчину підійдуть до негативно зарядженої поверхні краплі і утворять прошарок позитивно заряджених іонів навколо краплі. Цей подвійний електричний шар представляє собою своєрідний конденсатор, одною обкладкою якого служить заряджена поверхня електрода, а другою – шар іонів, які знаходяться в приелектродній області. Ртутно-крапельний електрод можна розглядати як конденсатор зі змінною поверхнею. Тому, коли на комірку накладають змінну напругу, по ній тече ємнісний струм I_c, який залежить від змінного складу розчину.

Наявність залишкової сили струму пояснюється протіканням через комірку ємнісного струму. Коли лінійно зростаюча напруга дорівнюватиме напрузі, при якій аналізована речовина починає відновлюватись на поверхні краплі, тоді через комірку протікатиме струм, який зв'язаний з електрохімічною реакцією на поверхні ртуті. В результаті розряду іонів аналізованої речовини, їх концентрація поблизу поверхні краплі зменшується. Остання поповнюється за рахунок дифузії іонів із розчину.

При напрузі $U = U_{1/2}$ середнє значення струму I_{cp} дорівнюватиме половині граничного струму I_d ($I_{cp} = I_{dcp} / 2$).

Напруга півхвилі не залежить від концентрації аналізованої речовини, а визначається, в основному, природою досліджуваної речовини.

<u>- Полярографи змінного струму</u>

Полярографи змінного струму мають низку переваг, зокрема зручність для дослідження кінетики електрохімічних процесів та можливість застосування в якості аналізаторів неперервної дії.

В полярографах змінного струму на комірки діє сумарна напруга від двох джерел: джерела постійної поляризуючої напруги 1 і джерела змінної напруги 2 (рис. 7.17).

Нехай в даному випадку застосовано звичайну полярографічну комірку (рис. 7.13), в якій неполяризованим електродом служить «ртутне дно», а поляризованим – «ртутно-крапельний електрод». Нехай в комірці знаходиться розчин з однією аналізованою речовиною. При дії сумарної напруги через комірку протікатиме результуючий струм $I_Я$, який дорівнюватиме

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$I_Я = I_e + I_c, \qquad (7.19)$$

де I_e – електролітична складова, яка зумовлена реакцією відновлення іонів аналізованої речовини; I_c – ємнісна складова, яка зумовлена ємністю подвійного електричного шару.

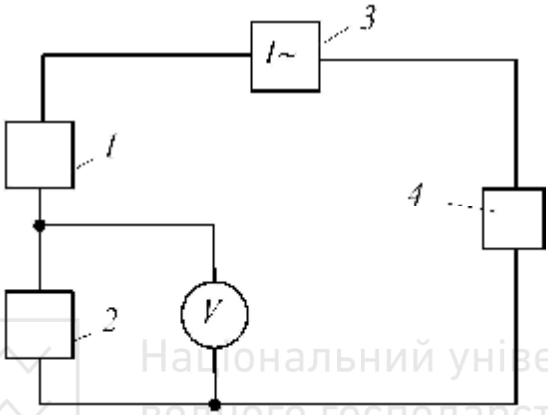


Рис. 7.17. Принципова схема полярографа змінного струму:
1 і 2 – відповідно генератор постійної і змінної напруги; 3 – вимірювач змінної складової сили струму; 4 – комірка

Силу електричного струму I_e можна представити у вигляді суми постійної $I_=$ та змінної $I_\sim$ складових

$$I_e = I_= + I_\sim. \qquad (7.20)$$

В якості корисної (інформативної) складової в полярографах змінного струму використовують змінну складову ($I_\sim$), а постійна складова ($I_=$) є завадою. В якості змінної напруги використовують: синусоїдну, прямокутну і трапецевидну.

Амплітуда змінного струму I залежить від поляризуючої напруги U на комірку ($I = f(U)$). Залежність амплітуди змінного електролітичного струму від постійної напруги на комірці називається <u>полярограмою змінного струму</u>.

Для цього випадку при $U = U_{1/2}$ полярограма має максимум (рис. 7.18, а).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

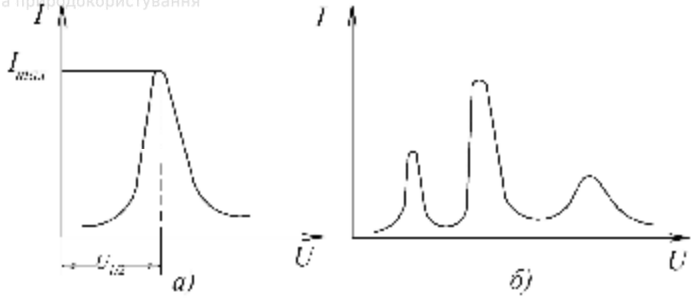


Рис. 7.18. Полярограми змінного струму для однокомпонентного (а) і багатокомпонентного (б) розчинів

Якщо розчин є багатокомпонентним, то полярограма матиме кілька максимумів (рис. 7.18, б). Ордината максимуму пропорційна концентрації, а відповідна цьому максимуму напруга характеризує природу речовини.

На рис. 7.19 наведено еквівалентну електричну схему комірки: $C_д$ – ємність подвійного шару; R_p – сума послідовно увімкнених опорів розчину, капіляра, генератора та інших елементів вимірювального кола; R_s – активна і C_s – реактивна складові комплексного опору комірки за змінним струмом.

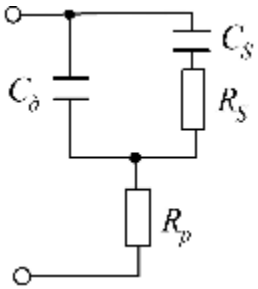


Рис. 7.19. Еквівалентна електрична схема комірки при накладанні на неї змінної напруги

На даний час полярографічний метод аналізу є одним з найбільш чутливих і точних методів. Він дозволяє проводити як кількісний, так і якісний аналіз розчинів.

Національний університет водного господарства та природокористування

При автоматичному контролі технологічних процесів полярографія змінного струму є однією з найбільш зручних.

- Кулонометричний метод

Кулонометричний метод заснований на вимірюванні кількості електрики чи струму під час електролізу досліджуваної речовини. Фізико-хімічною основою кулонометрії є закон Фарадея:

$$m = \frac{MIt}{96500n}, \qquad (7.23)$$

де m – маса виділеної речовини під час її електролізу, г; M – мольна маса даної речовини; I – сила струму, А; t – час електролізу, с; n – кількість електронів, які беруть участь в окисленні чи відновленні одного моля речовини.

Звідси випливає, що концентрація досліджуваної речовини визначається або за значенням усталеного струму електролізу при заданому сталому потенціалі, або при сталому заданому струмі часом виділення речовини.

Кулонометричний метод застосовують для вимірювань концентрації певного компонента (водню, кисню, двоокису вуглецю, вуглеводнів, хлору, фтору тощо) в рідкому і газовому середовищі, а також для вимірювань вологості газів.

Національний університет водного господарства та природокористування

Запитання для самоконтролю

1. Кондуктометричний метод аналізу.
2. Принципова схема кондуктометра з чотириелектродною вимірювальною коміркою.
3. Принципова схема низькочастотного кондуктометра з рідинним контуром зв’язку.
4. Потенціометричний метод аналізу.
5. Принципові схеми pH-метрів з безпосереднім відліком та ручною компенсацією вимірюваної ЕРС.
6. Схеми pH-метрів з автоматичною компенсацією вимірюваної ЕРС.
7. Схема pH-метра зі статичною компенсацією.
8. Полярографічний метод. Схема класичного полярографа.
9. Полярограф змінного струму.
10. Полярограма як інформація про природу і концентрацію розчину.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Висновок

Контроль будь-якого технологічного процесу грунтується на вимірюванні його основних параметрів або характеристик. В цьому аспекті розглянуто і описано методи і технічні засоби вимірювання різних неелектричних величин як неелектричними, так і електричними способами, таких як температура, геометричні розміри (лінійні та кутові, товщина шару покриття деталей, відстань між об'єктами), тиск, кількість та витрата, рівень рідких і сипучих матеріалів, а також хімічний склад розчинів.

Виходячи із можливості електричного вимірювання неелектричних величин, автори посібника вважали за доцільне представити основні відомості про вимірювання, вимірювальні перетворювачі неелектричних величин у електричні та передачу вимірювальної інформації на відстань для подальшого збору, аналізу та використання в системах автоматизації.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Література

1. Виглеб Г. Датчики: устройство и применение /Пер. с нем.– М. : Мир, 1989. – 196 с.
2. Головко Д. Б., Рего К. Г., Скрипник Ю. О. Основи метрології та вимірювань. – К. : Либідь, 2001. – 248 с.
3. Готра З. Ю., Ильницкий Л. Я., Полищук Е. С. и др. Датчики: Справочник /Под ред. З. Ю. Готры и О. И. Чайковского.– Львов: Каменяр, 1995. – 312 с.
4. Евтихеев Н. Н., Купершмидт Я. А. и др. Измерение электрических и неэлектрических величин.– М. : Энергоиздат, 1990. – 352 с.
5. Ким К. К., Анисимова Г. Н., В. Ю. Барборович и др. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника: Учебное пособие /Под ред. К. К. Кима. – СПб. : Питер, 2006. – 368 с.
6. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. – Л. : Машиностроение, 1989. – 701 с.
7. Кулаков М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств.– М. : Машиностроение, 1983. – 424 с.
8. Левшина Е. С., Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
9. Никольский Б. П., Матерова Е. А. Ионоселективные электроды.– Л. : Химия, 1980. – 240 с.
10. Парк Дж., Маккей С. Сбор данных в системах контроля и управления. Практическое руководство /Пер. с англ.– М. : ООО "Группа ИДТ", 2006. – 504 с.
11. Парк Дж., Маккей С., Райт Э. Передача данных в системах контроля и управления. Практическое руководство /Пер. с англ.– М. : ООО "Группа ИДТ", 2007. – 480 с.
12. Полищук Е. С. Измерительные преобразователи.– К. : Вища школа, 1981. – 296 с.
13. Поліщук Є. С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин. – Львів : Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2000. – 360 с.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

14. Поліщук Є. С., Дороговець М. М., Яцук В. О. та ін.. Метрологія та вимірювальна техніка (за ред. Є. С. Поліщука). – Львів : Бескид БІТ, 2003. – 544 с.
15. Спектор С. А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений.– Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.
16. Турчин А. М. Электрические измерения неелектрических величин. – М. Л. : Энергия, 1966. – 690 с.
17. Фарзане Н. Г., Илясов Л. В., Азим-заде А. Ю. Технологические измерения и приборы. – М. : Высшая школа, 1989. – 456 с.
18. Харазов В. Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами.– СПб. : Профессия, 2009. – 592 с.
19. Электрические измерения электрических и неэлектрических величин /Под ред. Е. С. Полищука.– К. : Вища школа, 1984. – 360 с.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

В.В. Кованько, В.В. Древецький,
А.О.Христюк

Національний університет
водного господарства
та природокористування

ЗАГАЛЬНОТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ І ПРИЛАДИ

Національний університет
водного господарства
та природокористування