

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Конспект лекцій
з дисципліни:
«Вимірювальна техніка»
Частина 2

для студентів спеціальності G3 «Електрична інженерія», I
ступеня вищої освіти (бакалавр) освітньої програми
«Енергоефективність та енергозбереження» денної та заочної
форми навчання

Конспект лекцій з дисципліни «Вимірювальна техніка» Частина 2 для студентів спеціальності G3 «Електрична інженерія», I ступеня вищої освіти (бакалавр), освітньої програми «Енергоефективність та енергозбереження» денної та заочної форми навчання / «Запорізька політехніка» нац. ун-т. Каф. електропостачання промислових підприємств; уклад.: В.Ю. Міщенко. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2026. 65 с.

Укладачі:

В.Ю. Міщенко, к.т.н., старш.викл.

Рецензент:

Ю.Б. Ліуш, к.т.н., доцент

Відповідальний за випуск:

Шрам О.А., зав. кафедри, к.т.н.

Затверджено
на засіданні кафедри
«Електропостачання промислових
підприємств»
Протокол № 8.
від « 06 » березня 2026р.

Рекомендовано до видання
НМК електротехнічного
факультету
Протокол № 8.
від « 19 » березня 2026р.

ЗМІСТ

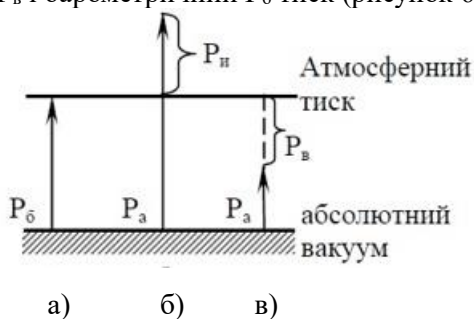
6	Вимір тиску рідких і газових середовищ.....	77
6.1	Методика виміру тиску.....	77
6.2	Вимірювання тиску.....	79
6.2.1	Рідинні манометри.....	79
6.2.2	Деформаційні манометри.....	84
6.2.3	Електричні манометри.....	89
6.3	Вимірювальні перетворювачі тиску.....	94
6.3.1	Загальні відомості.....	94
6.3.2	Диференційно-трансформаторні перетворювачі.....	96
6.3.3	Перетворювачі з магнітною компенсацією.....	99
7	Вимір витрати газу, рідини і пару.....	105
7.1	Загальні відомості.....	105
7.2	Витратоміри по перепаду тиску в пристрої, що звужує.....	106
8	Вимірювальні перетворювачі тиску.....	115
8.1	Загальні відомості.....	115
8.2	Візуальні рівнеміри.....	115
8.3	Гідростатичні рівнеміри.....	117
8.4	Поплавкові і буйкові рівнеміри.....	124
8.5	Ємнісні рівнеміри.....	127
8.6	Індуктивні рівнеміри.....	131
8.7	Акустичні рівнеміри.....	134
	Перелік джерел посилань.....	137

6 ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ РІДКИХ ТА ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩ

6.1 Методика виміру тиску

У багатьох галузях промисловості, а також у наукових дослідженнях необхідно вимірювати тиск, який створюється газовими і рідкими середовищами на поверхні, що їх обгороджують (резервуари, труби, канали, тракти, що виводять дим, робочий простір котлів, печей і ін.). Великий діапазон вимірюваних тисків, розмаїтість властивостей рідин і газів, різна вимога до точності вимірів, а також конструктивні особливості об'єктів визначають застосування різних методів і засобів виміру тиску [2].

При вимірах розрізняють абсолютний P_a , надлишковий P_n , вакууметричний P_v і барометричний P_b тиск (рисунок 6.1).



а – барометричний (атмосферний) тиск; б – абсолютний тиск,
 $P_a > P_{бв}$ – абсолютний тиск, $P_a < P_{б}$

Рисунок 6.1 – Співвідношення тисків

Під абсолютним тиском розуміють повний тиск, під яким знаходиться рідина чи газ (пара) при відліку від абсолютного вакууму. Абсолютний тиск може бути більше (б) чи менше (в) атмосферного. На практиці частіше вимірюється і використовується надлишковий тиск P_n , що дорівнює:

$$P_n = P_a - P_b,$$

якщо абсолютний тиск більше атмосферного, і вакууметричний тиск

$$P_v = P_b - P_a,$$

якщо абсолютний тиск менше атмосферного. При малих відхиленнях P_n і P_v від атмосферного тиску вони позначаються знаком "+" чи "-".

Прилади для виміру тиску, розрідження чи різниці тисків називаються манометрами. Вони підрозділяються на:

- барометри, що вимірюють атмосферний тиск;
- напороміри, що вимірюють невеликі надлишкові тиски, приблизно від 0 до + 40 кПа;
- тягоміри, що вимірюють розрідження, приблизно від 0 до -40 кПа;
- тягонапороміри, що вимірюють як позитивні, так і негативні тиски і мають двосторонню шкалу з межами від -20 до +20 кПа;
- манометри абсолютного тиску, що вимірюють тільки значення P_a ;
- диференціальні манометри (дифманометри), що вимірюють різницю тисків.

Одиницею виміру тиску в системі СІ є паскаль (Па), а також кратні одиниці кПа і МПа. Для зручності виміру великих тисків (більше атмосферного) штучно ввели в систему СІ одиницю, що одержала назву "бар" (1 Бар). При цьому, 1 Бар, що містить 10^5 Па незначно відрізняється від однієї атмосфери, тобто 1 Бар $\approx$ 1 ат.

На практиці допускається застосування позасистемних одиниць, таких як:

- 1 мм вод. ст.=9,8 Па;
- 1 мм рт. ст.=133,3 Па;
- 1 кг/см² (1 техн. ат.)=0,98066 $\times$ 10⁵ Па.

Застосування одиниці тиску "міліметр водного (чи ртутного) стовпа" особливо зручно в тих випадках, коли застосовують рідинні манометри з візуальним відліком висоти підйому рідини.

У залежності від принципу виміру тиску всі прилади можна розділити на три групи [2]:

- рідинні, у яких вимірюваний тиск врівноважується тиском стовпа рідини;
- деформаційні (пружинні), де вимірюваний тиск визначається по величині деформації різних пружних чуттєвих елементів;
- електричні, дія яких заснована на перетворенні тиску в яку-небудь електричну величину або на зміні електричних властивостей матеріалу під дією тиску;

– вантажопоршневі, у яких вимірюваний тиск врівноважується тиском, створюваним масою поршня і вантажів.

6.2 Вимірювання тиску

6.2.1 Рідинні манометри

У рідинних манометрах мірою вимірюваного тиску є висота неврівноваженої частини стовпа рідини в сполучених посудинах. Найпростіший рідинний манометричний прилад складається з U-образної скляної трубки і прямолінійної шкали з найменшою ціною розподілу 1 мм (рисунок 6.2). Обидва кінці трубки заповнені рідиною приблизно до половини своєї висоти. Як робоча рідина використовується вода чи ртуть, звідси тиск вимірюється в міліметрах водяного чи ртутного стовпа [5].

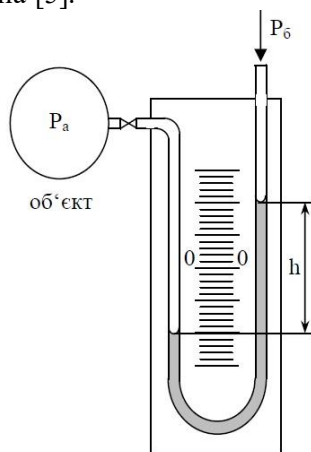


Рисунок 6.2 – Вимір надлишкового тиску U-образним манометром

Різниця в діаметрах лівої і правої частин трубки не впливає на результат виміру. Не обов'язково також заповнювати трубку рідиною до рівня, що точно збігається з нульовою оцінкою, тому, що при відліку показань враховується тільки різниця рівнів по кількості розподілів шкали. При вимірі тиску один кінець трубки підключається до об'єкта,

інший сполучений з атмосферою. Стоп рідини h врівню важує різниця тисків:

$$P_a - P_b = \rho \cdot g \cdot h; \quad h = \frac{1}{\rho \cdot g} (P_a - P_b), \quad (6.1)$$

де P_a – абсолютний тиск газового (рідкого) середовища в об'єкті, Па;

P_b – атмосферний тиск у момент виміру, Па;

ρ – щільність робочої рідини, кг/м^3 ;

g – прискорення сили ваги, м/с^2 .

Рівняння (6.1) показує, що точність виміру тиску визначається точністю відліку висоти підйому рідини h , точністю визначення щільності робочої рідини ρ і не залежить від перетину трубки. Якщо щільність середовища (рідини чи газу) в об'єкті помітно відрізняється від щільності робочої рідини, що заповнює U-образну трубку, то вираження (6.1) прийме наступний вид:

$$h = \frac{1}{g \cdot (\rho_1 - \rho_2)} \cdot (P_a - P_b), \quad (6.2)$$

де ρ_1 – щільність робочої рідини, кг/м^3 ;

ρ_2 – щільність середовища в об'єкті, кг/м^3 .

Найбільша абсолютна погрішність виміру тиску h U-образним манометром складає близько 2 мм, що зв'язано з неточністю зчитування (фіксації) рівня рідкого середовища в двох трубках манометра через наявність меніска (увігнутого при водяному заповненні й опуклого при ртутному заповненні). Для зменшення впливу капілярних сил у манометрах використовуються скляні трубки діаметром від 8 до 10 мм.

Двотрубні манометри з водяним заповненням використовуються для виміру тиску, розрідження, різниці тисків повітря і неагресивних газів у діапазоні до ± 10 кПа. При заповненні манометра ртуттю межі виміри розширюються до 100 кПа, при цьому, вимірюваним середовищем можуть бути вода, неагресивні рідини і гази. Такі межі виміру обумовлені зручністю візуального спостереження за зміною рівня рідини в скляних трубках манометра. В окремих випадках при проведенні досліджень у лабораторних умовах межі вимірюваних тисків можуть бути розширені, при цьому, довжина скляних трубок

манометра може досягати більш двох метрів, що дозволяє значно знизити відносну погрішність виміру.

Для збільшення точності відліку висоти стовпа робочої рідини використовуються чашкові однотрубні манометри (рисунок 6.3), у яких одна трубка замінена широкою судиною, діаметр якого в кілька разів більше діаметра трубки. При вимірі надлишкового тиску широка судина з'єднується з об'єктом, а кінець з'єднується з атмосферою, при цьому рівень рідини в трубці підніметься, а в широкій судині опуститься. При вимірі вакууметричного тиску трубка з'єднується з об'єктом, а широка судина з атмосферою. При цьому, рідина у вимірювальній трубці буде підніматися доти, поки вагу стовпа рідини не зрівноважить різниця між атмосферним тиском і вакуумом контролюваного середовища [5].

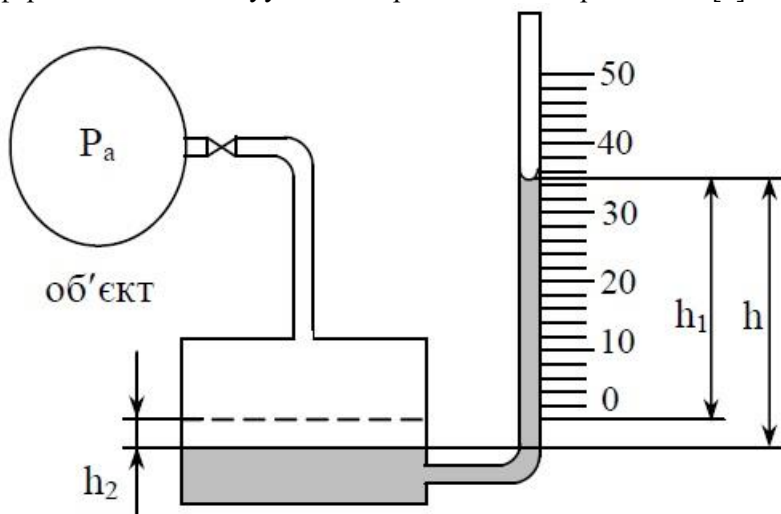


Рисунок 6.3 – Чашковий манометр

У цьому приладі точний тиск чи розрядження буде визначатися як сума висот опускання рідини h_2 і підйому h_1 :

$$h = h_1 + h_2 \quad (6.3)$$

Однак, на практиці, через незначне опускання рідини в широкій судині h_2 , тиск визначається тільки по величині h_1 .

Оцінимо погрішність при такому способі виміру тиску. Маса рідини, витиснута із широкої судини, дорівнює масі, що надійшла у вимірювальну трубку, тобто

$$M_{\text{ч}} = M_{\text{т}} \quad \text{чи} \quad h_2 \cdot F_2 \cdot \rho = h_1 \cdot F_1 \cdot \rho$$

Звідси:

$$h_2 = \frac{F_1}{F_2} \cdot h_1 \quad (6.4)$$

Підставивши отримане співвідношення (між h_2 і h_1) у вираження (6.3), одержимо:

$$h = h_1 \cdot \left(1 + \frac{F_1}{F_2}\right) \quad \text{чи} \quad h = h_1 \cdot \left(1 + \frac{d^2}{D^2}\right),$$

де d , D – діаметри відповідно широкої судини і трубки.

Звичайне співвідношення діаметрів складає 1:20 і величина h складе:

$$h = h_1 \cdot \left(1 + \frac{1}{20^2}\right) = h_1 \cdot (1 + 0,0025) \approx h_1$$

Таким чином, виміром рівня в широкій судині можна зневажити через незначну погрішність. Вимір тиску в чашкових манометрах по висоті підйому стовпа рідини тільки в капілярі приводить до зниження погрішності зчитування, що з урахуванням погрішності градування шкали не перевищує 1 мм, тобто в два рази менше, ніж у двотрубних (U-образних).

Мінімальний діапазон виміру чашкових манометрів з водяним заповненням складає 1,6 кПа, при цьому відносна приведена погрішність виміру не перевищує $\pm 1\%$.

Для виміру малих тисків і розряджень (± 2500 Па), а також для підвищення точності виміру застосовують чашкові манометри з похилою трубкою (рисунк 6.4), показання яких визначаються по довжині розтікання робочої рідини в похилій трубці манометра.

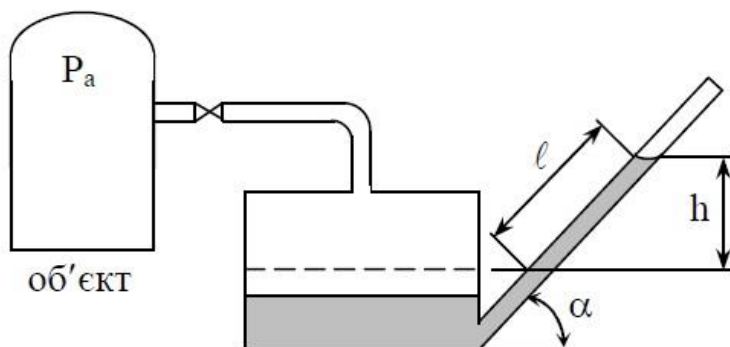


Рисунок 6.4 – Манометр з похилою трубкою

Такі прилади одержали назву мікроманометри і застосовуються як у лабораторній практиці, так і в промислових умовах при вимірі тиску і розрядження в топковому просторі, а також тяги в димових трактах теплових агрегатів. Похиле положення трубки підвищує точність виміру, тому що при тому самому значенні висоти підйому рідини h довжина рідини в трубці збільшується при зменшенні кута нахилу. При цьому, обмірюваний тиск у мм. вод. ст. при водяному заповненні визначається по формулі:

$$h = l \cdot \sin \alpha \quad (6.5)$$

Найчастіше, як робочу рідину в мікроманометрах застосовують етиловий спирт, тому що він менше змочує скло і дає більше, ніж вода, значення ціни поділу приладу. При вимірі у формулу (6.5) вводять виправлення на щільність спирту:

$$h = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot l \cdot \sin \alpha, \quad (6.6)$$

де ρ_1 – щільність спирту, кг/м^3 ;

ρ_2 – щільність води, кг/м^3 .

У мікроманометрах з похилою трубкою кут нахилу трубки α може мінятися і займати одне з п'яти фіксованих положень, яким

відповідають поправочні коефіцієнти " K "=0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8, розраховані по формулі:

$$K = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \sin \alpha, \quad (6.7)$$

у якій $\rho_1=8095 \text{ кг/м}^3$ (щільність етилового спирту).

Недоліками рідинних манометрів є відсутність дистанційної передачі показань і порівняно невелика межа вимірів. Тому рідинні прилади як стаціонарні в промисловості використовуються рідко. Вони широко поширені в лабораторній практиці й у промисловості при епізодичних вимірах і при контролі інших приладів завдяки високій точності виміру [5].

6.2.2 Деформаційні манометри

У деформаційних (пружинних) манометрах мірою вимірюваного тиску чи розрядження є величина деформації пружних чуттєвих елементів у виді їх лінійних чи кутових переміщень. Як пружні елементи в приладах тиску найчастіше використовуються (рисунок 6.5) плоскі мембрани (а), гофровані мембрани (б), коробчаті гофровані мембрани (в), сильфони (г), сильфони з циліндричною пружиною (д) і трубчасті пружини (е) і ін.

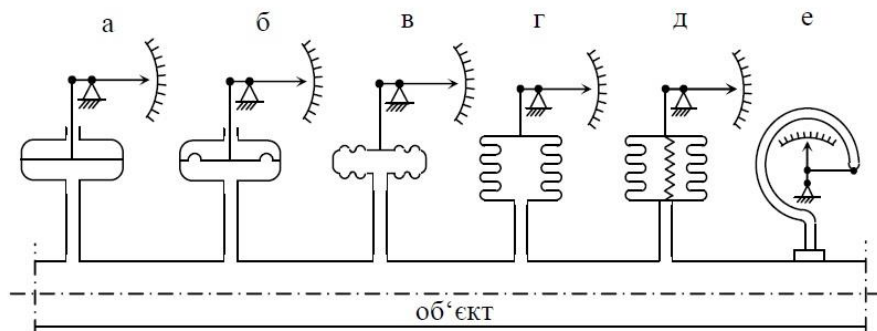


Рисунок 6.5 – Пружні чуттєві елементи

Для виготовлення мембран, сильфонів і трубчастих пружин застосовуються матеріали з високою пружністю, антикорозійністю,

малою залежністю параметрів від зміни зовнішніх умов і добре піддаються технологічній обробці, пайці і зварюванню. Зазначеним вимогам відповідають бронза, латунь і хромонікелеві сплави.

Однією з основних характеристик пружного чуттєвого елемента є залежність лінійного (чи кутового) переміщення Δl визначеної його точки від діючого тиску, тобто $\Delta l = f(p)$. Таку характеристику, яку називають статичною, звичайно при проектуванні пружних чуттєвих елементів намагаються робити лінійною:

$$\Delta l = k \cdot \Delta p$$

Крутість статичної характеристики залежить від конструкції чуттєвого (пружинного) елемента, матеріалу, температури. Робочий діапазон вибирається в області пружних деформацій і залежить від пружності (коефіцієнта твердості) пружинного елемента.

Для забезпечення надійної роботи пружного чуттєвого елемента необхідно, щоб розмір напруги, що виникає у матеріалі під дією зовнішніх сил, не перевищував межі пружності.

Унаслідок недосконалості пружних властивостей реальних матеріалів вид статичної характеристики $\Delta l = f(\Delta p)$ чуттєвого елемента при збільшенні і зменшенні навантаження в межах пружних деформацій неоднозначний і утворює так називану петлю гістерезису. Розмір гістерезису є однією з важливих характеристик пружинного елемента, тому що визначає погрішність приладу. На розмір гістерезису впливає хімічний склад, структура матеріалу і значення напружень у матеріалі чуттєвого елемента. Гістерезис, а звідси і величина погрішності, виражається у відсотках:

$$\delta = \frac{(\Delta l_1 - \Delta l_2)_{\max}}{\Delta l_{\max}} \cdot 100, \% \quad (6.8)$$

де $(\Delta l_1 - \Delta l_2)_{\max}$ – максимальна різниця між переміщеннями пружинного елемента при прямому і зворотному вимірі (ході);

$\Delta l_{\max}$ – максимальна величина переміщення пружинного елемента при вимірюваному тиску, що допускається максимально, для даного пружинного елемента.

Пружні чуттєві елементи виготовляють з досить пластичних матеріалів, що мають високу пружність і міцність. Зазначені властивості мають такі матеріали як бронза, латунь, і хромонікелеві сталі, що мають найкращі технологічні й експлуатаційні якості.

По класу точності манометри розділяються на технічні, контрольні і зразкові. Технічні манометри мають класи точності 1,5; 2,5; 4; контрольні – 0,5 і 1,0; зразкові – 0,16 і 0,45.

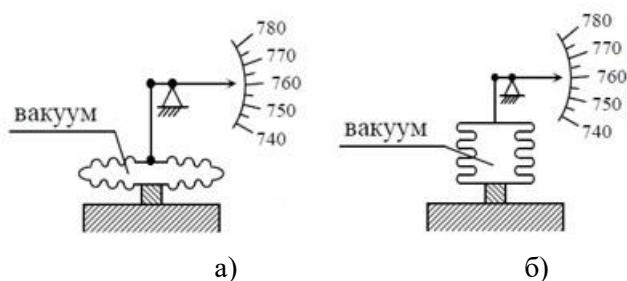
Нижче розглядаються найбільш розповсюджені типи пружних чуттєвих елементів, застосовуваних у приладах виміру тиску.

Плоскі мембрани [2]. Плоска мембрана являє собою тонкостінну мембрану постійної товщини (рисунок 3.5 а), затиснену по краях. Під дією тиску газу чи рідини мембрана прогинається і передає переміщення свого центра через підйомову систему на стрілку приладу, що показує. Перевагою манометрів із плоскою мембраною є стійкість проти вібрацій. Такі манометри застосовуються для виміру тиску не вище 2,5 МПа при погрішності від $\pm 2,5$ до $\pm 4\%$. Плоскі мембрани знаходять застосування в приладах для виміру тиску агресивних рідин чи в'язких речовин, а також у приладах спеціальних конструкцій, наприклад, п'єзокварцевих, ємнісних, індуктивних, з тензоперетворювачами і т.д. Прилади з плоскими мембранами мають малу інерційність і їх можна використовувати для виміру перемінних тисків з частотою до декількох сотень і тисяч герц.

Гофровані мембрани [2]. Гофрована поверхня мембрани у виді кільцевих хвиль (рисунок 3.5 б) дозволяє одержати лінійну характеристику і значно підвищити надійність роботи мембрани. Гофровані одиночні мембрани як чуттєві елементи застосовуються рідко. Найбільше застосування в приладах тиску (тягомірах, напоромірах, дифманометрах) одержали коробчаті мембрани, утворені двома спаяними чи звареними по зовнішній крайці гофрованими мембранами. Профілі мембран можуть бути пильчастими, трапеційдальними і синусоїдальними. Коробчаті мембрани застосовуються в приладах для виміру порівняно малих тисків, розріджень і перепадів тисків. Наприклад, напороміри і тягоміри мають шкали з верхньою межею виміру від 160 до 40000 Па; тягонапороміри з нулем по середині шкали від ± 80 до ± 20000 Па. Основна погрішність приладу складає $\pm 2,5\%$. Багато мембранних манометрів забезпечуються системою дистанційної передачі показань з уніфікованими електричними чи пневматичними сигналами.

Сильфонні манометри [2]. Сильфон являє собою тонкостінний циліндр, бічна поверхня якого виконана з поперечним гофруванням. Висота сильфона змінюється пропорційно прикладеному тиску чи

перепаду тиску, при цьому, більше значення створюється над сильфоном, а менше – усередині нього. Максимальна величина робочого ходу (деформація) сильфона складає 5 - 10 мм, що обумовлює найвищу чутливість у порівнянні з іншими типами пружинних елементів, застосовуваних у приладах для виміру тиску. Великий робочий хід сильфона і велике зусилля, що розвивається, дозволяє досить просто здійснювати запис показань вимірюваного тиску на дисковому чи стрічковому діаграмному папері.



а – коробчатата мембрана; б – сильфонна мембрана

Рисунок 6.6 – Схема барометра (анероїда)

Сильфони застосовуються в напоромірах і тягомірах для виміру невеликого тиску до 25 кПа і розрідження до 100 кПа повітря і неагресивних газів. Для збільшення твердості і зменшення впливу нелінійності характеристики усередину сильфона поміщають дротову циліндричну гвинтову пружину (рисунок 6.5 д). Унаслідок цього вимірюваний тиск врівноважується силою пружної деформації сильфона і гвинтової пружини. Основна погрішність сильфонних манометрів складає 1,0...2,5%

Барометри. Барометри призначені для виміру атмосферного тиску, тобто абсолютного тиску, виробленого газовим шаром планети Земля на земну поверхню.

Дія барометра заснована на деформації коробчатої чи сильфонної мембрани при вимірі атмосферного тиску (рисунок 6.6). Внутрішня порожнина мембран герметична і знаходиться під вакуумом

(абсолютний тиск у внутрішній порожнині мембран складає від 13 до 40 Па).

Трубчасті манометри. Прилади з трубчастою пружиною належать до числа найбільш розповсюджених манометрів і вакууметрів. Манометри мають чуттєвий елемент у виді зігнутої по колу на кут $\gg 270^\circ\text{C}$ трубки овального чи еліптичного перетину (рисунок 6.56). Один кінець трубки закритий, а до іншого через спеціальний штуцер підводиться вимірюваний тиск. При підвищенні тиску усередині трубки відбувається деформація перетину в напрямку наближення до круглого перетину, і це викликає появу зусиль, що змушують трубку розгинатися. Таким чином, величина переміщення кінця трубки служить мірою вимірюваного тиску.

Тонкостінні трубчасті пружини застосовують у приладах для виміру вакууметричного тиску до 0,1 МПа і надлишкового тиску до 6 МПа. Для виміру надлишкового тиску від 20 до 160 МПа застосовують товстостінні пружини овального перетину.

Різновидом конструкції трубчастих манометрів є манометри з багатовитковою (гелікоїдальною) трубчастою пружиною, застосовувані найчастіше як самописні прилади. Застосування гелікоїдального порожнього пружинного елемента дозволяє значно підвищити чутливість приладу, що обумовлено більшою величиною деформації пружини (великим кутом повороту вільного кінця пружини) у порівнянні з одновитковою пружиною при однаковому підведеному тиску.

Манометри, що показують, і самописні манометри можуть мати додаткові пристрої, що здійснюють замикання електричного ланцюга при визначеному значенні вимірюваного тиску для автоматичної сигналізації чи позиційного регулювання тиску газу чи рідини в якому-небудь об'єкті. Електроконтактні прилади і реле тиску застосовують при автоматизації технологічних процесів, у пристроях теплового захисту агрегатів і реле інших пристроїв. Електроконтактні прилади випускають з відліковим пристроєм, що показує, тому вони можуть бути використані одночасно для цілей виміру і сигналізації надлишкового чи вакууметричного тиску. Реле (чи сигналізатори) тиску для цілей виміру не можуть бути використані так, як вони не мають відлікових пристроїв. На рисунку 6.7 показана схема електроконтактного манометра [2]. У цьому приладі в якості пружного

чуттєвого елемента використовується одновиткова трубчаста пружина. Усередині приладу розташовані спеціальні електроконтакти 1, 2, 3. Установка електроконтактів 1 і 2 може бути зроблена на будь-які оцінки робочої частини шкали манометра за допомогою гвинтів, розташованих на лицьовій частині приладу.

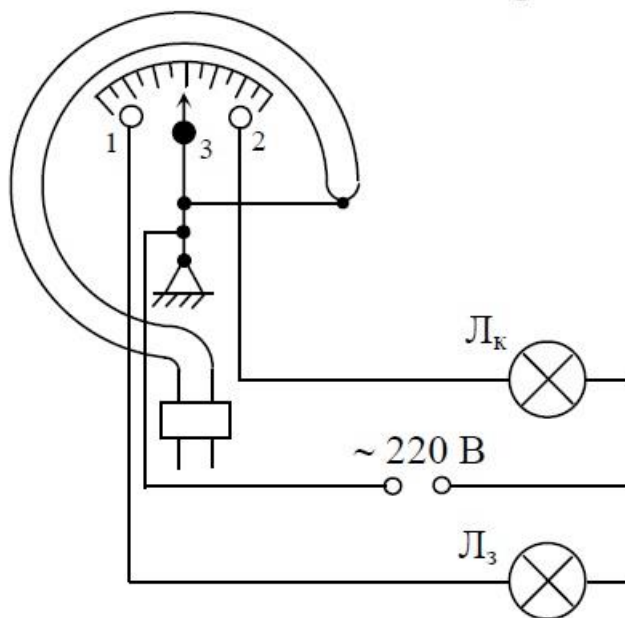


Рисунок 6.7 – Електроконтактний манометр

Якщо вимірюваний тиск середовища в об'єкті зменшиться до нижнього заданого рівня, то стрілка, що показує, за допомогою контактів 3 і 1 замкне електричний ланцюг і включить лампу Лз (зеленого кольору). Якщо ж тиск середовища збільшиться до верхнього заданого значення, то стрілка за допомогою контакту 3 замкне контакт 2 і при цьому загориться сигнальна лампа Лк (червоного кольору).

6.2.3 Електричні манометри

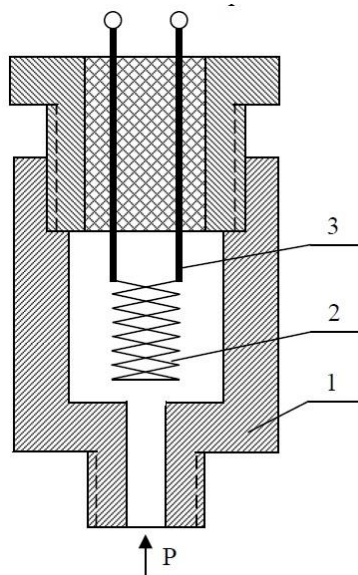
Електричні манометри мають свою область виміру тиску, у якій неможливо застосувати рідинні і пружинні прилади. При вимірі

надвисоких тисків, глибокого вакууму і тиску, що змінюється з високою частотою, застосовуються тільки електричні манометри, дію яких засновано на перетворенні тиску в яку-небудь електричну величину. Розрізняють наступні типи електричних манометрів: електричного опору, п'єзоелектричні, термопарні, іонізаційні, ємнісні.

Принцип дії манометрів опору заснований на зміні електричного опору провідника в залежності від зовнішнього тиску. Для цілей виміру тиску, як показали експериментальні дослідження, найбільшою мірою підходить манганін, що має лінійну залежність опору від тиску. Крім того, він має дуже малий коефіцієнт температурного розширення, що дає можливість не враховувати вплив температури навколишнього середовища на електричний опір манганіну.

Конструкція (схема) манометра з перетворювачем з манганіну показана на рисунку 6.8. Чуттєвий елемент манометра являє собою біфілярну котушку 1 з опором 180–200 Ом із дроту діаметром 0,05 мм. Для виміру опору манганінової котушки застосовують автоматичні мости чи потенціометри, якщо вимагаються більш точні виміри. Межі основної погрішності приладу, що допускається, не перевищують $\leq 1\%$. Манометри опору призначені для виміру надвисоких тисків до 3000 МПа і застосовуються як у дослідницькій практиці, так і в промисловості, особливо при контролі процесу гідроекструзії (обробка металів при надвисокому тиску).

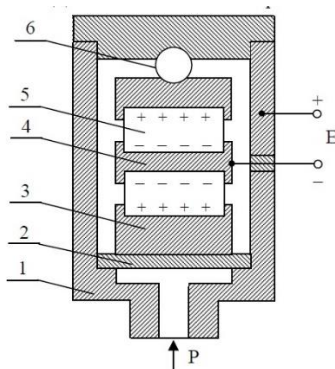
П'єзометричні манометри. Принцип дії манометрів цього типу заснований на використанні п'єзоелектричного ефекту, що спостерігається в ряду кристалів. Під дією тиску на гранях деяких кристалічних речовин (кварц, турмалін, титанат барію, двоокис кремнію й ін.) виникають електричні заряди. Якщо вирізувати з п'єзоелектричного кристала прямокутну пластину і піддати її стиску в напрямку, перпендикулярному оптичній і електричній осям кристала, то на гранях, перпендикулярних цим осям, з'являться електричні заряди, рівні за значенням і протилежні за знаком. Величина заряду прямо пропорційна діючому тиску.



1 – корпус приладу; 2 – манганіновий резистор; 3 – мідний струмовідвід

Рисунок 6.8 – Схема манометра опору

Найбільш широко використовуються кристали кварцу, у яких п'єзOMETричний ефект практично не залежить від температури до 500°C . Крім того, кристали кварцу в порівнянні з іншими кристалами мають високу механічну міцність. Схема п'єзoeлектричного манометра приведена на рисунку 6.9. Вимірюваний тиск P через мембрану 2 діє на два п'єзоелементи 5, розташованих так, що на їхніх внутрішніх гранях, що стикаються з металевою прокладкою 4, виникають однойменні заряди. Інші сторони кварцових пластин (п'єзоелементів) прилягають до металевих опор 3 і через них електрично замикаються на корпус манометра. Кулька, що знаходиться між кришкою і верхньою опорою, сприяє рівномірному розподілу тиску на поверхні кварцових пластин. Нижня частина корпусу має штуцер для з'єднання приладу з об'єктом виміру.



1 – корпус пристрою; 2 – мембрана; 3 – металева опора;
4 – контактна пластина; 5 – п'єзоелемент; 6 – шарик

Рисунок 6.9 – Схема п'єзоелектричного манометра

Позитивний заряд при вимірі тиску відводиться на корпус, а негативний заряд знімається контактною пластиною 4 і за допомогою проводу через ізолюючу втулку подається на вимірювальний пристрій. Як вторинний прилад для виміру виникаючого потенціалу E використовується осцилограф. Загальна погрішність виміру не перевищує 1,5...2,0 % при верхній межі вимірюваного тиску, що складає 100 МПа.

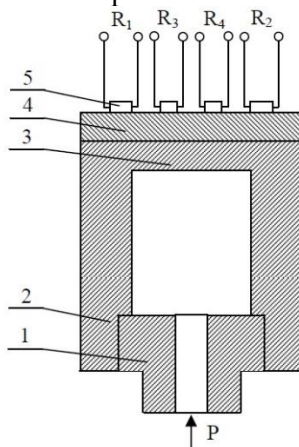
Достоїнством п'єзоелектричного манометра є майже повна безінерційність, тому що електричні заряди в кристалах виникають відразу в момент виникнення тиску. П'єзоелектричні манометри застосовуються при вимірі тисків, які швидко змінюються (вибухові процеси, діагностика двигунів внутрішнього згоряння, обробка металів тиском і ін.).

Тензометричні манометри. Тензометричний метод виміру тиску полягає в безпосередньому перетворенні деформації пружного чутливого елемента (мембрани) під впливом тиску в зміну електричного опору резисторів, закріплених на цьому елементі. Ця зміна опору перетворюється електричною вимірювальною схемою в електричний вихідний сигнал, пропорційний величині вимірюваного тиску.

Резистор, опір якого змінюється в залежності від його деформації, називається тензорезистором. Схема тензометричного манометра

приведена на рисунку 6.10. Манометр складається з циліндричного корпусу 2, верхня частина якого утворює пружну мембрану 3, а в нижній частині мається штуцер 1 для підведення вимірюваного тиску P . До мембрани припаяна кругла сапфірова пластинка 4, на поверхню якої нанесені методом напилювання тонкоплівкові напівпровідникові тензорезистори R_1, R_2, R_3, R_4 з монокристалічного кремнію.

Тензорезистори за допомогою припаяних до них вивідних проводів з'єднані з електричним перетворювачем, розташованим конструктивно в корпусі тензометричного манометра.



1 – штуцер; 2 – корпус прибору; 3 – пружна мембрана;
4 – сапфірова пластинка; 5 – кремнійові резистори

Рисунок 6.10 – Схема тензометричного манометру

Тиск у манометрі вимірюється з використанням схеми невідновженого моста, плічми якого є тензорезистори R_1, R_2, R_3, R_4 . Під дією вимірюваного тиску мембрана 3 із сапфіровою пластинкою 4 і тензорезисторами піддається деформації. Тензорезистори R_1 і R_2 розташовані в радіальному напрямку, що приводить при деформації до зменшення їхнього опору, а тензорезистори R_3 і R_4 - в окружному напрямку, що викликає збільшення їхнього опору. Таке розташування тензорезисторів на сапфіровій пластині при відповідному їхньому з'єднанні в електричному ланцюзі мостової схеми значно підвищує чутливість тензометричного манометра. У результаті при деформації

виникає розбаланс моста у виді напруги, що підсилюється за допомогою убудованого в корпус манометра мікроелектронного підсилювача. Підсилювач видає стандартний сигнал $0 - 5$ мА (пропорційний вимірюваному тиску) для дистанційної передачі на вторинний вимірювальний прилад, що має градування в одиницях тиску.

Верхня межа показань манометра $0,1 - 40$ МПа при класі точності різних модифікацій приладів $0,6; 1,0$ і $1,5$. Тензометричні манометри мають малі габарити, простий устрій, високу точність і надійність у роботі, що дозволяє використовувати їх для виміру тиску в складних виробничих умовах.

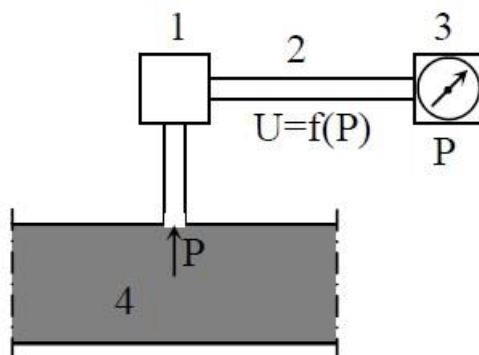
Теплові вакуумметри. Принцип дії теплових вакуумметрів заснований на залежності теплопровідності газового середовища від ступеня його розрядження. Вони призначені для виміру абсолютного тиску газового середовища в інтервалі $1,1 - 104$ Па, тобто в області середнього значення вакууму. Для виміру абсолютного тиску в зазначеному інтервалі застосовуються два конструктивних варіанти теплових вакуумметрів: термпарний і опору. В обох конструкціях чутливим елементом є нагріта шляхом пропущення електричного струму платинова нитка, розташована у вакуумному балоні. При збільшенні розрядження газового середовища її теплопровідність буде зменшуватися, отже, нагріта платинова чи вольфрамова нитка буде гірше віддавати тепло стінкам балона, у результаті чого її температура буде зростати. Вимірюючи температуру нитки чи її опір, можна вимірювати величину вакууметричного тиску в об'єкті.

На рисунку 6.11 показана схема термпарного вакуумметра. Усе речовину скляного балона 3, вакуумно щільно приєднаного верхньою частиною до об'єкта виміру тиску, знаходиться платиновий нагрівач. Щоб значно зменшити теплопередачу від нитки до стінок балона за рахунок випромінювання, максимальна температура нитки повинна бути приблизно 100°C . Перед початком виміру температура нитки, рівна 100°C , встановлюється за допомогою регульовального реостата R_p і контрольного міліамперметра [5].

6.3 Вимірювальні перетворювачі тиску

6.3.1 Загальні відомості

Більшість сучасних систем виміру тиску (перепаду тиску) рідких і газоподібних середовищ у технологічних агрегатах складаються з первинного перетворювача, вторинного приладу і з'єднуючої їх лінії зв'язку (рисунок 6.14).



1 – первинний перетворювач; 2 – лінія зв'язку; 3 – вторинний прилад; 4 – об'єкт

Рисунок 6.14 – Схема системи виміру тиску

Первинний перетворювач 1 розташовується біля місця виміру (біля об'єкта) 4 і призначений для перетворення вимірюваного тиску P в електричний (пневматичний) сигнал U , зручний для передачі по лінії зв'язку 2 до вторинного приладу 3, що розташований на щиті керування. Найчастіше при вимірі тиску з використанням перетворювача застосовуються в якості чутливих елементів деформаційні пристрої, наприклад мембрана. При зміні тиску мембрана буде прогинатися і зсув її центра однозначно визначає тиск газу чи рідини. Для перетворення лінійного переміщення центра мембрани в уніфікований електричний вихідний сигнал найбільше поширення одержали диференційно-трансформаторні, ферродинамічні перетворювачі, а також перетворювачі з магнітною компенсацією. Тип перетворювача вибирається в залежності від виду перетвореного механічного сигналу (лінійне чи кутове переміщення, зусилля) і заданого виду сигналу, переданого по лінії зв'язку (струм, напруга, пневмосигнал і т.д.) [2].

Сучасні вимірювальні перетворювачі випускаються з уніфікованими вихідними сигналами, що забезпечує взаємозамінність

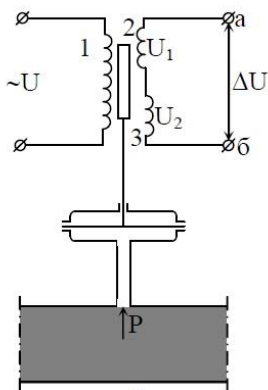
засобів вимірів (вторинних приладів) і дозволяє скоротити типи вторинних приладів. Широке поширення одержали перетворювачі з вихідним сигналом перемінного струму. Цей сигнал представляється у виді зміни взаємної індуктивності в діапазоні 0-10 мГ чи у виді зміни напруги – перемінного струму в таких межах: $-1...+1$ В; $0...2$ В; $1...3$ В. Найбільш перспективними є перетворювачі з уніфікованим вихідним сигналом постійного струму $0 - 5,0 - 20$ і $4 - 20$ мА; застосовуються також перетворювачі з вихідним сигналом напруги постійного струму з діапазоном його зміни $0 - 10$ і $0 - 5$ В, а також з частотним електричним сигналом у діапазоні $4 - 7$ кГц. Використання постійного струму дозволить позбутися від впливу індуктивності і ємності лінії зв'язку, підвищує перешкодостійкість лінії зв'язку і забезпечує їхню достатню довжину. Важливим фактором є також можливість використання вторинних приладів постійного струму, що випускаються, регулюючих приладів і засобів обчислювальної техніки з вхідними сигналами постійного струму. У деяких галузях промисловості, таких як хімічна і харчова, де електричні перетворювачі застосовувати недоцільно, широко застосовуються перетворювачі з уніфікованим пневматичним сигналом у межах $20 - 100$ кПа.

6.3.2 Диференційно-трансформаторні перетворювачі

Диференційно – трансформаторні перетворювачі (ДТП) призначені для перетворення лінійного переміщення сердечника, зв'язаного з мембраною чуттєвого елемента, у вихідний електричний сигнал [2].

Принцип дії ДТП заснований на залежності взаємної індуктивності між первинною обмоткою (обмоткою збудження) і вторинною обмоткою від положення сердечника. Перетворювач являє собою трансформатор (рисунок 6.15), що має обмотку збудження 1 і дві секції 2 і 3 вторинної обмотки, включені зустрічно. Створюваний первинною обмоткою перемінний магнітний потік буде пронизувати обидві секції вторинної обмотки, збуджуючи в них перемінні ЕРС U_1 і U_2 . Якщо сердечник розташовується симетрично щодо двох секцій вторинної обмотки (як показано на рисунку 6.15), то $U_1=U_2$ і результуюча напруга між точками "а" і "б" буде дорівнювати нулю. При збільшенні тиску Р мембрана чуттєвого елемента прогинається і

сердечник переміститься нагору на визначену величину. При цьому, збільшиться магнітний потік через верхню обмотку 2 і, навпаки, зменшиться магнітний потік через нижню обмотку 3. Відповідно до цього зросте напруга U_1 і зменшиться напруга U_2 . Між точками "а" і "б" з'явиться результуюча напруга, яка буде дорівнювати $\Delta U = U_1 - U_2$. При зменшенні тиску P сердечник переміститься вниз і при цьому U_2 буде зростати, а U_1 зменшуватися. Між точками "а" і "б" напруга також зросте (по модулю), але фаза її буде зворотною. Таким чином, значення і фаза вихідного сигналу ΔU залежать від положення сердечника між обмотками індуктивності (первинної і вторинної), тобто від величини тиску в об'єкті.

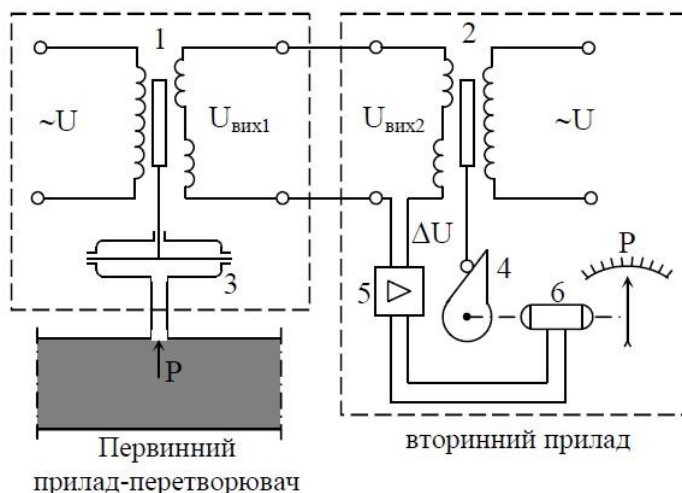


1 – первинна обмотка; 2, 3 – вторинні обмотки

Рисунок 6.15 – Схема диференційно-трансформаторного перетворювача

Для дистанційної передачі електричного сигналу від ДТП перетворювача (первинний прилад) до вторинного приладу, розташованому на щиті керування об'єктом, використовується компенсаційна схема (рисунок 6.16). Основна частина вторинного приладу – диференційно-трансформаторний перетворювач 2, що має характеристику і конструкцію аналогічну ДТП первинного приладу 1. У первинному приборі-перетворювачі сердечник переміщається при повороті профільованого кулачка 4. Вихідна напруга $U_{\text{вих1}}$ первинного приладу спрямована назустріч вихідній напрузі $U_{\text{вих2}}$ вторинного

приладу. Результируюча напруга $\Delta U = U_{\text{вих1}} - U_{\text{вих2}}$ надходить на електронний підсилювач 5, що харчує реверсивний двигун 6.



- 1 – ДТП первинного приладу; 2 – ДТП вторинного приладу;
3 – пружний елемент; 4 – профільований кулачок; 5 – посилювач;
6 – реверсивний двигун.

Рисунок 6.16 – Схема дистанційної передачі тиску з використанням диференційно-трансформаторних перетворювачів

При розгляді дії вимірювальної схеми припустимо, що перед виміром сердечники двох приладів (первинного і вторинного) знаходяться в середньому положенні (як представлено на рисунку 6.16). При цьому, вихідні напруги двох приладів будуть рівні ($U_{\text{вих1}} = U_{\text{вих2}}$), а різниця цих напруг буде дорівнювати нулю ($\Delta U = 0$).

Зміна тиску P в об'єкті приведе до переміщення сердечника первинного приладу (нагору чи вниз у залежності від величини тиску), і при цьому порушиться рівність напруг $U_{\text{вих1}}$ і $U_{\text{вих2}}$. Різниця напруг, що з'явилася, ΔU підсилюється і надасть руху реверсивному двигуну. Двигун, повертаючи кулачок, переміщає сердечник ДТП вторинного приладу, що буде встановлений у таке положення, при якому $U_{\text{вих1}} = U_{\text{вих2}}$. При цьому $\Delta U = 0$ і двигун зупиниться, а сердечник ДТП у вторинному приладі переміститься на таку ж величину, як і сердечник

у первинному приладі. Таким чином, кожному положенню сердечника ДТП первинного приладу (тобто визначеному значенню тиску) відповідає цілком визначене положення сердечника ДТП вторинного приладу. Стрілка, що показує, (чи пристрій, що реєструє) кінематично зв'язана з реверсивним двигуном, укаже на значення тиску в об'єкті в момент виміру.

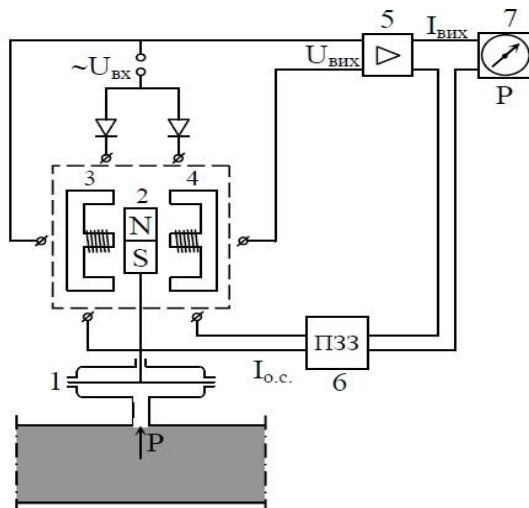
Достоїнством компенсаційного методу виміру тиску з використанням диференційно-трансформаторного перетворювача є відсутність впливу коливання живильної напруги і частоти на точність показання вторинного приладу. Це зв'язано з тим, що всі зміни параметрів живильної напруги однаково впливають на роботу ДТП первинного і вторинного приладів.

Диференційно-трансформаторні перетворювачі прості по устрою, надійні в роботі і на їхнє показання не роблять вплив зміна температури, тиску, вологості і запиленості навколишнього середовища. До недоліків цих перетворювачів варто віднести неможливість підключення до них декількох одночасно працюючих вторинних приладів. Крім того, система дистанційної передачі з ДТП, як і всі системи передач на перемінному струмі, піддані впливу зовнішніх магнітних полів і сусідніх ліній зв'язку, що викликає додаткову погрішність виміру. Зазначених недоліків позбавлені перетворювачі з магнітною компенсацією і перетворювачі з передачею сигналів на постійному струмі.

6.3.3 Перетворювачі з магнітною компенсацією

Передавальні перетворювачі з магнітною компенсацією призначені для перетворення лінійного переміщення чуттєвого елемента первинного приладу в уніфікований вихідний сигнал постійного струму. Принцип дії перетворювача полягає в тому, що магнітний потік в одному магнітопроводі, що змінюється при переміщенні біля нього постійного магніту, компенсується магнітним потоком іншого магнітопроводу за рахунок струму зворотного зв'язку. При цьому, установлюється визначена залежність між вихідним струмом і переміщенням рухливого елемента (постійного магніту), а виходить, і значенням вимірюваної величини.

Структурна схема перетворювача приведена на рисунку 6.17. Пружний чуттєвий елемент 1 (мембрана) первинного перетворювача перетворює вимірювану величину (тиск) у лінійне переміщення постійного магніту 2. При переміщенні магніту змінюється магнітний потік у лівому магнітопроводі 3 і на виході перетворювача з'являється напруга $U_{\text{вих}}$, що підсилювачем 5 перетворюється у вихідний токовий сигнал $I_{\text{вих}}$.



1 – мембрана; 2 – постійний магніт; 3 – лівий магнітопровід;
4 – правий магнітопровід; 5 – підсилювач; 6 – пристрій зворотного зв'язку; 7 – вторинний вимірювальний пристрій.

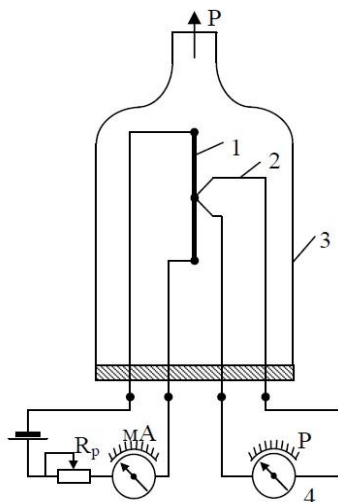
Рисунок 6.17 – Структурна схема перетворювача з магнітною компенсацією

Вихідний струм $I_{\text{вих}}$ надходить у лінію дистанційної передачі й одночасно в пристрій зворотного зв'язку 6, вихідний струм якого $I_{\text{о.с.}}$ створює магнітний потік у правому магнітопроводі 4, що компенсує магнітний потік лівого магнітопровода. Таким чином, при збільшенні вимірюваної величини (тиску P) збільшується зсув постійного магніту 2, збільшується магнітний потік у магнітопроводі 3 і, отже, необхідний більший вихідний струм $I_{\text{вих}}$ і струм зворотного зв'язку $I_{\text{о.с.}}$ для взаємної

компенсації двох магнітних потоків, що утворюються в двох магнітопроводах.

Пристрій зворотного зв'язку 6 (ПЗЗ) дозволяє установити необхідний закон перетворення, тобто $I_{\text{вих}}=f(P)$. Ця залежність може бути або лінійною (у приладах для виміру тиску, різниці тисків, рівня), або квадратичною (у витратомірах по перепаду тиску на пристрої, що звужує). Вторинний прилад 7, вимірюючи $I_{\text{вих}}$, вкаже значення вимірюваної величини P .

Перетворювачі з магнітною компенсацією мають ряд переваг (рисунк 6.18): можливістю підключення декількох вторинних приладів до одного перетворювача, вібростійкістю і надійністю. До недоліків таких перетворювачів варто віднести досить високу температурну погрішність і неможливість роботи в агресивному середовищі, що впливає на роботу електронної апаратури, що знаходиться в корпусі первинного перетворювача. Перетворювачі цього типу мають клас точності 1,0 і 1,5. Як вторинні прилади використовуються міліамперметри з відповідним діапазоном виміру.



1 – платинова нитка; 2 – термопара; 3 – вакуумний балон;
4 – вимірювальний прилад

Рисунок 6.18 – Схема термопарного вакуумметра

Температура платинової нитки вимірюється в її центрі хромель–копелевою термопарою, що зв'язана з вимірювальним мілівольтметром, який відградує в одиницях тиску.

У теплових вакуумметрах опору, у яких чутливим елементом є нагріта до температури $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ вольфрамова нитка, використовується неврівноважений міст. На рисунку 6.19 приведена електрична схема теплового вакуумметра. Три плеча моста складаються з постійних опорів R_1 , R_2 , R_3 , а четверте R_4 являє собою тонку вольфрамову нитку, що знаходиться в камері, до якої приєднується об'єкт виміру тиску. При низьких тисках знижується концентрація молекул у газовому середовищі і довжина вільного пробігу молекул стає порівнянною з розмірами газової камери. Це приводить до різкого зменшення передачі тепла теплопровідністю від нагрітої нитки до стінок камери через газове середовище. Температура вольфрамової нитки, а виходить, і її електричний опір, збільшується пропорційно зниженню тиску. Напруга у вимірювальній діагоналі мостової схеми між точками а – б (розбаланс моста) також буде визначатися величиною вимірюваного тиску. Вимірювальний прилад (мілівольтметр), відградує в одиницях абсолютного тиску, покаже величину вакууметричного тиску в об'єкті.

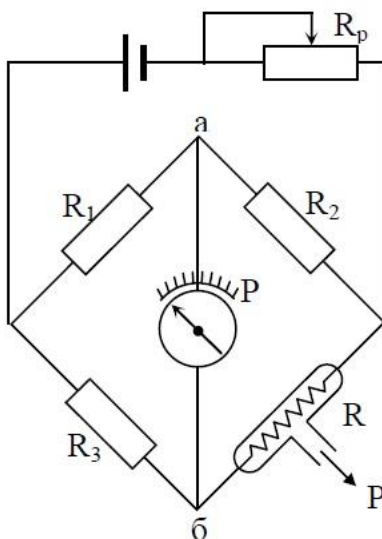


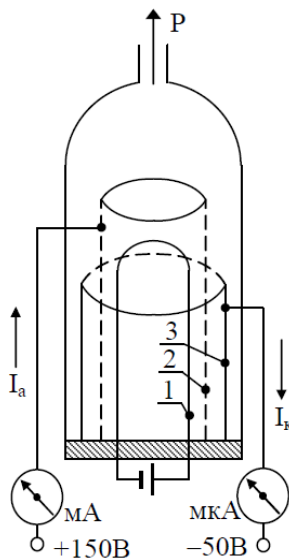
Рисунок 6.19 – Схема теплового вакуумметра опору

Тепловіддача від вольфрамової нитки залежить як від числа молекул, що беруть участь у переносі тепла, так і від температури стінок камери. Для зниження впливу на показання приладу коливань температури навколишнього середовища, газова камера з вольфрамовою ниткою міститься у вакуумну камеру, утворюючи термос з гарною тепловою ізоляцією.

Нижня межа виміру приладу обмежується зростанням по мірі зниження теплопровідності ролі променистого теплообміну, що стає головним при тиску нижче 10^{-1} Па.

Іонізаційний вакуумметр. Для виміру наднизького абсолютного тиску в діапазоні $10^{-1} - 10^{-8}$ Па використовуються іонізаційні вакуумметри. Принцип дії таких приладів засновано на іонізації молекул газу потоком електронів з наступним виміром іонізаційного струму, що залежить від величини абсолютного тиску газового середовища.

Основним елементом іонізаційного вакуумметра є скляна вакууметрична лампа (рисунок 6.20), що містить катод 1, що знаходиться усередині анодної сітки 2, оточеної циліндричним іонним



1 – катод; 2 – анодна сітка; 3 – іонний колектор

Рисунок 6.20 – Схема іонізаційного вакуумметра

колектором 3. Катод 1, нагрітий до високої температури, випускає електрони, що прискорюються позитивною напругою, прикладеною між сітковим анодом 2 і катодом 1. При русі електрони зіштовхуються з молекулами газу, іонізуючи їх. Позитивні іони попадають на негативно заряджений колектор 3. При сталості анодної напруги величина колекторного струму й I_k залежить від вимірюваного тиску, тому що кількість іонів, що утворюються, безпосередньо залежить від кількості молекул у газовому об'ємі лампи. Теоретично, у межі, колекторний струм буде дорівнювати нулю при абсолютному вакуумі. Однак, практично нижня межа виміру тиску іонізаційними вакуумметрами обмежена фоновим струмом, викликаним м'яким рентгенівським випромінюванням і фотоелектронною емісією колектора.

Величина вимірюваного тиску визначається за показниками мікроамперметра (мкА) з використанням градуювальної характеристики для даного типу іонізаційного вакуумметра.

Відносна погрішність більшості типів робочих вакууметричних манометрів не перевищує $\pm 30\%$. Прилади для виміру середнього і глибокого вакууму, що використовують електричні і теплові ефекти, застосовуються для контролю технологічних процесів зв'язаних із застосуванням середнього і глибокого вакууму: вакуумування рідкого металу і речовин, система водопідготовки і конденсаторні установки на теплових електростанціях; вакуумна обробка харчових продуктів і ін.

7 ВИМІР ВИТРАТИ ГАЗУ, РІДИНИ І ПАРУ

7.1 Загальні відомості

В усіх галузях промисловості для оперативного контролю, регулювання і керування технологічними процесами необхідно вести постійний облік витрати газоподібних середовищ (пальних газів, кисню, повітря й ін.), рідин (води, рідкого палива, рідких хімічних речовин і ін.), енергетичної і теплофікаційної пари. Точний вимір витрати цих середовищ дозволяє визначати і порівнювати економічну ефективність роботи одностипових агрегатів, удосконалювати і вибирати прогресивні технологічні процеси, що приводять до економії енергоресурсів і підвищення конкурентноздатності продукції, що випускається.

При вимірах, зв'язаних з урахуванням кількості речовини необхідно розрізняти поняття витрата і кількість речовини.

Витрата є кількість речовини, що протікає через перетин трубопроводу (чи каналу іншого перетину) в одиницю часу, тобто миттєве значення витрати. Відповідно до обраних одиниць може робитися вимір або масової витрати (кг/с, кг/год, т/год), або об'ємної витрати (м³/с, м³/год, л/с). Одиниці маси дають більш повні зведення про витрату речовини, чим одиниця об'єму, тому що обсяг речовини, особливо газів, залежить від тиску і температури. При вимірі об'ємних витрат газів для одержання порівнянних значень результати виміру приводять до нормальних умов (температура $t_n=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, тиск $P_n=101325\text{ Па}$, відносна вологість $\varphi=0$).

Кількість – це загальний обсяг чи маса речовини, що протікає через трубопровід за конкретний інтервал часу (тобто за весь проміжок часу) за годину, добу, місяць, рік і т.д.

Вимірювальний прилад, що служить для виміру витрати речовини, називається витратоміром, а прилад для виміру кількості речовини – лічильником кількості (лічильником). У кожному конкретному випадку до цих термінів варто додавати найменування контрольованого середовища, наприклад, витратомір природного газу чи водяний лічильник.

Для виміру витрати і кількості газоподібних і рідких середовищ, а також пари використовуються різні методи і засоби, що зв'язано як з розходженням фізичних і теплофізичних властивостей цих речовин, так

і з різними вимогами до точності виміру робочих, зразкових і еталонних приладів.

У даному розділі розглянуті найбільш розповсюджені, а також перспективні методи виміру витрати пари, газу і рідини.

7.2 Витратоміри по перепаду тиску в пристрої, що звужує

Одним з найбільш розповсюджених і широко застосовуваних безупинних методів виміру витрати в промисловості й у лабораторній практиці є метод перемінного перепаду тиску. Він дозволяє вимірювати витрату будь-яких газових, рідких середовищ, а також пари в широкому діапазоні температур, тисків, вологості, складу. Апаратурне виконання використовуване у витратомірах перемінного перепаду, відрізняється простотою конструкції, надійністю, низькими експлуатаційними витратами і достатньою точністю виміру витрати.

Метод виміру витрати по перепаду тиску заснований на залежності перепаду тиску в пристрої, що звужує, який встановлено в трубопроводі (чи в каналі іншої форми), від витрати вимірюваного середовища. При протіканні потоку через отвір пристрою, що звужує, підвищується швидкість потоку в порівнянні зі швидкістю до звуження. Збільшення швидкості потоку приведе до збільшення динамічного тиску і зниженню статичного тиску згідно закону збереження енергії, тобто відбудеться перерозподіл кінетичної і потенційної енергії середовища, що рухається. Відповідно статичний тиск у звуженому перетині буде менше, ніж у перетині до пристрою, що звужує.

Таким чином, при протіканні речовини через пристрій, що звужує, створюється перепад статичного тиску $\Delta P = P_1 - P_2$, що залежить від швидкості потоку і, отже, витрати середовища. Перепад тиску, створюваний пристроєм, що звужує, може служити мірою витрати речовини, що протікає в трубопроводі.

Використання розглянутого методу виміру вимагає виконання наступних умов:

- характер руху потоку до і після пристрою, що звужує, повинний бути турбулентним і стаціонарним;
- потік повинний цілком заповнювати весь перетин трубопроводу;
- фазовий стан потоку не повинний змінюватися при його плинні через пристрій, що звужує;

- у внутрішній порожнині трубопроводу до і після пристрою, що звужує, не утворюються опади й інші види забруднень;

- на поверхнях пристрою, що звужує, не утворюються відкладення, що змінюють його геометрію;

- пара повинна бути перегрітою для виключення конденсації і наближення його властивостей до властивостей газоподібних середовищ.

У якості пристроїв, що звужують, для виміру витрати рідин, газів і пари широко застосовують стандартні діафрагми, сопла і сопла Вентурі. Стандартними називаються пристрої, що звужують, які виготовлені і встановлені у відповідності з керівними нормативними документами, розробленими державною метрологічною службою. Градувальна характеристика стандартних пристроїв, що звужують, тобто залежність перепаду тиску від витрати, може бути визначена розрахунковим шляхом без індивідуального градування. Градувальні характеристики нестандартних пристроїв, що звужують, визначаються в результаті індивідуального градування.

Діафрагма, показана на рисунку 7.1, являє собою тонкий диск з отвором круглого перетину, центр якого лежить на осі труби. Передня (вхідна) частина отвору має циліндричну форму, а потім переходить у конічне розширення. Передня крайка повинна бути гострою без заокруглення і задирок. Стандартні діафрагми встановлюють на трубопроводах діаметром не менш 50 мм [3, 4].

Звуження потоку починається до діафрагми і на деякій відстані за діафрагмою в площині В потік досягає мінімального перетину F_2 внаслідок інерції струменя. У цьому перетині середня швидкість потоку зростає до максимального значення, при цьому, збільшується кінетична енергія потоку і зменшується потенційна, а виходить, зменшується відповідно і статичний тиск до значення P'_2 .

Розподіл статичного тиску уздовж стінки трубопроводу показано на рисунку 7.1. Перед діафрагмою статичний тиск трохи зростає від P'_1 до P_1 через раптове гальмування, за діафрагмою швидкість зростає і відбувається падіння статичного тиску до P'_2 . Після перетину В–В починається розширення струменя, що закінчується в перетині С–С. Цей процес супроводжується зменшенням швидкості і збільшенням статичного тиску. У перетині С–С швидкість приймає первісне значення (як у перетині А–А), але тиск буде менше первісного на

величину $\Delta P_{\text{втр}}$, назване втратою тиску в пристрої, що звужує. Необоротна втрата тиску викликана втратою енергії на місцевому опорі (діафрагмі) через сильні вихроутворення в мертвих зонах до і після діафрагми.

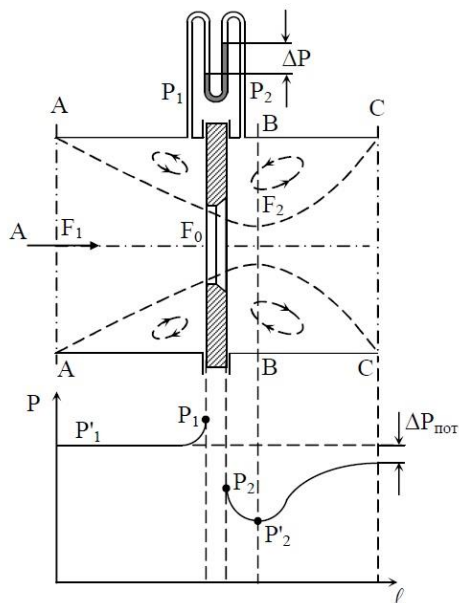


Рисунок 7.1 – Розподіл статичних тисків в зоні розташування пристрою, що звужує

Як видно з рисунка 7.1, відбір тисків P_1 і P_2 здійснюється за допомогою двох окремих отворів, розташованих безпосередньо до і після диска діафрагми. Перепад тиску на діафрагмі може вимірюватися різними приладами – дифманометрами з безпосереднім одержанням значення витрати (рідинні і пружинні манометри) чи з електричним перетворенням з подальшим виміром електричного сигналу вторинним приладом.

Для виведення рівняння витрати по перепаду тиску на пристрої, що звужує, припустимо спочатку, що рідина нестислива (тобто щільність рідини не змінюється при проходженні через пристрій, що звужує), втрати тиску дорівнюють нулю, відсутній теплообмін з навколишнім середовищем і трубопровід розташований горизонтально.

Застосовуючи рівняння Бернуллі для двох перетинів А–А й В–В, запишемо [2]:

$$P'_1 + \frac{W_1^2}{2} \cdot \rho = P'_2 + \frac{W_2^2}{2} \cdot \rho, \quad (7.1)$$

де P'_1 і P'_2 - статичний тиск у перетинах А–А й В–В, Па;

W_1 і W_2 – середня швидкість потоку в перетинах А–А й В–В, м/с.

У рівнянні 7.1 невідомими величинами є швидкості потоку W_1 і W_2 , а величини P'_1 і P'_2 можна вимірити безпосередньо дифманометром. Тому для висновку рівняння витрати скористаємося умовою нерозривності (суцільності) потоку, тобто маса речовини, що проходить через перетин А–А дорівнює масі речовини минаючої через перетин В–В. Відповідно до умови нерозривності потоку можна записати:

$$F_1 \cdot W_1 = F_2 \cdot W_2 \quad (7.2)$$

Самий вузький перетин струменя F_2 , що виходить із пристрою, що звужує, складновимірювана величина, тому F_2 виражають через площу отвору пристрою, що звужує, F_0 і коефіцієнт звуження:

$$F_2 = \mu \cdot F_0 \quad (7.3)$$

Площу перетину F_0 можна виразити через площу перетину трубопроводу F_1 , використовуючи так називаний модуль діафрагми "m" (тобто ступінь діафрагмування):

$$\frac{F_0}{F_1} = m \quad \text{і} \quad F_0 = F_1 \cdot m \quad (7.4)$$

Таким чином, площа перетину вузького потоку F_2 виразиться через коефіцієнти " μ " і "m":

$$F_2 = \mu \cdot m \cdot F_1 \quad (7.5)$$

Вирішуючи спільно рівняння 7.1 і 7.5, одержимо значення середньої швидкості вимірюваного середовища в самому вузькому перетині F_2 :

$$W_2 = \frac{1}{\sqrt{1-\mu^2 \cdot m^2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P'_1 - P'_2)} \quad (7.6)$$

На практиці статичний тиск виміряється в безпосередній близькості від пристрою, що звужує, тобто P_1 і P_2 , тому у формулу (7.6) уводять поправочний коефіцієнт ξ і рівняння для середньої швидкості W_2 прийме вид:

$$W_2 = \frac{\xi}{\sqrt{1-\mu^2 \cdot m^2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)} \quad (7.7)$$

Визначивши швидкість W_2 , можна знайти витрату рідкого чи газоподібного середовища, що протікає через трубопровід, по рівнянню:

$$V = W_2 \cdot F_2 \quad (7.8)$$

Використовуючи рівняння 7.3, 7.7 і 7.8, можна записати в остаточному виді рівняння витрати для пристроїв, що звужують, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$V = \frac{\xi \cdot \mu}{\sqrt{1-\mu^2 \cdot m^2}} \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)} \quad (7.9)$$

Коефіцієнти μ і ξ величини, які важко визначаються як практично так, і теоретично. Тому їх поєднують в один загальний коефіцієнт, що одержав назву "коефіцієнт витрати", у який входить також і коефіцієнт діафрагмування потоку (модуль діафрагми) " m ":

$$\alpha = \frac{\xi \cdot \mu}{\sqrt{1-\mu^2 \cdot m^2}} \quad (7.10)$$

Таким чином, рівняння витрати нестисливого середовища (тобто щільність до і після діафрагми не змінюється) приймає вид, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$V = \alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)} \quad (7.11)$$

Це рівняння можна використовувати також для визначення масової витрати середовища, $\text{кг}/\text{с}$:

$$G = V \cdot \rho = \alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (P_1 - P_2)} \quad (7.12)$$

При вимірі витрати стисливого середовища (газу чи пари) щільність ρ середовища змінюється при проходженні через пристрої, що звужують, внаслідок зміни тиску. Це враховується введенням у рівняння витрати поправочного множника на розширення

вимірюваного середовища ε . Рівняння витрати для стисливого середовища приймають вид:

$$V = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)} \quad (7.13)$$

$$G = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (P_1 - P_2)}, \quad (7.14)$$

де ρ – щільність середовища до пристрою, що звужує.

Отримані формули є основними для виміру витрати рідких і газоподібних середовищ при використанні пристроїв, що звужують. Виведені рівняння можуть застосовуватися, коли швидкість потоку в пристрої, що звужує, не досягає критичної, тобто швидкості звуку в даному середовищі.

Використання на практиці отриманих формул припускає, що значення ρ , F_0 , α і ε не повинні мінятися при різних значеннях витрати. Тоді вони можуть бути об'єднані в один коефіцієнт.

Як показують експериментальні дослідження, коефіцієнт витрати α є постійним тільки у визначеному обмеженому інтервалі зміни витрати. За даними досліджень величина α є функцією числа Рейнольдса Re і залежить також від параметра пристрою, що звужує, – величини "m". На рисунку 7.2 показані залежності коефіцієнта витрати від Re і m.

Як видно з приведених експериментальних даних (рисунок 7.2), коефіцієнт витрати α після деякого граничного значення критерію Рейнольдса $Re_{гр}$ стає практично постійним. Лінія, що з'єднує граничні значення $Re_{гр}$, поділяє всю область значень α на дві частини: ліву – де α залежить від Re (тобто від витрати середовища) і праву – де α не залежить від Re . Тому, при вимірі витрати необхідно, щоб значення числа Re було більше $Re_{гр}$, до того ж у формули витрати не потрібно вводити виправлення на в'язкість середовища. Граничні значення чисел Рейнольдса для стандартних пристроїв, що звужують, у залежності від "m" приведені в таблиці 7.1.

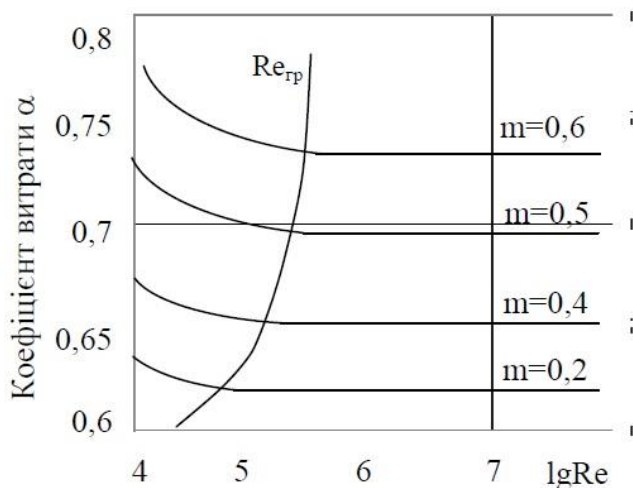


Рисунок 7.2 – Залежність коефіцієнту витрати стандартних діафрагм від числа Рейнольдса при різних значеннях m

Таблиця 7.1 – Граничні значення $Re_{гр}$ для стандартних пристроїв, що звужують

m	Значення $Re_{гр}$	
	для діафрагм	для сопел і сопел Вентурі
0,10	30000	66000
0,20	57000	90000
0,30	90000	125000
0,40	134000	165000
0,50	185000	190000
0,60	240000	200000
0,70	300000	-

За даними таблиці 7.1 можна визначити ту мінімальну витрату середовища, при якій коефіцієнт α залишається постійним і перепад тиску буде однозначно визначатися тільки витратою рідкого чи газоподібного середовища, яке протікає через пристрій, що звужує.

Для практичного використання отримані рівняння витрати (7.13) і (7.14) звичайно представляються в іншому записі:

$$V = 0,01252 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (7.15)$$

$$G = 0,01252 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot \Delta P} \quad (7.16)$$

Вхідні в ці формули витрати (об'ємного і масового) величини повинні мати наступні розмірності:

- d – діаметр пристрою, що звужує, мм;
- ΔP – перепад тиску на пристрої, що звужує, мм вод. ст.;
- ρ – щільність вимірюваного середовища, кг/м³.

Розрахунок градувальної характеристики пристрою, що звужує, припускає обчислення чисельного значення α , ε , d , ρ , що входять у рівняння витрати (7.15) і (7.16) у робочих умовах при відомому діаметрі прохідного отвору пристрою, що звужує, і трубопроводу в нормальних умовах. Після встановлення кількісного співвідношення між $V(G)$ і ΔP по обмірюваному в реальних умовах за допомогою дифманометра перепаду тиску на даному пристрої, що звужує, може бути обчислена витрата середовища через нього.

Коефіцієнт витрати α , що входить у рівняння (7.15) і (7.16), називається розрахунковим. Він характеризує реальні умови роботи пристрою, що звужує: наявність шорсткості середовища і притуплення вхідної крайки отвору (для діафрагм). Вихідне (чи початкове) значення α визначається для кожного типу пристроїв, що звужують, по спеціальних таблицях чи графіках. Вхідною величиною для визначення α є модуль пристрою, що звужує, "m", який визначається по формулі (7.4) при відомих діаметрах трубопроводу і вхідного отвору звуження.

Зміна величини α , викликана притупленням вхідної крайки діафрагми і шорсткістю трубопроводу, враховується введенням поправочних коефіцієнтів K_{Π} – на притуплення вхідної крайки і $K_{\Pi\Pi}$ – на шорсткість внутрішніх стінок трубопроводу. Коефіцієнти K_{Π} і $K_{\Pi\Pi}$ залежать від величини "m" і діаметра трубопроводу і визначаються по спеціальних таблицях.

Таким чином, розрахунковий коефіцієнт витрати α з урахуванням поправочних коефіцієнтів визначається по формулі:

$$\text{ - для діафрагм } \quad \alpha = \alpha_1 \cdot K_{\Pi\Pi} \cdot K_{\Pi} \quad (7.14)$$

$$\text{ - для сопел } \quad \alpha = \alpha_1 \cdot K_{\Pi\Pi} \quad (7.18)$$

Поправочний коефіцієнт e на розширення вимірюваного середовища вводиться внаслідок зміни її щільності при проходженні пристрою, що звужує. Цей коефіцієнт для рідких середовищ дорівнює одиниці (рідина практично нестислива), а для газів і пар залежить від перепаду тиску ΔP на пристрої, що звужує, модуля " m " і показника адіабати для цих середовищ. Залежність коефіцієнта e від цих величин визначається по таблицях чи номограмах.

8 ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТИСКУ

8.1 Загальні відомості

При проведенні багатьох технологічних процесів використовуються ємності, заповнені рідким середовищем: баки-сепаратори на парових котлах, водяні акумулятори, ємності з рідким паливом, ємності з хімічними реактивами й ін. Вимір рівня рідкого середовища в різних ємностях може бути зв'язаний як з безпечною роботою агрегату, так і з виміром кількості рідини, що витрачається з даної ємності. Таким чином, прилади – рівнеміри в залежності від призначення можуть виконувати різні функції: використання в системах автоматики для стабілізації значення рівня рідкого середовища в заданих межах, вимір за рівнем кількості рідини в резервуарі, сигналізація граничних відхилень рівня від заданого значення.

На практиці при виборі того чи іншого методу визначення рівня необхідно враховувати різні умови виміру: агресивність рідкого середовища, різні фізичні і хімічні параметри рідини (температура, тиск, в'язкість, щільність, електропровідність і інші параметри), відкриті чи закриті резервуари, вимоги точності виміру й інші. У зв'язку з цим застосовуються наступні методи виміру рівня рідких середовищ у резервуарах [2]:

- візуальні;
- гідростатичні;
- буйові, поплавкові;
- ємнісні;
- індуктивні;
- радіоізотопні;
- радіохвильові;
- акустичні;
- термокондуктометричні.

8.2 Візуальні рівнеміри

У візуальних рівнемірах використовується принцип сполучених посудин. Скляна трубка з нанесеними розподілами одним кінцем з'єднується з рідиною, а іншим - з газовим середовищем резервуара, у

якому вимірюється рівень рідкого середовища візуальним способом (рисунок 8.1) [3, 4].

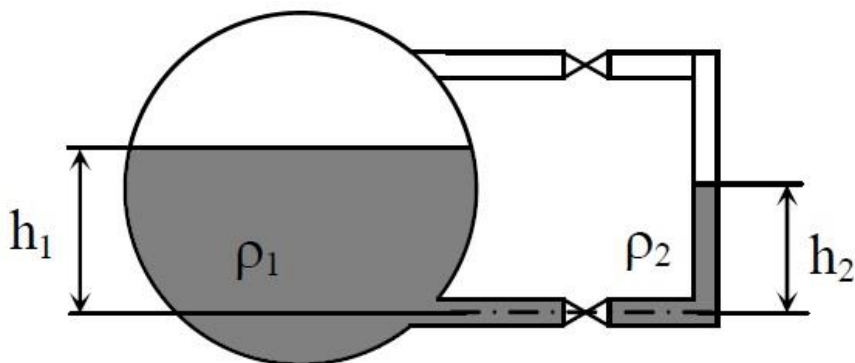


Рисунок 8.1 – Схема візуального рівнеміра

Погрішність виміру в таких рівнемірах може виникати через різницю щільності рідини в резервуарі й у вказівній скляній трубці. Розходження щільності може бути обумовлено різними температурами рідин у резервуарі і трубці. Абсолютна погрішність виміру рівня може бути обчислена по формулі:

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad (8.1)$$

Використовуючи формулу гідростатичного тиску для сполучених посудин, можна записати:

$$\rho_1 \cdot g \cdot h_1 = \rho_2 \cdot g \cdot h_2 \text{ чи } \rho_1 \cdot h_1 = \rho_2 \cdot h_2 \quad (8.2)$$

Звідси погрішність виміру визначиться:

$$\Delta h = h_1 \left[1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right] \quad (8.3)$$

Дійсне значення рівня рідини в резервуарі можна визначити, використовуючи вираження (8.2):

$$h_1 = h_2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (8.4)$$

Як видно з рівняння (8.3) і (8.4), погрішність виміру Δh і дійсне значення h_1 можна визначити при відомих температурах рідини в резервуарі t_1 і в скляній трубці t_2 , по яких знаходяться щільності ρ_1 і ρ_2 по довідковим даним. З метою зменшення погрішності звичайно виконується або теплова ізоляція рівнеміра, або продувка його рідиною з резервуара перед відліком.

8.3 Гідростатичні рівнеміри

У гідростатичних рівнемірах вимір рівня рідкого середовища проводиться по величині гідростатичного тиску, створюваного стовпом рідини H , що знаходиться в об'єкті виміру (відкритому і закритому резервуарі, барабані котла, акумуляторах тепла, конденсаторах турбіни й ін.), тобто:

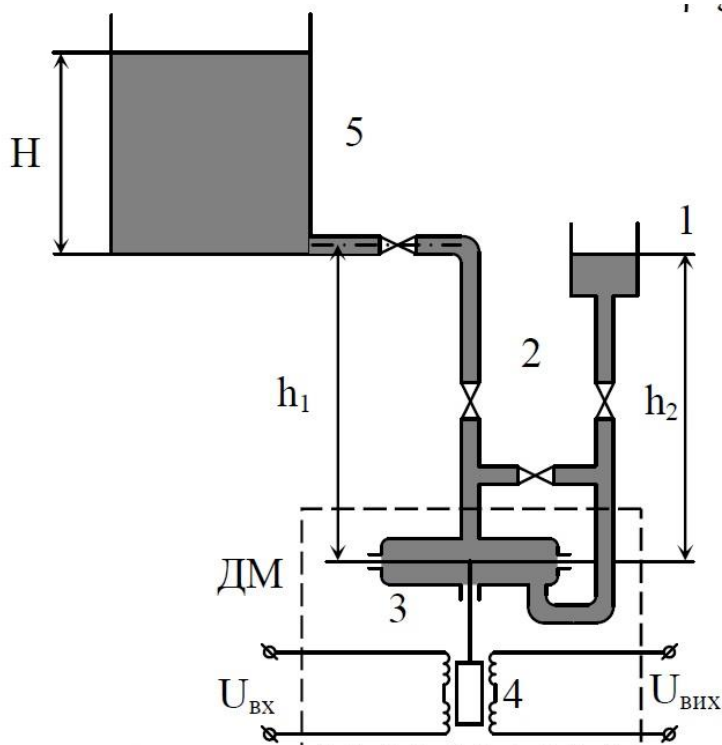
$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (8.5)$$

Найчастіше для виміру тиску P стовпа рідини застосовуються дифманометри з електричним вихідним сигналом. Схема підключення дифманометра до відкритого резервуара, що знаходиться під атмосферним тиском, показана на рисунку 8.2. Чуттєвим елементом у гідростатичному рівнемірі є пружини дифманометра з плоскою мембраною 3. Манометр зв'язаний з резервуаром 5 і зрівняльною судиною 1 двома імпульсними трубками 2, заповненими водою (чи іншою рідиною). Стовп рідини h_2 у зрівняльній лінії підтримується постійним. Дифманометр вимірює різницю тисків, що діють на його чуттєвий елемент у лівій і правій імпульсних трубках, тобто:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = (H + h_1) \cdot \rho_1 \cdot g - h_2 \cdot \rho_2 \cdot g \quad (8.6)$$

Якщо щільності ρ_1 і ρ_2 рідини в обох імпульсних трубках однакові і якщо $h_1 = h_2$, то:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot H$$



1 – зрівняльна судина; 2 – імпульсні трубки; 3 – пружинний елемент дифманометра; 4 – електричний перетворювач; 5 – резервуар;
ДМ – дифманометр

Рисунок 8.2 – Схема гідростатичного рівнеміра

З формули (8.6) видно, що показання рівнеміра будуть змінюватися при зміні щільності рідини, що знаходиться в резервуарі й в імпульсних трубках. Для виключення цієї погрішності імпульсні трубки прокладаються близько друг від друга. Інша погрішність, як видно з цієї ж формули, зв'язана зі зміною рівня рідини в зрівняльній судині, тому що висота h_2 залежить від коливання рівня H в резервуарі. Чим більше H , тим більше прогин мембрани в пружинному дифманометрі 3 і тим більший обсяг рідини витісняється з нижньої половини дифманометра в зрівняльну судину. Для зменшення цієї

погрішності встановлюється зрівняльна судина з великим поперечним перерізом, при цьому, великі коливання рівня H в резервуарі не викликають великих коливань h_2 у зрівняльній судині.

Коливання рівня рідини в резервуарі H змінює тиск ΔP на плоску мембрану дифманометра, від прогину якої переміщається сердечник диференційно–трансформаторного перетворювача. Вихідна електрична величина (вихідна напруга $U_{\text{вих}}$ чи індуктивність), таким чином, однозначно визначається значенням рівня рідини в резервуарі і вимірюється вторинним вимірювальним приладом, установленим на пульті керування об'єктом. Електрична величина $U_{\text{вих}}$ може бути використана також у системах автоматичного регулювання рівня H і в системах сигналізації.

Гідростатичні рівнеміри одержали найбільш широке поширення для виміру рівня води в барабанах парових котлів. Робота такого барабана відрізняється такими особливостями: високим тиском і температурою води і пари, інтенсивним виділенням пари з води, значною зміною щільності води і пари при коливаннях тиску і температури під час несталих режимів і в процесі пуску котла.

Найпростішою схемою виміру рівня води (рідини) у барабані котла (у резервуарі під тиском) є схема з використанням однокамерної зрівняльної судини (рисунок 8.3). Зрівняльна судина 1 приєднується до парового простору барабана, а імпульсна трубка 3 підключається безпосередньо до водяного простору барабана. Перепад тиску ΔP , вимірюваний дифманометром 4, визначається різницею тисків, створюваних у лівій (мінусової) імпульсній трубці P_1 , і правій (плюсової) зрівняльної лінії P_2 , що відповідно дорівнюють:

$$P_1 = (h - H) \cdot \rho_{\text{п}} \cdot g + H \cdot \rho_{\text{р}} \cdot g + h_0 \cdot \rho_1 \cdot g - \text{тиск у лівій трубці};$$

$$P_2 = (h + h_0) \cdot \rho_2 \cdot g - \text{тиск у правій трубці};$$

де $\rho_{\text{п}}$ – щільність пари;

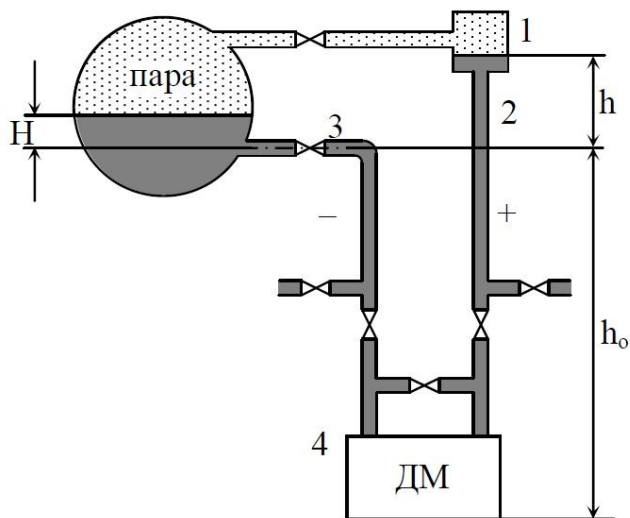
$\rho_{\text{р}}$ – щільність води у барабані;

ρ_1 – щільність води в лівій трубці;

ρ_2 – щільність води в правій трубці.

Таким чином, перепад ΔP , що діє на дифманометр, буде визначатися вираженням:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = [(h - H) \cdot \rho_{\text{п}} + H \cdot \rho_{\text{ж}} + h_0 \cdot \rho_1 - (h + h_0) \cdot \rho_2] \quad (8.7)$$



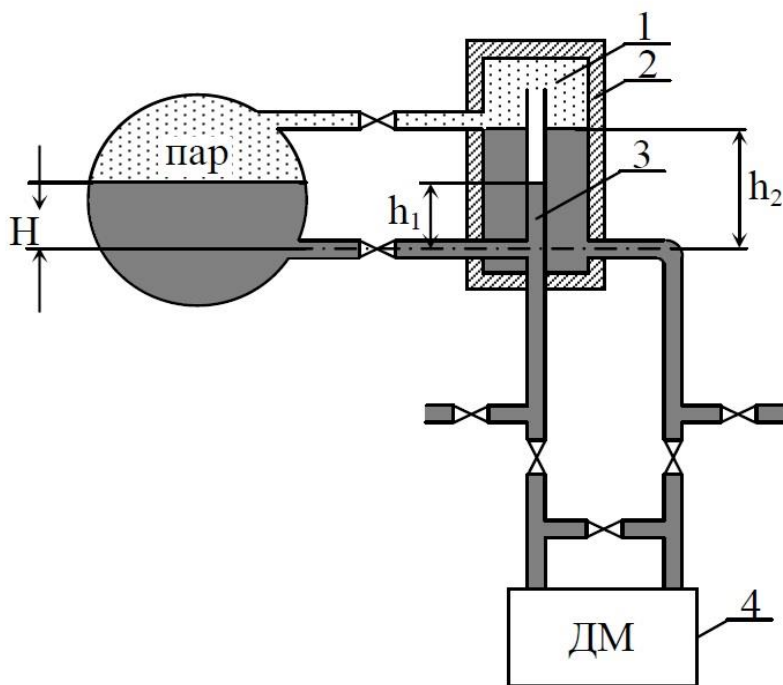
1 – зрівняльна судина; 2 – права імпульсна трубка; 3 – ліва імпульсна трубка; 4 - дифманометр (ДМ)

Рисунок 8.3 – Схема рівнеміра з однокамерною зрівняльною судиною

Як видно з формули (8.7), показання рівнеміра залежить не тільки від поточного рівня рідини в барабані H , але і від щільності води в барабані $\rho_{\text{ж}}$, в імпульсних трубках ρ_1 і ρ_2 , а також від щільності пари в барабані. Тому розрахунок шкали дифманометрів-рівнемірів проводять на робочий (номінальний) тиск у барабані. Крім того, на результат виміру впливає зміна щільності води ρ_1 і ρ_2 в імпульсних трубках, що може відбуватися при зміні температури навколишнього середовища чи температури води в барабані.

На практиці для визначення дійсного значення рівня води в барабані котельної установки застосовують розрахункові таблиці чи графіки, по яких вводиться виправлення в показання дифманометра на температуру і тиск пароводяного середовища в барабані, а також на температуру навколишнього середовища. Рівнеміри з однокамерними зрівняльними судинами застосовуються на котлах з номінальним тиском пари до 4,5 МПа. При великих тисках використовуються

рівнеміри з двокамерною зрівняльною судиною. У цих рівнемірах для зменшення впливу температур навколишнього середовища і води в барабані на показання дифманометра використовується двокамерна зрівняльна судина (рисунок 8.4). Зовнішня поверхня зрівняльної судини 1 покрита тепловою ізоляцією 2 для того, щоб щільність води в ньому і у внутрішній трубці 3, з'єднаною з водяним простором барабана, дорівнювала щільності води в барабані. Така конструкція рівнеміра дозволяє мати однакові рівні води в барабані H і у внутрішній трубці h_1 , тобто $H=h_1$. Для такої схеми рівняння для перепаду тиску ΔP , що діє на дифманометр 4, має вид [5, 6]:



1—зрівняльна судина; 2 — теплова ізоляція; 3 — внутрішня трубка;
4 - дифманометр (ДМ)

Рисунок 8.4 – Схема рівнеміра з двокамерною зрівняльною судиною

$$\begin{aligned}\Delta P &= h_2 \cdot \rho_v \cdot g - [h_1 \cdot \rho_v \cdot g + (h_2 - h_1) \cdot \rho_n \cdot g] = \\ &= (h_2 - h_1) \cdot (\rho_v - \rho_n),\end{aligned}\quad (8.8)$$

де ρ_v , ρ_n – щільності води і пари в барабані.

Як видно з приведеного рівняння (8.8), навіть при використанні двокамерної зрівняльної судини показання рівнеміра залежать від різниці щільностей води і пара $\rho_v - \rho_n$, що може мінятися при зміні режиму роботи агрегату.

У рівнемірах із двокамерними зрівняльними судинами важливе значення має забезпечення рівності температур у барабані й у зрівняльній судині. При зміні температури в судині відносно барабана з'являється додаткова погіршність через порушення рівності гідростатичного тиску води в барабані і у внутрішній трубці, а також через зміну гідростатичного тиску в зрівняльній судині.

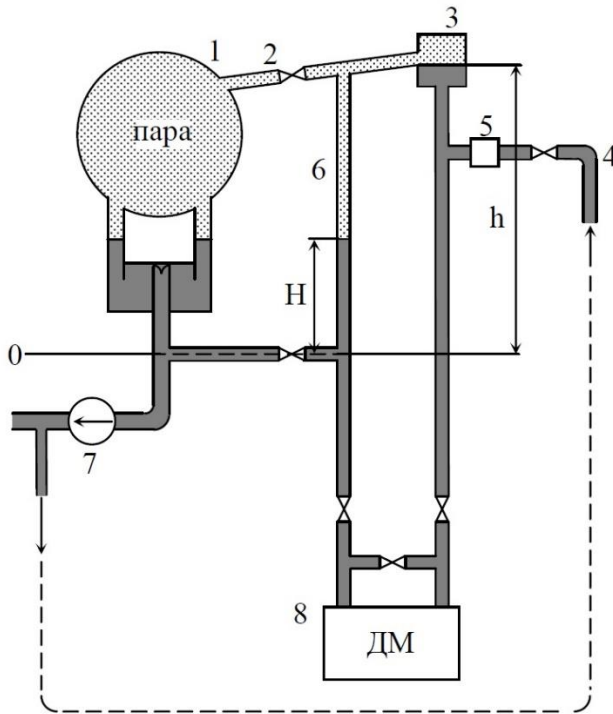
Гідростатичні рівняння одержали велике поширення для виміру рівня конденсату (води) у конденсаторах турбін на теплових електростанціях. Ефективність роботи конденсаторів залежить від точного виміру рівня конденсату і стабілізації його значення з використанням системи автоматичного регулювання. Так, підвищення рівня води в конденсаторі приводить до затоплення нижніх рядів охолоджувальних труб, що викликає переохолодження конденсату, яке приводить до додаткової втрати тепла і до зниження ККД котельної установки. І, навпаки, значне зниження рівня конденсату погіршує роботу конденсатного насоса внаслідок зменшення підпору з боку усмоктувальної труби насоса.

Схема виміру рівня в конденсаторі турбіни приведена на рисунку 8.5. Однокамерна зрівняльна судина 3 з'єднується за допомогою труби 2 з паровим простором конденсатора 1, а труба 6 приєднана до усмоктувальної труби конденсатного насоса 7. По трубі 4 через обмежувальну діафрагму 5 безупинно надходить у невеликій кількості конденсат з напірної лінії конденсатного насоса.

Завдяки такій схемі рівень води в судині 3 підтримується постійним, тому що подаваний у нього конденсат цілком заповнює збиток води із судини внаслідок її випару. При невеликому надлишку конденсату, він буде стікати в конденсатор по трубі 2.

Зрівняльну судину 3 у даній схемі виміру рівня можна не покривати ізоляцією, тому що температура конденсату в конденсаторі

мало відрізняється від температури повітря, що оточує зрівняльну судину.



1 – конденсатор; 2 – з'єднувальна труба; 3 – зрівняльна судина;
4 – конденсаторопровід; 5 – діафрагма; 6 – імпульсна трубка;
7 – конденсатний насос

Рисунок 8.5 – Схема виміру рівня води в конденсаторі турбіни

Перепад тисків ΔP , що діє на дифманометр, визначається по рівнянню:

$$\Delta P = [h \cdot \rho_v - \rho_v \cdot H - (h - H) \cdot \rho_n] \cdot g$$

чи

$$\Delta P = (h - H) \cdot (\rho_v - \rho_n) \cdot g, \quad (8.9)$$

де ρ_v – щільність води стовпів H і h , кг/м^3 ;

ρ_n – щільність води в конденсаторі, кг/м^3

Якщо врахувати, що щільність води гв значно більше щільності пари $\rho_{\text{п}}$, що знаходиться в конденсаторі при низьких тисках, то рівняння (8.9) можна представити в більш простому виді:

$$\Delta P = (h - H) \cdot \rho_{\text{в}} \cdot g \quad (8.10)$$

Усі розглянуті схеми гідростатичних рівнемірів не забезпечують повної незалежності показань від змін параметрів (температури, тиску, складу й ін.) як вимірюваної рідини, так і навколишнього середовища. Для більш точного визначення рівня рідкого середовища необхідно використовувати розрахункові поправочні коефіцієнти.

8.4 Поплавкові і буйкові рівнеміри

У поплавкових рівнемірах вимір рівня виконується по положенню поплавця, що переміщається вертикально разом з рівнем рідини.

Найбільше поширення одержали рівнеміри з механічним зв'язком поплавця з вимірювальним пристроєм. Про рівень у цьому випадку судять по положенню прикріпленого до противаги покажчика, з'єднаного з поплавцем за допомогою троса, перекинутого через блок (рисунок 8.6) [5, 6].

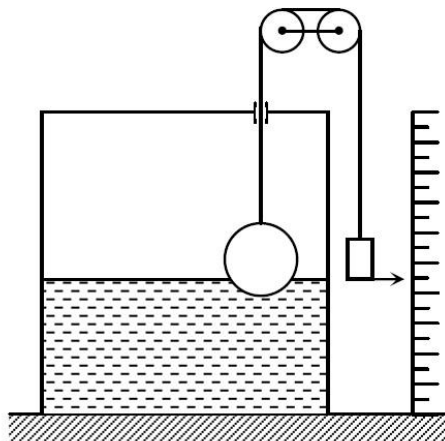


Рисунок 8.6 – Схема поплавкового рівнеміра

Цей метод застосовується для резервуарів, що знаходяться під атмосферним тиском, і розташованих недалеко від місця спостереження. Використання гнучких елементів (троса, стрічки) для одержання інформації про положення поплавця утруднено для резервуарів під тиском через складність герметизації виводів.

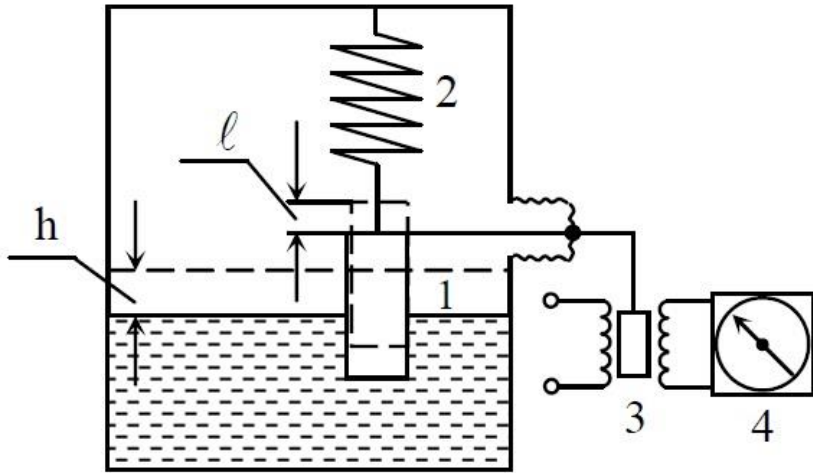
Для дистанційного виміру рівня рідини можна застосувати котушку індуктивності, усередині якої перемішається сердечник, прикріплений до троса. Вихідним сигналом є індуктивність котушки, сердечник якої через трос зв'язаний з положенням поплавця, тобто зі значенням рівня.

Точність виміру рівня залежить в основному від сталості щільності рідкого середовища, що знаходиться в резервуарі. При коливаннях величини щільності (наприклад, через зміну температури, складу й інших характеристик середовища) змінюється величина заглибної частини поплавця. Зменшення погрішності через коливання щільності рідини може бути досягнуто або збільшенням діаметра поплавця, або зменшенням ваги поплавця. Однак, зменшення маси поплавця обмежується забезпеченням необхідного натягу троса, а збільшення діаметра поплавця обмежується конструктивними розмірами рівнеміра.

Поплавкові рівнеміри мають визначені переваги: простота конструкції, великий діапазон виміру (до 12 м), досить висока точність (погрішність не більш 2 %), можливість виміру рівня агресивних і в'язких середовищ, широкий температурний діапазон виміру (при невеликих коливаннях конкретної температури). Недоліками цього способу виміру рівня є наявність поплавця в резервуарі і труднощі виміру рівня в резервуарах під тиском.

Для виміру рівня рідких середовищ у резервуарах, що знаходяться під надлишковим чи вакууметричним тиском, знаходять широке застосування буйкові рівнеміри з дистанційною передачею даних на щит контролю і регулювання технологічним процесом. Дія буйкового рівнеміра заснована на законі Архімеда, тобто залежності діючої на буй сили, що виштовхує, від рівня рідини. Як чуттєвий елемент у таких рівнемірах використовується масивне тіло (наприклад, циліндр) – буй 1, підвішене вертикально усередині судини і частково занурене в рідке середовище (рисунок 8.7). Буй закріплений на пружинній підвісці, що діє на буй з визначеним зусиллям. При

збільшенні рівня рідини на величину h від нульового положення відразу ж виникає сила, що виштовхує, що піднімає буй на величину l , що буде менше h , тому що щільність буя більше щільності рідини. При підйомі буя відбудеться стиск пружини на величину l і вся система прийде в новий стан рівноваги. Виникаюча додаткова сила, що виштовхує, діюча на буй з боку рідини і зменшена з боку газу, зрівноважується силою стиску пружини, що можна виразити наступною рівністю:



1 – буй; 2 – пружина; 3 – індукційний перетворювач;
4 – вимірювальний прилад

Рисунок 8.7 – Схема буйкового рівнеміра

$$c \cdot l = (h - l) \cdot \rho_p \cdot g \cdot F - (h - l) \cdot \rho_r \cdot g \cdot F, \quad (8.11)$$

де c – коефіцієнт твердості пружини;

ρ_p, ρ_r – щільність рідини і газу;

F – площа поперечного перерізу буя.

Звідси величина рівня рідини в резервуарі визначається:

$$h = l \left(1 + \frac{c \cdot g \cdot F}{\rho_p - \rho_r} \right) \quad (8.12)$$

Якщо величини c , g , F , ρ_p , ρ_m (які знаходяться в дужках) не змінюються в процесі виміру, то позначивши цю частину рівняння через постійну величину " k ", одержимо:

$$h = k \cdot l \quad (8.13)$$

Таким чином, статична характеристика буйкового рівнеміра лінійна, а чутливість цього методу може бути збільшена за рахунок збільшення площі перетину буя " F " чи зменшення твердості пружини " c ".

Погрішність виміру рівня буйковим рівнеміром, як видно з рівняння (8.11), може виникнути за рахунок зміни величин c , g , F , ρ_p , ρ_r . Так, при зміні температури рідини і тиску газового середовища в резервуарі, помітно змінюються щільності ρ_p , ρ_r . У цьому випадку в рівняння (8.11) вводяться виправлення, розраховані по зміні щільностей рідини і газу при відомій температурі і тиску в резервуарі.

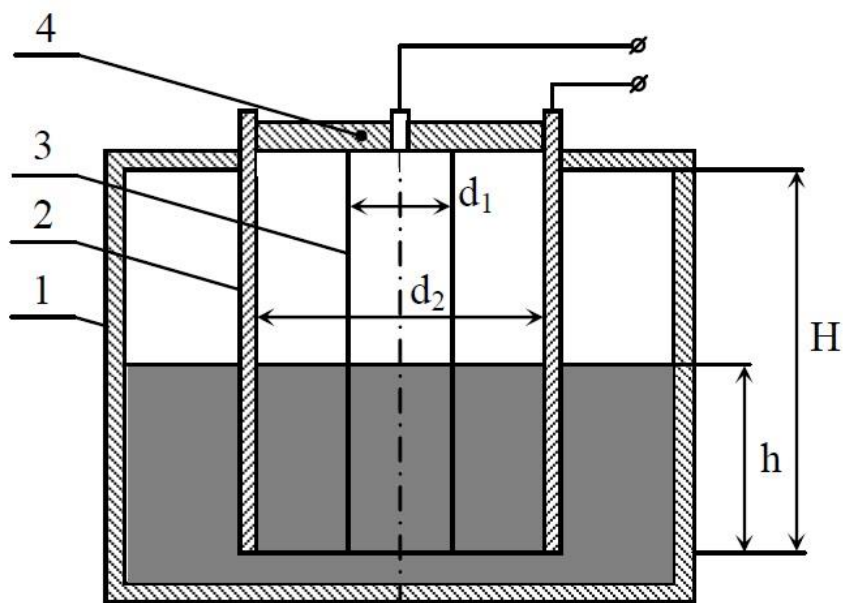
Буйкові рівнеміри дозволяють вимірювати рівень у резервуарах з температурою рідини до 400 °С, що знаходиться під тиском до 10 МПа. Рівнеміри, що випускаються, які мають клас точності 1 і 1,5, виготовляються з різними розмірами (діаметром і довгою) буя, що дозволяють вимірювати рівень у широких межах від 0 - 0,04 до 0 - 16 м.

8.5 Ємнісні рівнеміри

Дію ємнісного рівнеміра засновано на зміні електричної ємності конденсатора, що знаходиться в рідкому середовищі, при зміні рівня рідини в резервуарі.

Конденсатор, що перетворює зміну рівня рідини в пропорційну зміну ємності, являє собою два коаксіально розташованих циліндри, що утворюють два електроди конденсатора. Конструктивне виконання конденсатора залежить від електропровідних властивостей рідини. Принципове розходження полягає в тому, що один з електродів конденсатора для виміру рівня електропровідних рідин покривається електричною ізоляцією, а електроди конденсатора для неелектропровідних рідин не ізолюють.

У схемах ємнісного рівнеміра для неелектропровідних рідин електроди виконуються циліндричного чи пластинчастого типу, а також у виді твердого стрижня чи троса. В останньому випадку другим електродом служить металева стінка резервуара. На рисунку 8.8 показана схема пристрою ємнісного рівнеміра, виконаного у виді циліндричного конденсатора з двох коаксialьно розташованих сталевих труб 2 і 3, поміщених у резервуар 1, у якому виконується вимір рівня. Загальна ємність конденсатора буде визначатися сумою ємностей двох частин конденсатора, розташованих одна в рідкому, а інша в газовому середовищах резервуара [5, 6].



1 – резервуар; 2 – зовнішній електрод; 3 – внутрішній електрод;
4 – ізолятор

Рисунок 8.8 – Схема ємнісного рівнеміра для неелектропровідної рідини

Ємність частини циліндричного конденсатора, розташованого в рідкому середовищі, визначається по формулі:

$$C_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_p \cdot h}{\ln \frac{d_2}{d_1}}$$

Для частини конденсатора, що знаходиться в газовому середовищі, ємність визначається по аналогічній формулі:

$$C_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot (H - h)}{\ln \frac{d_2}{d_1}}$$

Сумарна ємність буде дорівнювати:

$$C = C_1 + C_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{d_2}{d_1}} [h \cdot (\varepsilon_{\text{ж}} - \varepsilon_r) + \varepsilon_r \cdot H]$$

Таким чином, ємність конденсатора однозначно залежить від вимірюваного рівня h при незмінних значеннях інших величин, що входять у формулу 8.15. Однак, у робочих умовах діелектрична проникність рідини ε_p залежить від зміни температури, тиску і складу рідкого середовища, що часто зустрічається на практиці. Зміною цієї ж величини (ε_r) для газового і парового середовища можна зневажити, тому що для більшості газів і пари відносна діелектрична проникність незначно відрізняється від одиниці. Негативний вплив на роботу ємнісних рівнемірів роблять активні опори як ізолятора 4, так і контрольованої рідини в міжелектродному просторі.

Для підвищення точності виміру рівня ємнісними рівнемірами в схемах використовується додатковий компенсаційний конденсатор, розташований у рідкому середовищі нижче основного конденсатора. Це дозволяє автоматично уводити виправлення в показання рівнеміра при відхиленні ε_p від значення, прийнятого при градуюванні приладу. Зменшення впливу активного опору досягається введенням в електричну схему фазового детектора, що відфільтровує сигнал перешкоди, створюваний активним опором.

У ємнісних рівнемірах для виміру рівня електропровідної рідини один з електродів конденсатора виконується у виді ізолизованого

стержня. Другим електродом служать стінки металевого резервуара, у якому вимірюють рівень рідини. Якщо резервуар неметалічний, то в рідину поміщають металевий неізольований стрижень, що виконує роль другого електрода.

У ємнісних рівнемірах для виміру електричної ємності конденсатора використовуються мостові і резонансні схеми. Найбільш простою є мостова схема (рисунок 8.9), що складається з двох вторинних обмоток трансформатора (що живиться генератором Γ), ємності C_1 конденсатора, що знаходиться в об'єкті (резервуарі), і конденсатора, що підстроює C_2 . Міст урівноважений при нульовому рівні рідини в резервуарі, при цьому сигнал на вході і виході підсилювача дорівнює нулю. При збільшенні рівня ємність конденсатора, що знаходиться в резервуарі, збільшується і напруга на вході підсилювача зростає. Посилений сигнал перетворюється в уніфікований (0 – 100 мВ) і вимірюється вторинним приладом, у якості якого може бути використаний автоматичний чи потенціометр міліамперметр [6].

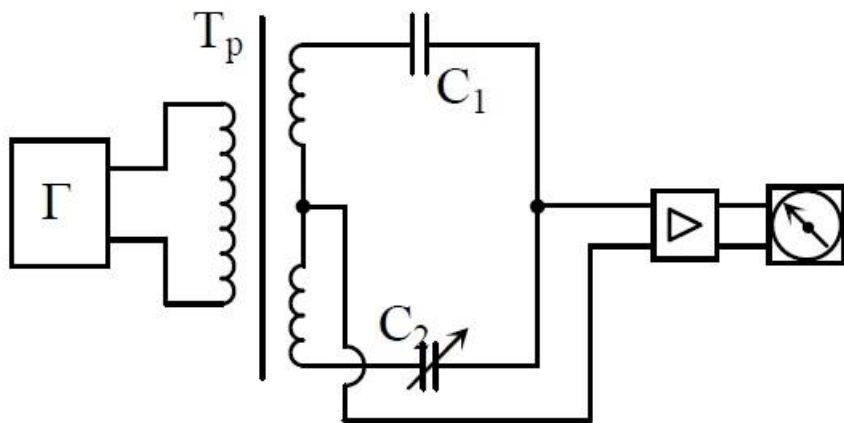


Рисунок 8.9 – Принципова електрична схема ємнісного рівнеміра

Діапазон виміру рівня ємнісними рівнемірами залежить від характеристики рідини, типу конденсатора (як чуттєвого елемента), способу його установки на резервуарі і складає від 1 до 20 м.

Ємнісні рівнеміри знайшли велике поширення через простоту конструкції, відсутності рухливих елементів, можливості використання

в широкому діапазоні температур рідини (від -40 до $+200$ °C) і тисків (до 6 МПа). Недоліками таких рівнемірів є: непридатність для виміру рівня в'язких середовищ (більш 1 Па·с), рідин, які утворюють плівки, рідин, які кристалізуються, і рідин, які випадають в осад, а також висока чутливість до зміни електричних властивостей рідини.

8.6 Індуктивні рівнеміри

Дія індуктивних рівнемірів заснована на залежності індуктивності одиночної котушки (соленоїда) чи взаємної індуктивності двох котушок від глибини занурення їх в електропровідну рідину. Під дією перемінного магнітного поля котушки індуктивності в рідкому середовищі створюються вихрові струми, магнітне поле яких, за законом Ленца спрямовано назустріч магнітному полю котушки. Тобто результуюче магнітне поле буде менше поля не зануреної в рідину котушки, тобто індуктивність зануреної котушки менше індуктивності "сухої" котушки. Таким чином, повний електричний опір, включаючи індуктивний, одиночної котушки буде однозначно визначатися глибиною занурення її в рідину, що дозволяє визначити рівень рідкого середовища у вимірюваному об'єкті.

На практиці велике поширення одержали індуктивні рівнеміри, що містять дві індуктивно зв'язані котушки, що утворюють трансформатор (рисунок 8.10). При зміні рівня змінюється індуктивність двох котушок, що визначається по формулі:

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (8.17)$$

де k – коефіцієнт зв'язку;

L_1 і L_2 – індуктивності однієї і другий котушок.

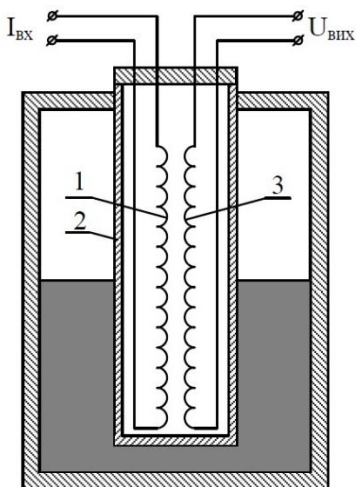
Вихідна напруга на виході другої котушки дорівнює:

$$U_{\text{вих}} = k \cdot I_{\text{вх}} \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

Вимірюючи $U_{\text{вих}}$, можна визначити значення рівня рідкого середовища в об'єкті.

На рисунку 8.10 представлена найпростіша схема індуктивного трансформаторного рівнеміра, що складає з обмотки збудження 1, по

якій протікає перемінний струм збудження $I_{\text{ВХ}}$, і вторинної обмотки 2, з якої знімається вихідний сигнал $U_{\text{ВНХ}}$.



1 – обмотка збудження; 2 – вторинна обмотка; 3 – захисний чохол

Рисунок 8.10 – Схема індуктивного рівнеміра

Дві обмотки рівнеміра поміщені в металевому захищеному чохолі 3, що герметично закріплений у кришці резервуара, що дозволяє здійснити заміну котушок без порушення герметичності рівнеміра.

При роботі рівнеміра перемінний магнітний потік, що створюється обмоткою збудження, ініціює виникнення вихрових струмів у товщі контрольованого рідкого середовища. Це приводить до залежності взаємної індуктивності між обмотками від рівня рідини. Таким образом, вихідна напруга $U_{\text{ВНХ}}$ вторинної обмотки буде однозначно залежати (залежність лінійна) від рівня рідини в резервуарі.

До основного недоліку індуктивних рівнемірів варто віднести вплив зміни температури рідкого середовища на результат виміру. Зі зміною температури змінюється: активний опір обмоток, довжина провідників в обмотках, провідність захисного чохла, провідність рідкого середовища. Крім того, на результат виміру впливає зміна

складу середовища, зміна властивостей матеріалу чохла і наявність на ньому плівок чи розплаву окислів. Врахувати вплив різних факторів на точність виміру важко через складний вплив їх на погрішність. Тому такі рівнеміри застосовуються для виміру рівня розплавлених металів постійного складу і температури, наприклад, рідкометалевого теплоносія в ядерних енергетичних установках.

Значне зниження впливу різних факторів на точність виміру рівня досягається в індуктивних рівнемірах дискретної дії. Рівнемір являє собою ряд коротких котушок індуктивності (малюнок 8.11), поміщених у виді стовпа усередині металевого чохла, що відокремлює котушки від середовища. Індуктивність кожної котушки залежить від того, занурена вона в рідину чи ні, тому індуктивність зануреної котушки менше індуктивності не зануреної. Усі робочі котушки 1,2,3... n і контрольна котушка "к" включені в логічну схему, що стежить (ЕБ – електронний блок), яка відшукує першу зверху котушку, розташовану нижче рівня рідини, і порівнює її індуктивність з індуктивністю контрольної котушки. Інформацію про номер котушки, розташованої на границі рідини – газ, надходить на вимірювальний прилад (ВП), що дає можливість визначити значення рівня рідкого середовища в резервуарі.

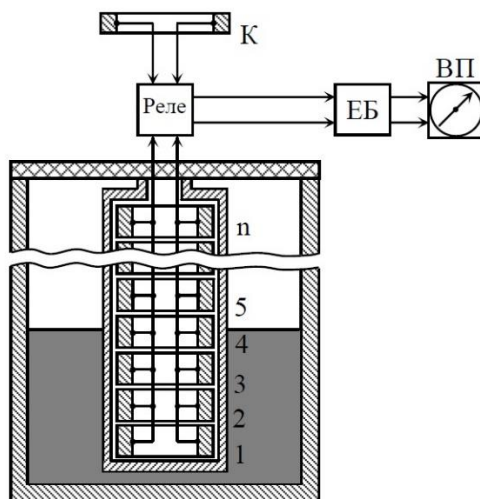


Рисунок 8.11 – Схема дискретного індуктивного рівнеміра

Особливістю роботи дискретного індуктивного рівнеміра є те, що система, яка стежить, не вимірює безпосередньо індуктивність робочих котушок, а відшукує дві сусідні котушки з індуктивностями, що різко відрізняються, причому кількісне розходження індуктивностей значення не має. Така схема виміру рівня не реагує на зміну різних параметрів середовища (температури, тиску, складу) і ці виміри не можуть впливати на точність виміру. Погрішність виміру буде визначатися тільки дискретністю (тобто через визначений інтервал) визначення лінії розподілу рідкої і газової фаз. Крок (інтервал) дискретності, а значить і погрішність, буде дорівнювати висоті h сусідніх котушок і відстані δ між ними, тобто:

$$\Delta = \delta + (h_1 + h_2)/2, \quad (8.19)$$

де h_1 і h_2 – висоти сусідніх котушок (вони можуть бути однакові чи різні в залежності від ділянки виміру рівня – у крайніх точках чи біля умовного нульового рівня).

Це дає можливість значно підвищити точність виміру рівня рідкого середовища шляхом зменшення висоти котушок і відстані між ними на робочих ділянках виміру рівня (на інших ділянках висота котушок може бути збільшена).

8.7 Акустичні рівнеміри

В акустичних рівнемірах використовуються ультразвукові коливання, що поширюються в газовому чи рідкому середовищах, і в залежності від способу використання цих коливань вони поділяються на локаційні, поглинання і резонансні [6].

У локаційних рівнемірах використовується ефект відбиття ультразвукових коливань від границі розподілу рідина-газ. Положення рівня визначається за часом проходження ультразвукових коливань від джерела до приймача після відображення їх від поверхні розподілу.

У рівнемірах поглинання положення рівня визначається по ослабленню інтенсивності ультразвуку при проходженні через шар рідини чи газу.

У резонансних рівнемірах вимір рівня виробляється за допомогою виміру частоти власних коливань стовпа газу над поверхнею рідини, що залежить від рівня рідини.

Найбільше поширення одержали локаційні рівнеміри. У цих приладах ультразвук пропускають або зверху, через газове середовище (такі рівнеміри називають акустичними), або знизу, через шар рідини (такі рівнеміри називають ультразвуковими). Перевагою акустичних рівнемірів є те, що на показаннях цих приладів не позначається зміна фізичних і хімічних властивостей рідини. Однак, зміна температури і тиску газового середовища впливає на точність виміру рівня, що є недоліком акустичних рівнемірів. Тому такі рівнеміри використовуються для рідин, що мають температуру не більш $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тиск не більш 4 МПа.

Рівнеміри, засновані на пропущенні ультразвуку через рідину (ультразвукові), використовуються для середовищ під високим тиском і для них потрібна невелика потужність випромінювача. Однак, такі прилади дуже чутливі до наявності пухирців газів у рідині, а також до коливань температури і тиску в рідкому середовищі, що викликає додаткову погрішність виміру.

Спрощена схема акустичного рівнеміра представлена на рисунку 8.12, у якому джерелом (Д) і одночасно приймачем (П) відбитих ультразвукових коливань є п'єзоелемент. Генератор (Г) височастотних електричних імпульсів збуджує в п'єзоелементі ультразвукові коливання, що відбиваються від поверхні води і повертаються назад на п'єзоелемент [6].

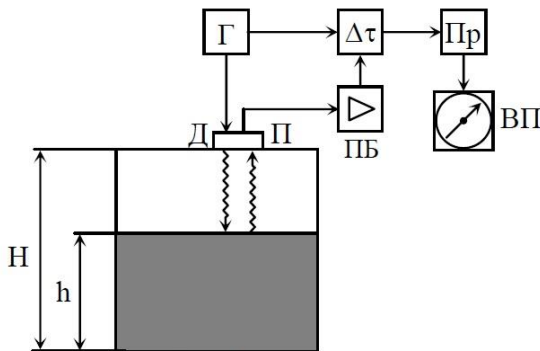


Рисунок 8.12 – Схема акустичного рівнеміра

Одночасно генератор включає схему виміру часу ($\Delta\tau$), на який надходить посилений блоком (ПБ) сигнал від п'єзоелементу, утворений повернутою ультразвуковою хвилею/

Обмірюваний часовим блоком час $\Delta\tau$ буде визначатися по швидкості ультразвуку в газовому середовищі і пройденим шляхом по формулі:

$$\Delta\tau = \frac{2(H-h)}{c} \quad (8.20)$$

Перетворювач (Пр) перетворює значення часу в уніфікований вихідний сигнал, вимірюваний вторинним вимірювальним приладом (ВП).

Для зменшення впливу зміни температури газового середовища, що знаходиться над рідиною, мається блок температурної компенсації, що включає в себе термометр опору, розташований біля п'єзоелемента. Використовувані на практиці акустичні рівнеміри мають клас точності 2.5.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Шаповаленко О.Г., Бондар В.М. Основи електричних вимірювань: підручник. Київ: Либідь, 2002. 320 с.
2. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Метрологія та вимірювання: навч. посіб. Ужгород: Видавництво УжНУ, 2014. 292 с.
3. Практичний посібник з енергетичного аудиту промислових підприємств. Київ: Проект «Консультування підприємств щодо енергоефективності», 2020. 279 с.
4. Прокопенко В.В., Закладний О.М., Кульбачний П.В. Енергетичний аудит з прикладами та ілюстраціями: навч. посіб. Київ: Освіта України, 2009. 438 с.
5. Нетробчук І.М. Вимірювання метеорологічних величин : навч. посіб. Луцьк: Вежа-Друк, 2015. 128 с.
6. Клеєвська В.Л., Поліщук О.О. Приземні метеорологічні спостереження: навч. посіб. Харків: Нац. аерокосм. ун-т “Харк. авіац. ін-т”, 2010. 52 с.