

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Ілющенко В.І.
Туяхов А.І.
Саф'янц С.М.

ВИМІРЮВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

Рекомендовано Міністерством
освіти і науки України як
навчальний посібник для студен-
тів вищих навчальних закладів

Донецьк 2007

УДК 383.14:621.1.016.4

Ілющенко В.І., Туяхов А.І., Саф'янц С.М. Вимірювання в енергетиці– , 2007. – 340 с.

Рецензенти:

В.Л.Пилушенко, доктор технічних наук, професор

Ф.В.Недоп'юкін, доктор технічних наук, професор

С.Ф.Жуков, доктор технічних наук, професор

У навчальному посібнику викладені основні методи та засоби вимірювання, які застосовуються для автоматичного контролю теплоенергетичних процесів. Наведені методики вимірювання температури, тиску, витрати та інших величин. Висвітлені питання вимірювання рівней рідини та сипучих матеріалів, контроль складу газів та якості води, пари, та рідини. Також включені методи вимірювання основних електричних величин. Розглянуті погрішності вимірювання і методи їх зниження. Викладаються сучасні і перспективні методи і засоби вимірів теплотехнічних параметрів і застосовність їх для конкретних виробничих умов. Представлено приклади складання функціональних схем контролю, сигналізації і керування теплоенергетичними установками і дається необхідний мінімум довідкових матеріалів.

Навчальний посібник призначено для студентів спеціальностей «Промислова теплотехніка», «Теплоенергетика» і «Теплові електричні станції» «Енергоменеджмент», а також може бути корисна для інженерів-теплоенергетиків

ISBN

© Ілющенко В.І., Туяхов А.І., Саф'янц С.М. 2007

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 ВИМІРЮВАННЯ.....	8
2 ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ	16
2.1 Температурні шкали.....	16
2.2 Контактні термометри.....	21
2.2.1 Термометри розширення.....	21
2.2.2 Манометричні термометри.....	28
2.2.3 Дилатометричні і біметалічні термометри.....	32
2.2.4 Термоелектричні термометри.....	34
2.2.5 Способи підвищення якості виміру температури термопарами.....	41
2.2.6 Конструктивне виконання термопар.....	45
2.2.7 Компенсаційний метод виміру термо-ЕРС термопари	51
2.2.8 Термометри опору.....	58
2.3 Безконтактні термометри.....	62
2.3.1 Основні закони випромінювання.....	62
2.3.2 Пірометри спектрального випромінювання.....	70
2.3.3 Пірометри повного випромінювання.....	74
2.3.4 Перспективні напрямки в розробці приладів для виміру температури.....	77
2.3.5 Вторинні прибори.....	82
3 ВИМІР ТИСКУ РІДКИХ І ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩ.....	93
3.1 Методика виміру тиску	93
3.2 Вимрювання тиску.....	94
3.2.1 Рідинні манометри.....	94
3.2.2 Деформаційні манометри.....	98
3.2.3 Електричні манометри.....	103
3.3 Вимірювальні перетворювачі тиску.....	109
3.3.1 Загальні відомості.....	109
3.3.2 Диференційно-трансформаторні перетворювачі.....	111
3.3.3 Перетворювачі з магнітною компенсацією.....	113
3.3.4 Феродинамічні перетворювачі.....	115
4 ВИМІР ВИТРАТИ ГАЗА, РІДИНИ І ПАРИ.....	118
4.1 Загальні відомості.....	118
4.2 Витратоміри по перепаду тиску в пристрої, що звужує.....	119
4.3 Схеми сполучних ліній при використанні пристроїв, що звужують.....	132
4.4 Вимір витрати рідин і газів напірними трубками.....	135

4.5	Ультразвукові витратоміри.....	140
4.6	Електромагнітні витратоміри.....	144
4.7	Вимір витрати тепла в теплофікаційних системах.....	147
4.8	Тахометричні витратоміри.....	149
4.9	Тенденції розвитку засобів виміру витрати.....	154
5	ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТИСКУ.....	156
5.1	Загальні відомості.....	156
5.2	Візуальні рівнеміри.....	156
5.3	Гідростатичні рівнеміри	157
5.4	Поплавкові і буйкові рівнеміри	162
5.5	Ємнісні рівнеміри.....	164
5.6	Індуктивні рівнеміри.....	167
5.7	Акустичні рівнеміри.....	169
6	АНАЛІЗ СКЛАДУ ГАЗІВ.....	172
6.1	Загальні положення.....	172
6.2	Хімічні газоаналізатори.....	173
6.3	Теплові газоаналізатори.....	175
6.4	Магнітні газоаналізатори.....	177
6.5	Оптичні газоаналізатори.....	180
6.6	Лазерний газоаналізатор.....	184
6.7	Газові хроматографи.....	185
6.8	Портативний газоаналізатор Quintox.....	190
6.8.1	Клавіатура ВБУ.....	193
6.8.2	Дисплей ВБУ.....	194
6.8.3	Фіксація показань.....	194
6.8.4	Принтер.....	195
6.8.5	Датчики приладу, які розраховують параметри.....	196
7	АНАЛІЗ ЯКОСТІ ВОДИ, ПАРИ І КОНДЕНСАТУ.....	199
7.1	Загальні положення.....	199
7.2	Електродні кондуктометричні аналізатори.....	200
7.3	Безелектродні кондуктометри.....	203
7.4	Потенціометричний метод аналізу води.....	205
7.5	Вимір концентрації газів, що містяться у воді і парі.....	209
8	ВИМІР ВОЛОГОСТІ ГАЗІВ.....	214
8.1	Загальні положення.....	214
8.2	Психрометричний метод.....	215
8.3	Конденсаційний метод виміру вологості.....	217
8.4	Сорбційний метод виміру вологості.....	220

9 ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН.....	222
9.1 Вимірювання струму, напруги та заряду	222
9.2 Вимірювання потужності, енергії та показників якості електроенергії.....	244
10 ВИМІРЮВАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ.....	272
10.1 Загальні відомості.....	272
10.2 Вимірювальні системи.....	274
10.3 Телевимірювальні системи.....	276
10.4 Принцип побудови функціональних схем контролю і керування технологічним об'єктом.....	278
Перелік посилань.....	286
ДОДАТОК А – Коефіцієнти розподілу Стьюдента.....	288
ДОДАТОК Б – Монохроматичний коефіцієнт теплового випро- мінювання різних матеріалів при $\lambda=0,65$ мкм.....	289
ДОДАТОК В – Коефіцієнт повного теплового випромінювання (інтегральний коефіцієнт теплового випромінювання) різних матеріалів.....	290
ДОДАТОК Д – Градувальна характеристика хромель–копелевої (ХК) термопар в діапазоні температур $-50...+800^{\circ}\text{C}$..	292
ДОДАТОК Е – Градувальна характеристика хромель–алюмелевої (ХА) термопар в діапазоні температур $-200...+1300^{\circ}\text{C}$	295
ДОДАТОК Ж – Градувальна характеристика платинородій (10 %)-платинової термопар (ПП) у діапазоні температур $0-1600^{\circ}\text{C}$	300
ДОДАТОК З – Градувальна характеристика платинородій (30%) – платинородієвої (6%) термопар (ПР) у діапазоні температур $300...1800^{\circ}\text{C}$...	305
ДОДАТОК І – Градувальна характеристика вольфрамрений (5 %) – вольфрамрениєвої (20 %) термопар (ВР) у діапазоні температур $0...2500^{\circ}\text{C}$	310
ДОДАТОК К – Градувальна таблиця дровових термометрів опору.....	318
ДОДАТОК Л – Тиск і щільність насичених водяних пар.....	319
ДОДАТОК М – Інструкція до роботи з прибором QUINTOX KM9006.....	320

ВСТУП

Сучасна людина в плінні усього свого життя постійно має справу з вимірами. Щодня ми дивимося на годинник, визначаючи і звіряючи час із сигналами точного часу, вимірюємо температуру у квартирі і за вікном будинку, стежимо за показаннями ваг у магазині, метеобюро нам повідомляє про температуру, вологість, тиск атмосферного повітря і навіть величину радіаційного фону. Виробнича діяльність людини також супроводжується численними і різноманітними вимірами, без яких неможливо контролювати хід технологічного процесу.

Пізнання навколишнього світу, а також повсякденний кількісний контроль за всіма сторонами людської діяльності здійснюється з використанням методу безпосереднього виміру тих чи інших величин. На важливість виміру вказували багато вчених.

Так, Д.І.Менделєєв підкреслював: "Наука починається з тих пір, як починають вимірювати; точна наука немислима без міри". Багато наукових досліджень супроводжуються вимірами, що дозволяють установити кількісні співвідношення між різними явищами навколишнього світу й установити закономірності досліджуваних явищ.

Прогрес в області вимірів завжди сприяє новим відкриттям, а досягнення науки приводять до удосконалювання методів і засобів вимірів. Розробка нових технологій, одержання нових матеріалів відбиваються в характеристиках засобів вимірювання.

В даний час у промисловості усе більше поширення дістають сучасні засоби для виміру різних технологічних параметрів. Серед них можна виділити наступні основні групи:

- цифрові вимірювальні прилади й аналого-цифрові перетворювачі;
- вимірювальні перетворювачі електричних і неелектричних величин в електричні сигнали;
- вимірювальні інформаційні системи і вимірювально-обчислювальні комплекси;
- вимірювально-обчислювальні засоби на основі використання мікропроцесорів у мікро-ЕОМ.

В області метрологічного забезпечення перед ученими стоять наступні задачі:

- удосконалювання і випереджальний розвиток еталонної бази, підвищення точності відтворення одиниць величин, перехід на еталони, засновані на фундаментальних законах природи;
- удосконалення системи передачі одиниць величин до засобів вимірів, автоматизація повірочних операцій;
- розширення сфери метрологічного забезпечення на недостатньо охоплені області вимірів;
- розвиток загальної теорії вимірів, теорії погрішності вимірів і ін.

В міру розвитку техніки виміри стають усе більш складними, однак, суть виміру, що полягає в зіставленні кількісного вираження якоїсь фізичної величини з іншою такою ж фізичною величиною, прийнятої за одиницю, залишається без змін.

Основою метрологічної діяльності в Україні є забезпечення засобу виміру різних фізичних величин на підприємствах, в установах, у науково-дослідних і навчальних закладах. Для цього існують державна і відомчі метрологічні служби, діяльність яких спрямована на створення умов, що забезпечують одержання вимірів необхідної якості.

1 ВИМІРЮВАННЯ

Виміром називають знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою технічних засобів. У процесі виміру величину порівнюють з одиницею, що повинна бути того ж роду, що і величина, яка вимірюється.

Технічні засоби, що застосовуються для проведення експериментальної частини вимірів і мають нормовані метрологічні властивості (характеристики) називаються *засобами вимірів*.

Засоби виміру є носіями одиниць, у яких хочуть виразити вимірювані величини. І в зв'язку з великою кількістю видів вимірюваних величин принципи дії засобів вимірів дуже різноманітні. В основі їх дії лежать механічні, електричні, електронні, оптичні, магнітні, термічні, акустичні, хімічні й інші явища, а також їхнього сполучення.

Класифікація засобів вимірів

По функціональному призначенню засоби виміру поділяють на наступні групи:

- міри;
- вимірювальні перетворювачі;
- вимірювальні прилади;
- вимірювальні інформаційні системи.

Під *мірою* розуміють засіб вимірів, призначений для відтворення фізичної величини заданого розміру.

Вимірювальний перетворювач - засіб виміру, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, зручної для передачі, подальшого перетворення, обробки і (чи) збереження, але не піддається безпосередньому сприйняттю спостерігачем. Вимірювальний перетворювач, до якого підводиться вимірювана величина, називають *первинним вимірювальним перетворювачем*. Як приклад можна привести термоелектричний термометр (термопара), термометр опору, звукуючий пристрій витратоміра.

Первинні вимірювальні перетворювачі, розташовані безпосередньо на об'єкті (у трубопроводі, кладці печі, резервуарі, реакторі, димовідводячих трактах і т.д.) і віддалені від місця обробки вимірювальної інформації, називають іноді *датчиками* (датчик температури, тиску і т.д.).

Вимірювальним приладом називають засіб вимірювання, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, доступної для безпосереднього сприйняття спостерігачем, наприклад, у виді цифрового відліку на відліковому пристрої.

У залежності від виду інформації, що представляється, про вимірювану величину вимірювальні прилади розділяються на:

- що показують: вимірювальний прилад, що допускає тільки відлічування показань значень вимірюваної величини. Наприклад, мілівольтметр, що показує, рідинний термометр і ін.

- що реєструють: вимірювальний прилад, у якому передбачена реєстрація (запис) показань (барограф, потенціометр, витратомір і ін.).

- підсумовуючі: вимірювальний прилад, у якому значення вимірюваної величини визначається шляхом її інтегрування по іншій величині (електричний лічильник електроенергії, тепломір, водомірний лічильник і ін.).

На великих об'єктах, коли необхідно вимірювати велике число фізичних величин, робити обробку вимірювальної інформації, впливати на об'єкт і т.д., застосовують *вимірювальні інформаційні системи*.

Вимірювальна інформаційна система - це сукупність функціонально об'єднаних вимірювальних приладів, вимірювальних перетворювачів, ЕОМ і інших допоміжних технічних засобів, розміщених у різних точках контрольованого простору (середовища, об'єкта і т.п.) з метою виміру однієї чи декількох фізичних величин, властивих цьому простору. У залежності від призначення вимірювальні системи розділяють на інформаційні, контролюючі і керуючі системи.

Вимірювальні прилади виробляють сигнали вимірювальної інформації у формі, доступної для безпосереднього сприйняття спостерігачем. Прилади (чи вимірювальні системи) мають звичайно типову структурну схему, зображену на рисунку 1.1.

Чуттєвий елемент 1 знаходиться під впливом вимірюваної величини. Перетворювальний елемент 2 перетворює сигнал вимірювальної інформації в зручну для використання форму. Вимірювальний механізм 3 здійснює власне процес виміру.

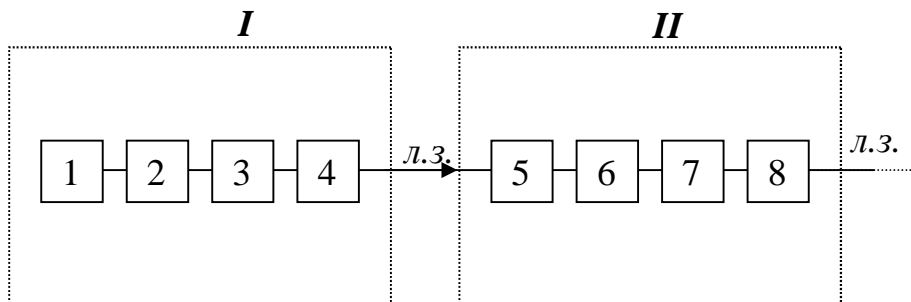


Рисунок 1.1 – Структурна схема вимірювальної системи

Елементи 1-3 у загальному випадку утворюють первинний перетворювач (первинний прилад) I. Результат виміру перетворюють передавальним перетворювальним елементом 4 і по лінії зв'язку л.з. передають на вторинний прилад II. Цей прилад містить: проміжний вимірювальний перетворювач 5, вимірювальний механізм 6, відліковий пристрій 7, який призначений для відлічування значень вимірюваної величини за допомогою шкали і покажчика.

Якщо вимірювальна інформація потрібна в декількох точках спостереження або використовується в системах керування, то вторинний прилад може містити один чи кілька передавальних перетворювачів 8. кілька передавальних перетворювачів може також знаходитися в первинному приладі.

Погрішності.

Процес виміру, як усякий фізичний процес, зв'язаний з погрішностями, що спотворюють представлення у особі, що вимірює, про дійсне значення вимірюваної величини. У залежності від форми числового вираження погрішності вимірювальних приладів підрозділяються на абсолютні, відносні і приведені.

Абсолютна погрішність Δx є різницю між показанням приладу x_n і дійсним значенням вимірюваної величини x :

$$\Delta x = x_n - x. \quad (1.1)$$

Абсолютна погрішність має визначений знак (плюс або мінус) і виражається в одиницях вимірюваної величини. Якщо $\Delta x > 0$, то говорять, що показання приладу завищені; якщо $\Delta x < 0$ – показання занижені.

З вираження (1.1) випливає

$$x = x_n - \Delta x = x - \Delta y,$$

де Δu - виправлення до показань приладу.

Абсолютна погрішність звичайно недостатньо точно характеризує якість виміру. Краще його характеризує відносна погрішність, що являє собою відношення абсолютної погрішності до дійсного значення вимірюваної величини, тобто

$$dx = \Delta x / x. \quad (1.2)$$

Тому що звичайно x_n мало відрізняється від x , те замість вираження (1.2) використовують іншу форму запису відносної погрішності, виражаючи її у відсотках:

$$dx = (\Delta x / x_n) \cdot 100.$$

Відносна погрішність, що задовільно характеризує якість окремого виміру, малопригодна для характеристики якості приладу. Дійсно, прилад, що вимірює деяку величину з однаковою абсолютною погрішністю у всьому діапазоні вимірів, має меншу відносну погрішність при великих абсолютних значеннях вимірюваної величини і велику відносну погрішність при малих абсолютних значеннях вимірюваної величини. Для приладу більш представницькою характеристикою його якості є приведена погрішність Δ , рівна відношенню абсолютної погрішності до кінцевого значення шкали приладу (ДСТ 13600-68): $\Delta = (\Delta x / A_{\text{кон}}) \cdot 100$, якщо нульова оцінка знаходиться на початку шкали або шкала безнульова.

У нормальних умовах експлуатації (температура навколишнього повітря $+20^{\circ}\text{C}$, тиск 101,325 кПа, відносна вологість повітря 30...80%, відсутні зовнішні магнітні поля, вібрація і т.п.) прилад має деяку нормовану межу основної погрішності, що допускається, виражену у відсотках, називають класом точності приладу:

$$K = \Delta_{\text{макс}} = (\Delta x_{\text{макс}} / A_{\text{кон}}) \cdot 100.$$

Метрологічні характеристики засобів виміру

Велике значення при оцінці якості і властивостей засобів вимірів має знання їхніх метрологічних характеристик.

Класом точності називається узагальнена характеристика засобу виміру, обумовлена межами допуску основних і додаткових погрішностей, а також іншими властивостями засобів вимірів, що впливають на точність.

Засоби вимірів випускаються на наступні класи точності: 0,01; 0,015; 0,02; 0,025; 0,04; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,4; 0,5; 0,6; 1,0; 1,5; 2,0; 4,0; 5,0; 6,0. Умовно можна розділити всі засоби виміру по класах точності на такі групи:

- індикатори:	1–6 клас точності
- робочі:	0,1–1 клас точності
- зразкові:	0,01–0,1 клас точності
- еталони: менше	0,01 клас точності

Класи точності вимірювальних приладів наносяться на циферблати, шкали або корпуси засобів вимірів у виді умовних позначок, наприклад: $0,5; \sqrt{0,5}$; $\textcircled{0,5}$; $0,5/0,3$. При цьому, цифри 0,5 ідповідає межа погрішності, що *допускається*, $\delta x = \pm 0,5\%$. Це *приведена погрішність*, для якої нормоване значення виражене в одиницях вимірюваної величини. Цифри зі значком $\sqrt{0,5}$ відповідає межа погрішності, що *допускається*, $\delta x = \pm 0,5\%$. Це також приведена погрішність, але нормоване значення в цьому випадку - довжина шкали приладу. Цифри з кружком $\textcircled{0,5}$ відповідає межа погрішності, що *допускається*, $\delta x = 0,5\%$. Це відносна погрішність, причому постійна. Позначенню $0,5/0,3$ відповідає межа погрішності, що *допускається*, вираженою формулою:

$$d = \pm \left[0,5 + 0,3 \left(\frac{x_k}{x} - 1 \right) \right]$$

Це *відносна погрішність*, що зростає зі зменшенням вимірюваної величини x , де x_k - кінцеве значення діапазону вимірів. Застосовуються й інші позначення класу точності.

По класу точності приладу можна визначити його припустимі абсолютну і відносну погрішності $\Delta x_{\text{абс}}$ і γ .

На рисунку 1.2 показана характеристика трьох вимірювальних приладів (№1, №2, №3) тобто реакція приладів ΔI_1 , ΔI_2 , ΔI_3 на вхідний сигнал Δx .

Як видно з рисунка, найбільша чутливість, обумовлена по формулі $r = \frac{\Delta I}{\Delta x}$, приладу №3, а найменша в приладу №1.

Іноді чутливістю називають величину переміщення покажчика приладу при зміні вимірюваної величини на одиницю, (наприклад, 2 мм/град). Чутливість не зв'язана з величиною погрішності приладу. Іноді високочутливі прилади можуть мати велику погрішність, а прилад з малою чутливістю - високу точність вимірів.

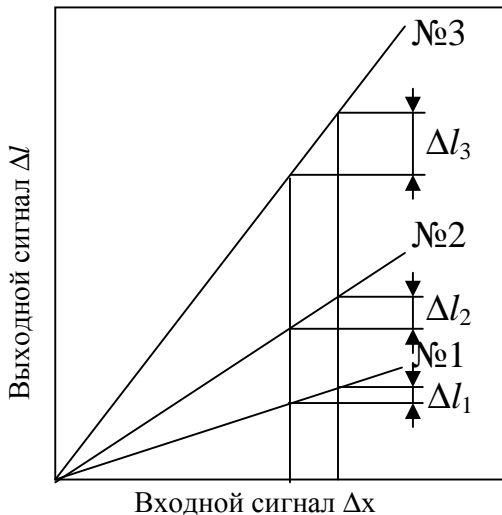
Варіацією показань приладу називається різниця між значеннями окремих показань приладу, що відповідають тому самому значенню вимірюваної величини, отриманих при наближенні до нього

як від менших значень до великих, так і від великих до меншого. Варіація показань визначається одночасно з основною погрішністю як різниця дійсних значень вимірюваної величини (за показаннями зразкового приладу), що відповідають однієї і тій же оцінці шкали приладу, що перевіряється, спочатку при збільшенні (прямий напрямок), а потім при зменшенні (зворотний напрямок) значення вимірюваної величини. При декількох підходах до даної точки діапазону вимірів у кожному із двох напрямків варіація визначається як середня різниця.

Варіація звичайно виражається у відсотках від прийнятого значення, що нормує:

$$b = \frac{x_1 - x_2}{x_N} \cdot 100 ,$$

де x_1 і x_2 - значення вимірюваної величини при прямому і зворотному напрямках підходу до даної точки виміру;



x - значення приладу, що нормує.

Рисунок 1.2 – Чутливість приладів

Варіація показань викликається появою тертя в опорах, люфтами, зносом кернів, підп'ятників і ін.

Варіація показань не повинна перевищувати 0,2% для приладів класу точності 0,25 і вище, а для приладів інших класів (0,5; 0,6 і т.д.) не вище половини припустимого значення основної погрішності.

Для встановлення придатності засобів вимірів до застосування здійснюють державну чи відомчу повірку засобів вимірів. Державну повірку засобів вимірів роблять органи державної метрологічної служби з дозволу Держстандарту України, відомчу – метрологічні служби підприємств і організацій, об'єднань, міністерств і інших органів державної виконавчої влади за умови одержання ліцензії в органах державної метрологічної служби.

Державній повірці підлягають вихідні зразкові засоби вимірів метрологічних служб; робочі засоби вимірів, застосовувані в області охорони здоров'я; при виробництві і контролі медикаментів і харчових продуктів; при здійсненні заходів для охорони навколишнього середовища, охороні праці і техніку безпеки; при геодезичних і гідрометеорологічних роботах; при розрахунках з покупцями, а також операціях, що включає усі види торгової діяльності, зв'язані з визначенням кількості товарів чи послуг; при обліку матеріальних ресурсів (електричної і теплової енергії, газу, нафтопродуктів і т.д.); при проведенні податкових, митних і поштових операцій; при проведенні експертиз (зокрема, з доручення державних органів); при реєстрації міжнародних і національних спортивних рекордів, а також при виконанні робіт, зв'язаних з обов'язковою сертифікацією продукції.

Засоби вимірів, які не підлягають державній перевірці, перевіряються відомчими метрологічними службами.

Результати перевірки, проведеної в інших країнах, можуть визнаватися дійсними відповідно до укладених міжнародних договорів (угодами) чи за рішенням Держстандарту України.

Засоби вимірів визнають придатними до застосування протягом межповерочного інтервалу, якщо результати перевірки підтверджують їх відповідність метрологічним і технічним вимогам до даного засобу вимірів, встановленим у нормативних документах або технічній документації.

Засоби вимірів піддають первинній, періодичній, позачерговій, інспекційній і експертній перевірці.

Первинній перевірці підлягають засоби вимірів при випуску з виробництва і ремонту, а також при ввозі через границю у випадку відсутності договорів або угод, що згадуються вище.

Періодичній перевірці підлягають засоби вимірів, що знаходяться в експлуатації чи призначені до продажу чи прокату. Проміжок часу між перевірками (міжпівірочний інтервал) устанавлюється таким чином, щоб забезпечити придатність засобів вимірів до застосування протягом цього періоду.

Позачергова перевірка виконується в процесі експлуатації засобів вимірів до закінчення міжпівірочного інтервалу.

Інспекційна перевірка виробляється з метою перевірки придатності засобів вимірів до застосування при здійсненні державного метрологічного нагляду.

Експертна перевірка виконується у випадку виникнення спорних питань щодо метрологічних характеристик і придатності засобу вимірів до застосування.

Організація і порядок проведення перевірки засобів вимірів здійснюється відповідно до ДСТУ 2708-94 "Перевірка засобів вимірів".

Для встановлення придатності засобів вимірів до застосування здійснюють державну чи відомчу перевірку засобів вимірів. Державну перевірку засобів вимірів роблять органи державної метрологічної служби з дозволу Держстандарту України, відомчу – метрологічні служби підприємств і організацій, об'єднань, міністерств і інших органів державної виконавчої влади за умови одержання ліцензії в органах державної метрологічної служби.

2 ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

2.1 Температурні шкали

Температура є найважливішим параметром оцінки ступеня нагріву тіл. З найдавніших часів люди намагалися знайти кількісну оцінку теплового стану усього, що їх оточувало.

На відміну від виміру довжини, ваги, часу пройшов тривалий час, поки на зміну суб'єктивним враженням при визначенні температури не прийшли точні і єдині методи вимірів. Спроби наочного представлення температурних змін (охолодження і нагрівання) відомі ще з давніх часів, при цьому використовували для цієї мети термічне розширення повітря. Перший термометр, побудований на цьому принципі, був запропонований Галілеєм у 1592 р. Цей прилад, названий у свій час термоскопом, не мав ніякої шкали, так що виразити його показання числом було неможливе. Термоскопи, що робив Галілей, складалися зі скляної кулі 1 (рисунок 2.1), наповненого повітрям; від нижньої частини кулі відходила трубка, яка частково заповнена водою і закінчується в судині 2, у якому також знаходилася вода.

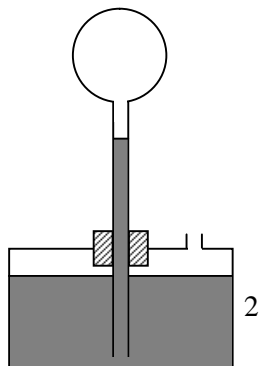


Рисунок 2.1 – Термоскоп Галілея

У теплий час повітря в кулі розширювалося і рівень води в трубці знижувався, а в холодний час обсяг повітря зменшувався і вода із судини 2 під дією атмосферного тиску піднімалася по капілярній трубці. Таким чином, по висоті підйому рідини в трубці можна судити про ступінь нагріву атмосферного повітря. Однак, висота стовпчика залежала не тільки від температури, але і від зміни атмосферного тиску й одержувати точні результати вимірів за допомогою такого термометра було неможливо.

Більш досконалий і простий термометр був запропонований відомим німецьким натуралістом Геріком, що зробив перший крок на шляху до побудови температурної шкали.

Його термометр складався з латунної кулі, заповненого повітрям, і вигнутої у формі букви U трубки зі спиртом (рисунок 2.2). Температуру в цьому термометрі показував дерев'яний чоловічок, що за допомогою шнура і блоку був зв'язаний з латунним поплавцем, що плаває у відкритому кінці термометра. У термометрі в середині шкали стояла

точка, біля якої покажчик зупинявся при перших заморозках, і ця точка була обрана за початок шкали.

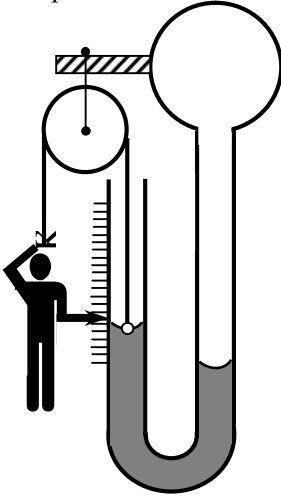


Рисунок 2.2 – Термометр Геріка

Однак, ідея використання газу як середовища, чутливого при зміні температури, не одержала в той час поширення і замість газів стали використовуватися рідинні термометри.

На можливість обрати як опорні точки термометра точку кипіння води і крапку танення льоду вказав Гюйгенс у 1655р. Як вчений він розумів, що при такому виборі можна буде порівнювати температури ("спостережливий ступінь теплоти", як він неї називав) у різних місцях різними термометрами, а не переносити той самий термометр із місця на місце.

У той час було встановлено, що визначені процеси в тих самих умовах завжди протікають при однакових температурах, наприклад, танення льоду чи кипіння води при постійному тиску. І в сучасній метрології такі стани речовини, у яких різні фази (наприклад, лід чи рідина-пара) при постійній температурі знаходяться в рівновазі один з одним, приймаються як опорні крапки. Їх зручно використовувати як калібрувальні крапки для температурної шкали. Температурна шкала рідинного термометра задається в такий спосіб: відзначається висота стовпа рідини в двох опорних крапках і отриманий проміжок поділяється на кілька рівних частин, кожна з яких називається градусом (від латинського "сходінка").

Перший сучасний термометр був сконструйований німецьким винахідником Фаренгейтом у 1714 р. Для цього термометра були обрані дві реперні (опорні) крапки: температура льоду, що тоне, і найнижча температура, приблизно $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сучасній шкалі Цельсія, що була отримана Фаренгейтом у лабораторних умовах шляхом змішування льоду, солі і нашатирю. Цей інтервал винахідник розбив на 32 частині, тому що його прилад виявився в 4 рази точніше, ніж інші термометри, що мали усього 8 розподілів на шкалі (по 4 градації відчуття теплого і холодного). По термометрі Фаренгейта температура людського тіла дорівнювала 96°F , а кипіння води - 212°F , при цьому, різні термометри можна було зв'язати друг із другом, порівнюючи їхні показання в різних "опорних" точках шкали.

Термометри Фаренгейта одержали широке поширення завдяки своїй точності і відсутності негативних значень температур на шкалі, і в даний час застосовується в деяких країнах Західної Європи й Америки. Для перекладу шкали Фаренгейта в шкалу Цельсія (і навпаки), що одержала найбільше поширення у світі, можна використовувати наступні формули:

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32); \quad ^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} ^{\circ}\text{C} + 32 \quad (2.1)$$

Цікаво відзначити, що ці дві шкали мають одну загальну крапку, тобто $-40^{\circ}\text{C} = -40^{\circ}\text{F}$.

В Франції в 1740 р. у вживання ввійшла шкала Реомюра, побудована на точках замерзання води (0°R) і її кипіння (80°R). Така шкала була обрана через те, що вода в цьому інтервалі за даними вимірів того часу, розширюється на 80 тисячних свого обсягу. Саме ці термометри були поширені в Росії до 1917 р. і висіли на вулицях і у всіх будинках.

Вирішальним кроком в області виміру температури можна вважати пропозицію шведського астронома Цельсія розділити інтервал між крапками танення льоду і кипіння води на 100 градусів. Після Цельсія питання про вибір опорних крапок і про величину градуса було вирішено на багато років, і він ввійшов у практику температурних вимірів.

До істотних недоліків рідинних термометрів відноситься залежність показань від робочої речовини (води, спирту, ртуті, і ін.), що заповнює термобалон і капілярну трубку. У термометрів з різними рідинами, прокаліброваних в опорних точках, висота підняття стовпчиків рідин у капілярах при однакових температурах різна внаслідок різних залежностей коефіцієнтів розширення від температури. Так, у спиртовому термометрі в порівнянні з ртутним інтервал між 0°C та 100°C необхідно поділяти нерівномірно. З цієї причини рідинні термометри не придатні для визначення поняття температури і звідси неможливо базисну величину, тобто градус, робити залежним від властивостей визначеної речовини.

У різних галузях промисловості й у наукових дослідженнях у даний час використовується дуже широкий інтервал температур: від тисячних градуса при вивченні квантових властивостей речовини до мільйонів градусів в установках термоядерного синтезу. Ці температури треба не тільки створювати, але і точно вимірювати.

З метою подальшого удосконалення температурної шкали проводилися роботи з вивчення можливості використання для виміру температур газового термометра. Для виготовлення газових термометрів використовувалися реальні гази, водень, гелій і інші, тобто такі з них, що по своїх властивостях порівняно мало відрізняються від ідеального. За допомогою газового термометра температура може бути обмі-

рювана по зміні тиску в залежності від температури при постійному обсязі, або по зміні обсягу газу в залежності від температури при постійному тиску.

У 1787 році французький хімік Шарль відкрив явище (яке поклало початку створення нової шкали) рівномірного розширення чи стиснення газу при нагріванні чи охолодженні. Зі зміною температури на один градус Цельсія газ збільшує чи зменшує свій обсяг рівно на $\frac{1}{273}$ того обсягу, що він займав при нулі градусів. Припустимо, охолоджується газ, що має обсяг 273 кубічних сантиметра при нулі градусів по Цельсію. При охолодженні цього газу на один градус він утратить $\frac{1}{273}$ частину свого первісного обсягу, і новий обсяг його складе 272 см^3 . Легко обчислити, що якщо газ остудити до $-273 \text{ }^\circ\text{C}$, те повинно відбутися як би зникнення газу. У дійсності газу при охолодженні не підкорюються до кінця закону Шарля, тому що ще до досягнення цієї температури вони перетворюються в рідину, а закон Шарля до рідин не можна застосовувати.

Англійський учений Кельвін вирішив ці ускладнення із "зникненням" газу і запропонував будувати температурну шкалу, виходячи з кінетичної енергії молекул. При 0°C середня кінетична енергія молекул газу має деяку визначену величину. Зі зниженням температури на кожен градус Цельсія молекули втрачають $\frac{1}{273}$ частину своєї кінетичної енергії, і убавання енергії молекул відбувається зовсім рівномірно. Це означає, що при температурі -273°C чи, точніше, при $-273,16 \text{ }^\circ\text{C}$ молекули мають нульову кінетичну енергію.

Отже, температуру $-273,16 \text{ }^\circ\text{C}$ можна вважати "абсолютним нулем". Якщо побудувати нову шкалу, у якій за початок взяти абсолютний нуль, а кожен розподіл узяти рівним звичайному градусу Цельсія, то співвідношення між цими двома шкалами виразиться формулою

$$K = ^\circ\text{C} + 273,16 \quad (2.2)$$

(До 1968 р. писали $^\circ\text{K}$, а за згодою, прийнятою в 1968 р., треба писати просто "K").

Розвиток термодинаміки в середині XIX сторіччя дозволив дати нове, яке не залежить від властивостей речовини, визначення температури. Шкала, заснована на другому законі термодинаміки, була запропонована в середині минулого століття Кельвіном і одержала назву "Термодинамічна температурна шкала".

В основі побудови термодинамічної температурної шкали лежать залежності між теплом і температурою, що отримані для ідеальної теплової машини, що працює по циклі Карно:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_2}{T_1}, \quad (2.3)$$

де Q_1 – тепло, що надходить з робочим тілом при T_1 у теплову машину;
 Q_2 – тепло, віддане робочим тілом холодильнику при T_2 .

Термодинамічна температурна шкала Кельвіна з'явилася вихідною шкалою для побудови температурних шкал, що не залежать від властивостей термометричної речовини. У цій шкалі інтервал, що полягає між точкою танення льоду і точкою кипіння води (для збереження наступності зі стоградусною температурною шкалою Цельсія) був розділений на 100 рівних частин.

Практичний вимір термодинамічної температури здійснюється газовими термометрами, однак, такі прилади є досить громіздкими і складними і для повсякденних практичних цілей дуже незручні. Тому починаються спроби розвинути більш зручні методи виміру температури, результати яких по можливості наближалися б до значень термодинамічної температури, тобто термодинамічна шкала замінюється "практичною температурною шкалою". Для цього вибирається деяка кількість гарно відтворених опорних точок, термодинамічні температури яких ретельно обмірювані і зафіксовані за допомогою газових термометрів. За допомогою опорних точок виконується градування приладів для виміру температури, показання яких між опорними точками описуються добре відомими функціями термодинамічної температури.

В даний час застосовується Міжнародна практична температурна шкала (МПТШ) у редакції 1968 р. Ця шкала обрана таким чином, щоб температура, обмірювана по цій шкалі, була близька до термодинамічної температури з точністю, забезпечуваною сучасними засобами вимірів. МПТШ – 68 устанавлюється для температур від 13,82 до 6300 К.

Як еталонні засоби виміру для різних областей температур застосовуються:

- від 13,81 до 903,89 К – платиновий термометр опору;
- від 903,89 до 1337,58 К – платинородій-платинова термопара;
- від 1337,58 до 6300 К – квазімонохроматичний пірометр.

В Україні крім шкали МПТШ – 68 устанавлені практичні температурні шкали, що призначені для здійснення однакових вимірів температури в діапазоні від 0,01 до 100000 К. Для діапазону 0,01 до 0,8 К устанавлена температурна шкала термометра магнітної сприйнятливості, заснована на залежності магнітної сприйнятливості термометра з церій – магнієвого нітрату від температури.

У діапазоні від 0,8 до 1,5 К устанавлена шкала конденсаційного термометра ^3He , заснована на залежності тиску насичених пар ізотопу гелію – 3 від температури.

У діапазоні від 1,5 до 4,2 К застосовується шкала конденсаційного термометра ^4He , заснована на залежності тиску насичених пар ізотопу гелію – 4 від температури.

У діапазоні від 4,2 до 13,81 К застосовується шкала германієвого термометра опору.

У діапазоні від 6300 до 100000 К застосовується шкала термометра мікрохвильового випромінювання.

2.2 Контактні термометри

2.2.1 Термометри розширення

Одним з основних параметрів, що визначають хід технологічних процесів у теплоенергетичних агрегатах (котлах, плавильних і нагрівальних печах різного призначення, сушилах, газогенераторах, хімічних реакторах і ін.) є температура.

Температурні виміри в цих агрегатах характеризуються:

- широким діапазоном виміру (від -200 до $+3000$ °С);
- необхідністю виміру температури твердих, рідких і газоподібних середовищ;
- присутністю агресивних середовищ у теплоенергетичних агрегатах.

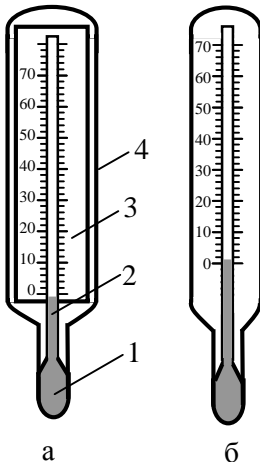
Перераховані умови вимагають застосування різних методів і засобів виміру температури. В даний час як у наукових дослідженнях, так і в промисловості застосовуються різні способи виміру температури, у яких використовуються термометричні властивості речовин. Засіб виміру температури, призначений для вироблення сигналу у формі, зручній для сприйняття спостерігачем, автоматичної обробки, передачі і використання в автоматичних системах керування, називається термометром. У таблиці 2.1 приведені найбільш розповсюджені в промисловості засоби виміру температури і зазначені межі застосування серійних засобів виміру. У дужках зазначені межі застосування засобів вимірів для спеціальних цілей.

Для виміру температур у лабораторних умовах і промисловій практиці широко застосовують скляні рідинні термометри, які є самим старим видом термометрів. Вони характеризуються досить високою точністю, невисокою вартістю і простотою експлуатації.

Принцип дії термометра заснований на залежності між температурою й обсягом термометричної рідини, укладеної в скляній оболонці. Рідинний скляний технічний термометр (рисунок 2.3) складається з термобалона 1 (чуттєвий елемент), заповненого термометричною рідиною (ртуть, спирт і ін.), капілярної трубки 2 (вимірювальні пристрої), пластини 3 з нанесеною на неї шкалою, зовнішньої скляної оболонки 4.

Таблиця 2.1 - Температурні межі застосування промислових засобів виміру температури

Тип засобів виміру	Різновид засобів виміру	Межі застосування, °С	
		нижній	верхній
Термометри розширення	Рідинні скляні термометри	-200	+750
	Манометричні термометри	-200 (-272)	1000
Термометри опору	Термометри опору металеві	-260	1100
	Термометри опору напівпровідникові	-272	600
Термоелектричні термометри	Термопари	-200 (-270)	2200 2800
Пірометри	Оптичні пірометри	700	6000 (100000)
	Пірометри спектрального відношення	300	2800
	Пірометри повного випромінювання (радіаційні пірометри)	-50	3500



1 – термобалон; 2 – капіляр; 3 – шкала; 4 – оболонка

Рисунок 2.3 - Рідинні термометри:

а – кийовий; б - технічний із вкладеною шкалою

Температура вимірюваного середовища, у яку поміщені резервуар (термобалон) з рідиною і частина капіляра, визначається по положенню рівня рідини в капілярі, довжину якого відградується в градусах.

Для заповнення рідинних термометрів застосовують ртуть, етиловий спирт, толуол, гас, петролейний ефір, пентан, і ін. Найбільше поширення одержали термометри з ртутним заповненням.

Ртуть має наступні властивості: може знаходитися в рідкому стані в

широкому діапазоні температур; верхня межа теоретично може бути доведена до 1200 °С за допомогою збільшення тиску в капілярі і застосування для виготовлення термометра плавленого кварцу; не зможує скла, що дозволяє використовувати капіляри з невеликим діаметром каналу (до 0,1 мм). Усе це забезпечує гарну точність виміру при високій чутливості.

При вимірі високих температур (більш 200 °С) капіляр над ртуттю заповнюється інертним газом (азотом) під великим тиском більш 3 МПа (30 атмосфер). Верхня межа вимірюваних температур обмежується міцнісними характеристиками скла. Ртутні термометри з межею виміру до 105 °С виготовляють вакуумними, а вище 105 °С – газонаповненими.

До числа недоліків ртуті варто віднести порівняно малий коефіцієнт об'ємного розширення в порівнянні з іншими рідинами (таблиця 2.2), використовуваними для заповнення термобалона, і її токсичність у випадку порушення герметичності системи термобалон - капіляр.

Таблиця 2.2 – Термометричні рідини для скляних термометрів

Термометрична рідина	Можливі межі виміру, °С		Середній коефіцієнт об'ємного теплового розширення, К ⁻¹	
	нижній	верхній	дійсний	видимий *
Ртуть (Hg)	-35	750 (1200)	0,00018	0,00016
Керосин	-60	300	0,00095	0,00093
Толуол (C ₆ H ₅ CH ₃)	-90	200	0,00109	0,00107
Етиловий спирт (C ₂ H ₅ OH)	-80	70	0,00105	0,00103
Петролейний ефір	-120	25	0,00152	0,00150
Пентан (C ₅ H ₁₂)	-200	20	0,00092	0,00090

*Під видимим коефіцієнтом об'ємного теплового розширення розуміють різниця між коефіцієнтом об'ємного теплового розширення термометричної рідини і скла.

Скляні термометри з органічними термометричними рідинами застосовуються в інтервалі від –200 до 200 °С і характеризуються меншою вартістю і шкідливістю у виробництві й експлуатації. Однак, унаслідок змочування скла ці термометри виготовляють із більшим діаметром капіляра, ніж у ртутних і тому вони мають меншу точність виміру.

У залежності від методу градування і застосування скляні рідинні термометри поділяються на дві групи: термометри, що градууються і застосовуються при повному зануренні в рідке середовище, температуру якого необхідно вимірити, і при неповному зануренні.

Термометри першої групи застосовуються в основному в лабораторних умовах і дозволяють забезпечити більш високу точність. Глибина їхнього занурення повинна змінюватися при зміні температури і дорівнювати висоті підйому рідини в капілярі. Однак, на практиці не завжди забезпечується ця умова виміру, і частина стовпчика рідини в капілярі може знаходитися поза вимірюваним середовищем, що приводить до погрішності виміру. Ця погрішність існує коли температура виступаючої частини стовпчика термометра і частини, зануреної у вимірюване середовище, буде різною.

Виправлення на виступаючий стовпчик до показань термометра визначаються в градусах по формулі:

$$\Delta t = n \cdot \beta \cdot (t - t_{в. ст.}) \quad (2.4)$$

де n – число градусів у виступаючому стовпчику, °С;

β – коефіцієнт видимого об'ємного розширення термометричної рідини в склі, K^{-1} ;

t – температура, показувана термометром, °С;

$t_{в. ст.}$ – середня температура виступаючого стовпчика, обмірювана допоміжним термометром, °С.

Приклад 2.1. Лабораторний ртутний термометр, занурений у вимірюване середовище до оцінки 170 °С, показує температуру 350 °С. Температура виступаючого стовпчика дорівнює 40 °С. Коефіцієнт видимого об'ємного теплового розширення ртуті в склі $\beta = 0,00016 K^{-1}$ (таблиця 2.2). Виправлення на виступаючий стовпчик складуть:

$$\Delta t = n \cdot \beta \cdot (t - t_{в. ст.}) = 180 \cdot 0,00016 \cdot (350 - 40) \approx 9^\circ C$$

Дійсне значення температури дорівнює $350 + 9 = 359^\circ C$.

Термометри другої групи (при неповному зануренні) – технічні – застосовуються для виміру температур у промисловості, при цьому, глибина їхнього занурення повинна бути постійною. На таких термометрах повинна бути зазначена нормальна глибина занурення і температура $t_{в.}$ виступаючої частини термометра при його градуюванні. Якщо температура виступаючої частини $t'_{в.}$ при використанні його в реальних умовах значно відрізняється від температури $t_{в.}$ при градуюванні, то для приведення показань термометра до температури виступаючої частини $t_{в.}$ необхідно до показань термометра алгебраїчно додати виправлення, що розраховується по формулі:

$$\Delta t = m \cdot \beta \cdot (t_{в.} - t'_{в.}) \quad (2.5)$$

де m – число градусів, відлічуване по термометрі при нормальній глибині його занурення;

β – коефіцієнт видимого об'ємного розширення термометричної рідини в склі, K^{-1} ;

$t_{в.}$ – температура виступаючого стовпчика при градуюванні, °С (звичайно $t_{в.} = 20^\circ C$);

$t'_в$ – температура виступаючого стовпчика в реальних умовах виміру, °С.

В даний час випускаються різні різновиди скляних термометрів, окрім з яких представлені нижче.

Лабораторні ртутні термометри для виміру температури від –30 до +600 °С, серед яких можна відзначити термометри типу ТР із діапазоном від 0 до 500 °С (таблиця 2.3), призначені для точних вимірів температури.

Таблиця 2.3 – Характеристика лабораторних термометрів підвищеної точності.

Тип термометра	Область вимірів, °С	Діапазон вимірів, °С	Ціна розподілу шкали, °С	Погрішність вимірів, °С
ТР-I	0–60	4	0,01	±0,01
ТР-II	55–155	10	0,02	±0,02
ТР-III	140–300	20	0,05	±0,05
ТР-I	300–500	50	0,10	±0,10

Виготовляються також лабораторні ртутні термометри спеціального призначення, що застосовуються при вимірі температур у якійсь одній визначеній області. До цієї групи відносяться калориметричні і метастатичні термометри. Калориметричні термометри застосовуються в калориметрах для визначення теплоти спалювання палива чи теплоємності тіл і мають шкалу в області кімнатних температур від 15 °С до 25 °С з погрішністю виміру не більш 0,001 °С.

Метастатичні термометри (термометри Бекмана) дозволяють вимірювати невеликі різниці температур (до 5 °С) з погрішністю 0,004 °С у широкому інтервалі температурної шкали від –20 до 150 °С завдяки наявності додаткового резервуара з термометричною рідиною (ртуттю).

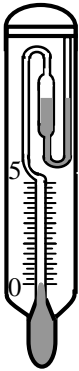


Рисунок 2.4 – Метастатичний термометр

Переливаючи рідину з резервуара в термобалон і навпаки з термобалона в резервуар, можна встановлювати п'ятиградусні інтервали температур (рисунок 2.4) у будь-якій місці інтервалу від –20 до 150°С.

Технічні ртутні термометри випускаються 11 модифікацій зі шкалами, °С: -90/+30, -60/+50, 0/100, 0/160, 0/200, 0/300, 0/350, 0/450, 0/500, 0/600. Ціна розподілу шкали складає від 0,5 °С (шкала –30/+50 °С) до 5 °С і 10 °С (шкала 0/600 °С). Форма нижньої частини термометра різна, їх виготовляють прямими (тип

А) і кутовими (тип Б с кутом 90 і 135°). При вимірі температур рідких чи газових середовищ, що знаходяться під високим тиском від 0,2 до 32 МПа (від 2 до 320 атмосфер) застосовують спеціальні захисні оправки, що ізолюють тендітне скло термометра від впливу високих тисків.

Технічні термометри електроконтактні застосовуються для замикання і розмикання ланцюга електричного струму з метою сигналізації, регулювання (у найпростіших схемах) температури в лабораторних і промислових умовах. Принцип дії заснований на здатності ртуті служити провідником електричного струму. Електроконтактні термометри виготовляють з постійними упаяними контактами (рисунок 2.5) чи з одним рухливим контактом, який можна переміщати усередині капіляра за допомогою спеціального магніту і другим нерухомим контактом, упаяним у капіляр термометра (рисунок 2.6). Термометри з рухливим контактом забезпечують замикання і розмикання електричного ланцюга при будь-якій значенні обраної шкали термометра. Ртуть, що переміщається в капілярі, забезпечує електричний контакт з упаяними електродами, навантаження на який не повинна перевищувати 0,5 мА при напрузі не більш 0,3 В.

Спеціальні ртутні термометри (максимальні) застосовуються для фіксування максимальної температури атмосферного повітря чи води у водоймах (метеорологічні термометри) чи для визначення максимальної температури людського тіла (медичні). У цих термометрах використовується незмочуваність скла ртуттю й у місці пережиму капіляра (рисунок 2.7) відбувається розрив стовпчика ртуті при охолодженні термобалона.

Визначимо чутливість рідинних термометрів, що відповідно до визначення буде дорівнює відношенню зміни висоти $h_2 - h_1$ підйому термометричної рідини в капілярі до зміни температури ($t_2 - t_1$):

$$S_0 = \frac{(h_2 - h_1)}{(t_2 - t_1)}$$

Для визначення S_0 запишемо залежність зміни обсягу термометричної рідини від температури t_1 і t_2 :

$$V_{t_1} = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot t_1); \quad V_{t_2} = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot t_2);$$

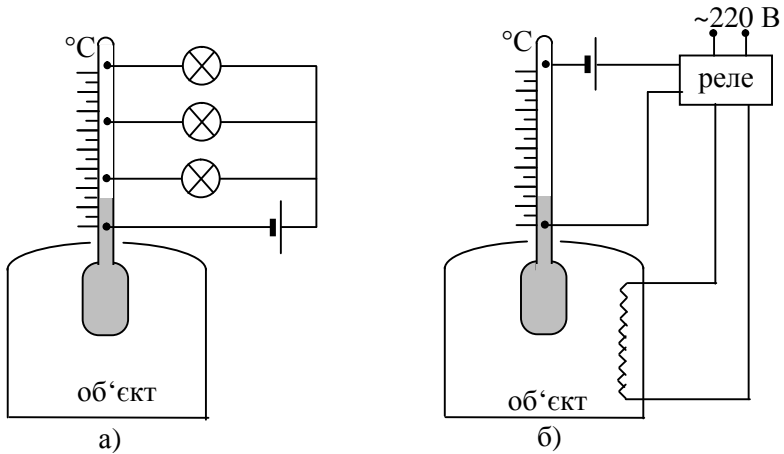
де V_0 – обсяг рідини в термобалоні при температурі градування (частіше при $t=0$ °С);

β – коефіцієнт об'ємного розширення рідини, K^{-1} ;

Зміна обсягу при збільшенні температури від t_2 до t_1

$$\Delta V = V_2 - V_1 = V_0 \cdot \beta \cdot (t_2 - t_1)$$

З іншого боку, зміну обсягу можна виразити через висоту підйому рідини в капілярі:



а - у схемах сигналізації; б - у схемах регулювання
 Рисунок 2.5 – Електроконтактні термометри

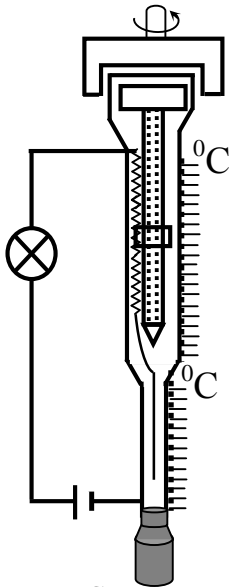


Рисунок 2.6 – Схема електроконтактного термометра із рухомим контактом

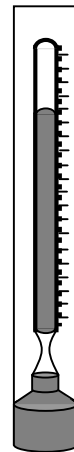


Рисунок 2.7 – Ртутний термометр максимальний

$$\Delta V = \frac{\pi d^2}{4} (h_2 - h_1)$$

де d – діаметр капіляра термометра, м.

Дорівнявши праві частини рівнянь, одержимо:

$$\frac{\pi d^2}{4}(h_2 - h_1) = V_0 \cdot \beta \cdot (t_2 - t_1)$$

Звідси чутливість рідинного термометра визначиться:

$$S_0 = \frac{4V_0 \cdot \beta}{\pi d^2} = \frac{h_2 - h_1}{t_2 - t_1}$$

Як видно з цього рівняння, при необхідності використовувати термометр із найбільшою чутливістю, треба вибрати термометр із великим первісним обсягом рідини в термобалоні і з маленьким діаметром капіляра. Однак, варто враховувати, що термометри з великим обсягом рідини в термобалоні мають велику інерційність, що не дозволяє вимірювати відносно швидкоплинні теплові процеси. Термометри з малим діаметром капіляра створюють труднощі для візуального відліку, і можуть приводити до додаткової погрішності із-за дії капілярних сил.

2.2.2 Манометричні термометри

Принцип дії манометричного термометра засновано на залежності тиску газу чи рідини, що знаходяться в замкнутій системі, від температури вимірюваного середовища.

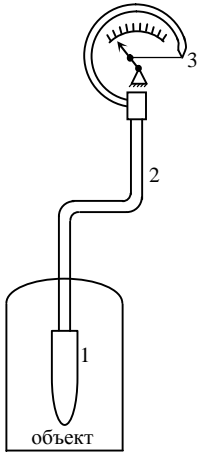


Рисунок 2.8 – Манометричний термометр

Манометричний термометр (рисунок 2.8) складається з термобалона 1, капіляра 2 і манометричної пружини 3, один кінець якої з'єднаний з капіляром, а інший, запаяний кінець пружини, з'єднаний зі стрілкою вимірювального приладу.

При зануренні термобалона у вимірюване середовище відбувається нагрівання (чи охолодження) робочої речовини, що знаходиться в термобалоні, і при цьому змінюється тиск у термосистемі. Зміна тиску робочої речовини через гнучкий капіляр передається на вимірювальний прилад - манометричну пружину, вільний кінець якої переміщується і повертає стрілку вимірювальної системи.

Інерційність манометричних термометрів залежить в основному від теплофізичних характеристик речовини в термобалоні і його маси і практично не залежить від довжини капіляра (тобто відстані від об'єкта до вимірювального приладу), тому що сигнал тиску передається зі швидкістю звуку в заповнюваній речовині.

Манометричні термометри в залежності від виду робочої речовини, що заповнює термосистему, підрозділяються на газові, рідинні і конденсаційні (парові). Термометри можуть працювати при температурі навколишній повітря від 5 до 60 °С та відносній вологості до 80 %. Контрольоване середовище (газ, продукти згорання, агресивні рідини) може бути агресивне, тому термобалон виконується зі спеціальної сталі марки Х18Н10М. Термобалони розраховані на надлишковий тиск від 0,4 до 25 МПа (від 4 до 250 атмосфер). Основна припустима погрішність не перевищує $\pm 1,0\%$ для класу точності 1 та $\pm 1,5\%$ для класу точності 1,5. Додаткова погрішність при температурі навколишнього повітря, відмінній від 20 °С (у межах від 5 до 60 °С), не перевищує для газових термометрів 0,5 % на кожні 10 °С зміни температури.

Газові манометричні термометри типів ТДГ-П, ТДГ-Е, ТПГ дозволяють вимірювати температуру від -150 до + 600 °С. Як робоча речовину використовується азот. При постійному обсязі газу залежність його тиску від температури визначається рівнянням

$$P_t = P_0 \cdot (1 + \beta \cdot t), \quad (2.7)$$

де P_0 – тиск газу при температурі 0 °С, Па;

β – коефіцієнт об'ємного розширення газу, $\beta = \frac{1}{273}$.

При зміні температури газу в термобалоні термометра від $t_{\text{поч}}$, що відповідає початку шкали, до $t_{\text{кін}}$, що відповідає кінцю шкали, буде мінятися і тиск газу відповідно до рівняння:

$$P_{\text{кін}} = \frac{P_{\text{поч}} \cdot (1 + \beta \cdot t_{\text{кін}})}{1 + \beta \cdot t_{\text{поч}}} \quad (2.8)$$

Після нескладних перетворень одержимо рівняння шкали газового манометричного термометра:

$$P_{\text{кін}} - P_{\text{поч}} = P_{\text{поч}} \cdot \frac{\beta \cdot (t_{\text{кін}} - t_{\text{поч}})}{1 + \beta \cdot t_{\text{поч}}} \quad (2.9)$$

З цього рівняння видно, що розмах робочого тиску $\Delta P = P_{\text{кін}} - P_{\text{поч}}$ у термосистемі газового термометра прямо пропорційний значенню початкового тиску $P_{\text{поч}}$ і діапазону виміру температур ($t_{\text{кін}} - t_{\text{поч}}$).

Коливання атмосферного тиску практично не впливають на показання приладу, оскільки в термосистемі азот знаходиться при відносно великому тиску від 0,98 до 4,9 МПа (від 9,8 до 49 атмосфер). Відхилення температури навколишнього середовища від градувальної температури, рівної +20 °С, приводить до зміни температури капілярної трубки і манометричної пружини, у зв'язку з чим при вимірі виникає погрішність, рівна

$$\Delta t = \frac{V_K}{V_T} (t_K - t_0), \quad (2.10)$$

де V_K і V_T – обсяг капілярної трубки і термобалона, м³;
 t_K – температура капіляра.

З формули видно, що погрішність виміру може бути зменшена за рахунок збільшення обсягу термобалона. Однак надмірне збільшення обсягу приводить до зростання інерційності всього приладу через низький коефіцієнт теплообміну між стінками термобалона і газу, що його наповнює, а також малою теплопровідністю самого газу.

Газові термометри випускаються з довжиною капіляра від 1,6 до 60 метрів при довжині термобалона від 125 до 500 мм і застосовуються для контролю температури холодної води, повітря, рідкого і газоподібного палива, на установках для одержання захисного газу, на кисневих станціях і на інших об'єктах.

Рідинні манометричні термометри типу ТЕЖ і ТПЖ призначені для виміру температури від –150 до +300 °С. Для заповнення термосистеми термометрів застосовують пропіловий алкоголь, метаксилол, силіконові рідини й ін.

Зміна тиску в залежності від температури для рідини в термометрі виражається рівнянням:

$$\Delta P = \frac{\Delta t \cdot \beta}{\mu}, \quad (2.11)$$

де ΔP – зміна тиску, Па;

Δt – зміна температури, К (°С);

β – коефіцієнт об'ємного розширення рідини, К⁻¹;

μ – коефіцієнт стискальності рідини, м²/Н.

Для запобігання закипання рідини в термосистемі створюється початковий тиск порядку 1,5...2 МПа (15...20 атмосфер). Інерційність рідинних манометричних термометрів менше, ніж газових завдяки більшій теплопровідності рідини. Однак, погрішності, викликані коливаннями температури навколишнього середовища, у рідинних термометрів більше, ніж у газових, і визначаються по тим же формулам.

При роботі рідинних термометрів необхідно враховувати гідростатичну погрішність уведенням виправлення, що додається, якщо манометрична пружина знаходиться вище термобалона, чи віднімається, якщо нижче.

Приклад 2.2. При вимірі температури продуктів згорання в борві нагрівальної печі термобалон рідинного манометричного термометра знаходився на 10 м нижче, ніж манометрична пружина і показував 270 °С. Визначити помилку виміру, якщо чутливість приладу

$S_0=0,01$ МПа/°С и термосистема заповнена рідиною з щільністю $\rho=895$ кг/м³.

Прилад буде занижувати показання на величину гідростатичного тиску рідини

$$P_{\text{ж}}=\rho \cdot g \cdot h=895 \cdot 9,81 \cdot 10=0,088 \text{ МПа}$$

Помилка виміру складе

$$\Delta t = \frac{P_{\text{ж}}}{S_0} = \frac{0,088}{0,01} = 8,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Дійсне показання приладу складе

$$t_{\text{д}}=270+8,8=278,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Конденсаційні (парові) манометричні термометри типу ТП і ТКП призначені для виміру температур від -50 до $+300$ °С. Термобалон термометра приблизно на $\frac{3}{4}$ заповнений низькокиплячою рідиною, а інша частина заповнена насиченою парою цієї рідини. Як рідину використовуються: фреон 22 (CH₂Cl) від -25 до 80 °С, пропилен (C₃H₆) - від -50 до 60 °С, хлористий метил (CH₃Cl) – від 0 до 125 °С, ацетон (C₃H₆O) – від 100 до 200 °С, етилбензол (C₈H₁₀) – від 160 до 300 °С.

Конденсаційні термометри мають велику чутливість, чим газові і рідинні, однак, залежність між температурою і тиском, що розвивається, у термосистемі нелінійна. Для лінеаризації характеристики і, отже, одержання рівномірної шкали, деякі типи манометричних конденсаційних термометрів (наприклад ТПП2-1) забезпечуються спеціальними пристроями (компенсаторами).

Показання конденсаційних термометрів залежать від висоти розташування термобалона (вище чи нижче) стосовно манометричної пружини (до корпусу приладу), а також від зміни атмосферного тиску. Зміна температури навколишнього середовища практично не робить впливу на показання приладу, тому що робочий тиск у термосистемі залежить тільки від діапазону виміру температури і від зміни тиску насиченої пари від температури.

Манометричні термометри відрізняються простотою пристрою, можливістю дистанційної передачі показань (до 60 м) і можливістю їхнього використання в пожежо- і вибухонебезпечних приміщеннях і середовищах. До недоліків відносяться: труднощі ремонту при розгретизації системи (особливо при ушкодженні капіляра), великі розміри термобалона, а звідси і велика інерційність.

2.2.3 Дилатометричні і біметалічні термометри

Робота дилатометричних і біметалічних термометрів заснована на властивості твердих тіл змінювати свої лінійні розміри при зміні температури по рівнянню:

$$\ell_t = \ell_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t) \quad (2.12)$$

де ℓ_t – довжина твердого тіла при температурі t , м;

ℓ_0 – довжина цього ж тіла при температурі 0°C , м;

α – коефіцієнт лінійного розширення твердого тіла, $^\circ\text{C}^{-1}$.

Дилатометричні термометри застосовуються головним чином у якості первинних вимірювальних перетворювачів у системах автоматичного регулювання температури, а також у системах захисту і сигналізації в різних об'єктах, де відбуваються теплові процеси. Термометри цього типу використовуються порівняно рідко для виміру температури із-за невисокої точності і великий інерційності.

Дилатометричний термометр (рисунок 2.9) складається з металеві труби (чуттєвого елемента) 1, усередині якої знаходиться стержень 2.

Коефіцієнт лінійного розширення труби значно перевершує цей показник для стержня. У верхній частині приладу розміщується підоймовий пристрій 3 з контактною групою 4. При підвищенні температури середовища труба подовжується більше, ніж стержень, унаслідок чого стержень, жорстко скріплений із трубою, переміщується вниз і за допомогою важеля розмикає контакти при заданій температурі. Контакти термометра зв'язані з електричним ланцюгом якогось пристрою (електричної печі, сигналізатора, реле, пристрою, що регулює, й ін.), що включається чи відключається в залежності від установленної температури на задатчику дилатометричного термометра. Зміна завдання

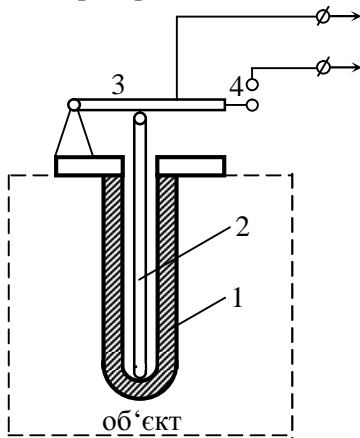


Рисунок 2.9 – Схема дилатометричного термометра-сигналізатора

здійснюється шляхом чи збільшення зменшення відстань між важелем 3 і контактом 4.

тури середовища труба подовжується більше, ніж стержень, унаслідок чого стержень, жорстко скріплений із трубою, переміщується вниз і за допомогою важеля розмикає контакти при заданій температурі. Контакти термометра зв'язані з електричним ланцюгом якогось пристрою (електричної печі, сигналізатора, реле, пристрою, що регулює, й ін.), що включається чи відключається в залежності від установленної температури на задатчику дилатометричного термометра. Зміна завдання

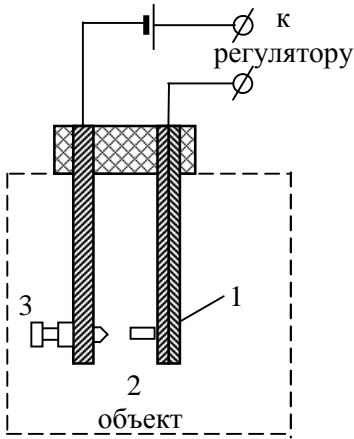


Рисунок 2.10 – Схема біметалічного реле температури

метрах (рисунок 2.10) як чуттєвий елемент використовується термобіметалева пластина 1, що складається з двох шарів різнорідних металів,

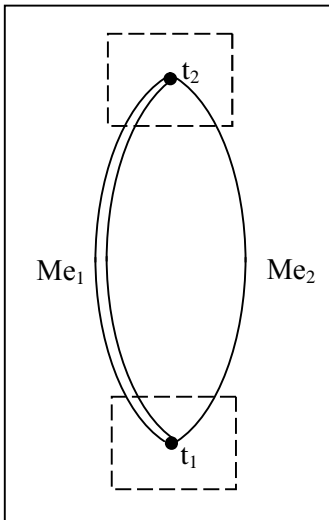


Рисунок 2.11 – Термоелектричний ланцюг

температури, при якій реле може чи включати відключати силові електричні ланцюги.

Дилатометричні термометри випускаються на різні діапазони температур від -30 до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ та класом точності 1,5 і 2,5 у залежності від модифікації й інтервалу температур. Для виготовлення металевої труби термометра використовується сталь чи латунь, а стержень – з інвару, при цьому, співвідношення коефіцієнтів лінійного розширення цих матеріалів складає більш 20, що значно збільшує чутливість цих приладів.

У біметалічних термометрах (рисунок 2.10) як чуттєвий елемент використовується термобіметалева пластина 1, що складається з двох шарів різнорідних металів, що мають різні коефіцієнти лінійного розширення (наприклад, інвар - сталь). Ці два шари жорстко скріплені між собою зварюванням по всій площині зіткнення. При нагріванні термобіметалевої пластини остання згинається убік металу (інвару) з меншим коефіцієнтом лінійного розширення і при заданій температурі замикає контакти 2. Регулювання зазору між контактами на задане значення температури здійснюється переміщенням кінця однорідної металевої пластини за допомогою гвинта 3. При збільшенні зазору між пластинами збільшується значення

Область застосування біметалічних термометрів (біметалічних реле) лежить в інтервалі від 60 до 300 °С в залежності від марки використовуваного біметалу.

Клас точності біметалічних термометрів не перевищує 2,5.

2.2.4 Термоелектричні термометри

Вимір температури за допомогою термоелектричних термометрів засновано на фізичному явищі термо-ЕРС, що було відкрито німецьким фізиком Томасом Зеєбеком у 1821р.

В електричному ланцюзі, що складається з двох різнорідних провідників, з'єднаних кінцями (рисунок 2.11), виникає термоелектрорушійна сила (термо-ЕРС) при різній температурі в місцях з'єднання провідників. Це явище можна пояснити з погляду електронної теорії будівлі металу. У кожному металі маються так називані "вільні" електрони, концентрація яких різна для різних металів. При контакті двох металів, що мають різну концентрацію вільних електронів, відбудеться явище дифузії, тобто електрони почнуть переходити з одного металу в інший (рисунок 2.12), створюючи контактну різницю потенціалів. Величина виниклого потенціалу буде залежати як від природи самих металів (тобто розходження в них вільних електронів), так і від температури в місці контакту. Чим вище температура металу, тим інтенсивніше протікає процес дифузії електронів з одного металу в інший і тому більш висока різниця потенціалів установиться в місці зіткнення металів.

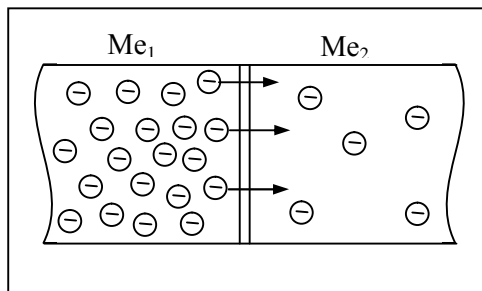


Рисунок 2.12 – Схема дифузії електронів із одного металу в інший

Якщо температура в місцях з'єднання двох провідників однакова, тобто $t_1=t_2$ (рисунок 2.11), то виникають різниці потенціалів у цих місцях будуть однакові, але протилежно спрямованими і термоток у цьому електричному ланцюзі буде дорівнювати нулю. Звідси випливає висновок, що для виникнення електричного струму в ланцюзі, що складається з двох металів, необхідні дві умови:

- електричний ланцюг повинний складатися з двох різнорідних провідників;

- температура в місцях з'єднання провідників повинна бути різною, тобто $t_1 \neq t_2$.

Виникнення контактної різниці потенціалів у місці зіткнення двох провідників можна пояснити також з теорії Ферма, у якій вільні електрони в металах характеризуються величиною енергетичного потенціалу. Величина потенціалу ототожнюється з глибиною потенційної ями, у якій знаходяться електрони. При зіткненні двох металів електрони будуть прагнути перейти (падати) з менш глибокої потенційної ями в більш глибоку, створюючи при цьому контактну різницю потенціалів.

З'єднання двох провідників з різних металів при різній температурі в місцях з'єднання провідників, виконане з метою виміру температури газоподібних, рідких і твердих середовищ (чи одержання електричної енергії) одержало назву "термопара" (чи термоелектричний генератор). Відповідно до вищенаведеного, можна записати основне рівняння термопари:

$$\Delta E = E_{t_1} - E_{t_2}, \quad (2.12)$$

де ΔE - результуюча ЕРС, що розвивається термопарою;

E_{t_1} - ЕРС, що виникає в місці з'єднання при температурі t_1 ;

E_{t_2} - ЕРС, що виникає в місці з'єднання при температурі $t_2 (t_1 > t_2)$.

Результуюча ЕРС залежить від роду з'єднаних між собою провідників (наприклад, мідь - залізо, мідь - алюміній і ін.) і від значення температур у місцях з'єднання цієї пари провідників. Звідси випливає важливий висновок, що для однозначного виміру температури в якому - або місці простору з використанням термопари необхідно стабілізувати і знати температуру в якому - або одному місці (із двох) з'єднання провідників. У цьому випадку можна записати рівняння термопари:

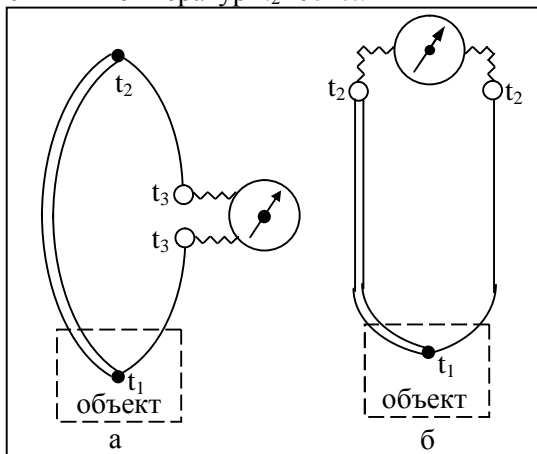
$$\Delta E = E_{t_1} - \text{const} \quad (2.13)$$

Вид функціональної залежності $\Delta E = f(t_1, t_2)$ для конкретної пари провідників визначити в даний час скрутно, а тому ця залежність встановлюється експериментально методом порівняння зі зразковими термометрами. Цей процес називається "градування термопари", при цьому, температура одного з кінців підтримується постійною і рівною 0°C . У процесі "градування" одержують градувальну характеристику обраної пари провідників (термопари), використовуючи яку на практиці, можна вимірити температуру по обмірюваній ЕРС.

Для виміру термо-ЕРС, що розвивається термопарою, використовують два способи підключення вимірювального приладу: у розрив електрода (рисунок 2.13а) і в розрив спаю, тобто в розрив місця з'єд-

нання (рисунок 2.13б) У першому випадку в термопарі буде чотири кінці: робочий з температурою t_1 , вільний з температурою t_2 і нейтральні з температурою t_3 , причому, температури цих двох нейтральних кінців повинні бути постійними при будь-якому їх значенні.

В другому випадку в термопарі буде три кінці: робочий з температурою t_1 , що занурюється в середовище, температуру якого необхідно вимірити, і два вільних кінці, що повинні знаходитися при постійній температурі $t_2 = \text{const}$.



а – у розрив електрода;

б – у розрив місця з'єднання

Рисунок 2.13 – Включення вимірювального приладу у ланцюг термопарі

ланцюг термопарі (рисунок 2.14). Якщо температура у всіх точках приєднання провідників однакова, тобто $t_1 = t_2$, то сумарна ЕРС, що розвивається усіма (трьома) термопарами дорівнює нулю (по другому закону термодинаміки енергію можна одержати якщо мається різниця висот, температур, потенціалів і т.д.):

$$\Delta E = E_{1,2}^{t_1} + E_{1,3}^{t_1} + E_{2,3}^{t_2} = 0 \quad (2.14)$$

Звідси:

$$-I_{1,2}^{t_2} = +(E_{1,3}^{t_1} + E_{2,3}^{t_1}) \quad (2.15)$$

При нерівності температур, $t_1 \neq t_2$, сумарне ЕРС дорівнює:

$$\Delta E = E_{1,2}^{t_1} + E_{1,3}^{t_2} + E_{2,3}^{t_3} \quad (2.16)$$

Підставивши значення $E_{1,2}^{t_2}$ з рівняння (2.15) у рівняння (2.16), одержимо:

На практиці частіше використовується другий варіант (б) підключення вимірювального приладу в ланцюг термопарі, що зв'язано, в основному, з більш простою конструкцією термопарі, що має один спай (одну точку з'єднання), а не два, як у першому варіанті.

При підключенні вимірювального приладу в ланцюг термопарі утвориться дві нові термопарі. Визначимо, як впливає підключення третього провідника в

$$\Delta E = E_{1,2}^{t_1} - I_{1,2}^{t_2} \quad (2.17)$$

Таким чином, включення в ланцюг термопары третього провідника (включення вимірювального приладу за допомогою третього провідника) не робить впливу на сумарну ЕРС термопары за умови, що температура t_2 буде однакою в двох точках приєднання третього провідника. Ці дві точки повинні знаходитися досить близько друг від друга, щоб забезпечувалися однакові температурні умови в цих точках.

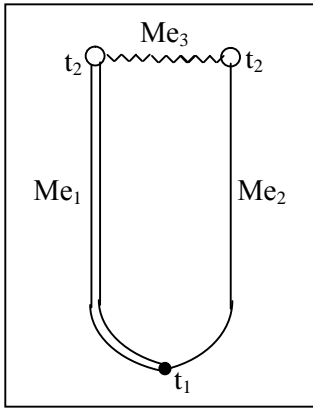


Рисунок 2.14 – Включення третього провідника у ланцюг термопары

Для збільшення чутливості термоелектричного методу виміру температури в ряді випадків застосовують термобатарею: декілька послідовно включених термопар, робочі кінці яких знаходяться при температурі t_1 , вільні при відомій і постійній температурі t_2 (рисунок 2.15). При такім з'єднанні термо-ЕРС, що розвивається термопарами, сумується, тобто термо-ЕРС термобатареї, що складається з n термопар, у n раз більше термо-ЕРС окремої термопары. Термобатарея застосовується при малих різницях температур між об'єктом і навколишнім середовищем.

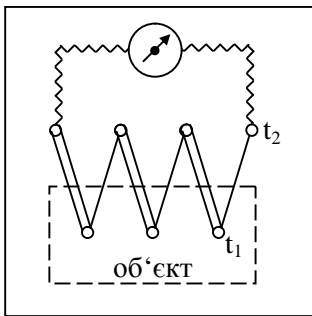


Рисунок 2.15 – Термобатарея

Термобатареї застосовуються також для одержання електроенергії, що може живити малих по потужності споживачів її (наприклад, морські буї, сигналізатори, радіосхеми й ін.).

У деяких випадках виникає необхідність виміру різниці температур у двох точках одного тіла (наприклад, для визначення теплового потоку, що проходить через тіло) чи в двох однотипних об'єктах (наприклад, у системах керування тепловими процесами в об'єктах). На малюнку 2.16 показана диференціальна термопара, коли ЕРС однієї термопары включають назустріч ЕРС іншої термопары.

Термопару можна виготовити з будь-якої пари як чистих металів, так і їхніх сплавів, одержуючи незліченну безліч пристроїв (термоелектричних термометрів) для виміру температури. Однак, не всі провідники можуть бути використані для виготовлення термопар. До матеріалів, використовуваних для виготовлення термопар, пред'являються такі вимоги:

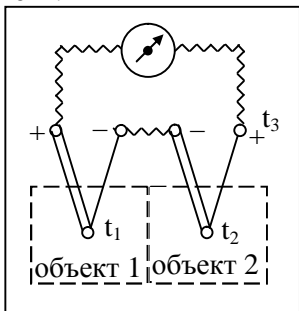


Рисунок 2.16 – Диференційна термопара

- лінійна характеристика, тобто лінійна залежність між вимірюваною температурою і вироблюваною термо-ЕРС;
- стабільність характеристики протягом тривалого часу роботи;
- висока жаростійкість (окалиностійкість), тобто здатність працювати в умовах підвищених температур без окислювання термопарних провідів;
- висока жароміцність (збереження механічних властивостей при високій температурі);
- хімічна стійкість при роботі в агресивних середовищах, як рідких, так і газоподібних;
- однозначність характеристики в широкому діапазоні температур;
- однорідність термоелектричних властивостей по довжині провідника;
- легкість технологічної обробки матеріалу для одержання термопарного проводу;
- гарні економічні показники.

Вищенаведені вимоги різко зменшують кількість матеріалів, з яких можна виготовити термопари. Нижче приводяться типи термопар, прийнятих у відповідності зі стандартами, застосовуваними в Україні, у Росії й у міжнародній практиці, а також даються їхні основні характеристики.

Платинородій-платинова термопара застосовується для тривалого виміру температур в області від 0 до 1300 °С та короткочасно – до 1600°С. Градувальне позначення цих термопар – ПП.

Один електрод (негативний) складається з чистої платини, другий електрод (позитивний) являє собою сплав, що складається на 10 % з родію (Rh) і на 90 % із платини (Pt). Термоелектроди цих термопар виготовляють із дроту діаметром 0,5 мм, що задовольняє умовам до-

статньої міцності і прийнятної вартості термоелектродних проводів. Ці термопари зберігають стабільність градуовальної характеристики в окисному і нейтральному середовищах. У відбудовній атмосфері платинородій–платинові термопари не рекомендується застосовувати, тому що відбувається істотна зміна градуовальної стандартної характеристики. Сильний негативний вплив робить контакт цих термопар з вуглецем і речовинами, що містять вуглець (наприклад, CO_2 , CH_4 і ін.), парами металів, з'єднаннями кремнію.

Платинородій–платинові термопари (ПП) відносяться до числа кращих термоелектричних термометрів по точності і відтворюваності термо-ЕРС, тому вони застосовуються в основному в якості еталонних і зразкових термометрів. У цій функції вони розділяються на наступні три різновиди: еталонні (ТПП - Е), зразкові (ТПП - О), робочі підвищеної точності (ТПП - РПТ) і технічні (ТПП).

Еталонні платинородій–платинові термопари служать для відтворення Міжнародної практичної температурної шкали від 630,74 до 1064,43 °С. Для цієї області температуру розраховують по рівнянню

$$E(t, t_0) = a + b \cdot t + c \cdot t^2 \quad (2.18)$$

де a , b , c – експериментально знайдені константи (приводяться в метрологічних довідниках).

Межа припустимої основної погрішності термопари ПП розраховується по формулі:

$$\Delta E = 0,01 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot (t - 300), \text{ мВ} \quad (2.19)$$

Платинородій–платинородієві термопари одержали велике поширення в промисловості й у лабораторній практиці для тривалого виміру високих температур від 300 до 1600 °С та короткочасно – до 1800 °С. Позитивний електрод – сплав з 30% родію і 70% платини, а негативний – з 6% родію і 94% платини. Градуовальне позначення цих термопар – ПР 30/6 (цифри вказують зміст родію в одному і другому термоелектродному проводі), і вони мають ті ж позитивні і негативні характеристики, що і термопари з градуванням ПП. Однак, вони відрізняються більшою стабільністю градуовальної характеристики, ніж термопари ПП, але при меншому значенні ЕРС, що розвивається, тобто мають меншу чутливість. Межа припустимої основної погрішності термопари ПР 30/6 розраховується по формулі в межах температур від 300 до 1800 °С:

$$\Delta E = 0,01 + 3,3 \cdot 10^{-5} \cdot (t - 300), \text{ мВ} \quad (2.20)$$

Хромель–копелеві термопари широко застосовуються для виміру температур різних середовищ у межах від – 50 до 600 °С. Градуоваль-

не позначення цих термопар ХК. З всіх існуючих у даний час типів термопар хромель–копелеві мають найбільшу термо-ЕРС (при температурі 600 °С вони розвивають більш 49 мВ), і, виходить, мають найбільшу чутливість. Як позитивний електрод використовується хромель – сплав на основі нікелю (89%Ni+9,8%Cr+10%Fe+0,2%Mn), а негативного – копель, сплав міді і нікелю (64% Cu+46% Ni). Термопари типу ХК можуть експлуатуватися як в окисній так і у відбудовній атмосфері у зазначеному діапазоні виміру температур і застосовуються для виміру температури продуктів згоряння в димовідводячих трактах печей, для контролю температури різних деталей, що працюють в умовах підвищених температур і в інших областях.

Хромель–алюмелеві термопари з градууювальною характеристикою ХА застосовуються для виміру температур від –200 до 1100 °С (короткочасно можна вимірювати температуру 1300 °С). Позитивним термоелектродом є хромелевий дріт, негативним служить алюмель, що представляє собою магнітний сплав на нікелевій основі (94%Ni+2%Al+2,5%Mn+1%Si+0,5% домішок). Термопари типу ХА застосовуються для виміру температури в робочому просторі теплових агрегатів (печей, котлів і ін.), температури газових середовищ, пара і рідини. Відмінною рисою цих термопар є досить висока стабільність градууювальної характеристики при високій інтенсивності іонізуючих випромінювань, що дозволяє використовувати їх при різних температурних вимірах на атомних електростанціях.

Межа припустимої основної погрішності для термопари типу ХА розраховується по формулі (у межах від 300 до 1300 °С)

$$\Delta E = 0,16 + 2,0 \cdot 10^{-4} \cdot (t - 300), \text{ мВ} \quad (2.21)$$

Вольфрам–ренієві термопари з градууювальною характеристикою ВР застосовуються порівняно рідко і призначені для тривалого виміру температур від 0 до 2200 °С, короткочасно – до 2500 °С. Найбільше поширення серед цих типів термопар одержала термопара ВР 5/20. Позитивним термоелектродом є сплав "вольфрам-реній" з 5% ренію, негативним – "вольфрам-реній" з 20% ренію. Термопари типу ВР застосовують для виміру температури розплавленої сталі. Вони можуть бути використані для виміру температури у вакуумі, у нейтральному чи відбудовному середовищі. Межі припустимої основної погрішності термопари типу ВР 5/30 розраховується по формулі (у межах температур від 1000 до 1800 °С);

$$\Delta E = 0,08 + 4,0 \cdot 10^{-5} \cdot (t - 1000), \text{ мВ} \quad (2.22)$$

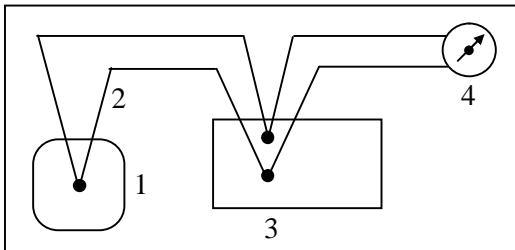
В даний час розробляються типи термопар з тугоплавких з'єднань для виміру високих і надвисоких температур, здатних працювати в різних умовах (у вакуумі, у сильноагресивних середовищах, різних розплавах солей, лугів, у рідких металах і ін.). Серед таких типів можна виділити наступні:

- термопари з молібдену з ренієм (MoRe 20/40, MoRe 20/50) застосовують для виміру температур у середовищах, що містять вуглець, тому що і Re і Mo слабо піддаються процесам карбідізації. Верхня межа виміру температур 2200 °С;

- термопари з дисіліциду молібдену (MoSi_2), дисіліциду вольфраму (WSi_2), бориду цирконія (Zr_2), карбиду титана (Ti) і графіту (C). Наприклад, термопара з електродами MoSi_2 - WSi_2 - для виміру температур до 1700 °С газових середовищ, деяких розплавлених солей, стекломас і металів; термопара з електродами C- Zr_2 - для виміру температур до 1800 °С розплавів сталі, чавуна, кольорових і рідких металів; термопара з електродами C-Ti для виміру температур до 2500 °С відбудовних, нейтральних, інертних газових середовищ у вакуумі; термопара з електродами $\text{Zr}_2\text{C-Nb}$ (цирконій-вуглець – ніобій-вуглець) і NbC-HfC (ніобій-вуглець – гафній-вуглець) для виміру температур до 3500 °С.

2.2.5 Способи підвищення якості виміру температури термопарами

Один з основних недоліків виміру температури з використанням термопар є вплив температури вільних кінців термоелектродних проводів на точність виміру температури в об'єкті. На практиці застосовується кілька способів усунення чи зменшення впливу зміни темпера-



1 – об'єкт виміру; 2 – термопара; 3 – холодильник; 4 – вимірювальний пристрій

Рисунок 2.17 – Схема стабілізації температури вільних кінців термопар із використанням холодильника

тури навколишнього середовища на термо-ЕРС термопар.

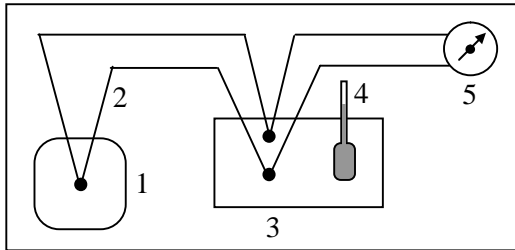
Застосування холодильника з температурою 0 °С. Самий точний метод виміру температури термопарами є розміщення вільних кінців термопар у спеціаль-

ному холодильнику, де підтримується температура 0°C (рисунок 2.17)

Такий спосіб виміру не вимагає уведення виправлення на температуру вільних кінців, і показання вимірювального приладу приймається за дійсне значення температури в об'єкті.

Як холодильник використовується невеликий ізольований від зовнішнього середовища компактний пристрій, що працює на ефекті Пельтьє, що є зворотним ефекту Зеебека. На внутрішній стінці холодильника розташовується батарея термопар, вільні кінці якої знаходяться ближче до зовнішньої поверхні. Через батарею термопар пропускають постійний струм, при цьому, робочі кінці охолоджуються, а вільні нагріваються й у такий спосіб усередині холодильника встановлюється температура 0°C при розрахунковому значенні струму, що пропускається.

Застосування термостата зі стабільною температурою (рисунок 2.18).



1 – об'єкт виміру; 2 – термопара;
3 – термостат; 4 – термометр; 5 – вимірювальний пристрій

Рисунок 2.18 – Схема стабілізації температури вільних кінців термопар з використанням термостата

Якщо при вимірі температури не потрібна підвищена точність і при цьому температура у тому місці, де розташовуються вільні кінці, не міняється помітно, то можна використовувати пасивний термостат для розміщення в ньому вільних кінців термопар. Температура в термостаті повинна вимірюватися рідинним скляним термометром для введення постійного

виправлення на температуру вільних кінців. Нижче приводиться методика розрахунку виправлення на температуру вільних кінців термопар.

Приклад 2.3. Визначити виправлення при вимірі температури термопарою з градуванням ХК, якщо вимірювальний прилад показує 360°C , а температура вільних кінців, поміщених у термостат складає $+40^{\circ}\text{C}$.

Розрахунок виправлення проводиться за наступною схемою:

- по градувальній таблиці для термопар ХК визначається термо-ЕРС при температурі вільних кінців:

$$E_{t=40^{\circ}\text{C}} = 2,66\text{мВ}$$

- по температурі, що показує вимірювальний прилад, визначається термо-ЕРС цієї ж термопари:

$$E_{t=360^{\circ}\text{C}}=29,01\text{мВ.}$$

- визначається сума термо-ЕРС:

$$E_{\text{цл}}=E_{t=40^{\circ}\text{C}}+E_{t=300^{\circ}\text{C}}=2,66+29,01=31,67\text{мВ.}$$

- по градуовальній таблиці визначається дійсне значення температури:

$$t_{\text{д}}=f(E_{\text{цл}})=403^{\circ}\text{C.}$$

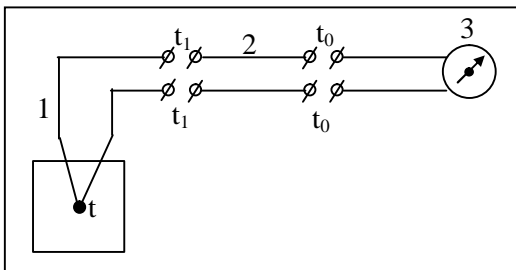
Виправлення для даного випадку виміру температури складає 3°C .

Застосування спеціальних термоелектродних проводів, що подовжують, (компенсаційних). При вимірі температури в реальних умовах виробництва з використанням термопар відстань між вимірювальним приладом (яке часто розташовується на щиті керування агрегатом) і власне термопарою складає від декількох до десятків метрів. Якщо з'єднати термопару з вимірювальним приладом, наприклад, алюмінієвими чи мідними проводами, то в точках з'єднання цих проводів і вільних кінців термопар виникнуть нові термопари, що приведе до появи паразитної термо-ЕРС. Для виключення паразитних термо-ЕРС застосовують так названі проводи, що подовжують, (чи компенсаційні), що у парі між собою повинні розвивати ту ж термо-ЕРС при температурі вільних кінців, що і сама термопара (рисунок 2.19), тобто

$$E_{(t_1, t_0)}^{\text{терм}} = E_{(t_1, t_0)}^{\text{пров}} \quad (2.23)$$

При підключенні проводів до термопари необхідне дотримання полярності.

Таким чином, при застосуванні проводів, що подовжують, відбувається перенос вільних кінців термопари з точок з температурою t_1 (ці точки знаходяться в безпосередній близькості від об'єкта, де можуть відбуватися коливання температур приблизно від 0 до 1000°C) у



1 – термопара; 2 – проводи, що подовжують;

3 – вимірювальний пристрій

Рисунок 2.19 – Схема з'єднання термопари із вимірювальним пристроєм проводами, що подовжують

точки з температурою t_0 , тобто біля клем вимірювального приладу, де температура більш стабільна.

Для кожного типу термопар застосовуються свої власні що подовжують термоелектродні проводи, що підбираються з умови формули 2.23. Рекоменде-

ндува що подовжують термоелектродні проволу для найбільш розповсюджених типів термопар приведені в таблиці 2.4, де зазначена полярність кожного проволу для правильного підключення їх до відповідного проволу термопари.

Застосування зовнішнього джерела живлення. Як було зазначено вище, підвищення температури вільних кінців термопари приводить до зменшення загальної термо-ЕРС термопари і зниженню результату виміру температури. Для компенсації втрати ЕРС термопарою застосовується зовнішнє джерело живлення, що підключається в ланцюг термопари і повинне компенсувати відсутню ЕРС. При цьому, величина значення, що компенсує, ЕРС повинна в точності відповідати тій утраті термо-ЕРС, що викликана підвищенням температури вільних кінців термопари і чим вище температура вільних кінців, тим більше значення ЕРС, що компенсує.

Таблиця 2.4 – Рекомендовані термоелектродні проволу, що подовжують

Тип термопари	Проволу, що подовжують				Позначення проволів
	позитивний		негативний		
	матеріал	колір оплетки	матеріал	колір оплетки	
ХК	Хромель	Фіолетовий	Копель	Жовтий	ХК
ХА	Мідь	Червоний	Константан	Коричневий	М
ПП	Мідь	Червоний	Сплав ТП (99,4%Cu+0,6%Ni)	Зелений	ПП
ВР	Мідь	Червоний	Сплав МН 2,4	Синій	М-МН

Пристрій зовнішнього джерела живлення, що підключається до термопари в районі перебування вільних кінців термопари, являє собою мостову схему (рисунок 2.20), три плечі R_2 , R_3 і R_4 якогь виконані з манганінового дроту, а плече R_4 з мідного дроту. Міст живиться від постійного джерела (батарея чи джерело стабілізованої напруги).

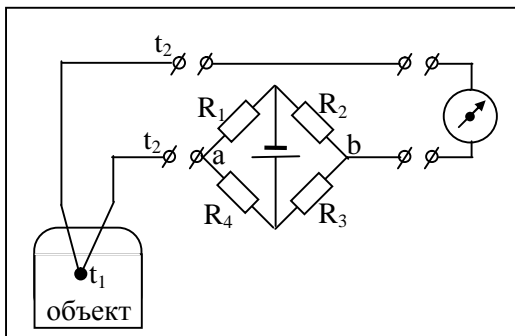


Рисунок 2.20 – Схема включення зовнішнього джерела живлення в ланцюг термопари

При температурі $t_2=0^\circ\text{C}$ міст урівноважений, напруга U_{ab} на затисках а і b дорівнює нулю, а термо-ЕРС термопари відповідає градуувальному значенню при температурі в об'єкті t_1 .

При зміні температури навколишнього середовища, а отже, і

температури вільних кінців термопар до значення t_2 , мідний резистор R_1 також збільшує свій опір до значення R'_1 . Унаслідок цього порушується рівновага моста і на затисках а і b виникає напруга U_{ab} , що автоматично компенсує зменшення термо-ЕРС термопар. Пристрої, призначені для цієї мети, виготовляються для термопар із градуванням ПП, ХА, ХК, при цьому погрішність компенсації при зміні температури вільних кінців термопар в межах $0 \dots 50^\circ\text{C}$ не перевищує $\pm 3^\circ\text{C}$.

2.2.6 Конструктивне виконання термопар

Конструкція термопар залежить від багатьох умов у тому числі від величини вимірюваної температури, від фізичних, хімічних властивостей вимірюваного середовища і його стану (твердого, рідкого, газоподібного), від мети виміру й ін. Однак, існують загальні вимоги, яким повинні задовольняти різні конструктивні елементи самої термопар:

- спай термопар (робочий кінець) повинний забезпечувати гарний контакт між двома термоелектродами термопар;
- термоелектроди по всій довжині повинні бути добре ізольовані друг від друга з використанням керамічної (Al_2O_3 , Si_2 , Mg) чи іншої ізоляції, що була б інертна до термоелектродних проводів при високій температурі;

- термопара разом з ізоляцією повинна бути поміщена в захисну газонепроникну гільзу, виконану з жаротривкої сталі при вимірі високих і середніх температур чи із щільного картону для одноразових термопар при вимірі температури рідких металевих розплавів (сталі, чавуна й ін.);

- спай робочого кінця повинний мати гарний тепловий контакт із нижньою частиною захисної гільзи (чохла) для зменшення інерційності термопар. Стандартні термопарі мають наступні значення теплової інерції: малоінерційне – 5 с, середньої інерційності – до 60 с, великої інерційності – до 180 с.

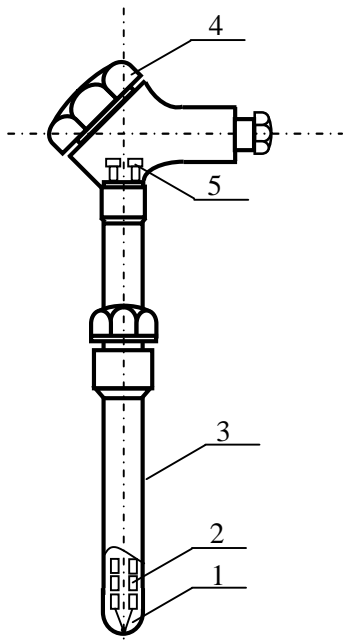


Рисунок 2.21 – Конструктивне виконання одного із видів термопар

- конструкція лабораторних термопар (підвищеної точності) повинна забезпечувати можливість термостатування вільних кінців.

В даний час найбільш раціональними і такими, що зарекомендували себе при тривалій експлуатації в промисловості, є стандартні термопари (термоелектричні термометри) (рисунк 2.21). Для захисту від механічних ушкоджень і впливів середовища, температура якого вимірюється, термопарні проводи (термоелектроди), ізольовані друг від друга вогнетривкою керамікою 2, містяться в спеціальну захисну арматуру. Термоелектроди розташовані так, що їхній спай 1 торкається захисного чохла 3. На кінці захисного чохла кріпиться голівка термопари 4. У голівці розташовані затиски 5 для з'єднання термоелектродів з вимірювальним приладом.

Робочий спай найчастіше виготовляється шляхом зварювання, а для вольфрам-ренієвих термоелектродів застосовують скрутку. В окремих конструкціях термоелектроди приварюють до захисного чохла. Як ізоляцію термоелектродів найбільше поширення при температурах до 1300 °С одержали порцелянові одно- та двоканальні трубки і намист, а для більш високих температур застосовують намист з окису алюмінію (Al_2O_3).

Захисні чохла виготовляються найчастіше з різних марок сталі для температур до 1000 °С. При більш високих температурах застосовуються спеціальні чохла з тугоплавких з'єднань: дибориду цирконію з молібденом (ZrB_2+Mo) для виміру температури сталі, чавуна і відбудовного газового середовища до 2200° С; дисилициду молібдену ($MoSi_2$) для виміру температури розплавленого скла й окисного газового середовища до 1700 °С.

Велике поширення останнім часом одержали термопари кабельного типу (термопари типу КТМС). Вони являють собою два термоелектродних проводи, поміщених у тонкостінну металеву оболонку. Як ізоляційний матеріал, що відокремлює термоелектроди друг від друга і від оболонки, використовується порошок з Mg чи Al_2O_3 . Такі термопари випускаються з маркіруванням ХА і ХК при зовнішньому діаметрі оболонки від 0,5 до 6 мм при як завгодно великій довжині для виміру температури від -200 до 1100° С.

Основними перевагами термопар кабельного типу є:

- можливість використання їх без застосування проводів, що подовжують, тобто саму термопару можна виготовити будь-якої необхідної довжини;

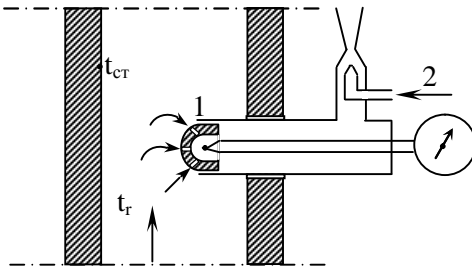
- гнучка оболонка термопари дозволяє прокладати її в будь-яких умовах діючого агрегату (об'єкта);

- застосування їх при тиску зовнішнього середовища до 40 МПа (400 ат);
- радіаційна стійкість, що дозволяє їм працювати в енергетичних реакторах атомних електростанцій;
- мала інерційність і невелика вага на одиницю довжини, що дає можливість ефективно використовувати їх у системах автоматики для керування теплоенергетичними агрегатами з швидкоплинними тепловими процесами (парові котли, парові і газові турбіни й ін.).
- підвищена стійкість до теплових ударів, вібрації і механічного навантаження.

Зазначені переваги кабельних термопар дозволяють ефективно використовувати їх у різних промислових установках для виміру температури твердих, рідких і газоподібних середовищ.

Особливі труднощі виникають при вимірі температури газових середовищ: продуктів згоряння в борах, повітря на виході з теплообмінників, доменного, коксового, генераторного газу на виході з агрегатів і ін. Це зв'язано з особливостями теплообміну в системі трьох середовищ: стінка каналу, газове середовище, спай термопари.

У реальних умовах при русі газового середовища в каналах температура газу завжди відрізняється від температури стінки каналу і звичайна термопара покаже проміжну температуру між $t_{ст}$ і t_r (рисунок 2.22).



1 – вогнетривкий екран; 2 – інжектор;
Рисунок 2.22 – Вимір температури газового середовища термопарою, яка відсмоктує

термопари. Крім того, спай термопари екранується від випромінювання стінки каналу за допомогою спеціальної насадки 1 з отворами для проходу газового середовища. Термопара, що відсмоктує, дозволяє різко збільшити точність виміру температури газового середовища.

Для роботи термопар, що відсмоктують, потрібна досить велика витрата стиснутого повітря чи пари, тому вони застосовуються пері-

Для визначення дійсної температури газового середовища застосовують так названу термопару, що відсмоктує. У цій конструкції термопари газове середовище за допомогою інжектора 2 з великою швидкістю (80...120 м/с) протікає через спай термопари і при цьому значно збільшується конвективна теплопередача від газу до

одично при проведенні іспитів, налагоджувальних робіт теплоенергетичних агрегатів, а також для внесення виправлень при визначенні температури газових середовищ звичайними стандартними термопарами, установленими стаціонарно.

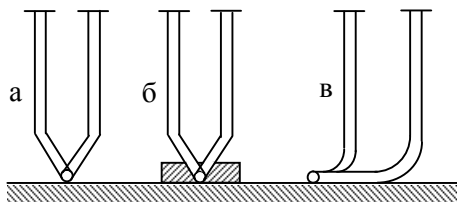
Вимір температури поверхонь. У реальних умовах експлуатації теплоенергетичних агрегатів часто виникає необхідність контролю температури поверхонь окремих вузлів вогнетривкої кладки, пальникових пристроїв, балок, фурм різного призначення й ін. Найчастіше для цієї мети застосовують так називані поверхневі термопари. Так, на теплових електростанціях для контролю температури поверхонь металу барабана, вихідних колекторів пароперегрівачів, окремих змійовиків пароперегрівача й окремих крапок паропроводів парогенераторів застосовують тільки поверхневі термопари.

При вимірі температури поверхонь необхідно виконати дві умови:

- чуттєвий елемент термопари (робочий кінець) повинен мати гарний тепловий контакт із поверхнею об'єкта;
- термопара не повинна охолоджувати своєю присутністю місце виміру температури.

Для забезпечення гарного теплового контакту застосовують різні способи в тому числі зачеканку спаю на поверхні об'єкта, приварювання і приклеювання робочого кінця до поверхні й інші. З метою зменшення спотворення температурного поля поверхні об'єкта виміру необхідно створити такі умови, щоб не було додаткового теплообміну в місці виміру температури поверхні.

На рисунку 2.23 показані різні способи виміру температури поверхні нагрітого тіла за допомогою термопари. Найбільш несприятливий варіант установки термопари показаний на малюнку 2.23а. У цьому випадку термоелектроди термопари відводять тепло як від робочого кінця, так і від тієї частини поверхні, температура якої повинна бути обмір



рювана. Тому такий спосіб установки не може бути рекомендований.

Варіант “б” дозволяє більш точно вимірити температуру завдяки ізоляційній пластинці, що

Рисунок 2.23 – Засоби встановлення термопари на поверхні

зменшує втрати тепла від спаю термопари, однак, у цьому способі витік тепла по термоелектродам не усувається.

Для зменшення погрішності за рахунок тепловідводу до мінімуму термопару необхідно встановлювати на поверхні тіла (варіант “в”). У цьому способі термоелектроди прокладаються на поверхні на довжину не менш 150 – 200 їх діаметрів. У цьому випадку тепловідвод безпосередньо від робочого кінця термопару значно зменшується.

Вимір температури металу труб парових котлів. Основним показником, що визначає надійну роботу котлів, є температурний режим труб поверхонь нагрівання. Максимальна температура труб, що обігріваються, не повинна, виходячи з умови тривалої міцності, перевищувати припустиму температуру для даної марки сталі, з якої виготовлена труба.

Температура труби є параметром, що підсумовує вплив цілого ряду факторів: умов обігріву (значення і розподіл теплового потоку), термодинамічного стану середовища й умов охолодження (теплообмін у середині труб), стану зовнішньої і внутрішньої поверхонь, а також умов експлуатації котла (підйом і скидання навантаження, робота на ковзному тиску) і т.д. При цьому, виникає задача виміру температури металу труб поверхонь нагріву, розташованих у топковій камері, зоні високих газових температур (пароперегрівник) і конвективній шахті, зоні помірної температури.

Найбільш складною задачею при цьому є вимір температури металу екранних труб у топковій камері через те, що робочий спай термопару і її виводів розташовуються в середовищі агресивних топкових газів, що мають високу температуру.

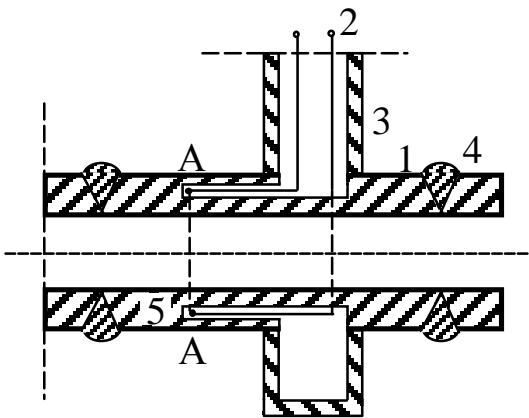


Рисунок 2.24 – Схема температурної вставки в екранній трубі для розташування термопару

Вимір температури металу труб пароперегрівника також є досить складною задачею. У цьому випадку з'являються додаткові труднощі, що визначаються віддаленістю крапок виміру від обмуровування. Для могутніх казанів ця відстань може перевищувати 8-10 м.

В даний час відомі різні конструкції пристроїв для виміру температури металу труб у зоні обі-

гріву. Ці пристрої прийнятий називати температурними вставками. Усі конструкції температурних уставок за принципом закладки в них гарячого спаю термопари можна розділити на вставки зі свердліннями в стінці труби і вставки з фрезерованою канавкою.

Вставка виготовляються з відрізка екранної труби $\varnothing 32 \times 6$ мм (сталь 12Х1МФ) (рисунок 2.24). У середині вставки 1 розташовується подовжня кільцева канавка, у якій знаходяться термоелектродні проводи термопари 2. Вільні кінці термопари виводяться за межі екранної труби 4 і за межі котла за допомогою відвідної трубки 3. Робочі кінці термопари розміщуються в перетині А – А на відстані 1,5 мм від зовнішньої поверхні труби. Термоелектродні проводи ($\varnothing 0,5$ мм) термопари мають градування ХА (хромель-алюмель) і ізолюються по всій довжині до робочого кінця (до спаю термопари). Надійний контакт спаю 5 зі стінками труби температурної вставки забезпечують ударом керна в зоні розташування спаю термопари.

Описана конструкція вставки забезпечує вимір температури металу на глибині $\delta=1,5$ мм. Температура металу на поверхні температурної вставки а, виходить, і на поверхні екранної труби, з достатньої для практичних розрахунків точністю може бути знайдена по формулі:

$$t_{\text{пов}} = t_{\text{вим}} + \frac{q}{\lambda} \delta, \quad (2.24)$$

де $t_{\text{вим}}$ - температура металу, обмірювана на глибині 1,5мм;

q – тепловий потік на поверхні екранної труби, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$;

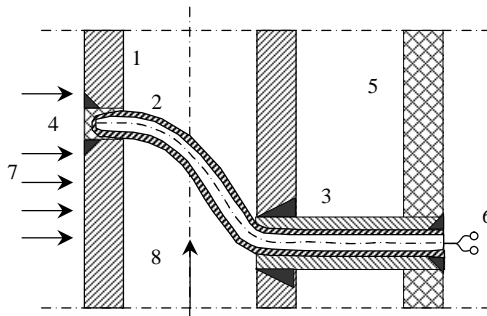
λ – коефіцієнт теплопровідності металу труби, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Загальна погрішність визначення температури зовнішньої стінки труби складається з неточності установки термопари і перерахування, і з імовірністю 0,95 не перевищує ± 5 °С.

В даний час широко застосовуються кабельні термопари типу КТМС у металевій оболонці з нержавіючої сталі. Ці термоелектричні перетворювачі володіють поруч достоїнств – вони виконані з тонкого термоелектрода ($\varnothing 0.2 - 0.3$ мм) і характеризується малою інерційністю, зберігаючи при цьому високу міцність і гнучкість, і тому їх варто рекомендувати при виготовленні цілого ряду температурних уставок. На малюнку 2.25 показана схема установки термопари КТМС у температурній вставці екранної труби. Такий спосіб виміру температури поверхні екранних труб дуже ефективний для контролю температурного стану екранів у зоні високих теплових навантажень парового котла.

2.2.7 Компенсаційний метод виміру термо-ЕРС термомпари

Компенсаційний метод одержав широке поширення при вимірі температури з використанням термопар. Суть методу полягає в зрівноважуванні (компенсації) ЕРС термопари відомою напругою, створюваною стороннім джерелом. Цей метод дозволяє вимірювати термо-ЕРС більш точно, тому що в момент виміру струм у ланцюзі термопари дорівнює нулю і виключається погрішність, зв'язана з впливом температури навколишнього середовища на опір зовнішнього ланцюга. Прилади, що використовують даний принцип, одержали назва «потенціометри».



1 – температурна вставка в екрані трубу; 2 – кабельна термопара; 3 – вивідна трубка; 4 – пробка; 5 – обмурівка котла; 6 – вивідні кінці термопари; 7 – газове середовище котла; 8 – пара.

Рисунок 2.25 – Температурна вставка для виміру температури екранних труб в зоні високих температур

На рисунку 2.27 показана найпростіша схема потенціометра, що складається з дільника напруги R , джерела живлення B , нуляль-гальванометра $НГ$ і термопари T . При вимірі температури термопара розвиває ЕРС, що підключається назустріч напрузі U , що знімається з частини $г$ дільника напруги. Переміщаючи движок дільника, можна знайти положення, коли $E=U$. У цьому випадку термо-ЕРС E буде урівноважена спаданням напруги U на ділянці $г$ дільника напруги, і струм у ланцюзі термопари буде відсутній. Стрілка нуляль-гальванометра покаже нуль. Головна перевага компенсаційного методу полягає в тім, що опір термопари і провідників, що підводять, не роблять впливу на

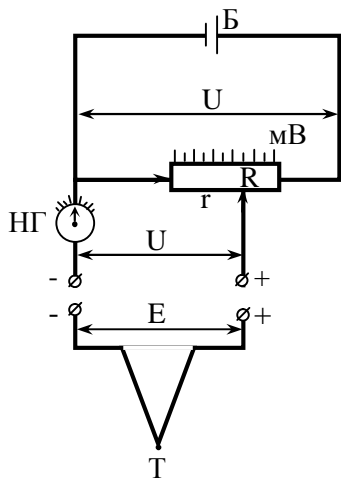


Рисунок 2.27-Компенсаційний метод виміру термо-ЕРС

стання переваги компенсаційного методу необхідно, щоб через дільник напруги протікав той самий струм (градуювальний).

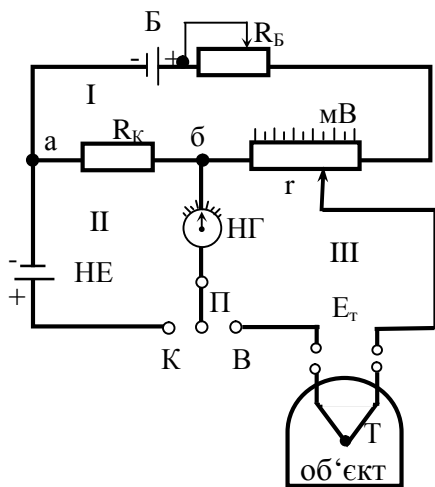


Рисунок 2.28 – Потенціометр з постійною силою робочого струму

вимір, що вигідно відрізняє цей спосіб виміру від способу з використанням мілівольтметра, розглянутого вище. Тому компенсаційний метод одержав широке поширення при вимірі термо-ЕРС термопар, що мають різне градування і різний власний опір.

Точність виміру ЕРС термопар компенсаційним методом залежить від стабільності струму в ланцюзі дільника напруги, тобто величина струму визначає стабільне значення напруги, що знімається з будь-якої точки дільника, тому що $U=I \cdot r$.

Для більш ефективного використання переваги компенсаційного методу необхідно, щоб через дільник напруги протікав той самий струм (градуювальний). З цією метою використовується електрична схема, у якій мається контрольне джерело напруги, так називаний «нормальний елемент», за допомогою якого можна встановлювати градувальний струм у ланцюзі дільника напруги. Така схема одержала назву «потенціометр із постійною силою робочого (градуювального) струму в ланцюзі дільника напруги» (рисунки 2.27, 2.28).

Потенціометр складається з трьох контурів: вимірювального I, нормального елемента II, і термопар III. Прилад живиться від джерела живлення Б, значення робочого струму якого може змінюватися перемінним резистором

R_B . Для точної установки робочого струму спадання напруги на резисторі R_k порівнюється з ЕРС нормального елемента. Нормальний елемент – це електрохімічне джерело з постійним значенням ЕРС, величина якого дорівнює 1,0186 В та не змінюється протягом тривалого часу. Однак нормальний елемент має малу потужність і його можна використовувати тільки як контрольне джерело напруги, тобто він застосовується як еталон постійної ЕРС.

Перед тим, як вимірити температуру, встановлюють стандартне (градуювальне) значення струму за допомогою опору R_B . Перемикач П знаходиться в цьому випадку в положенні К – контроль. Переміщаючи движок опору R_B , встановлюють стрілку нуль-гальванометра в нульове положення, що відповідає рівності ЕРС нормального елемента спаданню напруги на резисторі R_k , тобто

$$E_{н.е.} = U_{аб} \quad (2.25)$$

Тому що $U_{аб} = I \cdot R_k$, де I – струм у контурі 1, то в цьому контурі встановиться стандартне значення струму, рівне

$$I = \frac{E_{н.е.}}{R_k} = \text{const} \quad (2.26)$$

Після операції стандартизації робочого струму I перемикач П переводять у положення В – вимір, при цьому, нуль-гальванометр включається в контур термопари. У цьому випадку порівнюється ЕРС термопари зі спаданням напруги на ділянці r дільника напруги R_p . Переміщаючи движок R_p , домагаються встановлення стрілки нуль-гальванометра в нульову позицію. При цьому, настає повна компенсація невідомого значення ЕРС термопари E_t відомим потенціалом на опорі r , тобто

$$E_t = I \cdot r \quad (2.27)$$

Таким чином, стрілка движка на реохорді (інша, більш відома, назва дільника напруги), що відградує по довжині в мілівольтах, укаже на значення ЕРС термопари. Знаючи по таблиці градирувальну характеристику даного типу термопари, визначають значення температури в об'єкті.

Застосування потенціометра з постійною силою робочого струму для виміру термо-ЕРС має наступні переваги:

- незалежність показань від зміни опору зовнішнього ланцюга;
- підвищення точності виміру за рахунок підвищення точності установки робочого струму (точність установки визначається точністю $E_{н.е.}$ і R_k , погрішність яких не перевищує відповідно

0,01% і 0,02%). Гранична погрішність потенціометрів складає 0,05% і менш.

На практиці одержали велике поширення автоматичні потенціометри, що виключають участь людини в проведенні операцій компенсації вхідного сигналу термопарі. Вимірювальна схема автоматичного потенціометра не відрізняється принципово від схеми потенціометра з ручним зрівноважуванням.

На рисунку 2.29 приведена спрощена схема пристрою автоматичного потенціометра. ЕРС термопарі E_T порівнюється з напругою, що компенсує, U_k , яка знімається з діагоналі с-d невірноваженого вимірювального моста. Мостова вимірювальна схема є більш досконалою і дозволяє автоматично вводити виправлення на температуру вільних кінців термопарі. Уведення виправлення здійснюється додаванням у схему мідного резистора R_M , температура якого дорівнює температурі вільних кінців термопарі. Спадання напруги на резисторі R_M у точності дорівнює ЕРС термопарі (конкретного градуювання) при температурах її вільних кінців. Таким

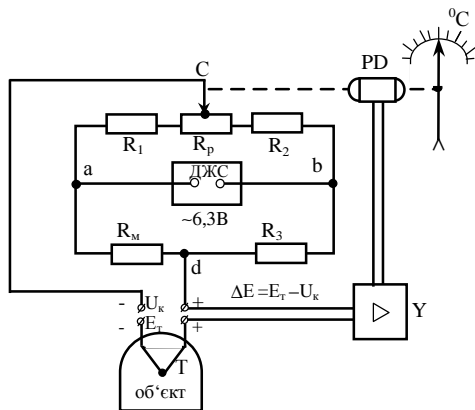


Рисунок 2.29 – Спрощена вимірювальна схема автоматичного потенціометра

чином, будь-які зміни ЕРС термопарі приводять до переміщення движка реохорда R_p , тобто прилад безупинно автоматично компенсує вимірюваний сигнал відомою напругою на частині реохорда.

чином, автоматично вводиться корекція на температуру вільних кінців термопарі, яка змінюється, за рахунок додаткової напруги, що знімається з резистора R_M . При вимірі температури в об'єкті, на вхід підсилювача подається різниця потенціалів, що дорівнює:

$$\Delta E = E_T - U_k \quad (2.28)$$

Посилений сигнал подається на реверсивний двигун РД, що одночасно переміщає движок реохорда R_p і стрілку

приладу. Переміщення движка R_p буде відбуватися доти, поки ΔE не стане рівною нулю. При цьому, двигун зупиниться і по положенню стрілки на шкалі приладу вимірюється температура в об'єкті. Таким чином, будь-які зміни ЕРС термопарі приводять до переміщення движка реохорда R_p , тобто прилад безупинно автоматично компенсує вимірюваний сигнал відомою напругою на частині реохорда.

Автоматичні потенціометри випускаються різних модифікацій: потенціометри, що показують (типу КВП1, КПП1); самописні зі стрічковою чи круглою діаграмою (типів КСП4, КСП3); одно- і багатоточечні (2, 3, 12 каналів); малогабаритні (типу КСП2); мініатюрні (типи КСП1); регулюючі, з вихідними пристроями дистанційної передачі показань; з різним часом пробігу стрілки всієї шкали (у секундах: 1,0; 2,5; 5; 10; 16)

Клас точності серійних автоматичних потенціометрів 0,25; 0,5; 1,0. Градування шкали виконується або в градусах Цельсія з одночасною вказівкою на шкалі типу застосовуваної терморпарі чи радіаційного термометра, або в мілівольтах.

Нижче на рисунку 2.30 приведена типова принципова схема одноточечного автоматичного потенціометра. На цій схемі прийняті наступні позначення: R_p - реохорд, $R_{ш}$ – шунт реохорда, який служить для підгонки опору реохорда до заданого нормованого значення, R_o - токовідводячий реохорд; R_n – резистор для встановлення діапазону виміру температури; $R_{н}$ – резистор для встановлення початкового значення шкали; R_6 – резистор баластовий, для установки при різних градуваннях визначеного значення опору верхньої галузі вимірювальної схеми; R_m – допоміжний резистор з мідного дроту для автоматичного уведення виправлення на зміну ЕРС терморпарі при змінах температури його вільних кінців; R_k – контрольний резистор з опором 509,5 Ом для всіх потенціометрів, що випускаються, який служить для контролю робочого струму у вимірювальній схемі при градуванні приладу чи його перевірці; ДЖС – джерело живлення стабілізоване;

$R' R''$ – резистори в ланцюзі ДЖС для обмеження і регулювання робочого струму при градуванні чи перевірці приладу; опори $R_{\phi 1}, R_{\phi 2}, R_{\phi 3}$ і конденсатори C_1, C_2, C_3 утворять фільтри, що усувають наведення і перешкоди, що виникають у проводах між терморпарою і потенціометром під дією зовнішніх електромагнітних полів; ВП – віброперетворювач для перетворення сигналу розбалансу в перемінну напругу; П – електронний підсилювач; РД – реверсивний двигун; 1-2 – затиски, до яких при градуванні приладу чи його перевірці приєднують нуль-гальвонометр і нормальний елемент.

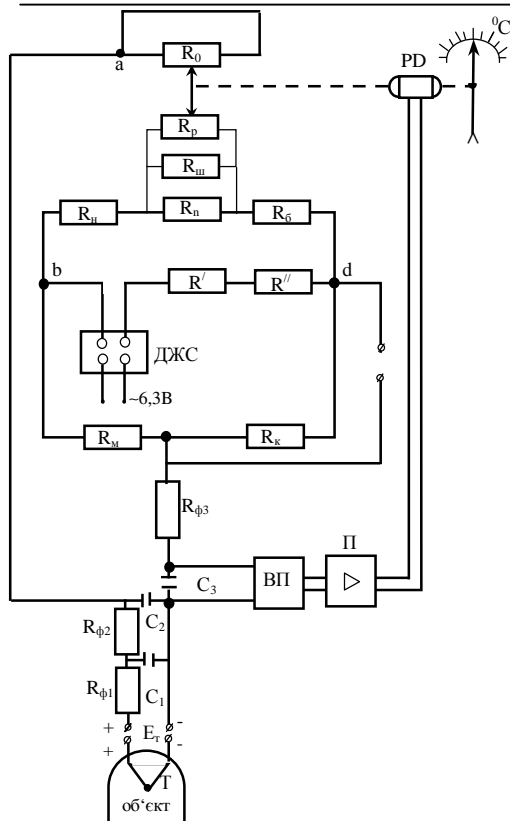


Рисунок 2.30 – Повна вимірювальна схема автоматичного потенціометра

Для підвищення надійності роботи двигок реохорда забезпечується контактами, виконаними зі сплаву золото-срібло-мідь. Надійність контакту, а, отже, і роботи реохорда забезпечується також чистотою контактних поверхонь, захистом від забруднень і необхідним контактним тиском.

Робота автоматичного потенціометра здійснюється в такий спосіб. ЕРС термопарі врівноважується спаданням напруги на ділянці "с". Це зрівноважування відбувається автоматично. Якщо $U_{ac} \neq E_T$, то на вхід електронного підсилювача надходить різниця сигналів $\Delta E = U_{ac} - E_T$, що підсилюється по напрузі і по потужності. Результуючий вихідний сигнал електронного підсилювача надходить на реверсивний двигун РД, що переміщає двигок реохорда R_p таким чином, що ΔE починає зменшуватися до нуля, тобто $U_{ac} = E_T$. При цьому, реве-

Усі резистори вимірювальної схеми автоматичних потенціометрів, крім R_M , виготовляють зі стабілізованого манганінового дроту. У потенціометрах, що працюють у комплекті з термопарами градувань ПП, ХА, ХК і інших, резистор R_M знаходиться в безпосередній близькості від вільних кінців термопар.

Реохорд автоматичного потенціометра є відповідальним вузлом. Основні елементи реохорда – робоча спіраль R_p і струмовідвід R_0 (допоміжна спіраль). У потенціометрах типу КПП, КСП і інших, що випускаються в даний час, робочу і допоміжну спіралі виготовляють зі сплаву паладію і вольфраму, що має велику стійкість проти стирання й окислювання в порівнянні з реохордом з манганінового дроту.

рсивний двигун зупиниться і стрілка вимірювального приладу, механічно зв'язана з двигуном, вкаже обмірювану температуру.

Автоматичні потенціометри типу КСП можуть здійснювати дистанційну передачу показань реостатними датчиками чи за допомогою пневматичних, токових, частотних і феродинамічних перетворювачів. У прилади окремих модифікацій вбудовуються пристрої, що сигналізують і регулюють. Середній термін служби приладів до середнього ремонту не менш 10 років.

Поряд з автоматичними потенціометрами, що використовують компенсаційну вимірювальну схему з реохордом, випускаються автоматичні безреохордні потенціометри. У цих приладах також використовується компенсаційний принцип виміру ЕРС термопари, але напруга, що компенсує, залежна від кута повороту вихідного вала виконавчого механізму, виробляється безконтактним пристроєм. Спрощена схема автоматичного безреохордного потенціометра представлена на рисунку 2.31.

Основним елементом приладу є електронний блок ПЧН – перетворювач частотного сигналу $f_{\text{вих}}$ у напругу, що компенсує, U_k постійного струму. При рівності U_k і вимірюваної термо-ЕРС термопари виконавчий механізм системи потенціометра, що стежить, знаходиться в спокої. Якщо вимірювана ЕРС термопари не дорівнює напрузі U_k , що компенсує, то сигнал розбалансу $\Delta E = E_T - U_k$ подається на вхід підсилювача, де перетвориться в напругу перемінного струму і підсилиться

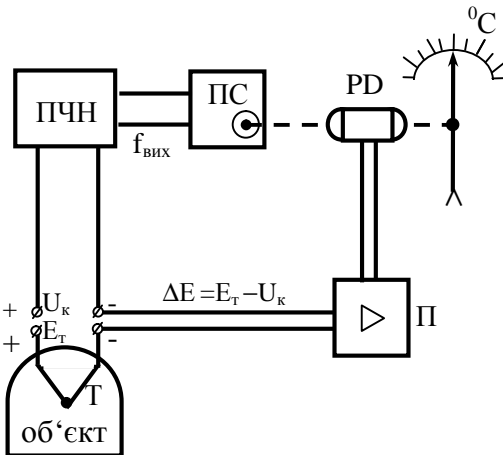


Рисунок 2.31 – Спрощена схема автоматичного безреохордного потенціометра

ся до значення, достатнього для приведення в дію реверсивного двигуна. Вал реверсивного двигуна повертає вісь перетворювача сигналу ПС, що виробляє вихідний сигнал $f_{\text{вих}}$, пропорційний куту повороту вхідної осі. Цей сигнал надходить на вхід електронного блоку ПЧН, де перетвориться в напругу постійного струму U_k .

Вал реверсивного двигуна повертає вхідну вісь перетворювача ПС і

переміщає покажчик на шкалі доти, поки напруга, що компенсує, не буде дорівнювати вимірюваній ЕРС термопар.

Автоматичні безреохордні потенціометри поки не одержали широкого поширення, мають достатні перспективи застосування через основну перевагу перед іншими приладами – це відсутність дорогого і часто ненадійного реохорда. Прилади випускаються у виді мініатюрних одноточечних агрегатів, що показують, і самописних апаратів типу ЕПП і ЕПС, що мають клас точності 0,5 і 1,0.

Потенціометри можуть бути оснащені наступними додатковими пристроями: одним чи двома передавальними перетворювачами типів ПФ, ПС чи ПП; чотирьохконтактним пристроєм, що сигналізує (регулюючим), що дозволяє здійснювати попередню й аварійну сигналізацію, двохпозиційне регулювання й інші операції.

2.2.8 Термометри опору

Принцип дії термометрів опору заснований на використанні залежності електричного опору різних матеріалів (у першу чергу металів) від температури. Знаючи дану залежність, по зміні величини опору термометра, судять про температуру середовища, у яке він занурений.

Як матеріали для виготовлення чутливих елементів термометрів опору використовуються чисті метали: платина, мідь, нікель і напівпровідники. Електричний опір металу збільшується з підвищенням температури в зв'язку зі зростаючим хаотичним рухом вільних електронів, обумовленим збільшенням теплових коливань атомів біля своїх положень рівноваги. У напівпровідниках, на відміну від металів, електричний опір зменшується при збільшенні температури, що зв'язано з різким зростанням числа електронів провідності.

До матеріалів (металів і напівпровідників), застосовуваним для виготовлення термометрів опору, пред'являються обов'язкові вимоги – це стабільність градуовальної характеристики і відтворюваність результатів виміру протягом тривалого часу. Інші характеристики, такі як висока чутливість, лінійність градуовальної характеристики, великий питомий опір і інші є бажаними.

З великого числа чистих металів і сплавів для виготовлення термометрів опору в даний час застосовуються високочисті мідь, платина, нікель.

Мідні термометри опору типу ТСМ застосовуються для тривалого виміру температури від -200 до $+200$ °С. Опір міді змінюється практично лінійно при зміні температури:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha_t), \quad (2.29)$$

де R_t, R_0 – опір термометра при температурі t і 0 °С;

α – температурний коефіцієнт електричного опору мідного дроту,
 $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

До достоїнств міді варто віднести низьку вартість, лінійну залежність опору від температури, можливість одержання тонкого дроту високої чистоти й у різній ізоляції. Недолік мідних термометрів опору полягає в малому питомому опорі ($\rho_0=0,0155 \cdot 10^{-6}$ Ом·м) і значному окислюванні міді при високих температурах через руйнування ізоляції. По точності виміру температури мідні термометри опору підрозділяються на два класи: II і III, з номінальним опором при 0 °С, що складає 53 і 100 Ом і яким привласнене позначення градуювання відповідно гр 23 і гр 24. Відхилення опору ТСМ, що допускається, від номінального значення для обох класів точності складає $\pm 0,1$ %, а межа основної погрішності, що допускається, для термометрів II класу дорівнює $0,5$ °С, і III класу – 2 °С.

Платинові термометри опору (ТСП) використовуються для виміру температури від -260 до $+750$ °С, а в окремих випадках, наприклад, у метрологічній практиці, до 1100 °С. Чиста платина найбільшою мірою відповідає всім основним вимогам, пропонованим до металів для виготовлення чуттєвого елемента термометрів опору. Це дозволяє вважати платиновий термометр опору найбільш точним з числа первинних перетворювачів, призначених для виміру температур у зазначеній області для цих приладів. До недоліків платини варто віднести відхилення від лінійного закону залежності її опору, від температури. Наприклад, для інтервалу температур від 0 до 630 °С ця залежність може бути описана вираженням

$$R_t = R_0 (1 + A \cdot t + B \cdot t^2), \quad (2.30)$$

а на інтервалі від -183 до 0 °С – вираженням:

$$R_t = R_0 [1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3 (t - 100)] \quad (2.31)$$

Постійні A, B, C визначаються в точках кипіння води, сірки і ксию і використовуються при градуюваннях термометрів опору.

Платинові термометри опору виготовляються з наступними опорами при 0 °С: 1, 5, 10, 50, 100, 500 Ом, яким привласнені наступні умовні позначки номінальної статичної характеристики перетворення: 1П, 5П, 10П, 50П, 100П та 500П. Термометри з низьким електричним опором (1П, 5П, 10П) застосовуються в основному для виміру високих температур, а з більш високим – для виміру низьких температур.

Платинові термометри опору в залежності від їхнього призначення розділяються на три основні групи: еталонні, зразкові (1-го і 2-го розрядів) і робочі (технічні і лабораторні). Технічні термометри призначаються для тривалого виміру температури від -200 до 650 °C із номінальними значеннями опорів при 0 °C (R_0), рівними 10, 46, 100 Ом, яким приписане позначення градування відповідно гр20, гр21, гр22.

Нікелеві термометри опору (ТСН) мають перспективу застосування, тому що мають високий температурний коефіцієнт електричного опору і великий питомий опір, що дозволяє виготовляти досить малогабаритні термометри з малою інерційністю. Розроблені і застосовуються термометри 3-го класу для виміру температури в діапазонах від -60 до $+180$ °C. До числа недоліків нікелю варто віднести значну

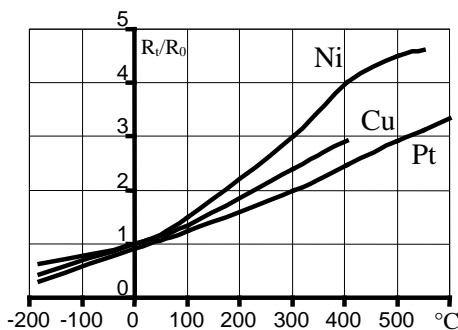


Рисунок 2.32 – Залежність відношення R_t/R_0 для нікелю, міді та платини від температури

окислюваність при високих температурах і велику залежність температурного коефіцієнта опору від ступеня чистоти металу. Крім того, залежність опору нікелю від температури має різко нелінійну характеристику (рисунок 2.32).

Крім металів для виготовлення термометрів опору застосовують напівпровідникові матеріали: германій, окисли міді, марганцю, ко-

бальту, магнію, титана і їх суміші. Більшість напівпровідникових термометрів опору має великий питомий опір, тому можна виготовляти дуже малі по розмірах чутливі елементи.

Залежність опору напівпровідникового термометра опору визначається вираженням:

$$R_T = R_0 \cdot \exp\left(B \frac{T_0 - T}{T_0 \cdot T}\right), \quad (2.32)$$

де R_0 – опір термометра при $T_0=293$ К;

B – коефіцієнт, що залежить від матеріалу напівпровідника, з якого виготовляється термометр.

Найбільше поширення одержали германієві термометри опору для виміру криогенних температур від 1,5 К до 90 К. Межі погрешностей робочих термометрів, що допускаються, складають від $\pm 0,05$ до

$\pm 0,1$. Еталонний германієвий термометр опору відтворює і зберігає одиницю температури в діапазоні від 4,2 до 13,81 К.

Для виміру температур від -100 до $+300$ °С застосовуються окисні напівпровідникові термометри опору (терморезистори). Форма і види чуттєвих елементів, що виготовляються, терморезисторів залежить від способу й умови їх застосування. Найбільш розповсюдженими видами терморезисторів є циліндричні, шайбові і бусинкові, що робить їх малоінерційними і придатними для виміру швидкоплинних теплових процесів. Крім того, напівпровідникові термометри опору можна використовувати в якості безконтактних температурних сигналізаторів (термореле). Це викликано тим, що вони мають здатність змінювати свій опір стрибкоподібно в кілька разів при досягненні визначеної температури, що викликає відповідне збільшення струму і спрацьовування системи сигналізації.

Широке використання напівпровідникових термометрів опору обмежується рядом недоліків, які вони мають. До них, насамперед, відноситься відсутність взаємозамінності терморезисторів, які виготовляються в даний час, через великий розкид характеристик навіть для того самого типу термометра. Це виключає можливість одержання єдиної градуовальної таблиці для даного типу термометра. Крім того, нелінійний характер залежності електричного опору від температури, нестабільність характеристики, вплив умов виміру температури даного середовища приводять до додаткової погрішності виміру температури.

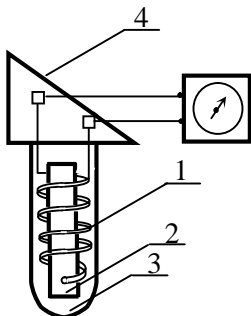
Перспективним напрямком в області конструювання термометрів опору є використання тонкоплівкової технології для виготовлення чуттєвих елементів термометрів. Особливістю технології є напилювання тонкого шару металу заданої конфігурації на ізолюючу підкладку. Як матеріал для виготовлення чуттєвих елементів використовується порівняно недорогий чистий нікель.

Нікелеві тонкоплівкові термометри опору мають ряд переваг:

- мінімальні розміри, що дозволяє забезпечити відносно високу швидкодію при досить високій точності перетворення;
- висока стабільність температурного коефіцієнта опору;
- низька вартість.

Діапазон вимірів при використанні нікелевих термометрів опору складає від -40 до 150 °С в довгостроковому режимі, при цьому, погрішність виміру не перевищує $\pm 0,3\%$. Висока довгострокова стабільність дозволяє використовувати такі датчики температури в системах контролю енергетичних установок, обліку витрати тепла в системах опалення і гарячого теплопостачання й ін.

Промисловість випускає уніфіковані конструкції термометрів опору для виміру температури рідких і газоподібних середовищ. Чуттєвий елемент металевого термометра складається з дроту чи стрічки, що намотана на каркас зі скла, кварцу, кераміки, слюди чи пластмаси (рисунок 2.33). Для зменшення впливу зовнішніх електричних і магнітних полів дротовий опір 1 намотують на каркас 2 біфілярно (тобто здвоєним проводом). При такому способі намотування утворюються два соленоїди, розташованих один в іншому, і напрямки струмів у них завжди протилежні, що робить таке намотування безіндукційним. Простір між корпусом і дротовою спіраллю заповнено порошком окису алюмінію.



1 – дротовий опір; 2 – каркас; 3 – корпус; 4 – з'єднувальна голівка; 5 – вимірювальний прилад.
Рисунок 2.33 – Конструкція термометру опору

Платинові термометри опору виготовляються з дроту діаметром 0,03–0,1 мм, мідні – із дроту діаметром 0,05–0,1 мм. Безіндукційне намотування забезпечує можливість включення термометра опору в схему виміру з приладами, що живиться постійним чи перемінним струмом.

Металеві термометри опору використовуються для виміру температури повітря, газоподібного і рідкого палива, кисню, що охолоджує металеві конструкції агрегату води, пари, низькотемпературних продуктів згоряння й ін.

2.3 Безконтактні термометри

2.3.1 Основні закони випромінювання

Оптична пірометрія заснована на законах теплового (електромагнітного) випромінювання тіл і в порівнянні з іншими методами виміру температури має ряд переваг:

- теплоприймач (чуттєвий елемент) не знаходиться в об'єкті, температура в якому вимірюється. Такий метод називається безконтактним, тобто чуттєвий елемент безпосередньо не контактує з об'єктом (водою, паром, газом, твердим тілом і ін.), не вносить викривлення в температурне поле об'єкта і не піддається шкідливому впливу з боку об'єкта;

- практично необмежений діапазон вимірюваних температур від найнижчих до надвисоких. Надвисокі температури (вище 3000 °С) можна вимірити тільки методами оптичної пірометрії;
- швидке одержання інформації про тепловий стан об'єкта завдяки малій тепловій інерції чуттєвих елементів, використовуваних в оптичній пірометрії.

Оптична пірометрія має також і недоліки:

- вплив поглинаючого газового і пилового середовища, що знаходиться між об'єктом і чуттєвим елементом, на точність виміру;
- вплив радіаційних властивостей (монохроматичного і спектрального ступеня чорності, селективності поглинання і випромінювання електромагнітних хвиль і ін.)
- нелінійна характеристика чуттєвих елементів обумовлена нелінійними законами теплового випромінювання тіл.

В основу безконтактних методів виміру температур був покладений фундаментальний закон випромінювання нагрітих тіл ($T > 0$ К), відкритий німецьким фізиком Максом Планком у 1901 р., у якому встановлюється залежність енергетичної світності абсолютно чорного тіла від його температури на різних довжинах хвиль. Ця залежність описується рівнянням Планка:

$$E_{0\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3} \quad (2.33)$$

де $C_1 = 2\pi \cdot h \cdot c^2$, $C_2 = \frac{hc}{k}$ – постійні коефіцієнти;

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постійна Планка;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постійна Больцмана;

$c = 10^8$ м/с – швидкість поширення електромагнітних хвиль;

e – основа натуральних логарифмів;

λ – довжина хвилі випромінювання, м.

На рисунку 2.34 представлена залежність спектральної щільності випромінювання абсолютного чорного тіла від довжини хвилі при різних температурах. Криві на рисунку показують, що спектральна яскравість зі збільшенням температури чорного тіла швидко зростає. Наприклад, у видимій області спектра від 0,4 до 0,7 мкм спектральна яскравість чорного тіла при зміні температури від 1000 К до 2000 К зростає відповідно в 20 і 16 разів швидше, ніж температура.

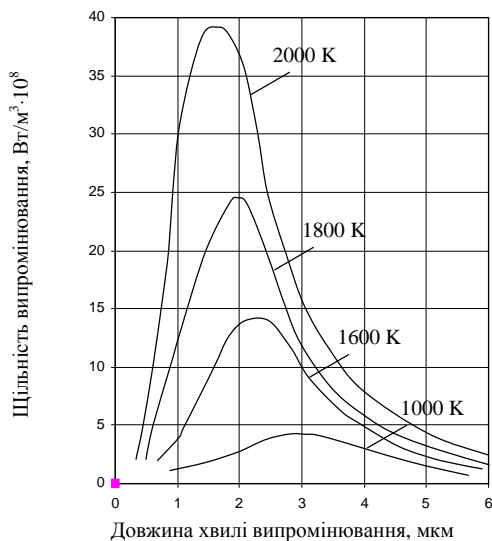


Рисунок 2.34 – Залежність щільності випромінювання чорного тіла від довжини хвилі та абсолютної температури

ючою ниткою складає від 700 до 8000 °С в видимій області спектра.

Вимір температури оптичними пірометрами засновано на порівнянні яскравості тіла, температура якого вимірюється, з яскравістю нитки еталонної лампи, що відградуєвано по випромінюванню абсолютно чорного тіла відповідно до закону Планка (формула 2.50). Порівняння двох яскравостей робиться людським оком через червоний світлофільтр із довжиною хвилі $\lambda=0,65$ мкм, що дозволяє світловий потік розглядати як еквівалентне монохроматичне випромінювання з погіршістю, що не перевищує 0,1 мкм. Вибір червоного світлофільтра обумовлений найбільшою чутливістю ока в цьому діапазоні довжини хвилі випромінювання, що значно підвищує точність порівняння яскравостей вимірюваного тіла (об'єкта) і еталонної лампи.

На рисунку 2.35 представлена схема оптичного пірометра, що складається з корпусу з об'єктивом 1 і окуляром 5, двох світлофільтрів 2 і 4, пірометричної (еталонної) лампи 3, джерела живлення 6, реостата 7, вимірювального приладу 8.

Випромінювання об'єкта, температура якого вимірюється, проходить через об'єktiv 1, далі через червоний світлофільтр 4 і окуляр 5

Така різка зміна яскравості тіла при порівняно невеликій зміні температури у видимій області спектра дозволяє здійснювати вимір температури в цьому діапазоні довжин хвиль по зміні яскравості тіла.

Прилади, призначені для виміру яскравісної температури у видимій області спектра, звичайно називають *оптичними пірометрами*. Велике поширення одержали прилади, що і в даний час знаходяться в експлуатації, називані оптичними пірометрами зі зникаючою ниткою. Інтервал вимірюваних температур для промислових і лабораторних пірометрів зі зникаючою ниткою складає від 700 до 8000 °С в видимій області спектра.

попадає на око оператора. Одночасно оператор сприймає випромінювання і від пірометричної лампи. Переміщаючи движок реостата 7, оператор змінює величину струму, що проходить через лампу, і домагається зрівноважування яскравості нитки і яскравості об'єкта.

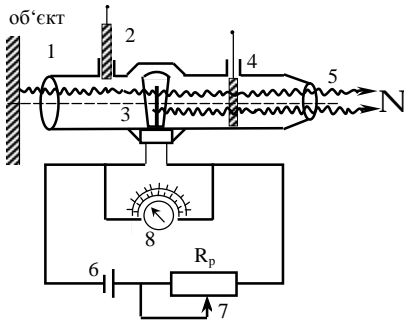


Рисунок 2.35 – Схема оптичного пірометра

У загальнопромислових оптичних пірометрах як вимірювальний прилад використовується мілівольтметр, що показує, з декількома шкалами (двома чи трьома) для виміру порівняно низьких (700 - 1400 °С), середніх (1200 – 2000 °С) і високих (більш 2000 °С) температур. При вимірі середніх і високих температур для запобігання вольфрамової нитки від перегріву і збереження стабільного градування пірометра застосовуються нейтральні світлофільтри, що вводяться між об'єктивом і лампою. На рисунку 2.38 показана схема пірометра з двома шкалами для низьких і середніх температур. При переході на другу шкалу (середніх температур) використовується нейтральний світлофільтр 2. При введенні нейтрального світлофільтра яскравість об'єкта для оператора, що робить вимір температури, зменшується в десятки разів і тому потрібно менша яскравість (менша температура) вольфрамової нитки пірометричної лампи при порівнянні її з яскравістю об'єкта, температура якого вимірюється.

В оптичних пірометрах підвищеної точності і зразкових як вимірювальні прилади використовуються потенціометри, що забезпечують велику точність виміру.

Оптичні пірометри градууються по випромінюванню абсолютно чорного тіла, тому вони вимірюють не дійсну температуру об'єкта, а так називану яскравісну.

Якщо яскравість нитки менше яскравості тіла, то вона на його тлі виглядає чорною смужкою, при більшій температурі нитки вона буде виглядати як світла смужка на більш темному тлі. При рівності яскравостей об'єкта і нитки, остання «зникає» з поля зору оператора. Цей момент свідчить про рівність яскравісних температур об'єкта виміру і нитки пірометричної лампи. У

Яскравістю температури реального тіла на визначеній довжині хвилі називається така температура абсолютно чорного тіла, при якій спектральна енергетична яскравість цього тіла дорівнює спектральній енергетичній яскравості реального тіла при його дійсній температурі (рисунок 2.36). Таким чином, оптичні пірометри дають занижені показання температури реального тіла і тому необхідно вводити виправлення. Виправлення вводиться на підставі визначення яскравісної температури по формулі Планка.

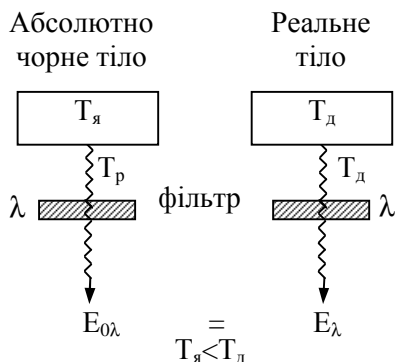


Рисунок 2.36 – Схема, що пояснює поняття яскравісної температури

стної температури по формулі Планка.

При температурі тіла $T < 3000$ К, що має місце в реальній практиці температурних вимірів, формула Планка (2.50) переходить у формулу Вина, тому що

комплекс $e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} \gg 1$. Тому можна записати:

- для абсолютно чорного тіла

$$E_{0\lambda} = \frac{c_1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_я}}}; \quad (2.34)$$

- для реального тіла

$$E_\lambda = \frac{\epsilon_\lambda c_1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_д}}}, \quad (2.35)$$

де ϵ_λ – монохроматичний ступінь чорності реального тіла.

З огляду на рівність спектральних енергетичних яскравостей реального і чорного тіла відповідно до визначення яскравісної температури і рисунок 2.39, дорівнявши праві частини рівнянь (2.34) і (2.35), одержимо дійсне значення температури реального тіла:

$$\frac{c_1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_я}}} = \frac{\epsilon_\lambda c_1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_д}}}, \quad (2.36)$$

чи

$$T_d = \frac{1}{\frac{1}{T_j} - \frac{\ln 1/\epsilon_\lambda}{c_2/\lambda}} \quad (2.37)$$

При відомому значенні константи c_2 і прийнятої довжини хвилі пропускання світлофільтрів рівної $\lambda=0,65$ мкм для оптичних пірометрів, можна записати формулу, по якій уводиться виправлення для визначення дійсної температури реального тіла при використанні оптичних пірометрів.

$$T_{\text{дійсн}} = \frac{1}{\frac{1}{T_j} - \frac{\ln \frac{1}{\epsilon_\lambda}}{9568}} \quad (2.38)$$

Слід зазначити, що для визначення дійсної температури об'єкта $T_{\text{дійсн}}$ по яскравісній температурі T_j необхідно знати спектральний ступінь чорності ϵ_λ , що для кожного матеріалу має своє значення і визначається по довідковим даним. У таблиці 2.5 дані значення ϵ_λ деяких тіл на довжині хвилі $\lambda = 0,65$ мкм.

Таблиця 2.5 – Монохроматичний коефіцієнт теплового випромінювання (монохроматичний ступінь чорності) деяких тіл при $\lambda = 0,65$ мкм.

Матеріал	Монохроматичний коефіцієнт теплового випромінювання поверхні тіла	
	неокисленої	окисленої
Сталь вуглецевіста тверда	0,45	0,80
Сталь вуглецевіста рідка	0,37	-
Залізо тверде	0,32-0,43	0,50-0,95
Залізо рідке	0,41-0,50	0,55-0,95
Мідь тверда	0,11-0,20	0,20-0,35
Мідь рідка	0,12-0,19	-
Вольфрам	0,43	-
Графіт	0,80-0,96	-
Шлаки рідкі	0,75-0,95	-
Вогнетриви	0,80-0,95	-

При вимірі яскравісної температури за допомогою оптичного пірометра необхідно враховувати, що величина ϵ_λ залежить не тільки від температури тіла і довжини хвилі, але і від характеру поверхні даного тіла. Збільшення шорсткості поверхні реального тіла приводить до зростання ϵ_λ . Різний ступінь окислювання поверхні металу приводить до зміни коефіцієнта випромінювання. Унаслідок цей перехід від яскравісної температури реального тіла до його дійсної температури зв'язаний з виникненням методичної погрішності від неточності підбору числового значення коефіцієнта ϵ_λ . Відхилення від дійсного значення ϵ_λ може досягати $\pm(10\dots 20)\%$, при цьому, погрішність виміру температури ΔT , розрахована по формулі Планка (2.50), складе:

T, K	1100	2000	3000
ΔT , K	$\pm 7,2$	$\pm 27,1$	± 61

Для підвищення надійності визначення дійсної температури тіла доцільно одночасно з виміром яскравісної температури робити і визначення коефіцієнта випромінювання ϵ_λ даного тіла. В даний час створені оптичні пірометри на базі мікропроцесорної техніки, у яких виробляється автоматичне визначення монохроматичного коефіцієнта випромінювання тіла, температура якого вимірюється. Дані по T_λ і ϵ_λ надходять на обчислювальний блок мікропроцесора, що, вирішуючи рівняння Планка, визначає значення температури тіла.

При відомому значенні коефіцієнта випромінювання ϵ_λ можна використовувати номограму (рисунок 2.37) для визначення дійсної температури по відомій яскравісній температурі T_λ , що визначається оптичним пірометром.

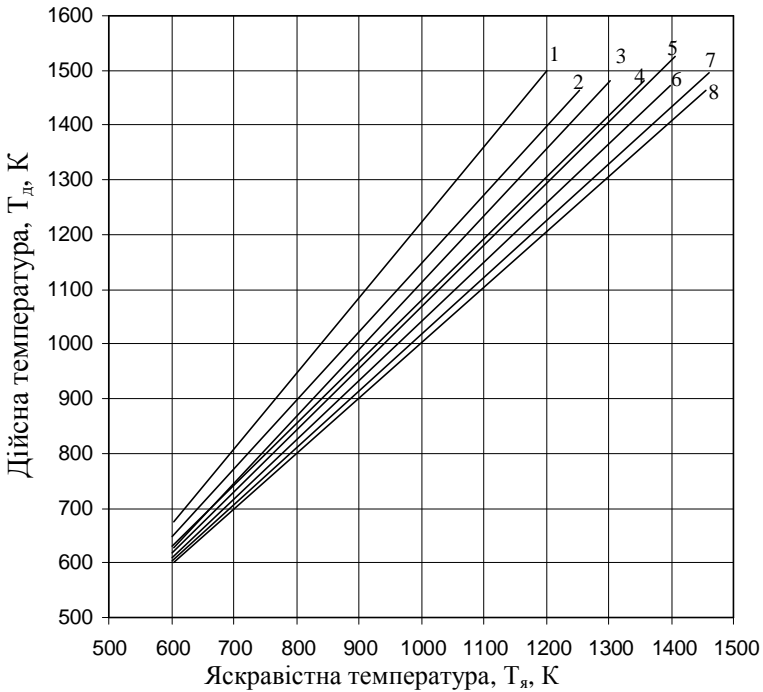
Фотоелектричні пірометри.

У фотоелектричних пірометрах у відмінності від оптичних пірометрів візуальний метод виміру температури замінюється на автоматичний. Як чуттєвий елемент використовуються фотодіоди, фотоопори, фотоелементи, фотомножники ін. При улученні світлового (теплого) потоку на чуттєвий елемент змінюються його електричні характеристики (опір, струм), пропорційні інтенсивності світлового потоку, що випускається нагрітим тілом. Найбільше поширення як чуттєві елементи одержали сур'ямо-цезієві і киснево-цезієві фотоелементи з діапазоном виміру від 800 до 4000 °C та чуттєві до випромінювання тільки у видимій області спектра. Робочий спектральний інтервал, використовуваний у цих пірометрах, складає від 0,6 до 0,72 мкм, що збігається з областю пропускання для оптичних пірометрів (0,63 мкм).

Завдяки цьому при вимірі температури вводиться виправлення по такій же методиці, що і для оптичних пірометрів.

На рисунку 2.38 представлена схема фотоелектричного пірометра, що складається з трьох основних елементів: візирної голівки 2, електронного блоку 8, вимірювального приладу 9.

Теплове випромінювання як від об'єкта, температура якого вимірюється, так і еталонної лампи 3, проходячи через оптичну систему і



- 1 - $\epsilon=0,2$; 2 - $\epsilon=0,3$; 3 - $\epsilon=0,4$; 4 - $\epsilon=0,5$;
 5 - $\epsilon=0,6$; 6 - $\epsilon=0,7$; 7 - $\epsilon=0,8$; 8 - $\epsilon=0,9$;

Рисунок 2.37 – Номограма для визначення дійсної температури.

червоний світлофільтр 5, по черзі попадає на фотоелемент 6 завдяки заслінці 4, що вібує, яка робить коливальні рухи і перериває світлові потоки.

При влученні теплового випромінювання на катод фотоелемента, виконаного у виді вигнутої пластинки і покритого металом з малою роботою виходу електронів (цезій, калій, натрій і ін.), з нього вибиваються електрони, що рухаються до анода, що має позитивний потенціал.

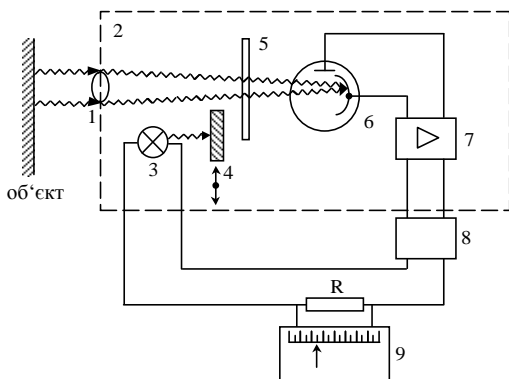


Рисунок 2.38 – Схема устрою фотоелектричного пірометра

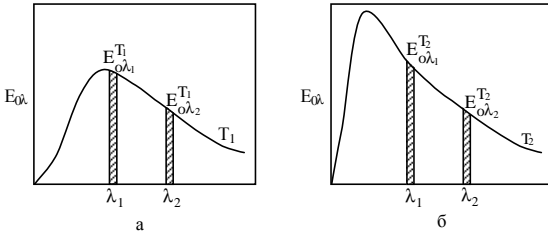
При цьому, яскравість нитки накалювання еталонної лампи буде збільшуватися доти, поки інтенсивності (яскравості) випромінювання від об'єкта і лампи не зрівняються. Таким чином, з достатньою точністю можна вважати, що сила струму в ланцюзі еталонної лампи однозначно зв'язана з яскравістю температурою об'єкта. У ланцюг лампи включений постійний калібрований резистор R, напруга на якому вимірюється швидкодіючим автоматичним потенціометром 9, що покаже яскравісну температуру об'єкта.

Межі основної погрішності показань, що допускається, для фотоелектричних пірометрів з діапазоном виміру від 800 до 2000 °C не перевищують $\pm 1\%$ верхньої межі виміру, а при температурах вище 2000 °C - не більш 1,5%. Час установлення показань пірометра близько 1 с.

2.3.2 Пірометри спектрального випромінювання

Пірометри спектрального відношення чи колірні пірометри засновані на залежності від температури тіла відношення спектральних енергетичних яскравостей на двох ділянках спектра, кожний з яких характеризується ефективною довжиною хвилі λ_1 і λ_2 . На рисунку 2.39 показана зміна енергетичної яскравості на двох ділянках λ_1 і λ_2 кривої Планка при різній температурі T_1 і T_2 . Як видно з рисунка, при збільшенні температури тіла змінюється відношення енергетичних яскравостей на цих ділянках довжин хвиль.

Таким чином, у ланцюзі фотоелемента виникає електричний струм, величина якого залежить від інтенсивного теплового (електромагнітного) випромінювання чи від об'єкта, чи від еталонної лампи, тобто залежить від температури випромінювачів. У підсилювачі 7 і електронному блоці 8 відбувається порівняння цих струмів, і якщо вони не рівні, то на виході електронного блоку 8 з'явиться струм, що буде живити еталонну



а – при температурі T_1 ;
 б – при температурі T_2 ($T_2 > T_1$)

Рисунок 2.39 – Зміна спектральних енергетичних яскравостей на двох діапазонах довжин хвиль

Так, наприклад, при T_1 відношення $\frac{E_{0\lambda_1}^{T_1}}{E_{0\lambda_2}^{T_1}} \approx 1,50$, а при T_2 це

відношення $\frac{E_{0\lambda_1}^{T_2}}{E_{0\lambda_2}^{T_2}} \approx 1,92$

за умови, що $T_2 > T_1$.

Конструктивно пірметри спектрального відношення виконуються

як двоканальними й одноканальними. У схемі двоканального пірметра використовуються два фотоелементи, що вимірюють енергетичні яскравості об'єкта кожний у своєму діапазоні довжин хвиль λ_1 і λ_2 . В одноканальному пірметрі обидві яскравості впливають на той самий приймач по черзі. На рисунку 2.40 приведена схема двоканального пірметра спектрального відношення, у якому випромінювання від нагрітого тіла після об'єктива 1 роздвоюється за допомогою призми 2 і направляється через світлофільтри червоний λ_1 і синій λ_2 на два фотоелементи Ф1 і Ф2. Сигнали фотоелемента посилені електронними підсилювачами ЕП1 і ЕП2, подаються на блок порівняння цих сигналів БП, що виробляє результуючий сигнал, пропорційний відношенню спектральних енергетичних яскравостей тіла на двох довжинах хвиль λ_1 і λ_2 . Для виміру результуючого сигналу (у виді електричного потенціалу) використовується автоматичний потенціометр 3.

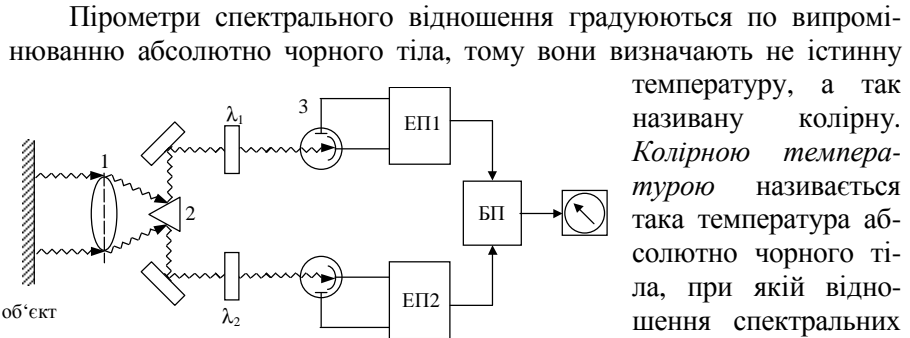
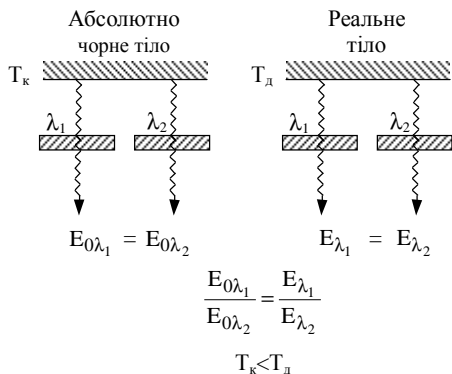


Рисунок 2.40 – Схема двоканального пірметра спектрального відношення

пірметру, а так називану колірну. Колірною температурою називається така температура абсолютно чорного тіла, при якій відношення спектральних енергетичних яскравостей абсолютно

чорного тіла на двох довжинах хвиль дорівнює відношенню спектральних енергетичних яскравостей реального тіла на цих же довжинах хвиль при його дійсній температурі (рисунок 2.41). Виправлення для



визначення дійсної температури вводиться на підставі визначення колірної температури з використанням формули Віна (2.34).

Відповідно до схеми, показаної на рисунку 2.44, можна записати:

$$\frac{E_{0\lambda_1}}{E_{0\lambda_2}} = \frac{E_{\lambda_1}}{E_{\lambda_2}}, \quad (2.40)$$

де

$$E_{0\lambda_1} = \frac{c_1}{e^{\lambda_1 T_k}}; \quad E_{0\lambda_2} = \frac{c_1}{e^{\lambda_2 T_k}};$$

Рисунок 2.41 – Схема, що пояснює поняття колірної температури

$$E_{\lambda_1} = \frac{\epsilon_{\lambda_1} c_1}{e^{\lambda_1 T_d}}; \quad E_{\lambda_2} = \frac{\epsilon_{\lambda_2} c_1}{e^{\lambda_2 T_d}}$$

Підставивши ці рівняння Віна в первісне (2.41) і зробивши відповідні перетворення, одержимо формулу для визначення дійсної температури реального тіла:

$$T_d = \frac{1}{\frac{1}{T_k} - \frac{\ln \frac{\epsilon_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2}}}{\frac{c_2}{\lambda_2} - \frac{c_2}{\lambda_1}}} \quad (2.41)$$

Для визначення дійсної температури тіла по отриманій формулі необхідно знати спектральні характеристики (ступінь чорності) тіла на двох довжинах хвиль λ_1 і λ_2 (довжини хвиль відомі по застосовуваних світлофільтрах), що утрудняє одержання дійсної інформації про температуру тіл, спектральні характеристики яких вивчені недостатньо. Однак, для багатьох тіл (більшість вогнетривких виробів, окислені метали й ін.) ϵ_{λ_1} і ϵ_{λ_2} відрізняються незначно і тому з достатнім ступенем точності можна прийняти обмірювану температуру як дійсне значення температури тіла, при цьому погрішність не перевищує 1%.

При уведенні виправлення по формулі 2.42 варто мати на увазі, що для тіл, у яких монохроматичний ступінь чорності убуває з ростом довжини хвилі ($\epsilon_{\lambda_1} < \epsilon_{\lambda_2}$), колірна температура більше дійсної температури. Для тіл, у яких монохроматичний ступінь чорності зростає по мірі росту довжини хвилі ($\epsilon_{\lambda_1} > \epsilon_{\lambda_2}$), колірна температура менше дійсної температури.

В даний час розроблений ряд пірометрів (зокрема пірометрів спектрального відношення), у яких здійснюється автоматичне уведення виправлень, що обчислюються на основі законів випромінювання нагрітих тел. На рисунку 2.42 показана схема пірометра спектрального відношення, що вимірює дійсну температуру тіла. Теплове випромінювання від об'єкта попадає поперемінно на фотоелемент 2 через два світлофільтри λ_1 і λ_2 , установлених на обертовому обтюраторі 1.

Сигнали фотоелемента, пропорційні спектральним яскравістям об'єкта на двох довжинах хвиль, подаються на електронний блок 3, у якому робиться посилення цих сигналів і видача їх на мікропроцесор 4. З іншого боку, в електронному блоці 3 порівнюються два сигнали від фотоелемента і видається результуючий сигнал, пропорційній колірній температурі T_k .

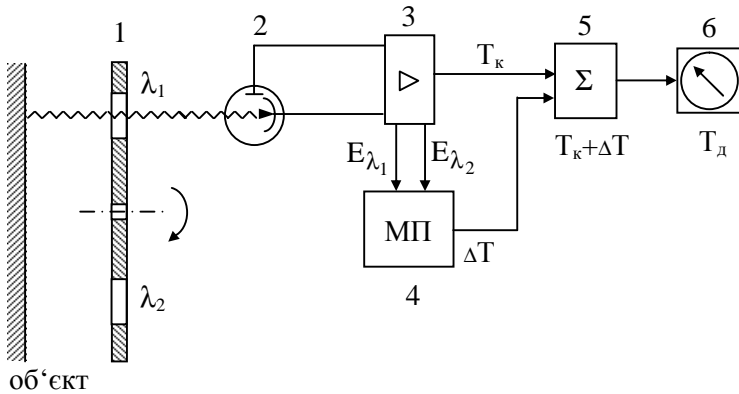


Рисунок 2.42 – Схема одноканального пірометра спектрального відношення із автоматичною корекцією температури

Мікропроцесор, одержуючи інформацію E_{λ_1} і E_{λ_2} і маючи дані в програмованому пристрої про величину довжин хвиль λ_1 і λ_2 , розраховує величину виправлення ΔT в виді електричного сигналу. Два сигнали T_c і ΔT обробляються в підсумовуючому блоці 5, що видає

сигнал, пропорційний дійсному значенню температури T_d , на вимірний прилад, що реєструє, б.

Пірометр розрахований на діапазон виміру дійсних температур від 800 до 2000 °С. Сумарна погрішність виміру дійсних температур при зміні коефіцієнта випромінювальної здатності (ступеня чорності ϵ), об'єкта від 0,3 до 1 не перевищує $\pm 1\%$ значення, що нормує.

2.3.3 Пірометри повного випромінювання

Дія пірометрів повного випромінювання заснована на законі Стефана-Больцмана, що зв'язує повну енергію випромінювання нагрітого тіла і його температуру по формулі

$$E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (2.42)$$

де ϵ - інтегральний коефіцієнт випромінювання (інтегральний ступінь чорності) реального тіла;

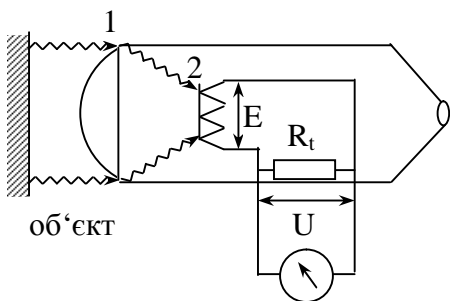


Рисунок 2.43 – Схема пристрою пірометра повного випромінювання

σ - постійна Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$.

Прилади, що вимірюють повну енергію випромінювання, одержали назву радіаційні пірометри. Датчик пірометра (первинний перетворювач) виконується у виді телескопа (рисунок 2.43), лінза об'єктива 1 якого фокусує теплове випромінювання від нагрітого тіла практично в діапазоні довжин хвиль від 0,4 до 4 мкм на теплоприймачі.

Як чуттєвий елемент у більшості випадків застосовують термобатарею 2 з декількох послідовно з'єднаних термопар (наприклад, хромель-копелевих). Потік випромінювання попадає на розклепані у виді тонких зачорнених пелюстків робочі кінці термопар (рисунок 2.44), кількість яких складає від 6 до 10 штук. Вільні кінці термопар при-

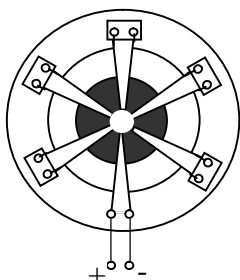


Рисунок 2.44 – Термобатарея пірометра

варюються до тонких пластинок, закріплених на слюдяному кільці і розташовуються в безпосередній близькості від корпусу телескопа для відносної стабілізації їхньої температури. Металеві виводи (+, -) служать для приєднання вимірювального приладу, у якості якого звичайно використовуються потенціометри чи мілівольтметри.

У процесі виміру температури тепловий потік проникає усередину корпусу телескопа, розігріває стінки корпусу приладу, при цьому підвищується температура вільних кінців термопар. Виникаюча при цьому погрішність буде тим більше, чим вище температура корпусу приладу.

Для зниження цього виду погрішності радіаційні пірометри забезпечуються різними пристроями температурної компенсації. Найбільш розповсюджений спосіб температурної компенсації здійснюється за допомогою електричного шунта R_t , виготовленого з міді чи нікелю. Резистор R_t , що шунтує термобатарею з опором r , поміщають у корпусі телескопа поруч з вільними кінцями батареї термопар. При вимірі температури вторинний прилад (мілівольтметр чи потенціометр) визначає не ЕРС батареї термопар, а спадання напруги U на резисторі, який шунтує, що дорівнює:

$$U = I \cdot R_t.$$

Тік I , що протікає в ланцюзі термопару обумовлений ЕРС, що розвивається термобатареєю, і визначається по формулі:

$$I = \frac{E}{r + R_t}.$$

Підставивши значення струму в первісне рівняння, одержимо:

$$U = \frac{E \cdot R_t}{r + R_t} \quad \text{чи} \quad U = \frac{E}{\frac{r}{R_t} + 1}.$$

Як видно з останнього вираження, при нагріванні корпусу приладу зменшується величина E через збільшення температури вільних кінців термобатареї. З іншого боку, збільшується значення опору R_t і тому величина U практично не змінюється при правильно обраному початковому значенні R_t .

У промислових умовах телескоп пірометра знаходиться на відносно близькій відстані від об'єкта, температура якого вимірюється, що може привести до значного перегріву корпусу приладу. Для запобігання корпусу телескопа від перегріву його поміщають у спеціальний захисний кожух, охолоджуваний проточною водою.

Радіаційні пірметри градууються по тепловому випромінюванню абсолютно чорного тіла, тому вони вимірюють не дійсну температуру, а так названу «радіаційну».

Радіаційною температурою називається така температура абсолютно чорного тіла, при якій його повна енергія випромінювання дорівнює повній енергії випромінювання реального тіла при його дійсній температурі.

Відповідно до цього визначення і рисунку 2.45, що пояснює зміст радіаційної температури, можна записати

$$E_0 = E.$$

З огляду на формулу Стефана – Больцмана, одержимо рівняння, з якого можна визначити дійсне значення температури реального тіла:

$$\sigma \cdot T_p^4 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_d^4 \quad (2.43)$$

Відкіля

$$T_d = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}} \quad (2.44)$$

Ця формула дозволяє перейти до дійсної температури тіла T_d , знаючи інтегральний коефіцієнт випромінювання (ступінь чорності) і радіаційну температуру T_p , обмірювану пірметром. Тому що для всіх реальних тіл $0 < \varepsilon < 1$, то, як видно з формули (2.59), радіаційна температура тіла завжди буде менше його дійсної температури. Величина ε для конкретного тіла, температура якого виміряється, приводиться в спеціальній довідковій таблиці, де дані значення ε для різних тіл (додаток Б).

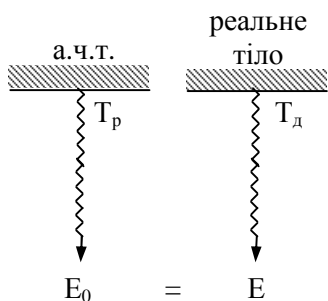


Рисунок 2.45 – Схема для пояснювання змісту радіаційної температури

Більшість застосовуваних у даний час радіаційних пірметрів має рефракторну (у світлі, що проходить) оптичну систему, тобто використовується лінза, що збирає, для фокусування теплового потоку від об'єкта на чутливому елементі (батарея термопар, фотодіод і ін.) приладу. При невеликих потужностях променистої енергії і, отже, невисоких температурах тіл для концентрації енергії застосовують рефлекторну оптичну систему (увігнуте дзеркало), що у меншому ступені

поглинає і розсіює прихожу від тіла теплову енергію.

Радіаційні пірометри дозволяють вимірювати температуру від 400 до 3500 °С. У якості вторинних самописних, що показують, і регулюючих приладів, що працюють у комплекті з радіаційними пірометрами, використовуються мілівольтметри й автоматичні потенціометри, що мають відповідне градування.

Межа припустимої основної погрішності радіаційних пірометрів в області температур від 500 до 2500 °С знаходиться в інтервалі 7,5...30°С.

2.3.4 Перспективні напрямки в розробці приладів для виміру температури

В даний час на ринку контрольно-вимірювального устаткування з'явився широкий вибір удосконалених приладів для виміру температури. Головна тенденція - це впровадження сучасної елементної бази в переносні (ручні) і стаціонарні (щитові) вимірювальні прибори.

Перше істотне нововведення, що з'явилося в ручних приладах - це вбудована пам'ять для збереження результатів вимірів. Прилади, що мають таку пам'ять мають у своїй назві визначення - Data Logger. Англійська фірма TES розробила серію приладів для виміру температури в діапазоні від 200 до 1333 °С, що працюють з чотирма типами термопар: k - хромель-алюмелева; j - залізо-міднонікелева; E - нікель-хром-міднонікелева; T - мідь-константанова. Індикація виконується на цифровому дисплеї з двома рядами службових символів, що відображають обраний канал, тип використовуваної термопари, стан батареї. Відображення ведеться в градусах Цельсія чи Фаренгейта з точністю $\pm(0,1\% \dots 0,8^\circ\text{C})$ і з максимальною швидкістю виміру - один відлік у секунду. Наявність двох каналів дозволяє вимірювати температуру відразу в двох точках, а також визначати різницю температур між двома точками об'єкта. Прилад може формувати керуючий сигнал при виході вимірюваних величин за межі мінімуму чи максимуму, встановлених заздалегідь.

Головна особливість приладу - вбудована пам'ять на 4000 записів результатів виміру. Для ідентифікації результатів прилад має власний годинник (з точністю до секунд) і календар реального часу. Крім того, має інтервальний таймер, що показує час з початку процедури вимірів. Частота вимірів може збільшуватися від однієї секунди і більш, що створює можливість використання даного приладу як основу для побудови моніторингової системи. Наприклад, при вимірі температури з інтервалом у 10 хвилин прилад збереже у своїй пам'яті дані

за 27 діб. Причому, усі дані можуть бути переписані в комп'ютер у будь-який час, для чого він оснащений інтерфейсом RS –232. Прийняті дані, крім безпосереднього відображення, можуть заноситися в таблицю (із указівкою дати і часу виміру), на підставі якої будується часовий графік.

Друга особливість приладу – це убудовані мініпринтери. Як робочий принтер застосовується мініатюрний термопринтер із шириною паперу 35 мм. Прилад виводить обмірювані дані тільки в табличній формі. Оператор установлює періодичність висновку інформації, у якій указується час, дата, номер каналу, тип термодатчика і результат виміру.

В універсальному приладі з цієї групи (TES – 30) забезпечується запам'ятовування і висновки на мініпринтер вимірюваних даних у виді таблиці чи тимчасового графіка. Масштаб графіка по тимчасовій осі (вісь «х») чи по амплітуді (вісь «у») може задаватися вручну. Крім того, для приладу розроблена і поставляється програмне забезпечення для передачі даних у комп'ютер і наступної обробки даних стандартними засобами Windows.

Приведені функціональні можливості ручних компактних реєстраторів температури дозволяють успішно використовувати їх як в автономному режимі, при проведенні налагоджувальних робіт і періодичному контролі теплового стану об'єкта в польових умовах, так і в стаціонарному стані замість щитових самописців.

Удосконалюванню піддалися також і безконтактні методи виміру температури, тому що в практиці вимірів необхідно знати тепловий стан окремих частин чи точок об'єкта, де використання звичайних контактних термометрів чи неможливо небезпечно.

Розглянемо можливості таких приладів на прикладі інфрачервоного пірометра ТМ-908, що випускається фірмою «Lutrou». Прилад призначений для безконтактного дистанційного виміру температури в діапазоні від $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ та складається з основного блоку і вимірювального зонда.

Принцип дії пірометра заснований на реєстрації інтенсивності інфрачервоного випромінювання, що випускається поверхнею об'єкта виміру. Як чуттєвий елемент використовується батарея термопар (кілька десятків термопар, з'єднаних послідовно), що фіксує випромінювання з довжиною хвилі від 6 до 12 мкм. Саме в цьому діапазоні знаходиться максимум енергетичної світності абсолютно чорного тіла (АЧТ) для температур від $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, завдяки чому забезпечується максимальна чутливість приладу.

Основні технічні характеристики пірометра ТМ-908 приведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Технічні характеристики пірометра ТМ-908

Параметр	Величина
Діапазон виміру температури/дозвіл	-10.....+300 °C/1°C -10.....+110 °C/0,1°C
Погрішність	±2%
Ступінь чорності вимірюваного об'єкта	регульована від 0,1 до 0,95
Датчик	батарея термопар
Інерційність	близько 1 с
Відстань до об'єкта	від 50 до 1000 мм
Маса пірометра	370 м

Обмірювана температура відображається на трьохрядному дисплеї, при цьому, мікропроцесор дозволяє не тільки робити виміри, але і фіксує в пам'яті максимальне і мінімальне значення температури, а також утримує на дисплеї поточне показання. Прилад автоматично уводить управління на ступінь чорності об'єкта, однак, оператор повинний установити на панелі приладу заздалегідь відоме значення ступеня чорності, узятє по довідковим даним для вимірюваного об'єкта. До числа достоїнств пірометра можна також віднести можливість його підключення до персонального комп'ютера через послідовний інтерфейс RS-232, у результаті чого прилад можна використовувати як реєстратора даних у стаціонарних автоматизованих вимірювальних системах.

Фірма Raytek розробила сімейство пірометрів для безконтактного виміру температури, у яких чуттєвий елемент і вимірювальний пристрій (мікропроцесор) розташовуються в одному блоці. Точний напрямок приладу на об'єкт чи окремий його елемент здійснюється за допомогою лазерного прицілу.

Фірма LAND INFRARED розробила ряд приладів – тепловізорів для дистанційного термообстеження великих промислових об'єктів у діапазоні температур від -20 до 1500 °C. Система дозволяє одночасно з відображенням інфрачервоної картини вивести градуовальну кольорну шкалу, що дає можливість бачити й аналізувати тепловий стан всього об'єкта.

Для вимірювання температури та теплових потоків безконтактним методом можливо використовувати безконтактний прибор INFRATRACE 801. Його характеристика наводиться в специфікації.

СПЕЦИФІКАЦІЯ

Характеристика	INFRATRACE 801
Діапазон вимірів: Температура Тепловий потік	0-800°C 316-1999 Вт/м ²
Ціна шкали	1°C, 1 Вт/м ²
Точність	±0,7% вимірюваної величини, ±0,4% діапазону
(Відноситься до роботи при температурах навколишнього середовища від 18 до 28°C при коефіцієнті випромінюючої здатності, рівному 1)	
Діапазон довжин хвиль	8-14мкм
Мінімальний розмір об'єкта	діам. 20мм при відстанях 1 м, при великих відстанях – відстань, ділена на 40
Кут зору	25 мілірадіан (1,5°)
Звуковий сигнал	Частота змінюється в залежності від показань приладу
Середній термін служби елемента живлення	14 годин
Габарити	235×90мм
Масштаб вихідного сигналу	1 мв на °C; 1 мв на Вт/м ²
Стабільність показань	Краще ±3°C
Робоча температура	від 0 до 45°C
Елемент живлення	PP3, TR146X, 6F22 – 9 вольт
Вага	1250г

INFRATRACE 801 являє собою портативний прилад для безконтактного виміру температури і теплового потоку. Прилад обладаний звуковим сигналом, що дозволяє легко знаходити гарячі і холодні крапки на поверхні.

Термометри INFRATRACE містять у собі оптичну систему, що забезпечує високоточні і стабільні виміри температури. Ця система доповнена електронною системою обробки, легко керованою користувачем за допомогою декількох кнопок на приладі. Помилки, спри-

чинені сторонніми джерелами теплової енергії, наприклад, сонцем, зведені до мінімуму.

Використовувана в приладі оптична система з фіксованим фокусом визначає мінімальний діаметр об'єкта при відстані 1 м у 20 мм і відношення відстані до діаметра об'єкта при великих відстанях у 40:1. Це показано на рисунку 2.46. На практиці бажано, щоб діаметр об'єкта був більше теоретичного в два рази, чи щоб відстань до об'єкта була менше теоретичного в два рази (але не менше 1 м). Це полегшує націлювання термометра і зменшує погрішність, викликану коливаннями руки оператора.

При роботі з такими поверхнями, як скло, шліфований метал, вода і т.п. рекомендується тримати прилад під прямим кутом до поверхні, температуру якої необхідно вимірити, щоб звести до мінімуму вплив теплового випромінювання від інших джерел. Більшість поверхонь, з якими доведеться працювати, мають низький коефіцієнт відображення і до них це попередження не відноситься.

Для виміру теплового потоку необхідно перемістити вимикач на передній поверхні ручки у верхнє положення. Після цього на дисплей буде виводитися вимірюване значення теплового потоку тієї поверхні, на яку спрямований об'єктив приладу (див. рис.2.40). Як нагадування при вимірі теплового потоку буде мигати зелений **світлодіод**, позначений "Watts/m²".

При відстанях до об'єкта, що відповідають специфікації, показання приладу не залежать від конкретної відстані.

Прилад забезпечує достатню точність при значеннях теплового потоку від 316 Вт/м² (що відповідає випромінюванню абсолютно чорного тіла при 0°C) до 1999 Вт/м² (що відповідає приблизно 160° для чорного тіла). Такі характеристики приладу дозволяють застосовувати його для оцінки **енерговитрат** у будинках, перевірки якості теплоізоляції й інших подібних задач. Для включення звукового сигналу необхідно натиснути перемикач на тильній стороні ручки, позначений скрипковим ключем. Для скасування звукового сигналу необхідно повернути перемикач у попереднє положення. Звуковий сигнал дозволяє оператору визначати зміни теплового потоку, не дивлячись на дисплей, тому його можна використовувати для виявлення гарячих чи холодних точок на поверхні, наприклад при пошуку ушкоджень теплоізоляції.

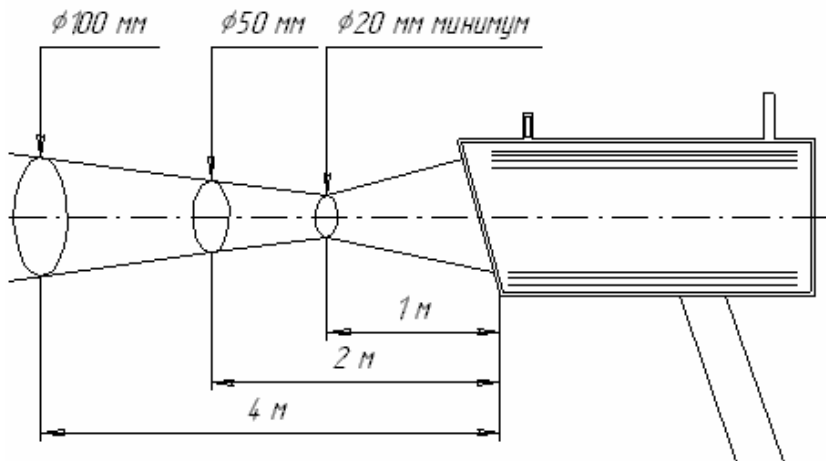


Рисунок 2.46 – Схема оптичної системи INFRATRACE

Регулятор корекції по випромінюючій здатності на виміри теплового потоку не впливає, цей регулятор використовується тільки в режимі виміру температури.

INFRATRACE дозволяє вимірювати температуру поверхні об'єкта практично на будь-якій відстані: на відстані, коли прилад майже торкається поверхні, до нескінченності, якщо тільки поверхня має достатній розмір. Всі інструкції з напрямку приладу на вимірюваний об'єкт, приведені для вимірів теплового потоку, також вірні для виміру температури.

Для виміру температури перемикач на передній стороні ручки варто установити в нижнє положення. Після цього на дисплей буде виводитися температура поверхні в °С. Як нагадування при цьому буде мигати зелений світлодіод, позначений " °С".

Звуковий сигнал працює так само, як і в режимі виміру теплового потоку.

2.3.5 Вторинні прибори

Вимір термо-ЕРС, що розвивається термопарами, виробляється двома методами: прямим виміром ЕРС термопар і компенсаційним.

Прямі виміри ЕРС термопар здійснюється мілівольтметрами, а для компенсаційного методу виміру використовуються потенціометри.

Принцип дії вимірювального магнітоелектричного мілівольтметра заснований на взаємодії магнітного поля постійного магніту і про-

відника зі струмом, що знаходиться в цьому магнітному полі. Основними частинами мілівольтметра (рисунок 2.47) є постійний магніт з полюсними наконечниками циліндричної форми 1, виконаними з магніто-м'якої сталі і рухливої рамки 2, що складається з декількох десятків витків тонкого ізольованого мідного дроту. Рамка, що має дві півосі 3, може повертатися в корундових чи агатових підп'ятниках. Підведення струму до рамки здійснюється через спіральні пружинки 4, що одним кінцем з'єднані з рамкою 2, а іншим – з контактами, що з'єднують її з термopарою 5.

Зміна температури навколишнього середовища приводить до зміни опору рамки і провідників, що підводять. При постійній термо-ЕРС термopари, це приводить до зміни струму, що протікає через рамку мілівольтметра, а, виходить, до зміни його показання. Для зменшення погрішності показання приладу послідовно з рамкою включений додатковий резистор 6 (R_d), виконаний з манганіну.

При вимірі температури в електричному ланцюзі мілівольтметра виникає струм, що, протікаючи через рамку приладу, створює магнітоелектричний момент, що повертає рамку і величина якого залежить від термо-ЕРС, створюваною термopарою.

$$M_T = 2 \cdot r \cdot \ell n \cdot I \cdot B,$$

де: $2r$ – ширина рамки, м;

ℓ - довжина рамки, м;

n – число витків обмотки рамки;

B – магнітна індукція, створювана полем постійного магніту між полюсними наконечниками, Тл;

I – струм, що протікає в рамці, А.

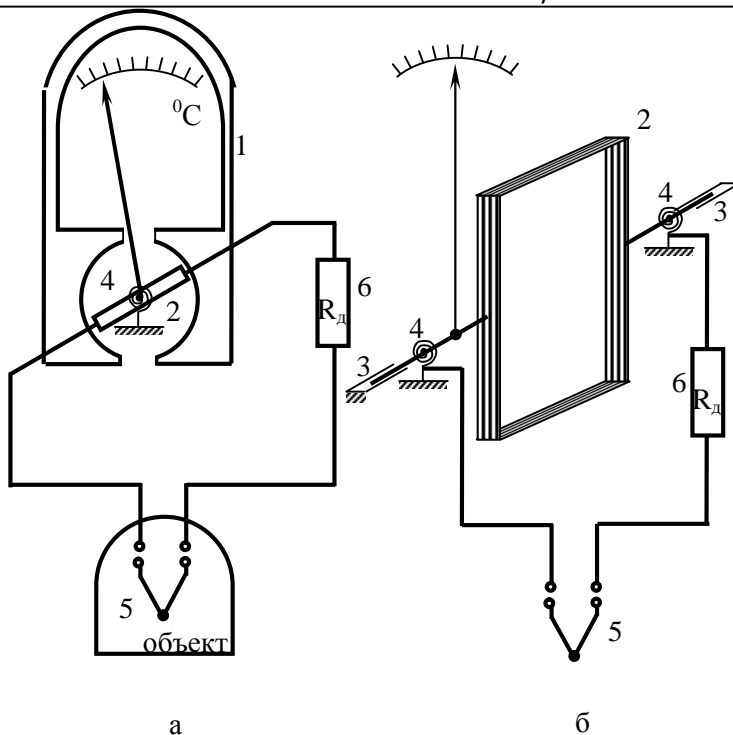
При повороті рамки одночасно закручуються спіральні пружини, що створюють протидіючий момент:

$$M_{пр} = M_{пит} \cdot \varphi, \quad (2.45)$$

де: $M_{пит}$ – питомий протидіючий момент, тобто момент пружин, віднесений до одиниці кута повороту, що залежить від матеріалу і розміру пружин, Н·м/рад

φ – кут повороту рамки, рад.

Обертання рамки буде продовжуватися доти, поки момент, викликаний протіканням струму через рамку (M_c), не зрівноважиться моментом при закручуванні пружини ($M_{пр}$), тобто $M_c = M_{пр}$. Дорів-



а – електрична схема;

б – підвід ЕРС термопарі до рамки мілівольтметра

Рисунок 2.47 – Схема магнітоелектричного мілівольтметра

нявши два моменти, знайдемо залежність між кутом повороту рамки і струмом, що протікає через рамку:

$$\varphi = \frac{2 \cdot r \cdot \ln B}{M_{\text{пит}}} I \quad (2.46)$$

Приймаючи, що $2r, \ell, n, B, M_{\text{пит}}$ для даної конструкції приладу при нормальних умовах експлуатації є постійними величинами і позначивши їхнє сполучення через "k", одержимо:

$$\varphi = k \cdot I \quad (2.47)$$

Тік, що протікає в рамці, залежить від ЕРС термопарі й опору всього електричного ланцюга, що з'єднує прилад і термоелектродні проводи (рисунок 2.26). Значення струму для даного електричного ланцюга можна записати за законом Ома:

$$I = \frac{E}{R_T + R_{II} + R_d + R_p}, \quad (2.48)$$

де E – ЕРС термопари, обумовлена вимірюваною температурою в об'єкті і типом термоелектродних приводів, мВ;

R_T – опір термоелектродних проводів термопари, Ом;

R_{II} – опір сполучних проводів, Ом;

R_d – додатковий опір, Ом;

R_p – опір рамки мілівольтметра, Ом;

Підставивши значення струму I у рівняння 2.22, одержимо градуювальне рівняння для магнітоелектричного мілівольтметра:

$$\varphi = k \cdot \frac{E}{R_T + R_{II} + R_d + R_p} \quad (2.49)$$

Для одержання однозначної залежності кута повороту рамки φ від ЕРС термопари (тобто від температури в об'єкті) необхідно, щоб сума опорів в електричному вимірювальному ланцюзі, що входить у формулу 2.49, не змінювалася в процесі виміру температури. Однак, на практиці температура навколишнього середовища може мінятися в досить великому інтервалі температур від позитивних до негативних значень, що приводить до зміни опору проводів, що входять в електричну схему мілівольтметра. У мілівольтметрах, особливо застосовуваних у промислових умовах, для зменшення погрішності, викликаній відхиленням температури навколишнього повітря від нормального (градуювального) значення, установлюють додатковий опір, що розташовується в корпусі приладу. Величина цього опору (R_d), виконаного з манганіну, у кілька разів (4-6 разів) більше суми всіх інших опорів, що різко знижує погрішність виміру, тому що $R_d \approx \text{const}$ у діапазоні від 0 до 100 °С. Однак застосування додаткового опору знижує чутливість приладу, тому що зменшується струм, що протікає через рамку мілівольтметра й обмежує верхню межу R_d .

Нижче приводиться приклад оцінки абсолютної погрішності виміру температури середовища мілівольтметром у комплекті з термопарою при нормальних умовах.

Приклад 2.4 Визначити значення граничної абсолютної погрішності при вимірі температури перегрітої пари, мілівольтметром, що показує, класу точності 0,5 зі шкалою 0...600 °С (градування ХА) при нормальних умовах. Мілівольтметр показує температуру пари 540°С.

Основна припустима погрішність мілівольтметра складе:

$$\Delta t_{\text{м}} = \frac{0,5 \cdot 540}{100} = \pm 2,7 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Відхилення характеристики, що допускається, термопари типу ХА, розраховане по формулі (2.21), дорівнює:

$$\Delta E_{\text{Т}} = \pm [0,16 + 2,0 \cdot 10^{-4} \cdot (t - 300)] = \pm [0,16 + 2,0 \cdot 10^{-4} \cdot (540 - 300)] = \pm 0,21 \text{ мВ},$$

що відповідає за градуовальною характеристикою (додаток Д) $\Delta t = \pm 5,3 \text{ } ^\circ\text{С}$.

Відхилення, що допускається, ЕРС компенсаційних проводів працюючих у комплекті з термопарою ХА, дорівнює $\Delta E_{\text{Т.п.}} = \pm 0,15 \text{ мВ}$, що відповідає (додаток Д) $\Delta t_{\text{к.п.}} = \pm 3,8 \text{ } ^\circ\text{С}$.

Гранична погрішність виміру температури складе:

$$\Delta t = \pm \sqrt{(\Delta t_{\text{м}})^2 + (\Delta t_{\text{Т}})^2 + (\Delta t_{\text{к.п.}})^2} = \sqrt{2,7^2 + 5,3^2 + 3,8^2} = \pm 7,058^0 \text{ С} \approx \pm 7^0 \text{ С}$$

Застосовувана в цьому прикладі методика оцінки граничної погрішності показань для вимірювального комплексу (мілівольтметр – термопара – компенсаційні проводи) добре погодиться з експериментальними даними.

Мілівольтметри, застосовувані для виміру термо-ЕРС термопар, по функціональному призначенню можуть бути такими, що показують, самописними і регулюючими. По конструктивному виконанню прилади бувають щитовими і переносними. Для переносних приладів установлені наступні класи точності: 0,2; 0,5; 1,0, а для щитових – 0,5; 1,0; 1,5. На шкалі мілівольтметра вказується градування термопари (чи пірометра), у комплекті з яким повинний працювати даний мілівольтметр. Внутрішній опір мілівольтметра для класу точності 0,2; 0,5; 1,0; 1,5 повинно бути не менш 500; 300; 200 Ом. Зовнішній опір мілівольтметрів, призначених для роботи з термопарами, повинен бути дорівнює 5 чи 15 Ом.

Як вторинні прилади для виміру температури з використанням термометрів опору застосовуються: неврівноважені мости, урівноважені мости, логометри.

Неврівноважені мости для виміру температури застосовують рідко. Однак, вони знайшли широке застосування для виміру опору в газоаналізаторах, концентратомірах і ряді інших засобів виміру. Неврівноважений міст складається з чотирьох резисторів, три з яких (R_1, R_2, R_3) виконані з манганіну і їх опір в процесі виміру не змінюються, і одного термометра опору (R_t) як чуттєвого елемента, розташованого в об'єкті виміру температури (рисунок 2.48). Електрична схема моста являє собою прямокутник, на сторонах якого розташовуються манганінові опори R_1, R_2, R_3 і термометр опору R_t . До однієї діагоналі моста (точки 1 і 2) підводиться живлення від батареї чи іншого джерела, на іншій діагоналі (вимірювальні точки «а» і «б») розташовується вимірювальний прилад.

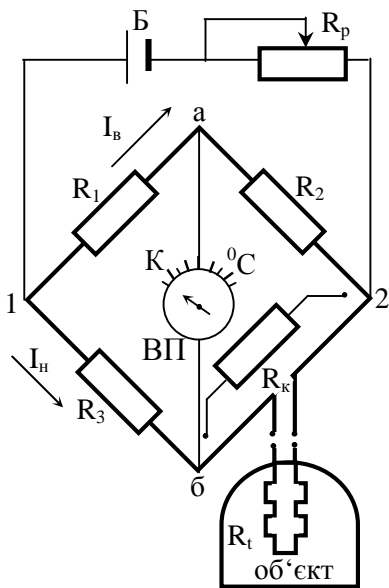


Рисунок 2.48 –Схема неврівноваженого моста

При вимірі температури спочатку робиться контроль напруги між точками «а» і «б». Для цього в плече моста «б-2» включається контрольний опір R_k і за допомогою регульовального опору R_k встановлюється стрілка вимірювального приладу ВП на контрольній точці (к), тобто при цьому встановлюється градуювальне значення напруги у вимірювальній діагоналі. Після операції «контроль» включається термометр опору R_t і відключається R_k .

При вимірі температури змінюється опір термометра R_t і у вимірювальній діагоналі між точками «а» - «б» виникне різниця

потенціалів, яку можна визначити як різниця падінь напруг між сусідніми плічми моста, тобто

$$U_{a-b} = U_{a-2} - U_{6-2}, \tag{2.50}$$

де

$$U_{a-2} = I_b \cdot R_2; \quad U_{6-2} = I_n \cdot R_t. \tag{2.51}$$

Струми, що протікають через два верхніх опори і два нижніх опори, відповідно визначаються :

$$I_B = \frac{U_{1-2}}{R_1 + R_2} ; I_H = \frac{U_{1-2}}{R_3 + R_t} \quad (2.52)$$

Підставивши отримані значення струмів і напруг формул (2.40), (2.41) у первісну формулу (2.39), одержимо залежність спадання напруги у вимірювальній діагоналі від R_t :

$$U_{a-b} = U_{1-2} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_t}{R_3 + R_t} \right) \quad (2.53)$$

З формули (2.53) неврівноваженого моста видно, що напруга у вимірювальній діагоналі, вимірювана вимірювальним приладом, залежить тільки від значення R_t , тобто від температури в об'єкті при незмінних значеннях інших параметрів, що входять у цю формулу. Унаслідок цього, для забезпечення правильності показань приладу необхідно підтримувати постійну напругу в точках «1» і «2» за допомогою регульовального опору (реостата) R_p чи застосовувати спеціальне стабілізоване джерело живлення. У першому випадку, при наявності внутрішнього джерела живлення у виді батареї чи акумулятора, прилад є автономним і не залежить від зовнішнього джерела живлення. В другому випадку, для роботи приладу необхідна наявність стороннього джерела живлення біля об'єкта, у якому вимірюється температура. Неврівноважені мости є досить чутливими і точними приладами з класом точності менше 0,5 і можуть застосовуватися навіть як контрольні для перевірок автоматичних мостів і термометрів опору.

У промислових умовах для безупинного виміру температури води, пари, різних газових середовищ застосовуються *автоматичні урівноважені мости* (рисунок 2.35). Урівноваженим мостом називається така мостова електрична схема, у якій різниця потенціалів між точками «а» і «б» у момент виміру дорівнює нулю. Для зрівноважування моста необхідно один з опорів на будь-якій плечі моста зробити перемінним. Умову рівноваги мостової схеми можна визначити з формули (2.42), де U_{a-b} необхідно дорівняти до нуля:

$$0 = U_{1-2} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_t}{R_3 + R_t} \right) \quad (2.54)$$

З двох співмножників, які стоять у правій частині рівняння, дорівняти нулю можна тільки вираження, що стоїть в дужках, тому:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_t}{R_3 + R_t} = 0. \quad (2.55)$$

Відкіля:

$$R_t \cdot R_1 = R_2 \cdot R_3. \quad (2.56)$$

Як видно з цього вираження (2.56), мостова схема буде знаходитися в рівновазі, якщо добутки опорів протилежних пліч будуть між собою рівні. Для забезпечення такої рівності опір R_2 виконано перемінним, при цьому, кожному значенню R_t буде відповідати цілком визначений опір R_2 , тобто

$$R_t = \frac{R_3}{R_1} R_2 = k \cdot R_2. \quad (2.57)$$

Таким чином, між температурою в об'єкті (вираженою через R_t) і

положенням движка опору R_2 має місце однозначна залежність, і положення движка вкаже значення вимірюваної температури (якщо всю довжину опору R_2 відградувано в градусах).

Робота автоматичного моста відбувається в такий спосіб. При зміні температури в об'єкті змінюється величина R_t і між точками «а» і «б» з'являється різниця потенціалів, що надходить на електронний підсилювач. Посилений сигнал керує роботою виконавчого механізму ВМ, що буде переміщати движок перемінного опору (реохорда) R_2 доти,

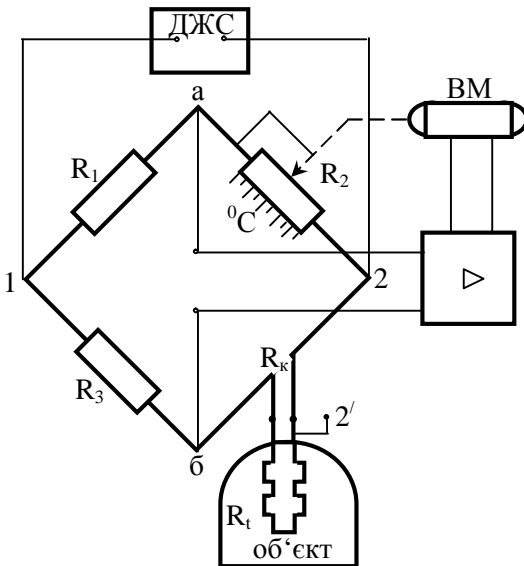


Рисунок 2.49 – Схема врівноваженого автоматичного моста

поки різниця потенціалів між точками «а» і «б» не буде дорівнювати нулю, при цьому, уся система (включаючи міст, електронний підсилювач, виконавчий механізм) прийде в стан рівноваги.

Схема урівноваженого автоматичного моста одержала найбільше поширення при вимірі температури з використанням термометра опору, тому що має наступні переваги:

- показання моста не залежать від коливання напруги живлення;

- показання приладу лінійно зв'язані зі зміною вимірюваної температури;
- вимір температури здійснюється автоматично;
- конструкція мостів дозволяє здійснювати запис показань температури об'єкта.

До числа недоліків схеми варто віднести:

- необхідність у схемі досить складного пристрою для зрівноважування (електронний підсилювач, виконавчий механізм, реохорд);
- складність чи неможливість виміру малих опорів;
- вплив зміни опору сполучних проводів на показання приладу.

Для зменшення впливу опору проводів застосовують трьопровідну схему включення термометра опору в мостову схему, тобто джерело живлення одним полюсом підключається безпосередньо до одному з кінців термометра опору (на рисунку 2.35 точку 2 переносять у точку 2'). У цьому випадку опір лінії термометра включають у два сусідніх плечі моста, що дозволяє в значній мірі зменшити температурну погрішність від зміни опору лінії.

В даний час промисловість випускає автоматичні урівноважені мости різних модифікацій із класом точності 0,25 і 0,5: що показують, самописні зі стрічковою і дисковою діаграмою, із сигнальними і регулюючими пристроями, одноточечні і багатоточечні, мініатюрні, малогабаритні і нормальногабаритні, з різним градуванням для роботи з мідними і платиновими термометрами опору, з різними межами виміру температури від -200 до $+650$ °С.

Логометри. Магнітоелектричний логометр (логос - «відношення») є вторинним приладом, що працює в комплекті з термометрами опору для виміру температури газоподібних і рідких середовищ. Принцип дії логометра заснований на вимірі відносини двох струмів, що проходять через дві жорстко скріплені рамки, що знаходяться в магнітному полі постійного магніту. Логометр (рисунок 2.50) складається з постійного магніту з полюсними наконечниками овальної форми і тому значення магнітної індукції в різних точках повітряного зазору при різному куті повороту рамок і стрілки буде різним. Повітряний зазор зменшується від центра до країв полюсних наконечників і відповідно від центра до країв полюсних наконечників зростає магнітна індукція в зазорі. Обидві рамки логометра живляться від одного джерела живлення Б і включені таким чином, що їхні обертаючі моменти спрямовані назустріч один одному. Значення обертаючих моментів рамок M_1 і M_2 можна визначити по формулах:

$$M_1 = k \cdot I_1 \cdot B_1; \quad M_2 = k \cdot I_2 \cdot B_2, \quad (2.58)$$

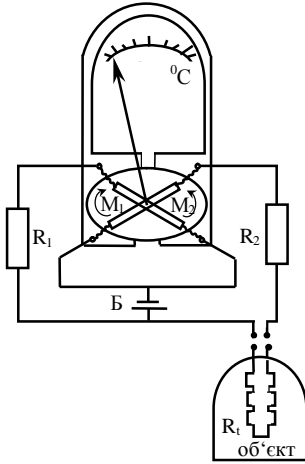


Рисунок 2.50 – Схема логометра

де I_1 і I_2 - значення струмів, що проходять через рамки;

B_1 і B_2 – значення магнітної індукції в місцях розташування рамок;

k – коефіцієнт, що визначається геометричними параметрами рамки і числом витків рамки.

При вимірі температури змінюється значення R_t і змінюється, у свою чергу, значення струмів I_1 і I_2 , що проходять через рамки. На рамках виникнуть різні обертові моменти M_1 і M_2 і система з двох рамок почне повертатися. При цьому рамка з великим обертаючим моментом попадає в більш слабке магнітне поле і її момент буде зменшуватися, у той час як рамка з меншим обертаючим моментом попадає в сильне магнітне поле і її момент буде збільшуватися.

При визначеному куті повороту обертаючі моменти зрівнюються і рамки зупиняться, тобто

$$M_1 = M_2.$$

чи

$$I_1 \cdot B_1 = I_2 \cdot B_2 \tag{2.59}$$

звідки

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{B_2}{B_1} \tag{2.60}$$

З огляду на те, що відношення $\frac{B_2}{B_1}$ є функцією кута α повороту

двох рамок, можна записати

$$\frac{B_2}{B_1} = f(\alpha).$$

Відношення ж струмів $\frac{I_1}{I_2}$ залежить від величини R_t , тобто від

значення температури в об'єкті, що можна представити як :

$$\frac{I_1}{I_2} = \varphi(R_t).$$

Таким чином, кут повороту рухливої системи (двох рамок і стріл-

ки, що показує), при якому моменти M_1 і M_2 будуть рівні (положення рівноваги системи), залежить від опору термометра, а, виходить, від вимірюваної температури і не залежить від напруги живлення.

У логометрах підвід струму до рамок здійснюється за допомогою маломоментних спіральних волосків, що одночасно служать і для повернення стрілки у вихідне положення при виключеному джерелі живлення. У цьому випадку зміна напруги живлення на $\pm 10\%$ від номінального значення викликає зміну показань, що звичайно не перевищує межі основної погрішності логометра, що допускається.

Основним недоліком логометрів, що працюють з високоомними термометрами опору, є вплив опору провідників, що підводять, значення якого може мінятися при зміні навколишньої температури. Для зменшення температурної погрішності приладу послідовно з рамками включають манганінові резистори. Однак, така операція приводить до деякої втрати чутливості логометра, що обмежує верхню межу величини опору додаткових резисторів. Крім того, на точність виміру температури впливають моменти тертя в опорах, моменти опору токопідводів, момент інерції рухливої системи і ряд інших факторів (наприклад, наявність зовнішніх магнітних полів).

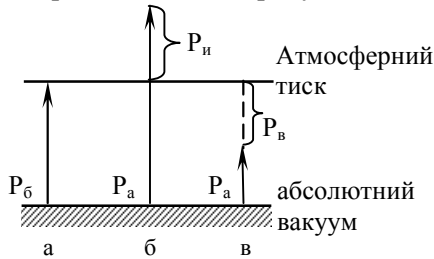
В експлуатації на промислових об'єктах знаходяться логометри різних модифікацій: переносні, щитового монтажу, зі спеціальними пристроями для регулювання і сигналізації, що показують і самописні (до 12 точок), із класом точності 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0.

3 ВИМІР ТИСКУ РІДКИХ І ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩ

3.1 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.

При вимірах розрізняють абсолютний P_a , надлишковий P_n , вакууметричний P_v і барометричний P_b тиск (рисунок 3.1).



а – барометричний (атмосферний) тиск

б – абсолютний тиск, $P_a > P_b$

в – абсолютний тиск, $P_a < P_b$

Рисунок 3.1- 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;

- манометри надлишкового тиску чи просто манометри;
- 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 $1 \text{ Бар} \approx 1 \text{ ат}$.

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.)=0,98066·10⁵ 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:

- 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 якунебудь електричну величину або на зміні електричних властивостей матеріалу під дією тиску;
- вантажопоршневі, у яких вимірюваний тиск врівноважується тиском, створюваним масою поршня і вантажів.

3.2 Вимірювання тиску

3.2.1 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

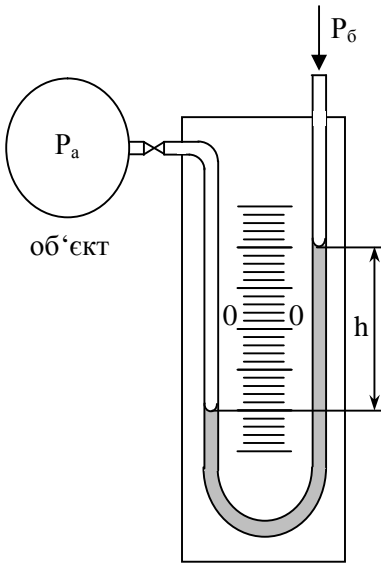


Рисунок 3.2 – Вимір надлишкового тиску U-образним манометром

трубки і прямолінійної шкали з найменшою ціною розподілу 1 мм (рисунок 3.2). 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.

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. Стовп рідини h врівноважує різниця тисків:

$$P_a - P_0 = \rho \cdot g \cdot h; \quad h = \frac{1}{\rho \cdot g} (P_a - P_0), \quad (3.1)$$

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

P_0 – атмосферний тиск у момент виміру, Па;

ρ – щільність робочої рідини, $\text{кг}/\text{м}^3$;

g – прискорення сили ваги, $\text{м}/\text{с}^2$.

Рівняння (3.1) 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 (3.1) прийме наступний вид:

$$h = \frac{1}{g \cdot (\rho_1 - \rho_2)} (P_a - P_0) \quad (3.2)$$

де ρ_1 – щільність робочої рідини, $\text{кг}/\text{м}^3$;

ρ_2 – щільність середовища в об'єкті, $\text{кг}/\text{м}^3$.

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 (рисунк3.3), 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 контрольованого середовища.

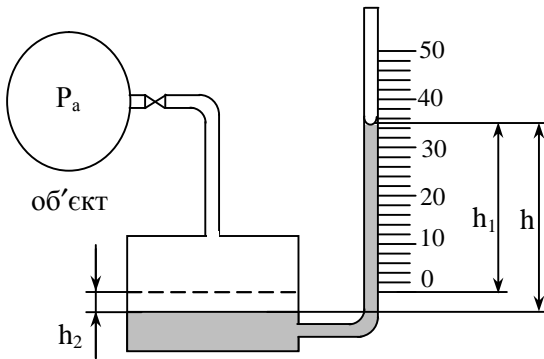


Рисунок 3.3 – Чашковий манометр

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

$$h = h_1 + h_2 \quad (3.3)$$

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

$$M_q = M_T \quad \text{чи} \quad h_2 \cdot F_2 \cdot \rho = h_1 \cdot F_1 \cdot \rho$$

Звідси:

$$h_2 = \frac{F_1}{F_2} h_1 \quad (3.4)$$

Підставивши отримане співвідношення (між h_2 і h_1) у вираження (3.3), одержимо:

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

де d, D – діаметри відповідно широкої судини і трубки. Звичайне співвідношення діаметрів складає 1:20 і величина h складе:

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

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 градуювання 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

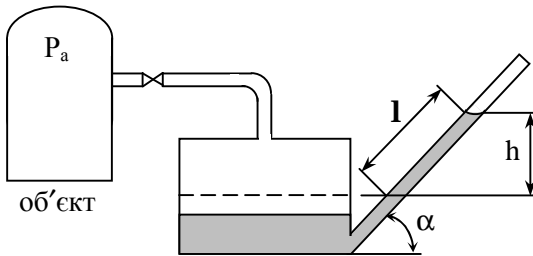


Рисунок 3.4 – Манометр з похилою трубкою

підвищення точності виміру застосовують чашкові манометри з похилою трубкою (рисунку 3.4), показання яких визначаються по довжині розтікання робочої рідини в похилій трубці манометра. 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:

$$h = l \cdot \sin \alpha \quad (3.5)$$

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 (3.5) вводять виправлення на щільність спирту:

$$h = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot l \cdot \sin \alpha, \quad (3.6)$$

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 "К"=0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8, розраховані по формулі:

$$K = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \sin \alpha, \quad (3.7)$$

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

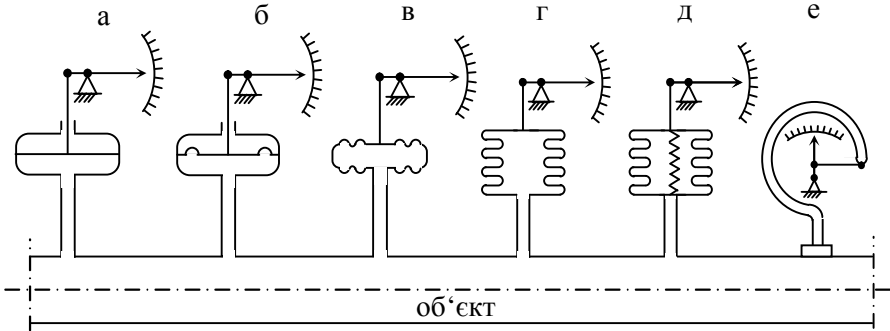
Недоліками рідинних манометрів є відсутність дистанційної передачі показань і порівняно невелика межа вимірів. Тому рідинні прилади як стаціонарні в промисловості використовуються рідко. Вони широко поширені в лабораторній практиці й у промисловості при епізодичних вимірах і при контролі інших приладів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

3.2.2 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 (рисунки 3.5) плоскі мембрани (а), гофровані мембрани (б), коробчаті гофровані мембрани (в), сильфони (г), сильфони з циліндричною пружиною (д) і трубчасті пружини (е) і ін.

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 вимо-



гам відповідають бронза, латунь і хромонікелеві сплави.

Рисунок 3.5 – Пружні чуттєві елементи

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 від статичної характеристики $\Delta l = f(\Delta p)$ чуттєвого елемента при збільшенні і зменшенні навантаження в межах пружних деформацій неоднозначний і утворює так названу 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:

$$\delta = \frac{(\Delta I_1 - \Delta I_2)_{\max}}{\Delta I_{\max}} \cdot 100, \% \quad (3.8)$$

де $(\Delta I_1 - \Delta I_2)_{\max}$ - максимальна різниця між переміщеннями пружинного елемента при прямому і зворотному вимірі (ході);

ΔI_{\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.

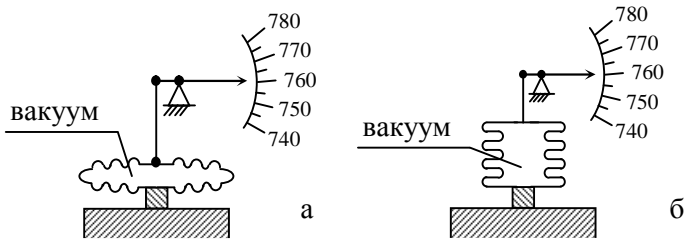
Нижче розглядаються найбільш розповсюджені типи пружних чуттєвих елементів, застосовуваних у приладах виміру тиску.

Плоскі мембрани. 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 підоймову 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'езокварцевих, 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. 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 мем-

бран 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. Сильфон являє собою тонкостінний циліндр, бічна поверхня якого виконана з поперечним гофруванням (рисунок 3.5 г). 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 – коробчатая мембрана; б – сильфонна мембрана

Рисунок 3.6 – 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 дровову циліндричну гвинтову пружину (рисунок 3.5 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 3.6). 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 $\approx 270^\circ$ трубки овального чи еліптичного перетину (рисунок 3.5e). 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 по-

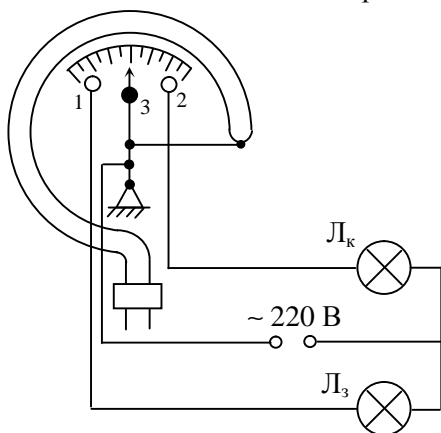


Рисунок 3.7 – Електроконтактний манометр

рожнього 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 3.7 показана схема електроконтактного манометра. 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.

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 L_3 (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 L_k (червоного кольору).

3.2.3 Електричні манометри

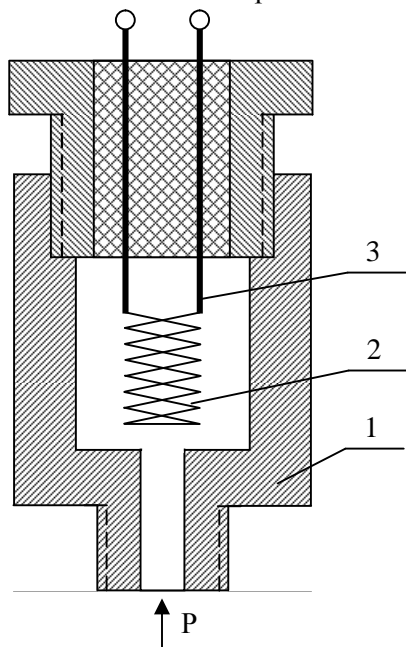
Електричні манометри мають свою область виміру тиску, у якій неможливо застосувати рідинні і пружинні прилади. При вимірі надвисоких тисків, глибокого вакууму і тиску, що змінюється з високою частотою, застосовуються тільки електричні манометри, дію яких засновано на перетворенні тиску в яку-небудь електричну 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 3.8. 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.



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

Рисунок 3.8 – Схема манометра опору

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.

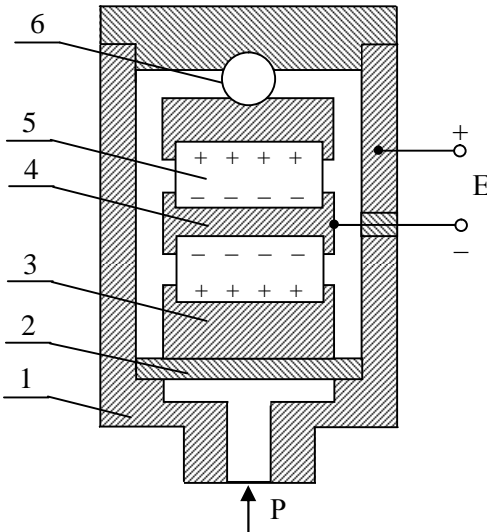
Найбільш широко використовуються кристали кварцу, у яких п'єзометричний ефект практично не залежить від температури до 500°C . Крім того, кристали кварцу в порівнянні з іншими кристалами мають високу механічну міцність. Схема п'єзоелектричного манометра приведена на рисунку 3.9. Вимірюваний тиск P через мембрану

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 верх-

ньою опорою, сприяє рівномірному розподілу тиску на поверхні кварцових пластин. Нижня частина корпусу має штуцер для з'єднання приладу з об'єктом виміру.

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 без-



1 – корпус приладу; 2 – мембрана; 3 – металева опора; 4 – контактна пластина; 5 – п'єзоелемент; 6 – шарик.
Рисунок 3.9 – Схема п'єзоелектричного манометра

інерційність, 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.).

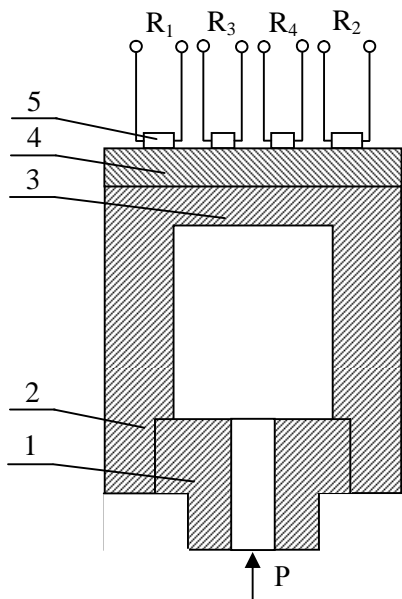
Тензометричні манометри. Тензометричний метод виміру тиску полягає в безпосередньому перетворенні деформації пружного чуттєвого елемента (мембрани) під впливом тиску в зміну електричного опору резисторів, закріплених на цьому елементі. Ця зміна опору перетвориться елект-

ричною 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 3.10. Манометр складається з циліндричного корпусу 2, верхня частина якого утворює пружну мембрану 3, а в нижній частині має штуцер 1 для підведення вимірюваного тиску P . До мембрани припаяна кругла сапфірова пластина 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
пластина; 5 – кремнієві резистори
Рисунок 3.10 – Схема тензометрич-
ного манометру

Тиск у манометрі вимірюється з використанням схеми неврівноваженого 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.

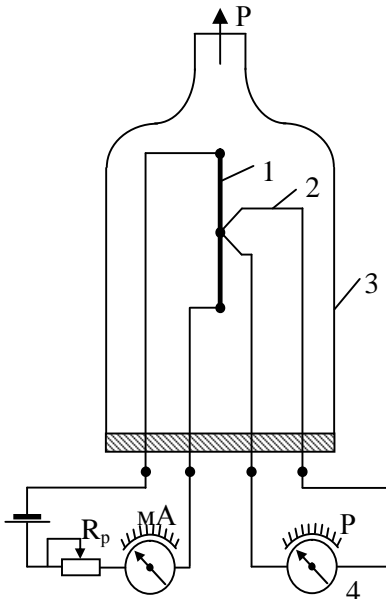
У результаті при деформації

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 $1,1-10^4$ Па, тобто в області середнього значення вакууму. Для виміру абсолютного тиску в зазначеному інтервалі застосовуються два конструктивних варіанти теплових вакуумметрів: *термопарний* і *опору*. В обох конструкціях чуттєвим елементом є нагріта шляхом пропускання електричного струму платинова нитка, розташована у вакуумному балоні. При збільшенні розрідження 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 3.11 показана схема термопарного вакуумметра. У середині скляного балона 3, вакуумно щільно приєднаного верхньою



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

Рисунок 3.11 - Схема термопарного вакуумметра

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 , установлюється за допомогою регульовального реостата R_p і контрольного міліамперметра.

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 чуттєвим елементом є нагріта до температури 200°C вольфрамова нитка, використовується невірноважений

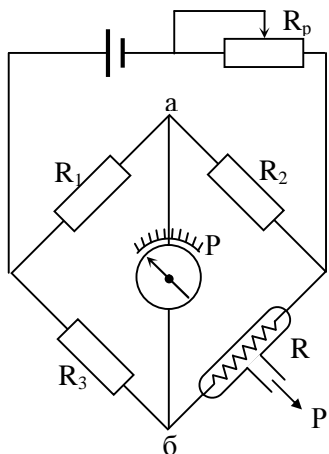


Рисунок 3.12 – Схема теплового вакуумметра опорув

збільшується пропорційно зниженню тиску. Напруга у вимірювальній діагоналі мостової схеми між точками $a - б$ (розбаланс моста) також буде визначатися величиною вимірюваного тиску. Вимірювальний прилад (мілівольметр), відградуйований в одиницях абсолютного тиску, покаже величину вакууметричного тиску в об'єкті.

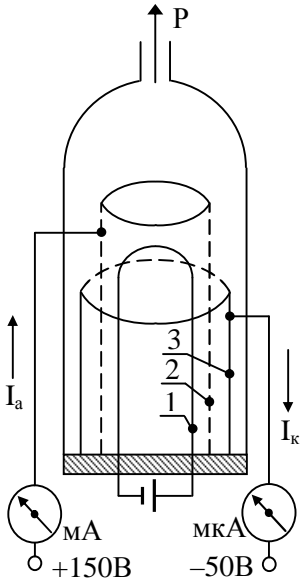
Тепловіддача від вольфрамової нитки залежить як від числа молекул, що беруть участь у переносі тепла, так і від температури стінок камери. Для зниження впливу на показання приладу коливань температури навколишнього середовища, газова камера з вольфрамовою ниткою міститься у вакуумну камеру, утворюючи 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 3.13), що містить катод 1, що знаходиться усередині анодної сітки 2, оточеної циліндричним іонним колектором

міст. На рисунку 3.12 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,



1 – катод; 2 – анодна сітка;
3 – іонний колектор
Рисунок 3.13 – Схема іонізаційного вакуумметра

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 утворяться, 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 градувальної характеристики для даного типу іонізаційного вакуумметра.

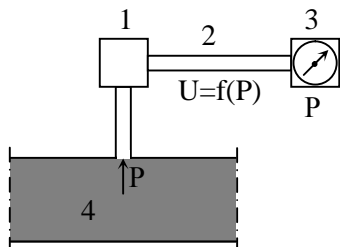
Відносна погрішність більшості типів робочих вакууметричних манометрів не перевищує $\pm 30\%$. Прилади для виміру середнього і глибокого вакууму, що використовують електричні і теплові ефекти, застосовуються для контролю технологічних процесів зв'язаних із застосуванням середнього і глибокого вакууму: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

3.3 Вимірювальні перетворювачі тиску

3.3.1 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 3,14).



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

Рисунок 3,14 – 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.).

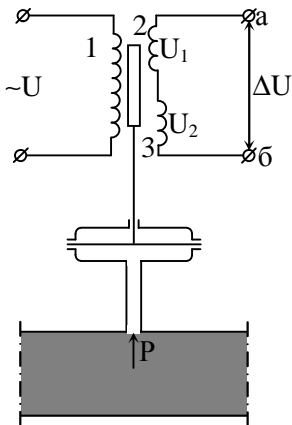
Сучасні вимірювальні перетворювачі випускаються з уніфікованими вихідними сигналами, що забезпечує взаємозамінність засобів вимірів (вторинних приладів) і дозволяє скоротити типи вторинних приладів. Широке поширення одержали перетворювачі з вихідним сигналом перемінного струму. Цей сигнал представляється 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.

3.3.2 Диференційно-трансформаторні перетворювачі

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

Принцип дії ДТП заснований на залежності взаємної індуктивності між первинною обмоткою (обмоткою збудження) і вторинною обмоткою від положення сердечника. Перетворювач являє собою трансформатор (рисунок 3.15), що має обмотку збудження 1 і дві секції 2 і 3 вторинної обмотки, включені зустрічно. Створюваний первинною обмоткою перемінний магнітний потік буде пронизувати оби-



1 – первинна обмотка;
2, 3 – вторинні обмотки
Рисунок 3.15 – Схема диференційно-трансформаторного перетворювача

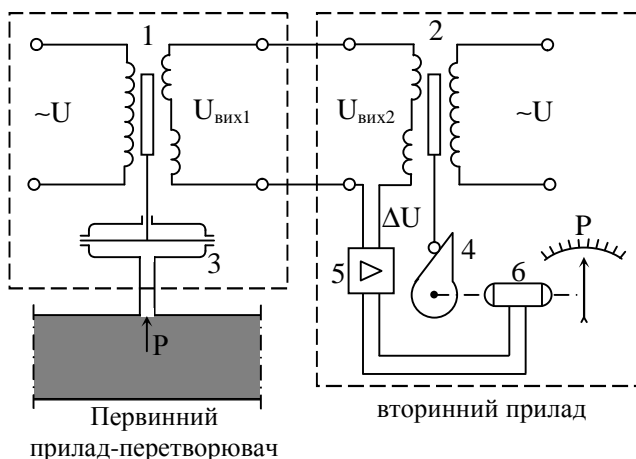
дві секції вторинної обмотки, збуджуючи в них перемінні ЕРС U_1 і U_2 . Якщо сердечник розташовується симетрично щодо двох секцій вторинної обмотки (як показано на рисунку 3.15), то $U_1=U_2$ і результуюча напруга між точками "а" і "б" буде дорівнювати нулю. При збільшенні тиску P мембрана чуттєвого 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 сер-

дечник 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.

Для дистанційної передачі електричного сигналу від ДТП перетворювача (первинний прилад) до вторинного приладу, розташованому на щиті керування об'єктом, використовується компенсаційна схе-

ма (рисунок 3.16). 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, що харчує реверсивний двигун 6.

При розгляді дії виміральної схеми припустимо, що перед виміром сердечники двох приладів (первинного і вторинного) знаходяться в середньому положенні (як представлено на рисунку 316). При цьому, вихідні напруги двох приладів будуть рівні ($U_{\text{вих1}} = U_{\text{вих2}}$), а різниця цих напруг буде дорівнювати нулю ($\Delta U = 0$).



1 – ДТП первинного приладу; 2 – ДТП вторинного приладу; 3 – пружний елемент; 4 – профільований кулачок; 5 – посилювач; 6 – реверсивний двигун
Рисунок 3,16 – Схема дистанційної передачі тиску з використанням диференційно-трансформаторних перетворювачів

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

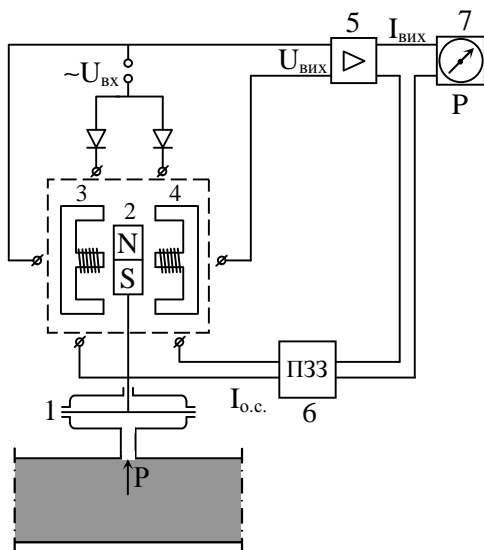
у первинному приладі. Таким чином, кожному положенню сердечника ДТП первинного приладу (тобто визначеному значенню тиску) відповідає цілком визначене положення сердечника ДТП вторинного приладу. Стрілка, що показує, (чи пристрій, що реєструє) кінематично зв'язана з реверсивним двигуном, укаже на значення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

3.3.3 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, устанавлиється визначена залежність між вихідним струмом і переміщенням рухливого елемента (постійного магніту), а виходить, і значенням вимірюваної величини.



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

Рисунок 3,17 – Структурна схема перетворювача з магнітною компенсацією

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 утворяться 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 $I_{\text{вих}}$, укаже значення вимірюваної величини P .

Перетворювачі з магнітною компенсацією мають ряд переваг: можливість підключення декількох вторинних приладів до одного перетворювача, вібронстійкість і надійність. 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 пере-

Структурна схема перетворювача приведена на рисунку 3.17. 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 перетвориться у вихідний ток сигнал $I_{\text{вих}}$.

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

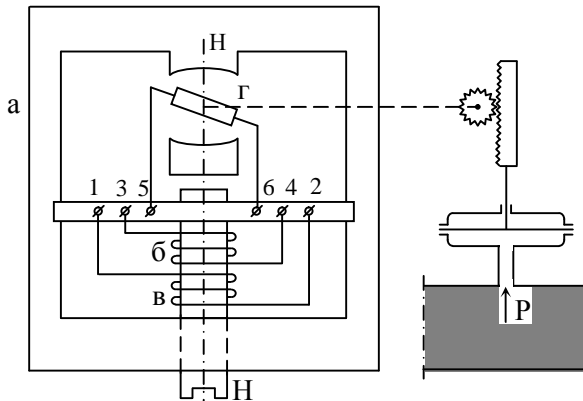
творювача. Перетворювачі цього типу мають клас точності 1,0 і 1,5. Як вторинні прилади використовуються міліамперметри з відповідним діапазоном виміру.

3.3.4 Феродинамічні перетворювачі

Феродинамічні перетворювачі застосовуються у вимірювальних пристроях для перетворення кутових переміщень чутливих елементів (мембран, сильфонів і ін.) при вимірі тиску чи перепаду тиску рідких чи газоподібних середовищ.

Принцип дії феродинамічних перетворювачів засновано на залежності взаємної індуктивності між обмоткою збудження і рамкою від її кута повороту, що приводить до залежності ЕРС, що наводиться в рамці, від кута повороту. Феродинамічний перетворювач (рисунок 3.18) містить магнітопровід "а", обмотку збудження "б" з вивідними контактами 3-4, обмотку зсуву "в" з вивідними контактами 1-2, поворотну рамку "г" з вивідними контактами 5-6. Поворотна рамка кінематично зв'язана з пружинним елементом, що сприймає зміну тиску чи перепаду тиску в об'єкті.

Магнітний потік у магнітопроводі, створюваний обмоткою збу-



а – магнітопровід; б – обмотка збудження; в – обмотка зміщення; г – поворотна рамка; 1, 2, 3, 4, 5, 6 - контакти

Рисунок 3.18 – Схема приладу феродинамічного перетворювача

дження (вона живиться перемінною напругою), індуктує ЕРС у рамці й в обмотці зсуву. ЕРС, що індуктується у рамці залежить від струму живлення обмотки збудження і взаємної індуктивності між рамкою й обмоткою збудження. Взаємна індуктивність змінюється при повороті рамки від нуля (коли площа рамки збігається з магнітної нейтраллю

НН) до максимального значення, тобто на кут $\alpha = \pm 20^\circ$. Амплітудне значення ЕДС, що наводиться в рамці, визначається по формулі:

$$E = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot n \cdot S \cdot B_m \cdot \alpha, \quad (3.8)$$

де f – частота;

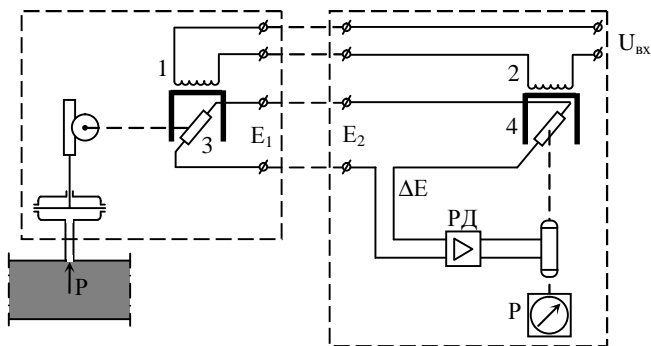
n – число витків рамки;

S – площа рамки;

B_m – амплітудне значення індукції магнітного поля;

α – кут повороту рамки.

Таким чином, ЕРС, що наводиться в рамці, лінійно залежить від кута повороту рамки при незмінному значенні інших величин, що входять у формулу (3.8). Рамка феродинамічних перетворювачів повертається в межах $\pm 20^\circ$, тому що при великих кутах порушується лінійність характеристики і збільшується погрішність виміру. Магнітна система перетворювача розрахована таким чином, що ЕРС, наводиться в рамці, змінюється від -1 В до $+1$ В при повороті рамки від -20° до $+20^\circ$. Для одержання на виводах рамки тільки позитивних ЕРС послідовно з нею включається обмотка зсуву. ЕРС, що наводиться в обмотці зсуву, складається з ЕРС рамки і вихідної напруги на рамці змінюється від 0 до



1 – обмотка збудження передавального перетворювача; 2 – обмотка збудження перетворювача, що компенсує; 3, 4 – рамки перетворювачів;

Рисунок 3.19 – Схема дистанційної передачі показань з використанням феродинамічних перетворювачів

$+2$ В. Перетворювачі без обмотки зсуву застосовуються в приладах з нульовою оцінкою в центрі шкали (наприклад, при вимірі позитивних і негативних тисків у робочому просторі нагрівальних, плавильних печей, казанів і інших об'єктів). Перетворювачі з обмоткою зсуву застосовуються в приладах з нульовою оцінкою на початку шкали.

Принципова схема дистанційної передачі показань з використанням феродинамічних перетворювачів без обмоток зсуву представлена на рисунку 3.19. Обмотки збудження 1 і 2 передавального перетворювача і перетворювача, що компенсує, включені послідовно, щоб виключити вплив на показання приладу зміни частоти f і напруги $U_{\text{вх}}$ вхідного живлення. Рамки перетворювачів 3 і 4 включені зустрічно, унаслідок чого на вхід підсилювача подається різниця ЕРС ΔE передавального перетворювача і перетворювача, що компенсує:

$$\Delta E = E_1 - E_2$$

При $\Delta E = 0$ на виході підсилювача сигналу немає і двигун РД зупиняється. При зміні тиску (чи перепаду тиску при вимірі витрати пристроями, що звужують) мембрана чуттєвого елемента через механічну передачу повертає рамку передавального перетворювача, що призводить до зміни вихідної напруги E_1 .

На виході підсилювача з'являється сигнал небалансу ΔE , що підсилюється і приводить в обертання вал реверсивного двигуна, кінематично зв'язаного з рамкою перетворювача, що компенсує. Двигун буде змінювати положення рамки до моменту рівності ЕРС E_1 і E_2 . Після цього двигун знеструмиться тому що ΔE стане рівним нулю і стрілка приладу установиться на оцінці, що відповідає значенню вимірюваного параметра.

У феродинамічній системі дистанційної передачі використовуються самописці і прилади, що показують, що мають рівномірну шкалу і клас точності за показниками 1,0. Феродинамічні перетворювачі мають такі ж переваги і недоліки, як і диференційно-трансформаторні.

4 ВИМІР ВИТРАТИ ГАЗУ, РІДИНИ І ПАРУ

4.1 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 однотипових 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 ($\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{год}$, 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 $t_n=20$ °С, тиск $P_n=101325$ Па, відносна вологість $\phi=0$).

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 ета-

лонних приладів.

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

4.2 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. Апаратне 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 i , 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 протіканні 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 градуювання. Градувальні характеристики нестандартних пристроїв, що звужують, визначаються в результаті індивідуального градуювання.

Діафрагма, показана на рисунку 4.1, 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.

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 4.1. 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.

Як видно з рисунка 4.1, 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 вимірятися різними приладами – дифманометрами з безпосереднім одержанням

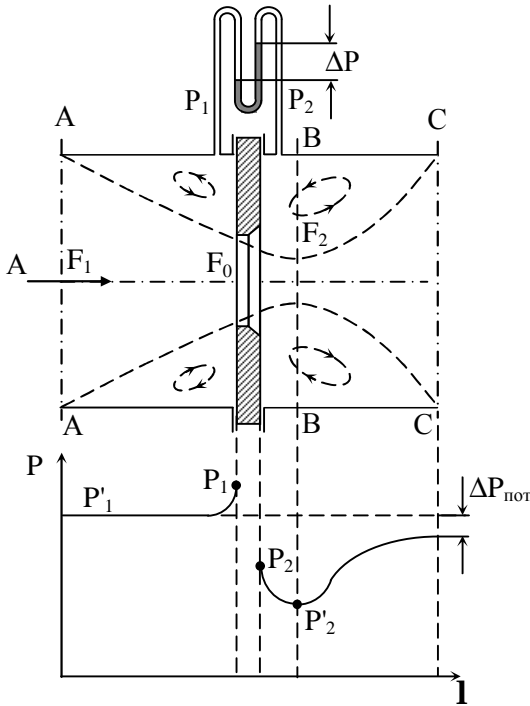


Рисунок 4.1 – Розподіл статичних тисків в зоні розташування пристрою, що звужує

А–А й В–В, запишемо

$$P'_1 + \frac{W_1^2}{2} \rho = P'_2 + \frac{W_2^2}{2} \rho. \quad (4.1)$$

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 4.1 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:

$$F_1 \cdot W_1 = F_2 \cdot W_2 \quad (4.2)$$

Самий вузький перетин струменя F_2 , що виходить із пристрою, що звужує, складновимірювана величина, тому F_2 виражають через

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

площу отвору пристрою, що звужує, F_0 і коефіцієнт звуження:

$$F_2 = \mu \cdot F_0. \quad (4.3)$$

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

$$\frac{F_0}{F_1} = m \quad \text{і} \quad F_0 = m \cdot F_1. \quad (4.4)$$

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

$$F_2 = \mu \cdot m \cdot F_1. \quad (4.5)$$

Вирішуючи спільно рівняння 4.1 і 4.5, одержимо значення середньої швидкості вимірюваного середовища в самому вузькому перетині F_2 :

$$W_2 = \frac{1}{\sqrt{1-\mu^2} \cdot m^2} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}. \quad (4.6)$$

На практиці статичний тиск виміряється в безпосередній близькості від пристрою, що звужує, тобто P_1 і P_2 , тому у формулу (4.6) уводять поправочний коефіцієнт ξ і рівняння для середньої швидкості W_2 прийме вид:

$$W_2 = \frac{\xi}{\sqrt{1-\mu^2} \cdot m^2} \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)}. \quad (4.7)$$

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

$$V = W_2 \cdot F_2. \quad (4.8)$$

Використовуючи рівняння 4.3, 4.7 і 4.8, можна записати в остаточному виді рівняння витрати для пристроїв, що звужують:

$$V = \frac{\mu \cdot \xi}{\sqrt{1-\mu^2} \cdot m^2} \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)}, \frac{M^3}{c}. \quad (4.9)$$

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":

$$\alpha = \frac{\mu \cdot \xi}{\sqrt{1-\mu^2} \cdot m^2} \quad (4.10)$$

Таким чином, рівняння витрати нестисливого середовища (тобто

щільність до і після діафрагми не змінюється) приймає вид:

$$V = \alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)}, \frac{\text{м}^3}{\text{с}}. \quad (4.11)$$

Це рівняння можна використовувати також для визначення масової витрати середовища:

$$G = V \cdot \rho = \alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (P_1 - P_2)}, \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (4.12)$$

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:

$$V = \alpha \cdot \epsilon \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)}, \frac{\text{м}^3}{\text{с}}. \quad (4.13)$$

$$G = \alpha \cdot \epsilon \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (P_1 - P_2)}, \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (4.14)$$

де ρ - щільність середовища до пристрою, що звужує.

Отримані формули є основними для виміру витрати рідких і газо-подібних 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 4.2 показані залежності коефіцієнта витрати від Re і m .

Як видно з приведених експериментальних даних (рисунок 4.2), 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

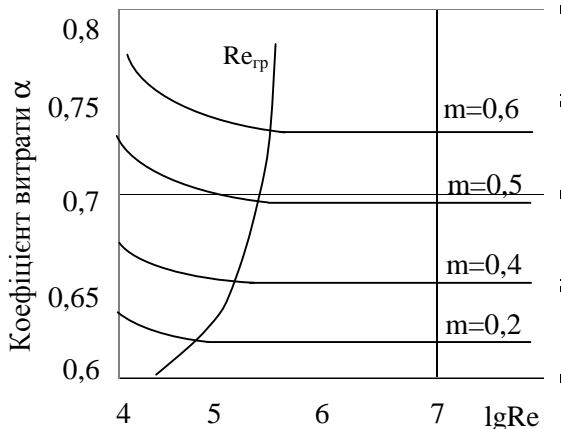


Рисунок 4.2 – Залежність коефіцієнту витрати стандартних діафрагм від числа Рейнольдса при різних значеннях m .

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 4.1.

За даними таблиці 4.1 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 (4.13) і (4.14) звичайно представляються в іншому записі:

$$V = 0,01252 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}, \frac{m^3}{c} \quad (4.15)$$

$$G = 0,01252 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot \Delta P}, \frac{кг}{c} \quad (4.16)$$

Таблиця 4.1 – 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	-

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/м^3 .

Розрахунок градуювальної характеристики пристрою, що звужує, припускає обчислення чисельного значення α , ϵ , d , ρ , що входять у рівняння витрати (4.15) і (4.16) 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 (4.15) і (4.16), 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 (4.4) при відомих діаметрах трубопроводу і вхідного отвору звуження.

Зміна величини α , викликана притупленням вхідної крайки діафрагми і шорсткістю трубопроводу, враховується введенням поправочних коефіцієнтів K_n – на притуплення вхідної крайки і $K_{ш}$ – на шорсткість внутрішніх стінок трубопроводу. Коефіцієнти K_n і $K_{ш}$ 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:

$$\text{- для діафрагм} \quad \alpha = \alpha_j \cdot K_{ш} \cdot K_n \quad (4.17)$$

$$\text{- для сопел} \quad \alpha = \alpha_j \cdot K_{ш} \quad (4.18)$$

Поправочний коефіцієнт ϵ 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 ϵ від цих величин визначається по таблицях чи номограмах.

Діаметри пристрою, що звужує, і трубопроводу звичайно зада-

ються значеннями при температурі 20 °С і позначаються відповідно d_{20} і D_{20} . Вхідні в рівняння витрати d чи D при робочій температурі t , що може відрізнятися від 20 °С, визначаються по формулах:

$$d = k'_t \cdot d_{20}; D = k''_t \cdot D_{20},$$

де k'_t та k''_t – поправочні коефіцієнти на розширення матеріалу пристрою, що звужує, і трубопроводу, які визначаються по робочій температурі і марці сталі. Якщо температура вимірюваного середовища знаходиться в інтервалі – 20...+50 °С, то $k'_t = k''_t = 1$.

Щільність вимірюваного середовища, що входить у рівняння витрати, визначається по температурі й абсолютному тиску цього середовища, що рухається в трубопроводі. По обмірюваним температурі і тиску щільність визначається по довідкових таблицях для конкретних рідких, газових середовищ і пари.

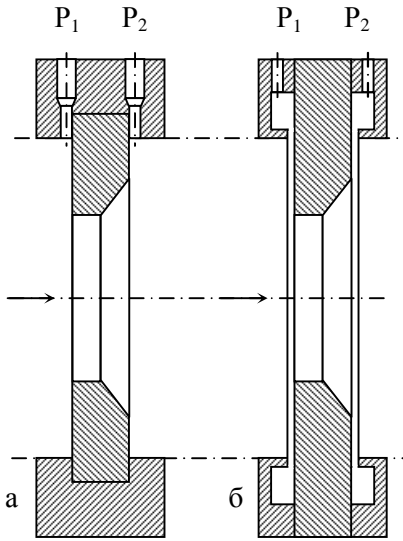
Обчислені α , ϵ , d , ρ , будучи підставленими у формули витрати (4.15) і (4.16), дозволяють одержати градууювальну характеристику пристрою, що звужує, за допомогою якої визначають витрату по вимірюваному перепаду тиску.

В експлуатаційних умовах можливе відхилення значення щільності вимірюваного середовища від градууювальної величини через різкі зміни температури і тиску. У цьому випадку в показання витратоміра необхідно вводити виправлення на зміну щільності, тобто помножити на коефіцієнт:

- для об'ємного витратоміра $C = \sqrt{\frac{\rho_{\text{гр}}}{\rho}}$;
- для масового витратоміра $C = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_{\text{гр}}}}$.

В даний час випускаються деякі типи витратомірів, у яких мається електронний блок для автоматичного уведення виправлення при зміні щільності середовища в процесі виміру витрати.

Типи *пристроїв, що звужують*. На практиці в залежності від конкретних умов вимірів застосовуються різні типи пристроїв, що звужують. Найбільш розповсюдженим типом пристроїв, що звужують, для виміру витрати рідких, газоподібних середовищ і пари є стандартні діафрагми. Вони є найпростішими у виготовленні пристроями, що звужують, і застосовуються при дотриманні вимоги $0,005 \leq m \leq 0,7$ для трубопроводів діаметром не менш 50 мм. Діафрагма для трубопроводів діаметром не менш 50 мм (рисунок 4.3 а, б) являє собою тонкий диск, затиснутий на фланцях, із круглими концентричними отворами.



а – діафрагма з окремими отворами;

б – камерна діафрагма

Рисунок 4.3 – Типи діафрагм

З боку входу отвір має гостру прямокутну кришку, а вихідна частина отвору розточується на конус під кутом 30–40°. Для великих діаметрів трубопроводів, більш 500 мм, діафрагми виготовляється без конічного розширення. Усі розміри діафрагми є розрахунковими щодо діаметра трубопроводу D .

Добір тиску P_1 і P_2 здійснюється через окремі циліндричні отвори на фланцях діафрагми для трубопроводів діаметром від 450 до 1600 мм. Для трубопроводів <450 мм добір тиску

здійснюється за допомогою кільцевих камер (рисунок 4.4 б). Діафрагми з кільцевими камерами (камерні діафрагми) менш чуттєві до місцевих збурювань і несиметричності потоку, дозволяють вирівнювати тиск і робити більш точний вимір перепаду тиску при менших довжинах прямих ділянок трубопроводу. Недоліком камерних діафрагм є їхня велика товщина (50-60мм), що утрудняє її установку і велику витрату металу на виготовлення при великих діаметрах трубопроводів.

В окремих випадках, коли необхідно значно зменшити втрати тиску при вимірі витрати, приймають у якості пристроїв, що звужують, сопла і сопла Вентурі.

Нормалізоване сопло (рисунок 4.4) являє собою звуження у виді насадки з плавно закругленим профілем з боку входу струменя, що закінчується короткою циліндричною частиною. Торцева частина сопла на вході потоку має циліндричне виточення для запобігання вихідної крайки циліндричної частини сопла від ушкодження. Сопла застосовуються при вимірі витрат газу, перегрітої пари високого тиску й агресивних рідин у трубопроводах діаметром від 50 до 200 мм. Сопло менш чуттєве до забруднення потоку і впливу корозії і дозволяє вимірювати великі витрати з меншою погрішністю і вимагає менших дов-

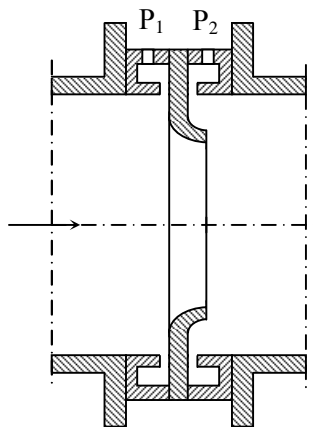


Рисунок 4.4 – Стандартне сопло

виборі типу пристрою, що звужує, і його геометричних параметрів варто враховувати припустиму втрату тиску для даного технологічного процесу.

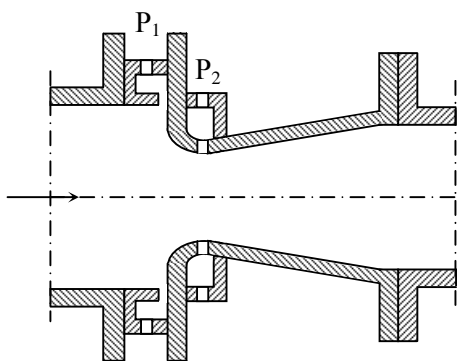


Рисунок 4.5 – Стандартне сопло Вентурі

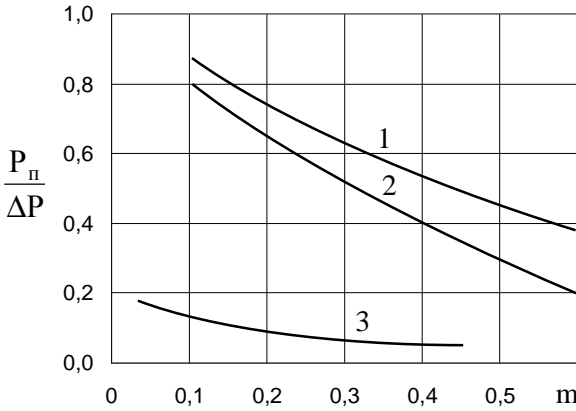
для різних пристроїв, що звужують, при різному значенні модуля "m". З графіків видно, що діафрагма має саму велику втрату тиску при будь-яких умовах виміру (крива 1). У сопла Вентурі, завдяки наявності дифузора, зберігається форма струменя і потік не відривається від стінок каналу, а отже, і втрати тиску (крива 3) у таких пристроях найменше в порівнянні з іншими типами пристроїв, що звужують. Сопло Вентурі рекомендується застосовувати в тих випадках, коли в проми-

жин прямих ділянок трубопроводів при установці, чим діафрагма.

Сопло Вентурі, що має профільовану вхідну частину, складається з циліндричної частини і конічної вихідної частини – дифузора (рисунок 4.5). Добір тисків P_1 і P_2 здійснюється через дві кільцеві камери, одна з яких розташовується до звуження, а друга – у самому вузькому місці сопла Вентурі.

Усі пристрої, що звужують, створюють при проходженні потоку безповоротну втрату тиску, величина якого залежить як від типу пристрою, що звужує, так і від величини "m", тобто від ступеня звуження потоку. Тому, при

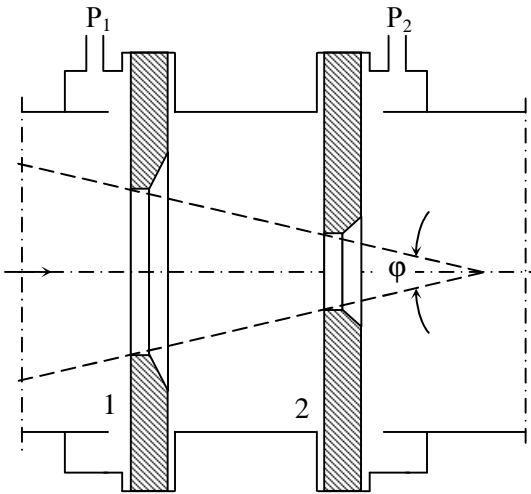
Утрату тиску вимірюваного середовища, що протікає через пристрій, що звужує, визначають як різницю статичних тисків, обмірюваних до і після пристрою, що звужує, на деякій відстані від нього. Утрата тиску в пристрої, що звужує, звичайно виражається в частках чи відсотках від перепаду тиску на пристрої, що звужує. На рисунку 4.6 приведена залежність утрати тиску, виражена у частках перепаду,



1 – діафрагма; 2 – сопло; 3 – сопло Вентурі

Рисунок 4.6 – Втрати тиску у пристроях, що звужують

газів з малою щільністю) і при малих діаметрах трубопроводів (менше 50 мм). За таких умов режим плинучості речовин у трубопроводах характеризується малими числами Рейнольдса, тобто потік слаботурбулентний. Як відзначалося вище, при значеннях чисел Re нижче граничних, коефіцієнт витрати не є постійною величиною для стандартних пристроїв, що звужують. Для таких випадків виміру витрати розроблено



1 – основна діафрагма;

2 – додаткова діафрагма

Рисунок 4.7 – Здвоєна діафрагма

слових установках при вимірі витрати речовини великі втрати тиску неприпустимі (спеціальні пальникові пристрої).

Особливі випадки виміру витрати. На практиці часто зустрічаються такі випадки, коли необхідно вимірювати витрату грузлих речовин (мазуту, смол, олій,

ряд спеціальних пристроїв, що звужують, з яких можна відзначити такі види діафрагм: здвоєна, із профілем у чверть кола, без циліндричної частини, з подвійним скосом. Найбільше поширення одержали здвоєні діафрагми, що забезпечують надійні результати виміру і стабільність коефіцієнта витрати при малих значеннях чисел Рейнольдса.

Здвоєна діафрагма (рисунок 4.7) являє собою пристрій, що складається з основної 1 і додаткової 2

діафрагм, встановлених друг від друга на відстані, що складає половину діаметра трубопроводу. Додаткова діафрагма, що поміщається перед основною, має більший діаметр прохідного перетину. Вона направляє потік в основну діафрагму під кутом $\varphi \approx 28^\circ$. У таких пристроях вдається одержати коефіцієнти витрати постійними в широкому інтервалі чисел Рейнольдса від $3 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^5$. Утрата тиску в здвоєних діафрагмах менше, ніж у звичайних але більше, ніж у сопла. Добір тисків P_1 і P_2 здійснюється через кільцеві камери.

У випадку виміру витрати забруднених середовищ (забруднена рідина, запилений газ) застосовуються сегментні діафрагми. Такі пристрої не є перешкодою для проходу забруднюючих потік домішок і в них не утворюються відкладення поблизу діафрагми.

Сегментна діафрагма являє собою тонкий диск, що має отвір у виді сегмента (рисунок 4.8), що розташовується у верхній частині трубопроводу, якщо необхідно вимірювати газові і рідкі середовища, забруднені твердими частками, і в нижній частині, якщо в рідині знаходяться газові пухирці.

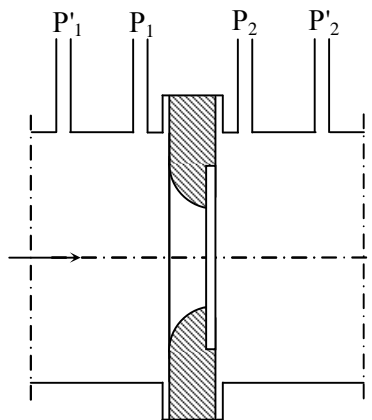


Рисунок 4.9 – Сопло з профілем в чверть круга для виміру витрати запиленних газових потоків.

Такий пристрій, що звужує, забезпечує вимір окремо витрати повітряного потоку з погрішністю не перевищуючої $\pm 2\%$ і окремо витрати вугільного пилу з погрішністю $\pm 2,5\%$.

Аеродинаміка потоку в його профілюючій частині обумовлює незначний знос вхідних заокруглень, радіус яких допускається зменши-

В обох випадках домішки вільно проходять через отвір і не утворюють відкладень і газових міхурів (мішків) у місці розташування діафрагми. Такі діафрагми застосовуються для діаметрів трубопроводу більше 25 мм і при $Re \geq 2.5 \cdot 10^4$.

Досвід застосування пристроїв, що звужують, для виміру витрати вугільного пилу в суміші з повітрям на теплових електростанціях показав, що найбільш раціональною конструкцією з погляду точності виміру, чутливості і надійності роботи в запиленних потоках є сопло з профілем "чверть кола" (рисунок 4.9). Такий при-

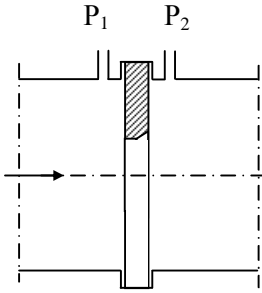


Рисунок 4.8 – Сегментна діафрагма

ти до 3%. У той же час цілком зберігається чистота поверхні вхідної крайки, що визначає сталість коефіцієнта витрати α .

Перепад тиску, вимірюваний у безпосередній близькості від сопла $\Delta P_1 = P_1 - P_2$, подає інформацію про витрату повітря, а по перепаду тиску на відстані, рівній половині діаметра трубопроводу, $\Delta P_2 = P'_1 - P'_2$ визначають витрату вугільного пилу.

Інформація з тисків P_1 , P_2 , P'_1 , P'_2 , перетворена в електричні сигнали, надходить на мікропроцесорний пристрій, що видає дані по витраті повітря, вугільного пилу, а також по концентрації вугільного пилу в 1 м^3 повітря. У мікропроцесор вводять також розрахункові формули, отримані експериментально для даного пристрою, що звужує, і конкретного середовища, що рухається.

Витратоміри з використанням пристроїв, що звужують, різних типів набули широкого застосування через наступні їх переваги:

- простота конструкції і надійність одержання первинної інформації про витрату середовища, що рухається;
- універсальність методу, що дозволяє вимірювати витрату будь-яких середовищ (рідких, газоподібних, двофазних) у широкому діапазоні тисків, температур, витрат і діаметрів трубопроводу;
- градувальна характеристика стандартних пристроїв, що звужують, може бути визначена розрахунковим шляхом, тому відпадає необхідність у зразкових витратомірах;
- можливість використання для різних умов виміру однотипних вторинних приладів – витратомірів.

Однак, пристрої, що звужують, мають недоліки, основними з яких є:

- необоротні втрати тиску, тому що пристрої, що звужують, є місцевим аеродинамічним опором;
- нелінійна залежність між витратою і перепадом, що дозволяє вимірювати витрати, що складають менш 30% від верхнього його значення;
- необхідність індивідуального градування пристроїв, що звужують, при малих числах Re чи в трубах $d < 50 \text{ мм}$;
- відносно висока погрішність виміру, що складає від 1,5 до 3,0%;
- обмежена швидкодія через кінцеву і недостатню швидкість проходження сигналу від пристрою, що звужує, до витрато-

міра, що реєструє, (включаючи інерційність і самого витратоміра), що створює труднощі при вимірі витрат, що швидко змінюються.

4.3 Схеми сполучних ліній при використанні пристроїв, що звужують

Точність виміру витрати пристроями, що звужують, залежить не тільки від типу пристрою, що звужує, і витратоміра (дифманометра), але і від способу з'єднання цих двох приладів.

Передача імпульсів тиску від пристрою, що звужує, до дифманометра здійснюється різними способами. На вибір схеми з'єднання впливають такі фактори, як параметри і фізичні властивості вимірюваного середовища, його агрегатний стан, взаємне розташування пристрою, що звужує, і дифманометра.

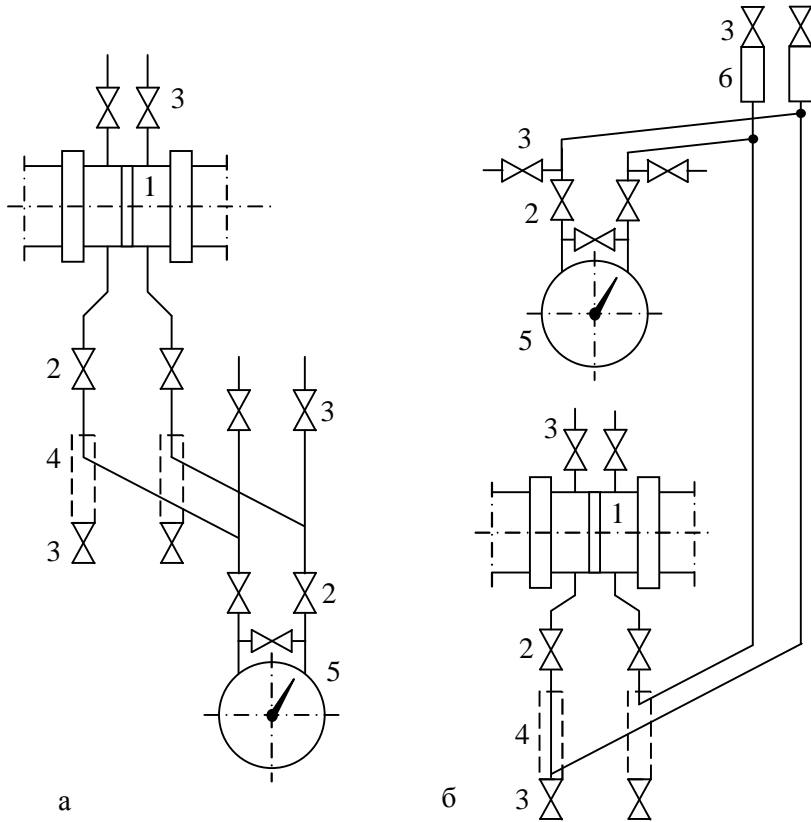
Дифманометр підключається до пристрою, що звужує, двома сполучними лініями (двома імпульсними трубками) внутрішнім діаметром не менш 8 мм і довжиною не більш 15 м. При вимірі витрати неагресивної рідини дифманометр рекомендується по можливості встановлювати нижче пристрою, що звужує, (рисунок 4.10а), що виключає влучення в сполучні лінії і дифманометр газу, що може виділитися з рідини, що протікає. Для горизонтальних трубопроводів сполучні лінії повинні підключатися через запірні вентилі 2 до нижньої половини труби, але не в самій нижній частині щоб уникнути влучення в лінії газу чи опадів із трубопроводу.

Запірні вентилі використовуються при ремонтних, профілактичних, налагоджувальних і інших роботах як сполучних ліній, так і дифманометра для від'єднання чи присєднання до трубопроводу окремих елементів системи виміру витрати. Для запобігання дифманометра від забруднень у нижчих точках горизонтального трубопроводу встановлюються відстійні судини 4.

У випадку розташування дифманометра вище пристрою, що звужує, (рисунок 4.10 б) у схемі передбачені газозбірники 6, встановлені у вищих крапках лінії, і відстійники 4, застосовувані тільки у випадку випадання опадів з вимірюваної рідини.

Для зменшення можливості надходження пухирців газу з рідини, що протікає в трубопроводі, у сполучні лінії при установці дифманометра вище пристрою, що звужує, сполучні трубки розташовуються нижче трубопроводу на 0,7 м.

При вимірі витрати газу дифманометр рекомендується встановлювати вище пристрою, що звужує, щоб конденсат, що утворився в

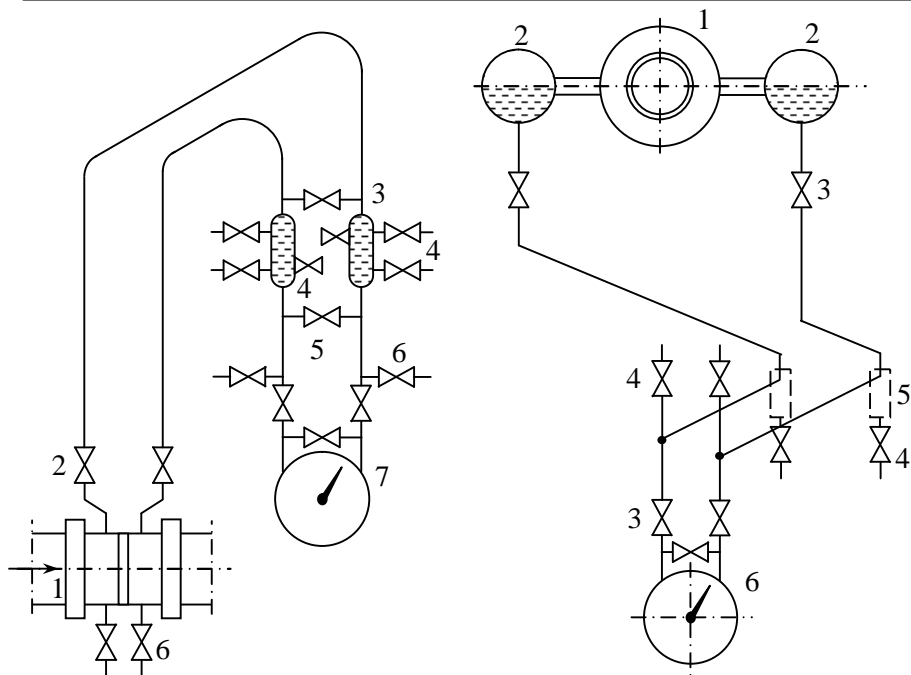


1 – пристрій, що звужує; 2 – запірний вентиль; 3 – продувний вентиль; 4 – відстійна судина із продувним вентилем; 5 – дифманометр (витратомір); 6 – газозбірник с вентилем для продувки.

Рисунок 4.10 – Схеми з'єднувальних ліній при вимірі витрати рідини із розташуванням дифманометра нижче (а) і вище (б) пристрою, що звужує.

сполучних лініях, міг стікати в трубопровід (рисунок 4.11). При вимірі витрати агресивного газу в сполучні лінії повинні включатися розділові судини. Вони являють собою ємності, заповнені нейтральною (розділовою) рідиною (наприклад, етиленгліколь, гліцерин і ін.) і розташовуються між пристроєм, що звужує, і дифманометром.

Особливістю виміру витрати пари є необхідність дотримання сталості і рівності рівнів конденсату в обох сполучних лініях, а також запобігання від влучення і видалення повітря, що потрапило в них. Схема з'єднання дифманометра із пристроєм, що звужує, при вимірі витрати пара показана на рисунку 4.12. Обов'язковим елементом цього



1 – пристрій, що звужує;
2 – запірний вентиль; 3 – розділова судина; 4 – контрольний вентиль; 5 – допоміжний вентиль; 6 – продувний вентиль; 7 – дифманометр.

Рисунок 4.11 – Схема з'єднувальних ліній із розділовими судинами при вимірі витрати газу

з'єднання є наявність зрівняльних судин 5 (конденсаційних), наповнену заповнених конденсатом.

Усі сполучні лінії і дифманометр 8 також заповнені конденсатом. Зрівняльні судини забезпечують сталість і однаковість верхніх рівнів конденсату в обох сполучних лініях. При вимірі витрати пари дифманометр рекомендується розташовувати нижче пристрою, що звужує, і нижче зрівняльних судин. Такий спосіб взаємного розташування пристрою, що звужує, і дифманометра полегшує видалення повітря зі сполучних ліній.

1 – пристрій, що звужує; 2 – зрівняльні судини; 3 – запірний вентиль; 4 – продувний вентиль; 5 – відстійна судина; 6 – дифманометр.

Рисунок 4.12 – Схема з'єднувальних ліній при вимірі витрати пара із встановленням дифманометра нижче пристрою, що звужує

4.4 Вимір витрати рідин і газів напірними трубками

Напірні трубки (трубки Піто-Прандтля) застосовують для виміру швидкості потоку рідкого чи газоподібного середовища в трубопроводах, а також у відкритих чи закритих каналах. При відомій площі перетину потоку (трубопроводу) F і обмірюваній за допомогою напірної трубки середньої швидкості потоку \bar{w} по всьому перетину можна розрахувати витрату даного середовища по формулі:

$$V = \bar{w} \cdot F \tag{4.19}$$

Вимір швидкості потоку напірними трубками виконується по виміру динамічного тиску (швидкісного напору) P_d , що відповідно до рівняння Бернуллі дорівнює:

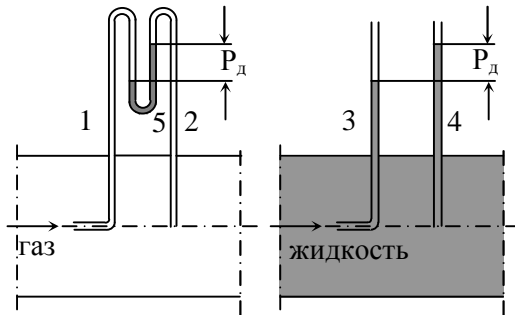
$$P_d = \frac{w^2 \rho}{2} \tag{4.20}$$

де w – швидкість потоку в крапці виміру, м/с;

ρ – щільність середовища, що рухається, у робочих умовах, кг/м³;

P_d – динамічний тиск, створюваний потоком, Па.

Метод виміру динамічного тиску, уперше застосований французьким інженером і вченим Генрі Піто в 1732 році для виміру швидкості води в ріках і каналах, показано на рисунку 4.13. Трубка 1, встановлена відкритим кінцем назустріч потоку, сприймає повний напір P_n , що складається із суми статичного $P_{ст}$ і динамічного P_d тисків. Для визначення тільки динамічного тиску необхідно від повного тиску відняти статичний тиск.



- 1 – трубка повного тиску;
- 2 – трубка статичного тиску;
- 3 – п'езометр повного тиску;
- 4 – п'езометр статичного тиску;
- 5 – дифманометр

Рисунок 4.13 – Схема виміру динамічного тиску для газоподібних та рідких середовищ

Для цього в потік міститься друга трубка 2 так, що площа відкритого кінця розташовується паралельно лініям струму (паралельно стінкам для трубопроводу), і трубка 2 сприймає тільки статичний тиск. Дифманометр 5, що підключається до зовнішніх кінців трубок, вимірює різницю повного і статичного тисків, тобто динамічний тиск, за ре-

зультатами якого розраховується швидкість потоку.

Для виміру швидкості рідкого середовища більш зручно застосовувати скляні трубки, вільні кінці яких сполучені з атмосферою. Висота підйому рідини в п'езометрі 3 визначає повний тиск рідини, що рухається, а п'езометр 4 покаже статичний тиск. Різниця висот підйому рідини в обох трубках визначає динамічний тиск.

При визначенні витрати по формулі (4.19) необхідно знати середню швидкість потоку в поперечному перерізі трубопроводу (каналу). Середня швидкість залежить від режиму руху середовища. При ламінарному режимі середня швидкість дорівнює половині швидкості на осі труби, тобто:

$$\bar{w} = 0,5w_{\text{ось}} . \quad (4.21)$$

Для ламінарного режиму досить вимірити динамічний тиск на осі потоку і розрахувати витрату, використовуючи формули (4.19) і (4.20), тобто:

$$V = 0,5F \sqrt{\frac{2P_d}{\rho}} . \quad (4.22)$$

При турбулентному режимі розподіл швидкостей по перетину потоку (епюра швидкостей) більш рівномірний і залежить від числа Re. Середню швидкість потоку можна виразити через швидкість на осі з урахуванням коефіцієнта, який визначається по експериментальним даним:

$$\bar{w} = Aw_{\text{ось}} . \quad (4.23)$$

На рисунку 4.14 показана залежність коефіцієнта A від числа Рейнольдса, отримана досвідним шляхом для газоподібних і рідких середовищ. При визначенні витрати у випадку турбулентного режиму роблять наступні вимірювальні й обчислювальні операції:

- вимірюють напірною трубкою динамічний тиск P_d на осі;
- обчислюють швидкість потоку на осі $w_{\text{ось}}$;
- обчислюють число Рейнольдса по формулі $Re = \frac{w_{\text{ось}} D}{\nu}$,
знаючи діаметр трубопроводу D і коефіцієнт динамічної в'язкості ν для даного середовища при робочих умовах;
- за графіком (рисунок 4.14) знаходять коефіцієнт A;
- обчислюють витрату по формулі:

$$V = AF \sqrt{\frac{2P_d}{\rho}} , \text{ м}^3/\text{с} \quad (4.24)$$

Найбільш складні умови виникають при вимірі витрати в перети-

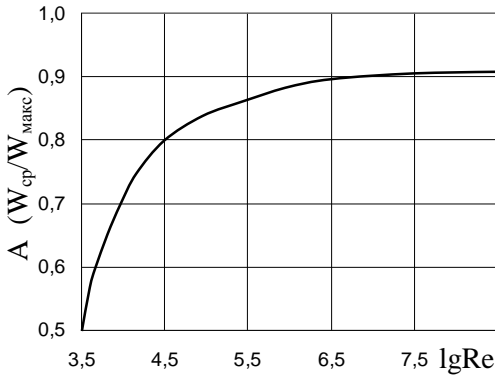


Рисунок 4.14 – Залежність відносної середньої швидкості $A (W_{cp}/W_{макс})$ від числа Рейнольдса

трубопроводів чи каналів з несталим режимом руху середовища. Такий режим виникає біля місцевих аеродинамічних опорів таких, як повороти трубопроводу, засувки, розширення, звуження й ін. Для таких випадків застосовується більш точний, що не залежить від характеру режиму руху і форми перетину трубопроводу, метод інтегрування. Для визначення витрати весь перетин трубопроводу F розбивається на ряд ділянок "n" з рівновеликими площами $f_1=f_2=f_3=...f_i$, при цьому вимірюється динамічний тиск $P_{ді}$ у визначеній точці кожної рівновеликої ділянки і розраховується швидкість w_i на кожному з них. Для циліндричного трубопроводу таких ділянок повинне бути не менш 5 і вимір динамічного тиску ведеться на кожній кільцевій ділянці в 4 діаметрально протилежних точках (рисунок 4.15 а). Прямокутні канали розбиваються на більшу кількість рівновеликих площ, не менш 16, і динамічний тиск вимірюється в середині кожної ділянки (рисунок 4.15 б). Об'ємна витрата визначається по формулі:

$$V = F \sqrt{\frac{2}{\rho} \bar{P}_d}, \tag{4.25}$$

де \bar{P}_d - середнє значення динамічного тиску по всьому перетині трубопроводу, рівне:

$$\sqrt{\bar{P}_d} = \frac{1}{n} \sqrt{P_{d1} + P_{d2} + ...P_{di}} \tag{4.26}$$

де n – число рівновеликих площ.

Використовуючи вираження (4.25), одержимо формулу для визначення витрати при несталому режимі:

$$V = \frac{F}{n} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{d1} + P_{d2} + ...P_{di})}. \tag{4.27}$$

В даний час застосовується кілька конструктивних варіантів напірних трубок, пристосованих як для лабораторних, так і для промисло-

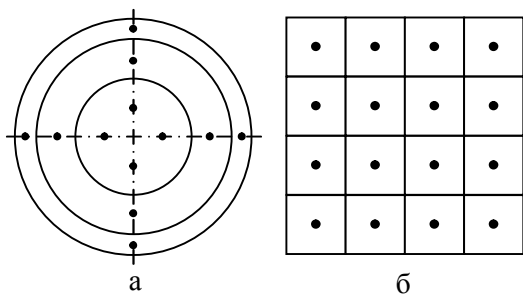


Рисунок 4.15 – Схема розбивки поперечного перетину каналу круглого (а) і прямокутного (б) перетину на ряд рівновеликих площ

са трубки 2. Тиски з точок виміру відбираються за допомогою тонких трубочок 3 і 4 і виводяться усередині корпуса держателя до сполучних штуцерів 5. Достоїнством трубки з напівсферичною голівкою є її мала чутливість до напрямку потоку, що набігає. Відхилення трубки від осі потоку на кут до 16° практично не позначається на результатах виміру, тому що повний і статичний тиск змінюються однаково.

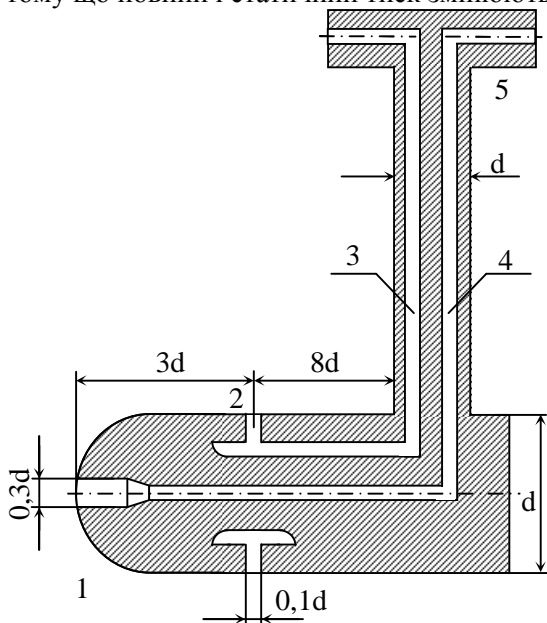


Рисунок 4.16 – Нормалізована напірна трубка

вих вимірів витрати чи швидкості рідких і газоподібних середовищ. Найбільше поширення одержали нормалізовані напірні трубки з напівсферичним наконечником (рисунок 4.16). Повний напір сприймається центральним отвором у голівці, спрямованим назустріч потоку, а статичний тиск - через ряд отворів, розташованих по окружності на бічній поверхні корпусу

При вимірі витрати (швидкості) нормалізованими напірними трубками виникає погрішність, обумовлена неточністю виготовлення самої трубки, а також перекручуванням поля швидкостей через наявність у потоці конструктивних елементів трубки. Тому в остаточні формули, приведені вище для всіх режимів руху потоку, вводиться поправочний коефіцієнт "ε", що визначається градуванням. Цей коефіцієнт для чисел Рейнольдса $Re > 700$ близь-

кий до одиниці і складає 0,98- 0,99, а для $Re < 700$ (у залежності від величини числа Рейнольдса) знаходиться в інтервалі 0,94–0,98.

З урахуванням поправочного коефіцієнта, що називається коефіцієнтом напірної трубки, можна використовувати наступні формули для визначення витрати напірними трубками:

- для ламінарного і турбулентного режимів при установці трубки на осі трубопроводу

$$V = \xi A F \sqrt{\frac{2P_{д(ось)}}{\rho}}, \text{ де } A=f(Re), A=0,5 - 1,0 \quad (4.28)$$

- для несталого режиму

$$V = \xi \frac{F}{n} \sqrt{\frac{2}{\rho} \sum_{i=1}^n P_{ді}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (4.29)$$

Напірні трубки для виміру витрати різних середовищ одержали поширення в промисловості, особливо в тих випадках, коли інші методи неефективні. Так, наприклад, у теплоенергетиці на котлах великої потужності для виміру витрати середовища в екранних трубах при проведенні теплогідрравлічних іспитів одержала поширення напірна трубка конструкції ВТІ (рисунок 4.17). Трубка має два скошених отвори, один з яких сприймає повний тиск P_n , інший – статичний $P_{ст}$.

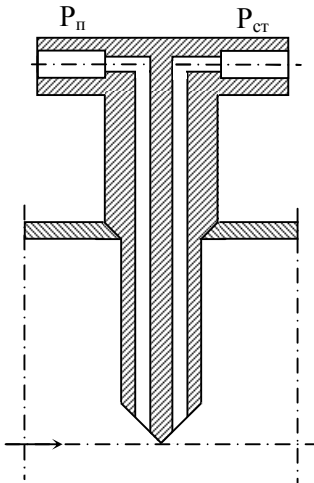


Рисунок 4.17 – Напірна трубка для виміру витрати в трубах малого діаметра

Такі трубки зручні для виміру витрати середовища в трубах поверхонь нагрівання котлів (діаметр труб складає 20 – 30 мм), завдяки простоті конструкції і малому гідравлічному опору. Для збільшення точності виміру виробляється попереднє тарирування кожної ділянки труби з встановленою в ній напірною трубкою.

При налагодженні й іспиті парових казанів виникає необхідність у вимірі витрати середовища в трубопроводі великого діаметра, у якому не передбачена установка діафрагми чи сопла для експлуатаційних цілей. У цьому випадку для виміру витрати використовуються витратомірні трубки конструкції ВТІ, простота яких дозволяє виготовляти їх у виробничих умовах безпосередньо на електростанціях. Напірна трубка (рисунок(4.18) ви-

готовляється з двох відрізків труб малого в порівнянні з трубопроводом діаметра. Ці відрізки зварені між собою по перегородці, що розділяє їхні внутрішні порожнини.

Витратомірна трубка встановлюється по діаметрі трубопроводу, а забірні отвори в ній діаметром 3 мм виконані один – по напрямку, а інший – проти напрямку потоку по обох сторонах від подовжньої осі трубопроводу.

4.5 Ультразвукові витратоміри

Розглянуті вище методи виміру витрати мають істотний недолік, зв'язаний з тим, що чуттєві елементи (діафрагма, сопло, напірна трубка) знаходяться в потоці, що рухається, і випробують шкідливий вплив середовища на конструктивні частини чуттєвого елемента. З іншого боку, самі чуттєві елементи, знаходячись у потоці, спотворюють його аеродинамічні характеристики, що приводить до появи додаткової погрішності виміру.

Останнім часом почали широко застосовуватися методи виміру витрати, у яких чуттєві елементи знаходяться поза середовищем, що рухається, що дозволяє розширити кількість видів вимірюваних середовищ (розплавлені метали, кислоти, луги, агресивні і токсичні рідини і гази й ін.). В одному з таких методів виміру витрати використовується ультразвукова хвиля, що подає інформацію про швидкість, а виходить, про витрату середовища, що рухається, у закритих і відкритих каналах.

В ультразвукових витратомірах використовуються різні ефекти, зв'язані з проходженням ультразвуку через середовище, що рухається: зміна швидкості ультразвуку в подовжньому напрямку потоку; відхилення ультразвукової хвилі при поперечному поширенні в потоці; ефект Доплера й ін.

Найбільше поширення одержав метод виміру витрати, заснований на вимірі різниці часів проходження ультразвуку по напрямку і проти напрямку плинину середовища. На рисунку 4.19 показана схема двоканального ультразвукового витратоміра, у якому використовується частотний спосіб виміру тимчасових інтервалів при проходженні ультразвуку в двох напрямках: у напрямку потоку і проти. Ультразвукові хвилі, утворені двома випромінювачами (B_1 , B_2), проходять перетин каналу в двох напрямках і надходять на два приймачі, що перетворюють ультразвукові сигнали в електричні. Як випромінювачі використовуються п'єзокристали, які збуджуються високочастотними електричними сигналами від генераторів Γ_1 і Γ_2 .

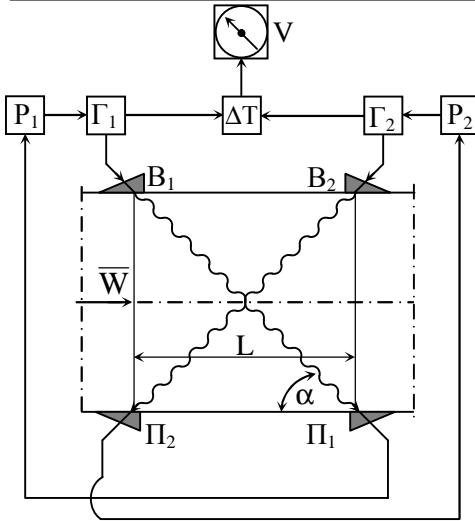


Рисунок 4.19 – Схема частотного ультразвукового расходомера

Приймачі Π_1 і Π_2 посиляють електричні сигнали на відповідні реле P_1 і P_2 , що керують роботою генераторів Γ_1 і Γ_2 у режимі "включено - виключено". При надходженні сигналу на реле відбувається відключення генератора, а при відсутності сигналу – включення. Таким чином, генератори Γ_1 і Γ_2 працюють у періодичному режимі, а час роботи і "мовчання" дорівнює часу проходження ультразвукових сигналів через середовище, що рухається. Вимір часу роботи генераторів (часу проходження ультразвуку

через трубопровід) виробляється в часовому блоці ΔT .

Час проходження ультразвуку по ходу і проти ходу потоку визначається по формулах:

$$\text{по ходу} \quad T_1 = \frac{L}{c \cdot \cos \alpha + \bar{w}} \quad (4.30)$$

$$\text{проти ходу} \quad T_2 = \frac{L}{c \cdot \cos \alpha - \bar{w}} \quad (4.31)$$

Для виключення з цих формул швидкості ультразвуку "с", що залежить від фізико-хімічних властивостей середовища (температури, тиску, щільності, хімічного складу й ін.) і впливає на точність виміру витрати, блок часу вимірює не різницю часів $T_1 - T_2$, а різницю зворотних часів, тобто різницю частот проходження цих сигналів:

$$\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = \frac{c \cdot \cos \alpha + \bar{w} - c \cdot \cos \alpha + \bar{w}}{L} = \frac{2\bar{w}}{L}, \quad (4.32)$$

де $\frac{1}{T_1} = f_1$ – частота проходження імпульсів при прямому ході ультразвуку;

$\frac{1}{T_2} = f_2$ – частота проходження імпульсів при зустрічному ході ультразвуку.

Використовуючи формули (4.19) і (4.32), можна записати остаточне вираження для визначення витрати середовища при використанні частотного ультразвукового витратоміра:

$$V = \frac{FL}{2} (f_1 - f_2), \text{ м}^3/\text{с} \quad (4.33)$$

де F – перетин трубопроводу (каналу), м^2 .

Як видно з формули (4.33), показання частотного витратоміра не залежать від швидкості поширення ультразвуку в середовищі, що є важливою перевагою такого методу виміру витрати рідких і газоподібних середовищ.

В інших типах витратомірів ультразвукова хвиля спрямована перпендикулярно осі труби і по величині відхилення ультразвукової хвилі від перпендикуляра визначається витрата чи середня швидкість потоку. В міру збільшення середньої швидкості потоку \bar{w} ультразвуковий промінь усе більш відхиляється по напрямку швидкості потоку (рисунок 4.20). Кут відхилення луча α буде визначатися вираженням:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\bar{w}}{c}\right) \quad (4.34)$$

Лінійне відхилення променя у приймачів (п'єзоелементів) Π_1 і Π_2 дорівнює

$$\delta = D \cdot \text{tg } \alpha \quad (4.35)$$

Зі збільшенням середньої швидкості середовища \bar{w} кількість енергії, що надходить на приймач Π_1 зменшується, а що надходить на приймач Π_2 – збільшується. Різницевий сигнал від приймачів Π_1 і Π_2 збільшується зі збільшенням середньої швидкості, а значить і витрати, і надходить у витратомір V .

Витратоміри з такою схемою прості по устрою, але мають обмежену точність через мале відхилення променя. Крім того, швидкість ультразвуку, що входить у розрахункові формули витрати, може мінятися при зміні фізичних параметрів і складу вимірюваного сере-

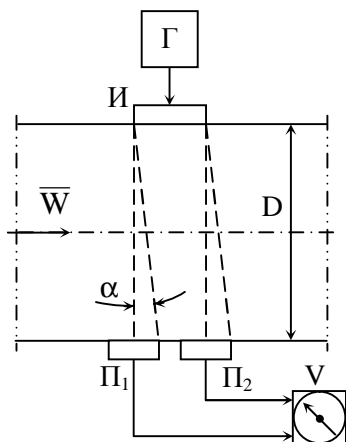


Рисунок 4.20 – Ультразвуковий витратомір по відхиленню променя від вертикалі

довища, що вносить додаткову погрішність.

Розроблено інші типи ультразвукових витратомірів нового покоління, таких як час-імпульсні і фазові. В час-імпульсних витратомірах періодично виробляється вимір різниці часів проходження дуже коротких імпульсів тривалістю 0,1 – 0,2 мікросекунд, по ходу і проти ходу руху середовища в трубопроводі. Вимірювана різниця часів дуже мала навіть при великих швидкостях руху середовища, що вимагає застосування електронних вимірювальних систем підвищеної точності. Крім того, показання таких витратомірів залежать від зміни швидкості ультразвуку в середовищі. Такі витратоміри застосовуються в основному для виміру витрати рідких середовищ, у яких у процесі виміру істотно не змінюються такі параметри як щільність, температура, тиск.

У фазових ультразвукових витратомірах використовується ефект Доплера, тобто вимірюється різниця фаз ультразвукових коливань, що поширюються по потоці і проти нього. Недоліком таких витратомірів також є залежність показань від зміни швидкості ультразвуку в середовищі.

В даний час в Україні розроблені різні модифікації ультразвукових час-імпульсних і доплеровських (фазових) витратомірів, що застосовуються в нафтовій, металургійній, хімічній і іншій галузях промисловості для виміру витрати мазуту, нафти, нафтопродуктів і інших рідин, у тому числі середовищ, забруднених твердими і газоподібними включеннями. Перевагою таких витратомірів є широкий діапазон вимірюваних витрат від 0,45 до 110000 м³/год для трубопроводів діаметром від 40 до 1800 мм із погрішністю виміру не більш 2 %.

Сучасні ультразвукові витратоміри комплектуються убудованими мікропроцесорами, що забезпечують обробку інформації, що надходить від датчиків, вимір і індикацію витрати середовища (за годину, добу, місяць), вироблення уніфікованого токового сигналу при використанні системи автоматичного регулювання, введення необхідних коригувальних і керуючих команд і ін.

На практиці одержали поширення і переносні ультразвукові витратоміри, що мають такі ж метрологічні характеристики, як і стаціонарні. У комплект приладу входить безпосередньо витратомір, портативна ЕОМ (notebook), багатофункціональний блок живлення з убудованим акумулятором, монтажні пристрої для швидкого і правильного розташування датчиків на поверхні трубопроводу. Такі прилади використовуються для оперативного контролю витрати обраного типу середовища на різних ділянках трубопроводів, що мають різний діаметр і товщину стінки.

Ультразвукові витратоміри є найбільш перспективними прилада-

ми для виміру витрати різних рідких і газоподібних середовищ, оснащені багатофункціональними малогабаритними мікропроцесорними пристроями. Використання мікропроцесора дозволяє значно підвищити точність виміру за рахунок автоматичного введення коригувальних сигналів при зміні фізичних і хімічних властивостей вимірюваного і навколишнього середовища. Найбільшу точність виміру показують одноканальні ультразвукові витратоміри з урізними датчиками, погрішність яких не перевищує 0,3 %.

4.6 Електромагнітні витратоміри

Вимір витрати електромагнітними витратомірами засновано на принципі електромагнітної індукції. Відповідно до цього принципу при русі електропровідної рідини в магнітному полі індуктується ЕРС, величина якої пропорційна швидкості руху рідини.

Електромагнітні витратоміри застосовуються для виміру в трубопроводах об'ємної витрати водопровідної води, різних розчинів (солей, лугів, кислот), пульп, рідких металів і інших електропровідних рідин, електрична провідність яких повинна бути не менш 10^{-3} Ом/м (відповідає електропровідності водопровідної води). Вимірюючи ЕРС, наведену в електропровідній рідині, що при своєму русі перетинає магнітне поле, можна визначити середню швидкість поточної рідини, а разом з тим і об'єму витрату.

Вимір витрати рідини електромагнітним методом здійснюється при використанні як постійного магніту, так і магніту з перемінним магнітним полем. Зазначені способи створення магнітного поля мають свої позитивні і негативні сторони.

Схема електромагнітного витратоміра з постійним магнітним полем зображена на рисунку 4.21. Корпус 1 – це відрізок труби, виконаний з немагнітного матеріалу і покритий зсередини електричною ізоляцією (гумою, емаллю, фторопластом і ін.), розташований між полюсами магніту 2. Магнітні силові лінії спрямовані перпендикулярно вектору швидкості руху рідини. Через стінку труби ізольовано від її введені електроди 3, що знаходяться в контакті з рідиною.

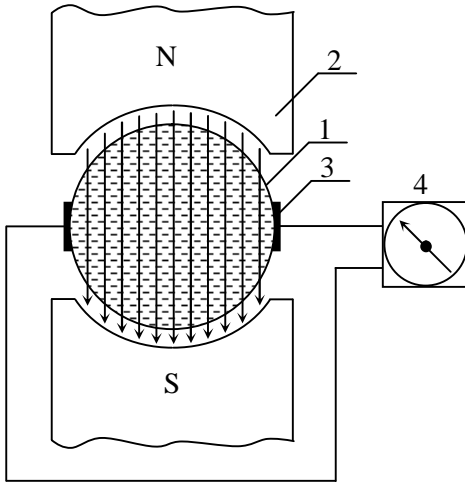
При протіканні електропровідної рідини між електродами буде наводитися ЕРС:

$$E = B \cdot D \cdot \bar{w} \quad (4.36)$$

де B – індукція магнітного поля;

D – довжина рідинного провідника, рівна діаметру труби;

\bar{w} – середня швидкість рідини.



- 1 – частина ізолюваного трубопроводу;
- 2 – постійний магніт; 3 – електроди;
- 4 – вимірювальний пристрій

Рисунок 4.21 – Схема електромагнітного витратоміра з постійним магнітним полем

електромагнітних полів, особливо при застосуванні в промислових умовах, де працюють електромотори, магнітні крани, трансформатори й інше електротехнічне устаткування. До числа переваг таких витратомірів варто віднести відсутність необхідності в джерелі живлення чутливих елементів, тобто самих електродів, розташованих на трубопроводі, що забезпечує безпеку його роботи і ряд інших факторів. Основним недоліком магнітних витратомірів з постійним магнітним полем є поляризація електродів, тобто виникнення в позитивного електрода негативних іонів, а в негативного електрода позитивних іонів. В міру нагромадження цих зарядів в електродів (струмоznімачів) виникає ЕРС, спрямована проти основної вимірюваної ЕРС, що приводить до порушення градування приладу і стабільності його роботи. Тому електромагнітні витратоміри з постійним магнітним полем не застосовуються для рідин з іонною провідністю (кислоти, лугу, солі, водянні розчини різних речовин і ін.). Такі витратоміри набули застосування для виміру витрати рідких середовищ з електронною провідністю, до яких відносяться розплавлені рідкі метали (натрій, ртуть, залізовуглецеві розплави й ін.) і в який відсутнє явище поляризації. Можливе застосування таких витратомірів – атомні реактори з

З огляду на те, що

$$\bar{w} = \frac{V}{F} = \frac{4V}{\pi D^2}, \text{ одержуємо:}$$

$$E = 4B \frac{V}{\pi D} \quad (4.37)$$

З формули (4.37) видно, що ЕРС прямо пропорційно вимірюваній об'ємній витраті. Вимір наведеної ЕРС здійснюється вимірювальним приладом 4, що градується в одиницях маси чи об'єму вимірюваної рідини.

Перевагою електромагнітних витратомірів з постійним магнітним полем є те, що значно полегшується боротьба з перешкодами від зовнішніх перемінних

рідкометалевим теплоносієм, плавильні і ливарні агрегати на металургійних заводах і ін.

Для виміру витрати середовищ з іонною провідністю застосовуються витратоміри з перемінним магнітним полем, створюваним електромагнітом (рисунок 4.22). При досить високій частоті електромагнітного поля поляризація електродів практично відсутня. Однак використання перемінного магнітного поля має свої недоліки, одним із яких є поява паразитної трансформаторної ЕРС. Ця ЕРС наводиться перемінним магнітним полем у провідниках, що знаходяться в перемінному магнітному полі і з'єднують електроди-струмознімачі з вимірювальним приладом.

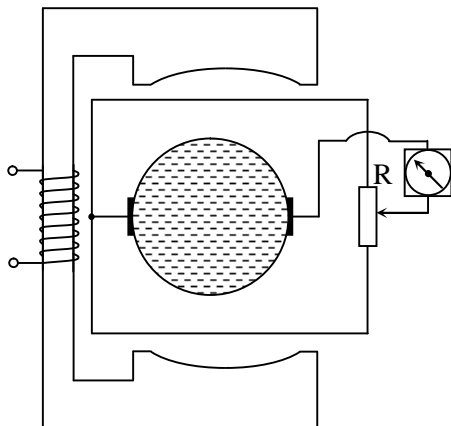
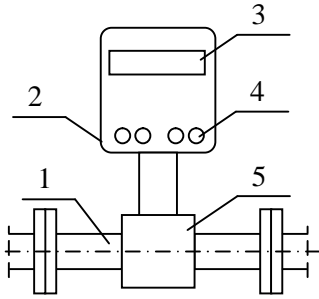


Рисунок 4.22 – Схема електромагнітного витратоміра із перемінним магнітним полем

Для компенсації трансформаторної ЕРС виводи одного з електродів з'єднуються симетрично розташованими проводами, замкнутими на регулюючий резистор R , створюючи кільцевий замкнутий ланцюг. При роботі витратоміра паразитна ЕРС, що виникає у верхньому проводі кільцевого ланцюга, дорівнює ЕРС, що виникає в нижньому проводі цього ланцюга. Так як виникаючі в двох провідниках трансформаторні ЕРС мають протилежні напрямки, то відбувається компенсація паразитних ЕРС у цих провідниках. Однак повного усунення трансформаторної ЕРС не відбувається через наявність у магнітному полі провідника, що йде від другого електрода. У сучасних електромагнітних витратомірах крім зазначеного вище способу застосовуються фазочуттєві детектори, що пропускають тільки корисний сигнал (ЕРС, що виникає при русі рідкого середовища в трубопроводі), і цілком компенсують трансформаторну ЕРС.

Електромагнітні витратоміри різних модифікацій, вироблені в Україні, мають убудований у вимірювальний блок мікропроцесорний пристрій, що обробляє інформацію від датчика витрати, встановленого на трубопроводі, реєструє значення миттєвої витрати і кількості за визначений проміжок часу, має можливість передачі даних на ЕОМ по інтерфейсу RS – 485 і інші операції.



- 1 – ділянка трубопроводу;
 2 – обчислювальний модуль;
 3 – індикація показань;
 4 – кнопки керування;
 5 – датчик витрати

Рисунок 4.23 – Портативний електромагнітний витратомір

і щільності середовища. Датчик витрати (чуттєвий елемент), практично безінерційний, знаходиться поза середовищем, що рухається, і, таким чином, не створює втрати тиску. Витратоміри, що використовують такий принцип виміру, знаходять застосування для виміру витрати агресивних, абразивних і грузлих рідин і пульп, рідких металів, тобто в тих випадках, коли застосування витратомірів інших типів утруднено.

4.7 Вимір витрати тепла в теплофікаційних системах

Об'єктивний контроль і аналіз роботи ТЕЦ, котелень, теплових мереж, різних теплообмінників і інших теплових систем і агрегатів можна здійснювати тільки шляхом безупинного виміру витрати і кількості тепла, що віддається споживачам. Колективні й індивідуальні споживачі також зацікавлені мати інформацію про кількість спожитого тепла, маючи відповідні прилади для виміру витрати теплоносія і його температури.

Прилад, що вимірює витрату тепла в одиницю часу, називається тепломіром. Прилад, що вимірює витрату і кількість теплоти за деякий проміжок часу, називається теплолічильником.

Витрата тепла Q , що відпускається споживачу в одиницю часу, виражається рівнянням:

$$Q = V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_1 - t_2), \quad (4.38)$$

де V – об'ємна витрата води (теплоносія) у лінії, що подає, $\text{м}^3/\text{с}$;
 c – питома теплоємність води, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

На рисунку 4.23 показаний один з варіантів електромагнітного витратоміра, що виконаний у виді єдиного вимірювально-обчислювального модуля, розміщеного безпосередньо на об'єкті виміру витрати – трубопроводі. Такий прилад може бути використаний і як теплолічильник при одержанні від мікропроцесора інформації про температуру середовища в трубопроводі.

Електромагнітні витратоміри, що мають клас точності 0,5 – 1,0, застосовуються на трубопроводах практично будь-яких діаметрів без обмеження верхньої межі по витраті. Їх показання не залежать від в'язкості

t_1, t_2 – температури прямої і зворотної води, °С;

ρ – щільність води в прямій лінії, кг/м³.

З формули (4.38) видно, що для визначення витрати тепла тепломір повинен одночасно вимірювати об'ємну витрату прямої мережної води і температуру прямої і зворотної води. При вимірі витрати тепла по формулі (4.38) необхідно у вимірювальний прилад (у вимірювальну систему) уводити коригувальні множники, тобто значення теплоємності і щільності води. Для зменшення погрішності виміру витрати необхідно враховувати зміну щільності і теплоємності води від температури самої води. Зміна щільності і теплоємності води від температури може бути врахована за допомогою апроксимуючих функцій:

$$\rho = \rho_0 \frac{1}{K_1 + K_2 t} \quad (4.39)$$

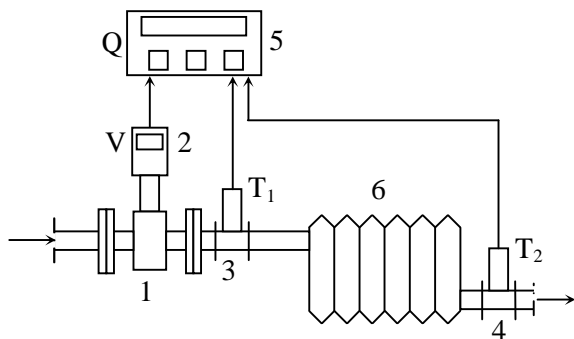
$$c = c_0 + K_3 \cdot \Delta t \quad (4.40)$$

де ρ_0 і c_0 – щільність і теплоємність води при розрахунковій температурі (наприклад, 20°С);

K_1, K_2, K_3 – постійні коефіцієнти, які визначаються з табличних даних щільності і теплоємності води;

Δt – відхилення температури від розрахункової.

Для параметрів води в теплофікаційних системах (тиск до 1,0 МПа, $t \leq 150^\circ\text{C}$) впливом тиску на щільність і теплоємність можна зневажити.



1 – датчик ультразвукового витратоміра;
2 – витратомір; 3 – датчик температури прямої води; 4 – датчик температури зворотної води; 5 – тепломір; 6 – теплообмінник (споживач тепла)

Рисунок 2.24 – Схема виміру витрати тепла на опалення

Приведені рівняння показують, що для виміру витрати вимагаються такі системи, що можуть реалізувати всі співвідношення між параметрами, що визначають витрату тепла.

Найбільш перспективними тепломірами, що враховують усі параметри, що входять у формули витрати теплової енергії, є вимірювальні комплекси чи окремі прилади із широким застосуванням мікропроцесорних пристроїв. На рисунку 4.24 приве-

дена одна з можливих схем обліку витрати тепла на опалення. Витрата води здійснюється ультразвуковим витратоміром, з убудованим мікропроцесором 2 для обробки інформації від датчика витрати 1 з індикацією годинної витрати, а також за визначений проміжок часу. Температура води вимірюється на вході і виході з теплообмінника 6 двома платиновими термопарами опору 3 і 4.

Інформація про витрату V і температурі T_1 і T_2 надходить у центральний мікропроцесор, що виконує наступні функції:

- корекцію зміни щільності і теплоємності води в залежності від температури води на вході в теплообмінник;
- вимір і індикацію теплової потужності теплообмінника, кВт;
- помісячну реєстрацію витрати тепла, кДж;
- добову реєстрацію витрати тепла, кДж;
- установку і розрахунок теплової енергії по тарифах;
- індикацію температури теплоносія (води) на вході і різниця температур на вході і виході теплоносія;
- архівацію всіх обмірюваних і розрахованих параметрів теплоносія, у тому числі середньогодинна, добова, місячна і річна витрата тепла.

Більшість що випускаються й експлуатованих тепломірів мають такі характеристики:

- живлення всіх систем, у тому числі і датчиків витрати і температури, від літєвої батарейки з терміном роботи до 6 років;
- діапазон виміру температури від 5 до 150 °С;
- відносна погрішність виміру витрати тепла $\pm 4\%$;
- діаметр трубопроводу теплової мережі 15 – 250 мм;
- довжина ліній зв'язку між перетворювачами (датчиками) витрати, температури і тепломіром до 25 м;
- зв'язок із зовнішніми пристроями через RS - 232; M – BUS, модем;
- середній термін служби 12 років.

Аналогічні системи розроблені для обліку витрати тепла в системах гарячого водопостачання.

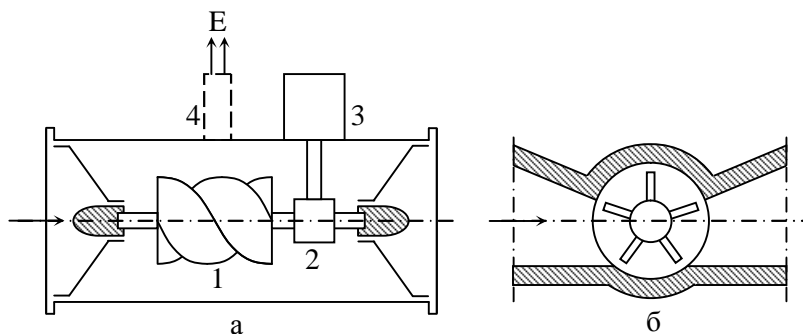
4.8 Тахометричні витратоміри

У тахометричному методі використовується залежність швидкості руху чуттєвого елемента, поміщеного у вимірюване середовище, від витрати цього середовища. Тахометричний метод знайшов застосування для виміру холодної і гарячої води, кислот, лугів, рідких про-

дуктів нафтопереробки, газів і інших речовин, що хімічно не діють на чуттєвий елемент витратоміра.

За принципом дії тахометричні витратоміри, що випускаються, розділяються на швидкісні й об'ємні. Швидкісні витратоміри (лічильники) застосовуються головним чином для виміру сумарної кількості холодної і гарячої води. У швидкісних лічильниках у якості чуттєвого (робочого) елемента застосовуються вертикальні і горизонтальні вертушки (турбінки). У лічильників з вертикальною вертушкою потік рідини, що обертає вертушку, спрямований по дотичній до окружності, описуваної середнім радіусів вертушки. Такі крильчасті вертушки звичайно називаються тангенціальними, і вони застосовуються для виміру невеликих витрат (від 0,15 до 12,6 м³/год). У лічильників з горизонтальною вертушкою потік рідини спрямований паралельно осі вертушки і таких приладів називаються аксіальними. Число оборотів вертушки приладу сумується рахунковим механізмом із вказівкою кількості рідини в одиниця об'єму.

На рисунку (4.25 а, б) показані схеми пристрою деяких типів витратомірів з аксіальною (а) і тангенціальною турбінкою. Корпус приладу (рисунок 4.25, а) являє собою відрізок труби з двома фланцями для приєднання його до трубопроводу. У середині корпусу розташована турбінка 1. Частота обертання турбінки, пропорційна об'ємній витраті, за допомогою редуктора 2 передається або на рахунковий механічний пристрій 3, або на електричний перетворювач 4, що видає електричний сигнал Е, пропорційний об'ємній витраті рідкого середовища, що протікає через трубопровід.



а – витратомір з аксіальною турбінкою; б – витратомір з тангенціальною турбінкою

1 – турбінка; 2 – передатний механізм; 3 – рахунковий пристрій; 4 – електричний перетворювач

Рисунок 4.25 – Устрій турбінних витратомірів

Турбінні тахометричні витратоміри відрізняються великою точністю (погрішність 0,5%), широким діапазоном вимірюваних витрат від $0,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{год}$ до $7500 \text{ м}^3/\text{год}$ при тисках до 250 МПа і температури від $-240 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+700 \text{ }^\circ\text{C}$. Вони встановлюються на трубопроводах діаметром 4 – 750 мм.

Тахометричні турбінні витратоміри мають і недоліки, що обмежують їх застосування: вплив в'язкості вимірюваного середовища, знос опор при наявності твердих часток у рідкому середовищі.

Об'ємні тахометричні лічильники, що мають більш високу точність в порівнянні зі швидкісними, застосовуються для виміру сумарної кількості мазуту, нафти, бензину й інших рідин, а також різних газових середовищ. В об'ємних лічильниках рідина, що протікає через неї, (газ) вимірюється окремими, рівними по обсязі дозами, що відсікаються одним чи декількома робочими елементами. Число пропущених доз рідини (газу), підсумовується рахунковим механізмом.

У промисловості в більшості випадків застосовуються камерні лічильники, що мають високу точність виміру (0,5...1% для рідини і 1...1,5 % для газів) і що дозволяють застосовувати їх для рідин з високою в'язкістю. Одним із приладів камерного типу є ротаційний лічильник, застосовуваний для виміру об'ємної витрати очищених неагресивних паливних газів (природного, пропану-бутану, доменного, генераторного, коксового й ін.). Лічильники дозволяють вимірювати витрати в межах від 40 до $40000 \text{ м}^3/\text{год}$ з погрішністю менш 2,5% при тисках до 6,4 МПа і температурі $-50...+50^\circ\text{C}$.

На рисунку 4.26 показана схема роботи ротаційного витратоміра (лічильника). У корпусі лічильника розміщені два поршні-ротори, що мають овальну форму, а також передавальний механізм і рахунковий пристрій. Газ надходить через верхній патрубок у корпус приладу, обертає ротори і виходить через нижній патрубок. За один оборот пропускається чотири обсяги Q (показано штрихуванням), тобто по

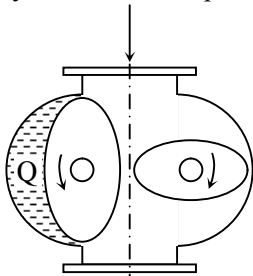


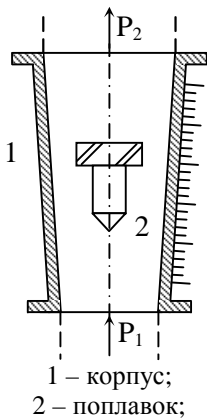
Рисунок 4.26 – Ротаційний витратомір

два обсяги на кожен ротор. Кінець одного з валів зв'язаний з редуктором і рахунковим механізмом. Витрата газу, пропорційна числу оборотів ротора, відзначається на рахунковому механізмі приладу.

У промисловій і лабораторній практиці для виміру невеликих об'ємних витрат рідин (від 0,04 до $16 \text{ м}^3/\text{год}$) і газів (від 0,063 до $40 \text{ м}^3/\text{год}$) одержали поши-

рення витратоміри постійного перепаду, більше відомі як ротаметри.

Ротаметр являє собою вертикальну конічну (розбіжну нагору) скляну трубку 1, усередині якої розташовується поплавць 2 (рисунок 4.27), виконаний у залежності від меж виміру з різних матеріалів (сталі, ебоніту, алюмінію, фторопласта). Центрування положення поплавця усередині конічної трубки досягається застосуванням спеціальної гвинтової насічки на ободу поплавця. Під дією потоку, що рухається, поплавець переміщається у вертикальному напрямку й одночасно обертається навколо своєї осі, що і забезпечує його центрування в середині потоку.



1 – корпус;
2 – поплавок;
Рисунок 4.27 – Схема ротаметра

Об'ємна витрата середовища, що протікає через ротаметр, визначається по переміщенню поплавця уздовж шкали, нанесеної на бічній поверхні корпусу ротаметра.

Принцип дії ротаметра заснований на зрівноважуванні при будь-якій витраті сили ваги самого поплавця іншими силами, що діють на нього з боку рідини.

Знизу на поплавець діють наступні сили:

- сила, обумовлена різницею статичних тисків $P_1 - P_2$, рівна $P_{ст} = (P_1 - P_2) \cdot F$, де F – площа перетину поплавця;
- динамічний тиск із боку середовища, що рухається, яке набігає на поплавець

$$P_d = \frac{w^2 \cdot \rho}{2},$$

де w – швидкість потоку перед поплавцем, м/с;

- сила тертя потоку об бічну поверхню поплавця $P_{тр} = k \cdot W_k \cdot F_6$, де k – коефіцієнт, що залежить від шорсткості поплавця; W_k – середня швидкість потоку в кільцевому зазорі між корпусом і поплавцем; F_6 – площа бічної поверхні поплавця.

Поплавець буде нерухомо висіти в потоці рідини чи газу, якщо буде дотримуватися рівність сил, що діють на нього зверху і знизу:

$$G = (P_1 - P_2) \cdot F + P_d + P_{тр} \quad (4.41)$$

Якщо зневажити силами P_d і $P_{тр}$, то можна записати

$$P_1 - P_2 = \frac{G}{F} \quad (4.42)$$

тобто перепад тиску на поплавці не залежить від витрати, тому рота-

метри називаються ще витратомірами постійного перепаду, що видно з формули (4.42), де відношення ваги поплавця G до його поперечного перерізу F є величина постійна ($G/F = \text{const}$). При збільшенні витрати збільшується площа кільцевого зазору, що буде відповідати новому положенню поплавця.

Формула витрати для ротаметрів виражається складною залежністю, обумовленою великою кількістю параметрів:

$$Q = \alpha \cdot F \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot V_{\text{п}} \cdot (\rho_{\text{п}} - \rho)}{\rho \cdot F}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (4.43)$$

де α - коефіцієнт витрати, що залежить від конусності корпусу приладу, втрат на місцеві опори і тертя при русі середовища в ротаметрі, геометричної форми поплавця і ряду інших параметрів;

$V_{\text{п}}$ - об'єм поплавця, м^3 ;

$\rho_{\text{п}}$ і ρ - щільність матеріалу поплавця і середовища, що протікає, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Тому що коефіцієнт витрати α аналітично визначити неможливо, те на практиці ротаметри градууються експериментально по воді чи повітрю, а відповідні градуовальні характеристики приводяться в паспорті приладу.

Якщо в процесі виміру змінюється щільність середовища (через зміну тиску чи температури) чи вимірюється інший тип середовища (замість повітря чи води вимірюються інші гази чи інші рідкі середовища), то показання ротаметра потрібно помножити на поправочний множник "к", який визначається по формулі:

$$k = \sqrt{\frac{\rho_{\text{гр}} \cdot (\rho_{\text{п}} - \rho)}{\rho \cdot (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{гр}})}} \quad (4.44)$$

де $\rho_{\text{гр}}$ і ρ - градуовальна і дійсна щільність середовища.

Погрішність виміру витрати ротаметром може бути визначена через погрішність величин, що входять у формулу (4.43). Найбільший вплив на погрішність робить зміна коефіцієнт витрати α , а також неточність визначення щільності середовища, відмінність маси поплавця від розрахункового значення й інші. Звичайний клас точності ротаметрів складає 2,5, однак, погрішність виміру може бути зменшена в 2-3 рази індивідуальним градуюванням з використанням зразкових витратомірів.

Недоліками ротаметрів є: необхідність установки тільки на вертикальних ділянках трубопроводів, труднощі дистанційної передачі показань і запису, неможливість застосування для середовищ з високим тиском і температурою.

4.9 Тенденції розвитку засобів виміру витрати

В даний час випускається більш 100 різних типів витратомірів, багато з яких використовуються тільки в лабораторній практиці і непридатні для промислового застосування. Усі вироблені промисловістю витратоміри можна розділити на дві основні категорії: витратоміри, дія яких засновано на витягу енергії з вимірюваного середовища, і витратоміри, дія яких засновано на передачі енергії вимірюваному середовищу. Більшість застосовуваних витратомірів засновано на витягу енергії з рідкого чи газового середовища, що рухається в трубопроводі, що супроводжується небажаним явищем – необоротною втратою тиску вимірюваного середовища. Для іншої групи витратомірів, у яких енергія передається середовищу, утрата тиску у вимірюваному середовищі практично відсутня.

Витяг енергії з вимірюваного потоку, зв'язаний зі звуженням каналу, може відбуватися в різних типах приладів шляхом зменшення перетину каналу, приміщення в потік ротора чи тіла необтійної форми. Всі елементи і пристрої, що створюють різницю тисків, мають квадратичну залежність вихідного сигналу від значення витрати, що обмежує їхній робочий діапазон. Так, наприклад, вимір витрати в співвідношенні 5:1 відповідає зміні різниці тисків у відношенні 25:1. Тому що робочий діапазон вимірювальних перетворювачів різниці тисків обмежений, це істотно знижує діапазон виміру витрати. Аналіз показує, що, незважаючи на недоліки, прилади, засновані на принципі звуження потоку поки займають лідируюче положення в промисловості, однак, спостерігається тенденція до зменшення їх частки. Подальше виробництво й експлуатація витратомірів такого типу буде зв'язана з удосконаленням перетворювачів на базі використання мікропроцесорної техніки, що підвищує точність виміру в кілька разів.

При вимірі масової витрати (кг/год, кг/с) витратомірами будь-яких типів розроблені засоби перетворення, вихідний сигнал яких є прямою функцією тільки масової витрати, тобто температура, тиск і властивості рідини чи газу не впливають на вихідний сигнал. У таких витратомірах застосовується мікропроцесорний пристрій, у якому виконується обробка інформації, що надходить від інших чуттєвих елементів, і вноситься виправлення в значення масової витрати на температуру, тиск і склад вимірюваного середовища. Витратоміри для виміру масової витрати, у яких автоматично вводиться корекція на зміну параметрів середовища, особливо ефективні для виміру витрати газоподібного палива (природного, коксового, доменного, генераторного й

ін.). У процесі виміру температура, тиск і склад газу можуть мінятися в широких межах, що може істотно впливати на технологічний процес, якщо не робити відповідні виправлення.

Альтернативою вимірювальним приладам із пристроями, що звужують, пропонуються вихрові витратоміри для виміру витрати рідких середовищ і особливо пари. У таких приладах у потік, що рухається, міститься тіло необтічної форми (прямокутної, трикутної, Т-образної), біля яких утворюються вихри. Частота проходження вихрів залежить від швидкості, а значить від витрати середовища в трубопроводі. Існує кілька методів виявлення цих вихрів. Найбільш часто як чуттєвий елемент у вихрових витратомірах застосовується термістор, що перетворює динамічний вплив при пульсації вихрів у частотний електричний сигнал. Обробка сигналу здійснюється у передпідсилювачі і смуговому фільтрі, а потім у мікропроцесорі, що видає інформацію про витрату (об'ємному чи масовому) середовища, що рухається в трубопроводі.

На основі розвитку мікроелектроніки удосконалені теплові витратоміри (наприклад, термоанемометри). Термовитратоміри засновані на двох основних принципах. У першому випадку нагріте тіло стикається з потоком рідини й охолоджується дією рідини (ступінь охолодження нагрітого тіла в потоці середовища) є мірою швидкості (витрати). В другому випадку теплота від нагрітого тіла передається потоку рідини, що тече в закритому каналі, а кількість переданої теплоти і збільшення (зменшення) температури потоку визначає масову витрату рідкого середовища.

До витратомірів першого типу відносяться термоанемометри з нагрітою ниткою чи плівкою для локального виміру швидкості потоку. До другого типу відносяться пристрої для визначення повної масової витрати. Термоанемометри з нагрітою плівкою відрізняються стабільною характеристикою і міцністю, однак, їм властива помітна інерційність. Найбільш перспективними приладами такого типу можна вважати багатоканальні термоанемометри, призначені для виміру складових швидкості двох чи трьох напрямків. Вони можуть бути використані як у лабораторній, так і в промисловій практиці для визначення аеродинамічних характеристик потоків рідкого чи газового середовища у вимірюваних об'єктах (трубопроводах, робочому просторі технологічних установок і ін.).

Аналіз розвитку засобів виміру витрати показує, що удосконалювання витратомірів буде йти по шляху розробки чуттєвих елементів, розташовуваних поза трубопроводами без порушення їхньої цілісності і із широким застосуванням мікропроцесорних пристроїв.

5 ВИМІР РІВНЯ

5.1 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:

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

5.2 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 5.1).

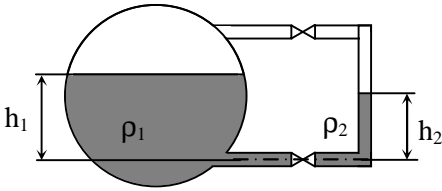


Рисунок 5.1 – Схема візуального рівнеміра

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:

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad (5.1)$$

Використовуючи формулу гідростатичного тиску для сполучених посудин, можна записати:

$$\rho_1 \cdot g \cdot h_1 = \rho_2 \cdot g \cdot h_2 \quad \text{чи} \quad \rho_1 \cdot h_1 = \rho_2 \cdot h_2 \quad (5.2)$$

Звідси погрішність виміру визначиться:

$$\Delta h = h_1 \left[1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right] \quad (5.3)$$

Дійсне значення рівня рідини в резервуарі можна визначити, використовуючи вираження (5.2):

$$h_1 = h_2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (5.4)$$

Як видно з рівняння (5.3) і (5.4), 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.

5.3 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:

$$P = \rho \cdot g \cdot h. \quad (5.5)$$

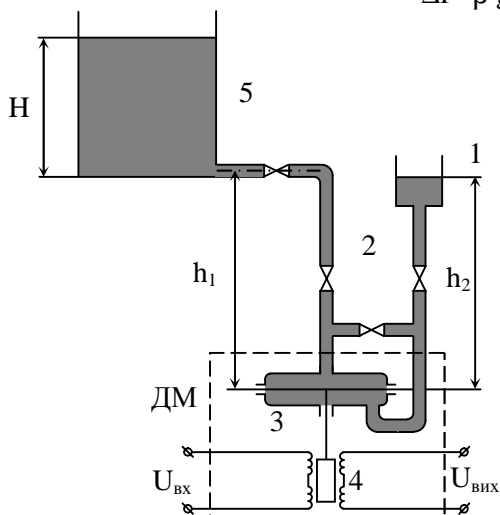
Найчастіше для виміру тиску P стовпа рідини застосовуються дифманометри з електричним вихідним сигналом. Схема підключення дифманометра до відкритого резервуара, що знаходиться під атмосфе-

рним тиском, показана на рисунку 5.2. 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:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = (H + h_1)\rho_1 \cdot g - h_2 \cdot \rho_2 \cdot g \quad (5.6)$$

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 5.2 – Схема гідростатичного рівнеміра

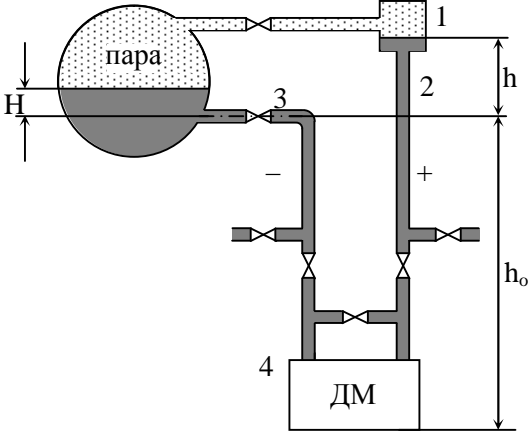
зрівняльна судина з великим поперечним перерізом, при цьому, великі коливання рівня H в резервуарі не викликають великих коливань h_2 у зрівняльній судині.

Коливання рівня рідини в резервуарі H змінює тиск ΔP на плоску мембрану дифманометра, від прогину якої переміщається сердечник диференційно-трансформаторного перетворювача. Вихідна електрична

З формули (5.6) 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 змінною 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

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.



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

Рисунок 5.3 – Схема рівнеміра з однокамерною зрівняльною судиною

Найпростішою схемою виміру рівня води (рідини) у барабані котла (у резервуарі під тиском) є схема з використанням однокамерної зрівняльної судини (рисунок 5.3). 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 правої (плюсової) зрівняльної лінії P_2 , що відповідно дорівнюють:

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

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

де ρ_n – щільність пари;

ρ_p – щільність води в барабані;

ρ_1 – щільність води в лівій трубці;

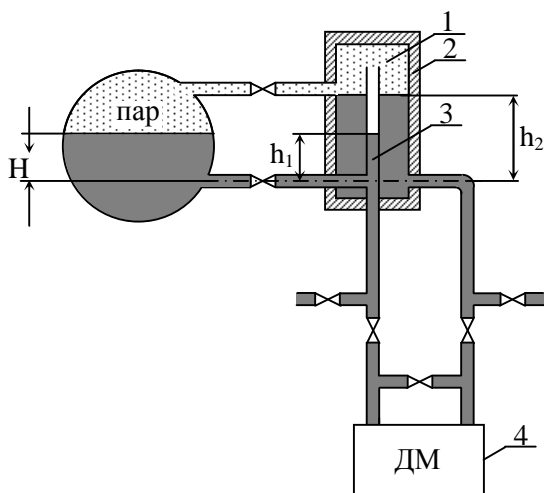
ρ_2 – щільність води в правій трубці.

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

$$\Delta P = P_1 - P_2 = [(h - H)\rho_n + H \cdot \rho_p + h_0 \rho_1 - (h + h_0)\rho_2] \quad (5.7)$$

Як видно з формули (5.7), показання рівнеміра залежить не тільки від поточного рівня рідини в барабані H , але і від щільності води в барабані $\rho_{ж}$, 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



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

Рисунок 5.4 – Схема рівнеміра з двокамерною зрівняльною судиною

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:

$$\Delta P = h_2 \cdot \rho_{в} \cdot g - [h_1 \cdot \rho_{в} \cdot g + (h_2 - h_1) \rho_{п} \cdot g] = (h_2 - h_1) (\rho_{в} - \rho_{п}) \quad (5.8)$$

де $\rho_{в}$, $\rho_{п}$ – щільності води і пари в барабані.

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 5.4). 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

Як видно з приведеного рівняння (5.8), 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 погрішність 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 5.5. 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 трубці 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 трубці 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.

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

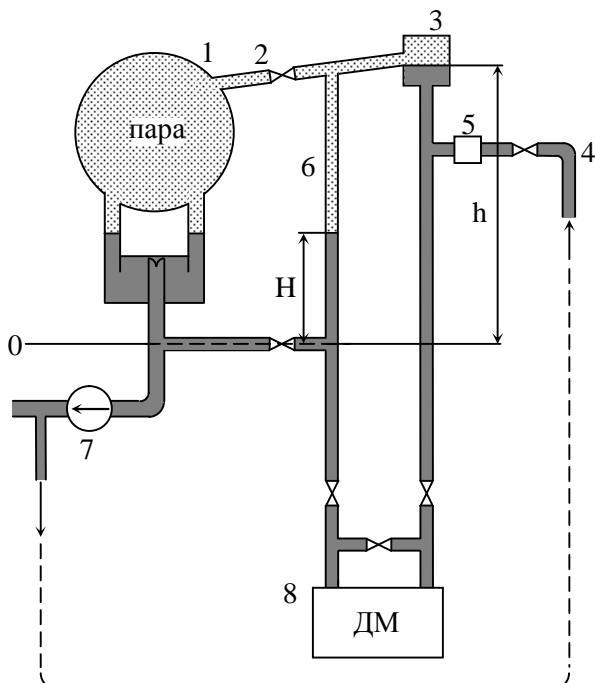
$$\Delta P = [h \cdot \rho_v - H \cdot \rho_v - (h - H) \rho_n] g,$$

чи

$$\Delta P = (h - H) \cdot (\rho_v - \rho_n) \cdot g, \quad (5.9)$$

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

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



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

Рисунок 5.5 – Схема виміру рівня води в конденса-
торі турбіни

Якщо врахувати, що щільність води ρ_v значно більше щільності пари ρ_p , що знаходиться в конденсаторі при низьких тисках, то рівняння (5.9) можна представити в більш простому виді:

$$\Delta P = (h - H)\rho_v \cdot g \quad (5.10)$$

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.

5.4 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 протизваги покажчика, з'єданого з поплавцем за допомогою троса, перекинутого через блок (рисунок 5.6). Цей метод застосовується для резервуарів, що знаходяться під атмосферним тиском, і розташованих недалеко від місця спостереження. Використання гнучких елементів (троса, стрічки) для одержання

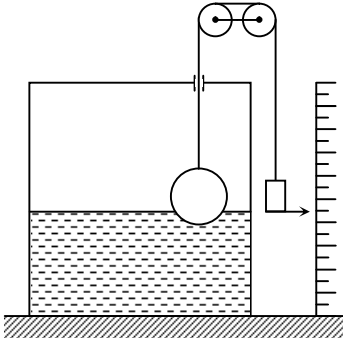


Рисунок 5.6 – Схема поплавкового рівнеміра

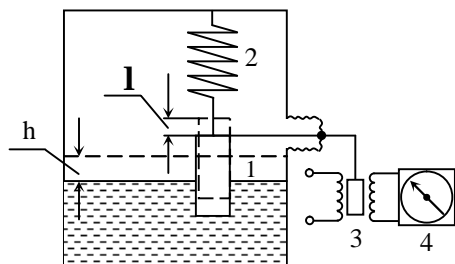
інформації про положення поплавця утруднено для резервуарів під тиском через складність герметизації виводів.

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 5.7). 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



1 – буй; 2 – пружина; 3 – індукційний перетворювач; 4 – вимірювальний прилад
Рисунок 5.7 – Схема буйкового рівнеміра

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, зрівноважиться силою стиску пружини, що можна виразити наступною рівністю:

$$c \cdot l = (h - l) \cdot \rho_p \cdot g \cdot F - (h - l) \cdot \rho_g \cdot g \cdot F, \quad (5.11)$$

де c – коефіцієнт твердості пружини;

ρ_p, ρ_g – щільність рідини і газу;

F – площа поперечного перерізу буя.

Звідси величина рівня рідини в резервуарі визначається:

$$h = l \left(1 + \frac{c \cdot g \cdot F}{\rho_p - \rho_g} \right). \quad (5.12)$$

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

$$h = k \cdot l \quad (5.13)$$

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 (5.11), може виникнути за рахунок зміни величин c, g, F, ρ_p, ρ_g . Так, при зміні температури рідини і тиску газового середовища в резервуарі, помітно змінюються щільності ρ_p, ρ_g . У цьому випадку в рівняння (5.11) 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.

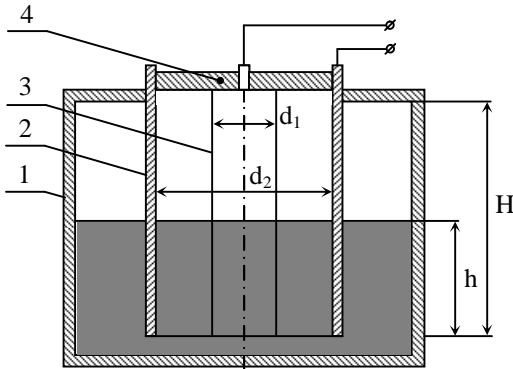
5.5 Ємнісні рівнеміри

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 коаксиально 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 5.8 показана



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

Рисунок 5.8 – Схема ємнісного рівнеміра для неелектропровідної рідини

схема пристрою ємнісного рівнеміра, виконаного у виді циліндричного конденсатора з двох коаксиально 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.

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

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_p h}{\ln d_2/d_1} \quad (5.14)$$

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

$$C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r (H - h)}{\ln d_2/d_1} \quad (5.15)$$

Сумарна ємність буде дорівнювати:

$$C=C_1+C_2=\frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{d_2}{d_1}} [h(\epsilon_{ж} - \epsilon_r) + \epsilon_r H] \quad (5.16)$$

Таким чином, ємність конденсатора однозначно залежить від вимірюваного рівня h при незмінних значеннях інших величин, що входять у формулу 5.15. Однак, у робочих умовах діелектрична проникність рідини ϵ_r 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_r від значення, прийнятого при градуюванні приладу. Зменшення впливу активного опору досягається введенням в електричну схему фазового детектора, що відфільтровує сигнал перешкоди, створений активним опором.

У ємнісних рівнемірах для виміру рівня електропровідної рідини один з електродів конденсатора виконується у виді ізольованого 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 5.9), 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

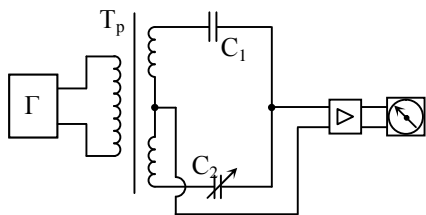


Рисунок 5.9 – Принципова електрична схема ємнісного рівнеміра

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 підсилувача зростає. Посилений сигнал перетвориться в уніфікований (0 – 100 мВ) і вимірюється вторинним приладом, у якості якого може бути використаний автоматичний чи потенціометр міліамперметр.

Діапазон виміру рівня ємнісними рівнемірами залежить від характеристики рідини, типа 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 °С) 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.

5.6 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 5.10). При зміні рівня змінюється індуктивність двох котушок, що визначається по формулі:

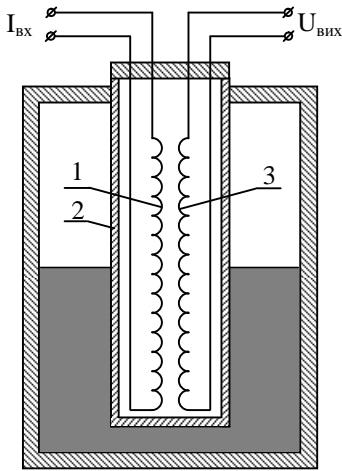
$$M = k\sqrt{L_1L_2}, \quad (5.17)$$

де k – коефіцієнт зв'язку;

L_1 і L_2 – індуктивності однієї і другий котушок.

Вихідна напруга на виході другої котушки дорівнює:

$$U_{\text{вих}} = kI_{\text{вх}}\sqrt{L_1L_2}. \quad (5.18)$$



1 – обмотка збудження; 2 – вторинна обмотка; 3 – захисний чохол
Рисунок 5.10 – Схема індуктивного рівнеміра

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

На рисунку 5.10 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 $U_{\text{вих}}$.

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 контролюваного рідкого середовища. Це приводить до залежності взаємної індуктивності між обмотками від рівня рідини. Таким образом, вихідна напруга $U_{\text{вих}}$ 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 5.11), поміщених у виді стовпа усередині металевого чохла, що відокремлює котушки від середовища. Індуктивність кожної котушки залежить від того,

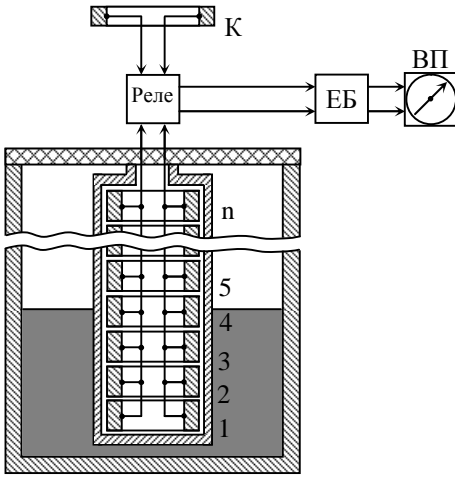


Рисунок 5.11 – Схема дискретного індуктивного рівнеміра

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 рідина – газ, надходить на вимірювальний прилад (ВП), що дає можливість визначити значення рівня рідкого середовища в резервуарі.

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:

$$\Delta = \delta + (h_1 + h_2) / 2, \tag{5.19}$$

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).

5.7 Акустичні рівнеміри

В акустичних рівнемірах використовуються ультразвукові коли-

вання, що поширюються в газовому чи рідкому середовищах, і в залежності від способу використання цих коливань вони поділяються на локаційні, поглинання і резонансні.

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 °С 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.

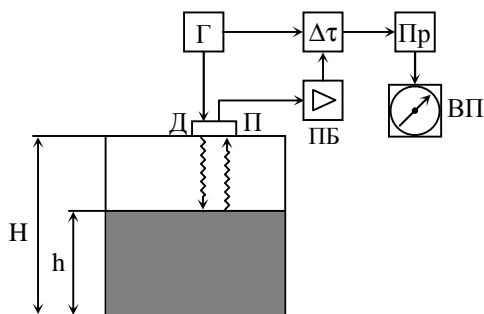


Рисунок 5.12 – Схема акустичного рівнеміра

Спрощена схема акустичного рівнеміра представлена на рисунку 5.12, у якому джерелом (Д) і одночасно приймачем (П) відбитих ультразвукових коливань є п'єзоелемент. Генератор (Г) високочастотних електричних імпульсів збуджує в п'єзоелементі ультразвукові коливання, що відбиваються від поверхні води і повертаються назад на п'єзоелемент.

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:

$$\Delta\tau = \frac{2(H-h)}{C} \quad (5.20)$$

Перетворювач (Пр) перетворить 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.

6 АНАЛІЗ СКЛАДУ ГАЗІВ

6.1 Загальні положення

Вимір складу газового середовища виробляється в різних галузях промисловості, у наукових дослідженнях, при проведенні екологічних моніторингів навколишньої атмосфери й в інших випадках.

Можна виділити наступні основні мети газового аналізу:

- визначення теплоти спалювання газоподібного палива по відомому складі пальних компонентів газової суміші. Вища теплота згоряння палива розраховується по формулі:

$$Q_B = \frac{q_{H_2} \cdot \%H_2 + q_{CO} \cdot \%CO + q_{CH_4} \cdot \%CH_4 + \dots}{100}, \quad (6.1)$$

де q_{H_2} , q_{CO} , q_{CH_4} і т.д. – теплові ефекти реакції горіння компонентів, Дж/м³ (беруться з довідкових даних);
 $\%H_2$, $\%CO$, $\%CH_4$ і т.д. – об'ємна концентрація пальних компонентів у газовій суміші.

- контроль якості спалювання палива по складу продуктів згоряння. При повному згорянні палива в продуктах згоряння на виході з теплових агрегатів повинні міститися тільки непальні компоненти, такі як CO₂, H₂O, N₂ і O₂. Для правильного ведення процесу горіння палива необхідно підтримувати визначене співвідношення між кількостями подаваних у топковий простір агрегату палива і повітря. При недостатній кількості повітря в продуктах згоряння з'являються такі пальні компоненти, як CO, H₂ і інші. Надлишкова кількість повітря забезпечує повне згоряння палива, але вимагає додаткових витрат на нагрівання надлишкового обсягу повітря, що є баластом, яке несе з агрегату невикористане фізичне тепло. Необхідне співвідношення паливо-повітря може бути встановлене на основі газового аналізу.
- контроль складу технологічних газів, до яких відносяться такі гази, як кисень, азот, аргон, водень, ендогаз, екзогаз і інші. Вони застосовуються для прискорення процесу виплавки сталі і чавуна (кисень), при рафінуванні рідкого металу в робочому просторі агрегату чи в ковші (аргон, азот), для захисту сталевих виробів від окислювання при нагріванні (ендогаз, аргон) і для інших технологічних процесів. Технологічні гази

повинні мати визначений склад (чи чистоту), що визначає якість технологічних операцій.

- контроль складу повітряної атмосфери для визначення концентрації шкідливих для навколишнього середовища газоподібних речовин, таких як оксиди (NO, NO₂, SO₂, SO₃, CO₂ і ін.), феноли, бензол, аміак, пальні вибухонебезпечні гази (CO, CH₄ і ін.).

Прилади, призначені для кількісного визначення складу газу, називаються газоаналізаторами. У залежності від призначення вони поділяються на переносні й автоматичні. Переносні газоаналізатори застосовуються в лабораторних умовах при виконанні дослідницьких робіт, при іспитах і налагодженні різних промислових теплотехнічних установок (плавильних, нагрівальних і термічних печей, парових і водогрійних котлів, сушильних установок і ін.). Автоматичні газоаналізатори призначені для безупинного автоматичного виміру змісту одного чи декількох компонентів у газовій суміші. На основі безупинного контролю газового середовища в робочому просторі промислового агрегату може здійснюватися автоматизоване керування технологічним процесом.

Газоаналізатори в залежності від способу визначення концентрації окремих компонентів газової суміші поділяються на:

- хімічні (хімічні властивості газових молекул);
- теплові (фізичні властивості газу);
- магнітні (магнітні властивості газу);
- оптичні (здатність поглинати електромагнітні хвилі);
- хроматографічні (адсорбційні властивості газових молекул);
- спектрометричні (спектральні властивості газу).

Газоаналізатори звичайно градууються у відсотках по обсязі. Такий спосіб градування шкали газоаналізаторів зручний, тому що процентна частка окремих компонентів у загальному обсязі залишається незмінною при зміні тиску і температури газової суміші.

6.2 Хімічні газоаналізатори

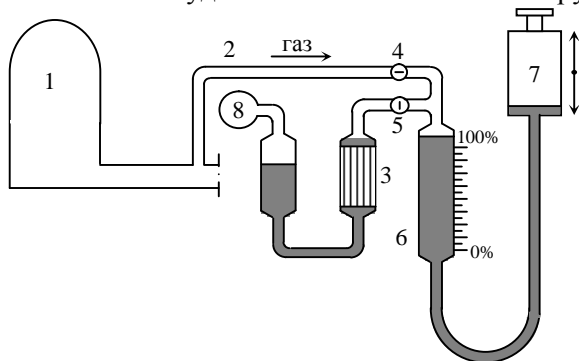
У хімічних газоаналізаторах визначення концентрації окремих компонентів газової суміші виконується методом поглинання цих компонентів хімічними реативами. По зменшенню початкового мірного обсягу газу визначають зміст даного компонента в газовій суміші.

Для багатьох компонентів газу розроблені селективні хімічні реативи, що поглинають (реагують) тільки аналізований компонент. Непоглинений залишок аналізованого газу надходить у газовимірюваль-

ний пристрій, де вимірюється зменшення обсягу, що відповідає поглиненому компоненту. Цей метод застосовується як у переносних газоаналізаторах ручної дії, названих часто приладами Орса, так і в автоматичних.

Найбільше поширення одержали переносні газоаналізатори для визначення якості спалювання палива під час пуско-налагоджувальних робіт теплових агрегатів, що використовують тверде, рідке чи газоподібне паливо. При цьому аналізуються три компоненти: CO_2 , O_2 і CO . Такі газоаналізатори застосовуються також для контролю і градування автоматичних газоаналізаторів на ці ж компоненти.

Схема устрою газоаналізатора для аналізу одного компонента з газової суміші представлена на рисунку 6.1. Аналізований газ з об'єкта 1 надходить у газоаналізатор по газовому тракту 2 при відкритому вентилі 4 і закритому вентилі 5. Мірна кількість газу (50 чи 100 мл) надходить у вимірювальну бюретку 6 за рахунок розрядження, створюваного опусканням зрівняльної судини 6. Дистильована вода із судини 6 перетікає в судину 7, а аналізований газ цілком заповнює вимірювальну бюретку 6, після чого кран 4 закривається, а кран 5 відкривається. Піднімаючи зрівняльну судину 7, витісняють аналізований обсяг газу в поглинальну судину 3, заповнену селективним хімічним реактивом, що поглинає тільки один компонент з аналізованої газової суміші. Для збільшення поверхні зіткнення між аналізованим газом і реактивом поглинальна судина заповнена скляними трубками. Якщо прокачати



1 – об'єкт; 2 – газова траса; 3 – поглинальна судина; 4, 5 – запірні крани; 6 – вимірювальна бюретка; 7 – зрівняльна судина; 8 – гумовий мішок
Рисунки 6.1 - Схема хімічного газоаналізатора

аналізований газ кілька разів через реактив, можна домогтися повного поглинання даного компонента.

Залишковий обсяг газу повертають у вимірювальну бюретку, що має градування в об'ємних відсотках від 0 до 100%. Рівень рідини у вимірювальній бюретці вкаже на зміст аналізованого компонента в газовій суміші. При необхідності визначити концентрацію інших компонентів, що міс-

необхідності визначити концентрацію інших

тяться в газовій суміші, використовують кілька поглинальних судин, заповнених відповідними реагентами, що вибірково поглинають аналізовані компоненти.

У газоаналізаторах типу Орса застосовуються наступні хімічні реагенти: розчин їдкого калію КОН для поглинання CO_2 , пірогалолова кислота $\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH})_3$ – для O_2 , розчин напівхлористої міді CuCl_2 з нашатирним спиртом NH_4Cl і аміаком NH_3 – для CO . Переносні хімічні газоаналізатори володіють достатньою для виробничих умов точністю виміру з погрішністю в межах 0,5 – 1% при використанні свіжоприготованих реагентів і гарного стану апаратури. До числа достоїнств об'ємного методу виміру концентрації газів відносяться: можливість виміру великої кількості компонентів газових сумішей шляхом підбора відповідних хімічних реагентів; можливість аналізу багатокомпонентних газових сумішей; простота пристрою.

Недоліками методу є: неможливість виміру малих концентрацій, тому що ціна розподілу вимірювальної бюретки складає 0,1 мл; періодичність дії, що складає 20-30 аналізів у годину; необхідність частішої заміни реагентів; неможливість використання в системах автоматичного регулювання.

6.3 Теплові газоаналізатори

У теплових газоаналізаторах для визначення концентрації якогонебудь компонента в газовій суміші використовуються її теплові властивості, такі як теплопровідність, тепловий ефект реакції каталітичного окислювання (термохімічні) і ін.

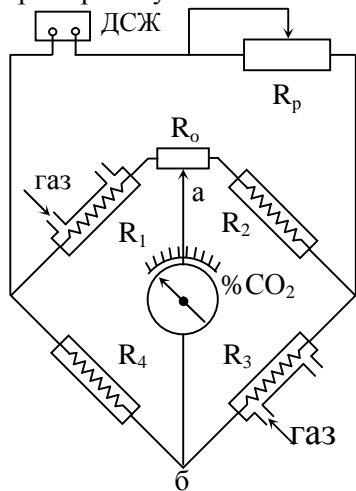
Найбільше поширення одержали термокондуктометричні газоаналізатори, засновані на різкому розходженні коефіцієнта теплопровідності одного з компонентів у порівнянні з іншими компонентами аналізованої газової суміші. Так, наприклад, теплопровідність таких газів як H_2 , CO_2 , SO_2 , CH_4 , He , Ar значно відрізняється від теплопровідності повітря, і якщо в повітряному середовищі мається один з цих компонентів, то зміна величини теплопровідності газової суміші буде визначатися зміною змісту даного аналізованого компонента.

Аналіз багатокомпонентної газової суміші по її теплопровідності можна робити за умови, що усі компоненти газової суміші, крім того, який визначається, мають приблизно однакову теплопровідність. Якщо в газовій суміші маються компоненти, що можуть впливати на теплопровідність суміші і концентрацію яких визначати не потрібно, то ці компоненти з газової суміші повинні бути вилучені перед початком

аналізу. Так, наприклад, при вимірі концентрації CO_2 у димових газах необхідно видалити такі компоненти як H_2 і SO_2 , що містяться в невеликій кількості, але впливають на загальну теплопровідність.

У теплових газоаналізаторах для визначення концентрації окремих компонентів використовуються мостові схеми, у яких плічми моста є платинові спіралі, нагріті до температури 100°C і поміщені в газові камери. Газоаналізатор складається з чотирьох газових камер, дві з яких R_2 і R_4 є робочими, через які безупинно прокачується аналізований газ (рисунок 6.2). Дві інші герметичні газові камери R_1 і R_3 служать у якості порівняльних, у яких знаходиться газ постійного складу. Так, наприклад, у газоаналізаторах, призначених для визначення CO_2 у газовій суміші, порівняльним газом є повітря.

При прокачуванні аналізованого газу, що містить, наприклад,



CO_2 і концентрацію якого треба визначити, через протилежні газові камери R_1 і R_3 змінюється теплопровідність газового шару, розташованого між платиновим дротом і стінкою камери. Зі збільшенням концентрації CO_2 у газовій суміші зменшується теплопровідність газу, погіршується теплообмін, що приводить до збільшення температури платинового дроту в камерах R_1 і R_3 . Розбаланс моста, що з'явився, вимірюваною величиною напруги між точками «а» і «б», визначається з вираження:

Рисунок 6.2 – Вимірювальна мостова схема термокондуктометричного газоаналізатора

$$E_{a,b} = k \cdot (R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4) \quad (6.2)$$

де k – коефіцієнт пропорційності.

Як видно з формули (6.2), при протіканні аналізованого газу через протилежні камери різко збільшується чутливість приладу, тому що напруга $E_{a,b}$ залежить від добутку величин опору платинових дротів у вимірювальних камерах R_1 і R_3 .

Як вимірювальний прилад, що вимірює різницю потенціалів $E_{a,b}$ між точками «а» і «б» і відградує в об'ємних відсотках аналі-

зованого компонента газової суміші, використовуються мілівольтметри, що показують, чи потенціометри, що реєструють.

Живлення мостової виміральної схеми в сучасних газоаналізаторах здійснюється постійним струмом від джерела стабілізованого живлення (ДСЖ). Резистор R_p , включений у ланцюг живлення призначений для установки такого струму живлення моста при градуванні газоаналізатора, щоб температура платинових дротів у всіх газових камерах була близька до $100\text{ }^\circ\text{C}$. Вхідний у міст перемінний резистор R_0 служить для усунення початкового небалансу моста, коли в газових камерах перед початком виміру знаходяться однакові склади газових сумішей.

Межі основної погрішності, що допускається, термокондуктометричних газоаналізаторів для визначення CO_2 у газовій суміші не перевищують 2 - 2,5% діапазону виміру. Зміна показань газоаналізаторів при зміні температури навколишнього повітря від 20 до $50\text{ }^\circ\text{C}$ не перевищує $\pm 2 - 2,5\%$.

Термокондуктометричний принцип (вимір по теплопровідності) вимір застосовується для визначення (крім CO_2) таких компонентів, як H_2 , SO_2 , Ar , O_2 , NH_3 у топкових газах і в газах при виробництві аміаку, хлору, аргону, сірчаної кислоти, а також для визначення концентрації водню в системі водневого охолодження турбогенераторів на теплових електростанціях. Недоліками таких типів газоаналізаторів є великий час установлення показань (інерційність), що досягає 120 секунд і підвищена погрішність (до 5%).

6.4 Магнітні газоаналізатори

Магнітні газоаналізатори використовуються для визначення тільки концентрації кисню в газовій суміші, тому що кисень на відміну від інших газів має сильні магнітні властивості, будучи парамагнітною речовиною. Якщо відносно магнітну сприйнятливості кисню прийняти за одиницю, то ця величина для всіх інших газів на два порядки менше, ніж у кисню. Тобто усі гази, крім кисню, є практично немагнітними речовинами. Таким чином, магнітні властивості газової суміші залежать від концентрації кисню в газі, а такі гази як NO і NO_2 , що виявляють незначні магнітні властивості, практично не впливають на магнетизм газової суміші через їхні малі концентрації.

Існує кілька методів виміру магнітної сприйнятливості газової суміші, що містить кисень. Найбільше поширення одержав метод, що носить назву термомагнітної конвекції. У магнітному газоаналізаторі

аналізований газ під дією магнітного поля втягується в спеціальну вимірювальну камеру, у якій знаходиться чуттєвий елемент, що нагрівається струмом. Газ, стикаючись з чуттєвим елементом, нагрівається і кисень втрачає свої магнітні властивості. Унаслідок цього, нагрітий газ виштовхується з камери, розташованої в магнітному полі, холодним газом і таким чином, виникає безупинний потік газу через вимірювальну камеру.

На рисунку 6.3 представлена схема магнітного газоаналізатора, у якому використовується схема виміру на основі неврівноваженого моста. Мостова схема живиться постійним струмом (від батареї Б чи джерела стабілізованого живлення), що підводиться до живильної діагоналі 1 – 2. Усі плечі моста R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , являють собою платинові нагрівачі виконані з дроту діаметром 0,02 мм, намотані на скляний стержень.

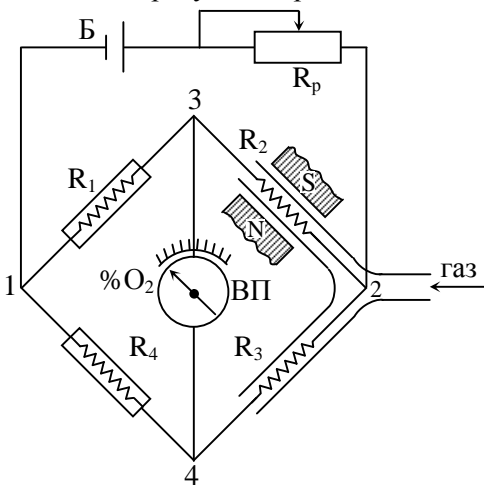


Рисунок 6.3 – Схема магнітного газоаналізатора

Через дві вимірювальні камери R_2 і R_3 безупинно прокачується аналізований газ, що містить кисень. Одна з камер R_2 поміщена в поле постійного магніту. Чим більше зміст кисню в газовій суміші, тим більший обсяг газу втягується в магнітне поле, проходячи через нагрівач R_2 . Таким чином, температура нагрівача R_2 буде визначатися змістом кисню в аналізованому газі. Більший обсяг газу, що проходить через магнітну камеру R_2 у порівнянні з камерою R_3 , знижує температуру нагрівача R_2 і зменшує його електричний опір. Виниклий розбаланс моста, тобто $R_1 \cdot R_3 > R_4 \cdot R_2$, приведе до появи різниці потенціалів між точками 3 і 4, що вимірюється вольтметром ВП із градуванням процентного вмісту кисню в газовій суміші.

Одномостова вимірювальна схема магнітного газоаналізатора застосовується як у переносному, так і в стаціонарному варіанті для виміру змісту кисню в продуктах згоряння нагрівальних і плавильних печей, а також котельних установок. Гранична погрішність приладу залежить від діапазону виміру і знаходиться в інтервалі від ± 2 до $\pm 10\%$ значення, що нормує. Остання цифра відповідає мінімальному

діапазону виміру приладу.

В автоматичних магнітних газоаналізаторах, що використовуються в системах автоматичного регулювання якості спалювання палива, застосовується двомостова вимірювальна схема, представлена на рисунку 6.4. Один з мостів є робочим, і його резистори R_1 і R_2 , що представляють собою платинові елементи, омиваються аналізованим газом. Резистор R_1 знаходиться між полюсами постійного магніту. Резистори R_3 і R_4 є постійними і виконані з манганінового дроту.

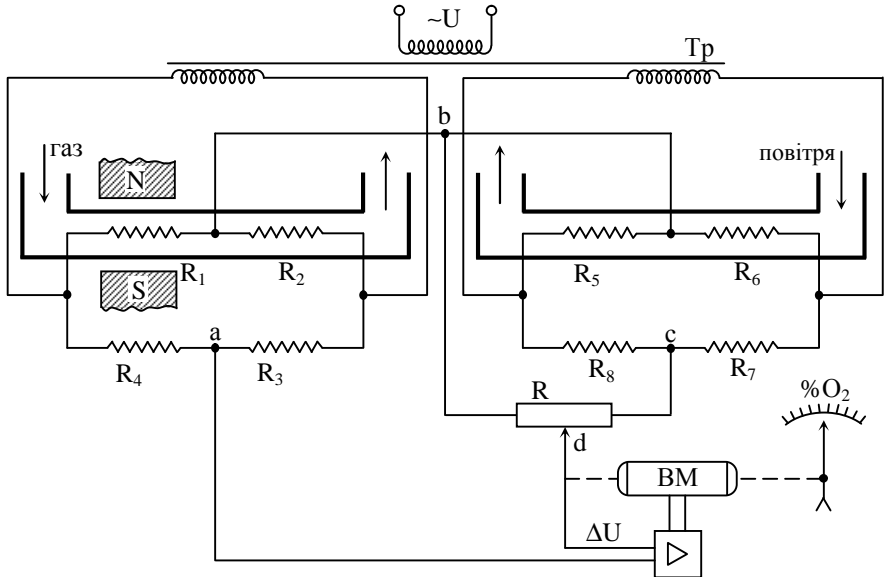


Рисунок 6.4 – Схема автоматичного магнітного газоаналізатора

Другий міст є мостом порівняння. Його плечі R_5 і R_6 , виконані з платинового дроту, омиваються повітрям. Резистори R_7 і R_8 виконані з манганінового дроту.

При наявності кисню в газовій суміші й у результаті впливу магнітного поля на кисень газ проходить через газову камеру робочого моста, омиваючи резистори R_1 і R_2 . Міст виходить з рівноваги й у вимірювальній діагоналі між точками «а» і «б» виникає напруга U_{ab} , що залежить від змісту кисню в газі. Через резистори R_5 і R_6 моста порівняння прокачується постійна кількість повітря й оскільки концентрація кисню в повітрі є стабільною, міст розвиває стабільну напругу U_{cb} між точками «с» і «в». Різницевий сигнал $\Delta U = U_{ab} - U_{cb}$ між двома мостовими схемами надходить на електронний підсилювач, далі на виконавчий механізм ВМ, що переміщає движок перемінного резистора

Р доти, поки спадання напруги на частині резистора R не буде дорівнювати ΔU . У момент компенсації цих двох напруг двигун ВМ зупиниться, а положення движка R чи кут повороту вала ВМ буде визначати зміст кисню в аналізованому газі. Достоїнством двомостових автоматичних магнітних газоаналізаторів є незалежність показань від таких факторів як коливання напруги живлення, температури, тиску і вологості навколишнього середовища. Це визначається одночасним впливом перерахованих факторів на електричні сигнали робочого і порівняльних мостів, а при виділенні різницевого сигналу знищуються всі перешкоди і формується тільки корисний сигнал, що залежить тільки від змісту кисню в газі.

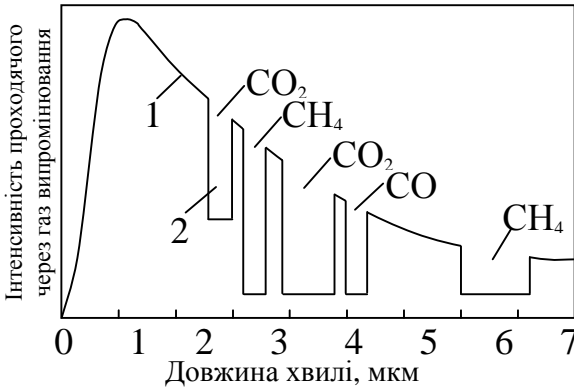
6.5 Оптичні газоаналізатори

В оптичних газоаналізаторах використовуються наступні оптичні властивості газової суміші, що залежать від складу газу:

- поглинання променистої (електромагнітної) енергії в інфрачервоній, ультрафіолетовій і видимій областях спектра;
- зсув інтерференційних смуг унаслідок зміни оптичної щільності газового середовища при пропущенні через газовий шар визначеної товщини двох когерентних променів;
- випромінювання (емісія) променистої енергії окремих компонентів газової суміші, що залежить від концентрації цієї кількості в газі.

Найбільше поширення в різних галузях промисловості одержали газоаналізатори, засновані на поглинанні інфрачервоної енергії. Вони застосовуються для визначення концентрації окису вуглецю (CO), двоокису вуглецю (CO_2), метану (CH_4), аміаку (NH_3) і інших компонентів, що знаходяться в різних газових сумішах. Це порозумівається тим, що в інфрачервоній області спектра ці гази мають інтенсивні і відмітні друг від друга інтервали (смуги) поглинання (рисунок 6.5). Як видно з рисунка, якщо через газову суміш, що містить, наприклад, CO_2 , CH_4 і CO , пропускати променисту енергію в інтервалі довжин хвиль від 0 до 9 мкм, то кожен компонент поглинає енергію в характерному (своєму) діапазоні довжин хвиль. По кількості поглиненої енергії в характерному діапазоні довжин хвиль можна визначити зміст конкретного газу в газовій суміші при постійній товщині газового шару.

У залежності від принципу виміру поглиненої енергії аналізованим компонентом газової суміші існуючі газоаналізатори цього



1 – крива випромінювання чорного тіла;

2 – поглинена частина енергії

Рисунок 6.5 – Спектр поглинання променеистої енергії газовими молекулами

типу поділяються на кілька груп і мають різні найменування. Найбільше застосування одержали газоаналізатори, у яких використовується селективний оптико-акустичний променеприймач, що вимірює залишок непоглиненої даним компонентом променеистої енергії. Величина (інтенсивність) непогли-

неної енергії визначається за законом Ламберта – Бера:

$$E_{\lambda} = E_{0\lambda} \cdot e^{-kcx}, \tag{6.3}$$

де $E_{0\lambda}$, E_{λ} – інтенсивність променеистої (монохроматичної) енергії до і після проходження через аналізований газ;

k – коефіцієнт поглинання, характерний для аналізованого компонента газової суміші і визначеної довжини хвилі променеистої енергії, що проходить через газ;

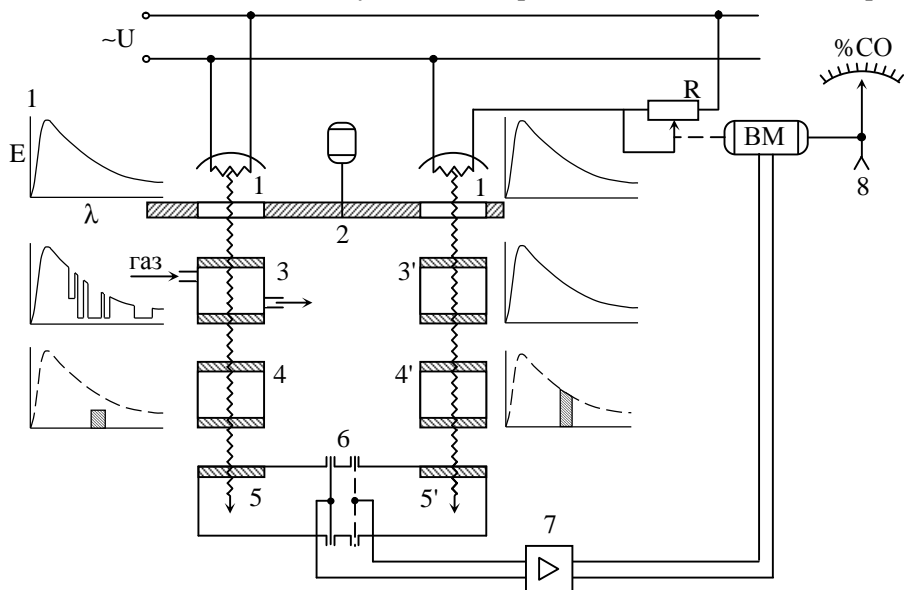
c – об’ємна концентрація аналізованого компонента (у частках одиниці);

x – товщина поглинаючого шару газу.

У процесі виміру вхідні у формулу (6.3) величини $E_{0\lambda}$, k , c , x відомі і залежать тільки від типу газу. Тому, обмірювана непоглинена частина енергії E_{λ} однозначно визначає концентрацію аналізованого компонента в газовій суміші.

Розглянемо роботу оптико-акустичного газоаналізатора, принципова схема якого показана на рисунку 6.6. Потоки інфрачервоного випромінювання (показані стрілками) від двох випромінювачів 1 перериваються обтюратором (обертвий диск з отворами) 2 і надходять у два оптичних канали. Лівий канал, що є робочим, складається з газової камери 3, через яку безупинно прокачується аналізований газ; фільтрувальної камери 4; поглинальної камери 5. Правий канал – канал порівняння – складається з нейтральної камери 3', у якій випромінювання практично не поглинається; фільтрувальної камери 4'; поглинальної камери 5'.

На рисунку 6.6 у графічній формі (формі кривих Планка) показано зміну спектра інфрачервоного випромінювання при проходженні світлового потоку від випромінювачів до камер поглинання через лівий і правий оптичні канали. При проходженні випромінювання через газову камеру 3 лівого каналу відбудеться часткове чи повне поглинання світлової енергії на окремих інтервалах довжин хвиль, викликане виборчим поглинанням енергії кожним компонентом, що знаходиться в газовій суміші. Для визначення змісту обраного (аналізованого) компонента необхідно з усього спектра виділити тільки той інтер-



1 – випромінювачі; 2 – обтюратор; 3 – газова камера; 3' – нейтральна камера; 4, 4' – фільтрувальні камери; 5, 5' – поглинальні камери; 6 – конденсатор; 7 – електронний блок з підсилювачем; 8 – виконавчий механізм

Рисунок 6.6 – Схема оптико-акустичного газоаналізатора вал, на якому поглинає енергію аналізований компонент. З цією метою спектр пропускають через фільтрувальну камеру, заповнену спеціальним багатокомпонентним газом, що поглинає випромінювання на всіх довжинах хвиль (в інфрачервоній області), крім інтервалу, на якому поглинає енергію аналізований компонент. Частина енергії, що залишилася (заштрихований стовпчик), пропорційна змісту аналізованого компонента, надходить у поглинальну камеру 5, де цілком поглинається. При цьому підвищується температура і тиск у камері 5

(камера 5 заповнена поглинальним газом), значення яких залежить від змісту визначаємого компонента в газовій суміші.

Інфрачервоне випромінювання, що надходить у правий оптичний канал, проходить спочатку через нейтральну камеру 3' для створення однакових фізичних умов роботи з лівим каналом. Камери 3 і 3' мають однакові геометричні й оптичні характеристики й у них дотримуються рівні умови ослаблення світлової енергії за рахунок відображення і поглинання випромінювання в оптичній системі камер. Фільтрувальна камера 4', як і аналогічна в лівому каналі, пропускає випромінювання в такому ж діапазоні довжин хвиль, і вся ця енергія поглинається в камері 5'.

Камери 5 і 5' розділені двома пластинками 6, одна з яких суцільна, а друга – перфорована. Дві пластинки утворюють плоский пластинчастий конденсатор. Ємність конденсатора залежить від відстані між пластинами, що визначається перепадом тиску між камерами 5 і 5'. При збільшенні змісту аналізованого компонента зменшується тиск у камері 5 і зростає перепад тиску між камерами, що приводить до пропорційного збільшення ємності конденсатора.

Електронний блок 7, зв'язаний з конденсатором, виробляє електричний сигнал, пропорційний змісту аналізованого компонента в газовій суміші. Виконавчий механізм 8, що живиться від електронного блоку, переміщає движок реостата R убік зменшення потужності (яскравості) інфрачервоного випромінювання в правому оптичному каналі. При рівності інтенсивностей інфрачервоних випромінювань у камері 5 і 5' електрична система (конденсатор – електронний блок – виконавчий механізм) прийде в стан рівноваги, тому що суцільна пластинка конденсатора залишиться нерухомою і сигнал на виході електронного блоку буде дорівнювати нулю.

Кут повороту вала виконавчого механізму буде однозначно визначатися змістом аналізованого компонента, а пристрій, що показує (реєструючий) укаже процентний вміст компонента в газовій суміші.

В оптико-акустичних газоаналізаторах періодичне переривання інфрачервоного випромінювання обтюратором робиться для створення пульсуючого зі звуковою частотою перепаду тиску в поглинальних камерах. Ці коливання передаються пластинкам конденсатора і перетворюються в перемінний електричний сигнал, що підвищує чутливість, стабільність і точність роботи електронного блоку.

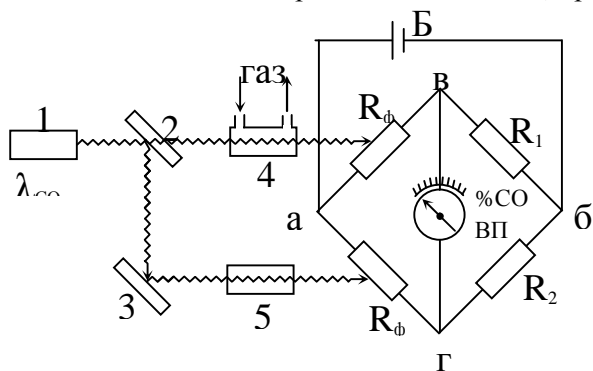
Газоаналізатори, що працюють на звукових частотах модуляції інфрачервоного випромінювання одержали найменування оптико-акустичних газоаналізаторів.

В даний час використовуються газоаналізатори з більшою частотою модуляції (тобто з більшою швидкістю обертання обтюратора) від 5 до 6 Гц і з газовою системою компенсації замість електричної. Така система виміру забезпечує незалежність показань від зміни температури навколишнього середовища, параметрів конденсатора й електронного посилення.

Межі основної погрішності оптико-акустичних газоаналізаторів, що допускається, складають $\leq 2,5\%$ діапазону виміру.

6.6 Лазерний газоаналізатор

У лазерному газоаналізаторі монохроматичний промінь у дуже вузькому діапазоні довжин хвиль пропускається через аналізований газ і по величині поглинання монохроматичного випромінювання визначається зміст аналізованого компонента в газовій суміші. Для кожного компонента вибирається визначена (характерна) довжина хвилі,



1 – лазер; 2 – напівпрозоре дзеркало; 3 – відбивач; 4 – робоча газова камера; 5 – камера з нейтральним газом; 6 – вимірювальний міст
Рисунок 6.7 – Схема лазерного газоаналізатора

випромінювання на який добре поглинається тільки даним компонентом. Для аналізу декількох обраних компонентів газової суміші застосовуються або кілька лазерів з різними довжинами хвиль випромінювання, або лазер з регульованим діапазоном довжин хвиль для кожного компонента.

На рисунку 6.7 представлена одна зі схем лазерного газоаналізатора, що може бути реалізована в приладах, що показують, і приладах, що реєструють, як стаціонарного, так і переносного типу. Монохроматичне випромінювання лазера 1 на довжині хвилі, що відповідає довжині хвилі поглинання даним компонентом (наприклад, λ_{CO} при аналізі CO у газовій суміші), проходить оптичну систему, що складається з напівпрозорого дзеркала 2, і відбивача 3. Оптичною системою промінь лазера роздвоюється на 2 однакові по

інтенсивності промені, що проходять через дві газові камери: робочу 4, через яку безупинно прокачується аналізований газ, і камеру 5 з нейтральним газом. При проходженні променя через робочу камеру інтенсивність його змінюється пропорційно змісту аналізованого компонента в газовій суміші. Інтенсивність променів, що пройшли через камеру з нейтральним газом, залишається незмінною. Два промені падають на відповідні фоторезистори, що входять у мостову схему, при цьому, опір фоторезистора $R_{\phi 1}$ змінюється пропорційно змісту аналізованого компонента, а опір $R_{\phi 2}$ залишається незмінним. Таким чином, напруга у вимірювальній діагоналі «в-г» буде однозначно визначатися змістом аналізованого компонента в газовій суміші, а вимірювальний прилад ВП укаже на об'ємну концентрацію цього компонента.

Використання лазерного променя, що має вузький діапазон довжини хвилі, дозволяє значно підвищити чутливість і точність газового аналізу, особливо при визначенні мікроконцентрацій окремих компонентів у газовій суміші. Лазерні газоаналізатори використовуються для визначення концентрації шкідливих домішок у газових викидах промислових підприємств, у лабораторній і дослідницькій практиці й в інших випадках.

6.7 Газові хроматографи

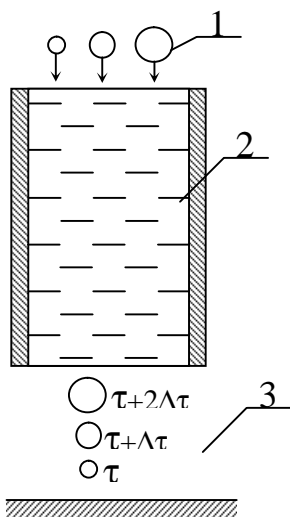
Газові хроматографи застосовуються для одночасного визначення концентрації декількох компонентів, що знаходяться в газовій суміші.

Дія хроматографів заснована на поділі газової суміші на окремі компоненти за допомогою спеціальних речовин, що одержали назву адсорбентів. Як адсорбенти в газовій хроматографії використовуються пористі речовини з великою поверхнею, такі як активовані вугілля, силікогелі, алюмогелі, цеоліти, тонкопористі стекла й ін. Після поділу газової суміші кожен компонент аналізується окремим детектором (визначником) з видачею електричного сигналу, пропорційного концентрації аналізованого компонента.

Хроматографічний поділ речовин (рідких і газоподібних) на окремі компоненти було вперше застосоване російським вченим М.С. Цветом при дослідженні пігментів, що беруть участь у фотосинтезі рослин. При проведенні досліджень учений мав справу з пофарбованими речовинами і тому використовуваний їм метод поділу був названий хроматографією від слова «колір».

Поділ газу на окремі компоненти відбувається через різницю адсорбуємості компонентів твердими адсорбентами, що зв'язано з різною силою молекулярної взаємодії між кожним аналізованим компонентом і адсорбентом.

Механізм поділу газів на окремі компоненти можна спрощено пояснити на прикладі руху трьох куль різного діаметра, як аналогію трьох різних молекул, через ряд горизонтальних ґрат, що представляють аналогію адсорбенту (рисунок 6.8). При одночасному вході куль у верхні ряди ґрат першим у нижній частині з'явиться мала куля, за нею середня, і останньою – велика куля, що визначається різним опором з боку ґрат на кулі різних розмірів, що рухаються.



1 – молекули трьох газів; 2 – адсорбент; 3 – час виходу молекул з адсорбенту

Рисунок 6.8 – Схема, що пояснює роботу хроматографа

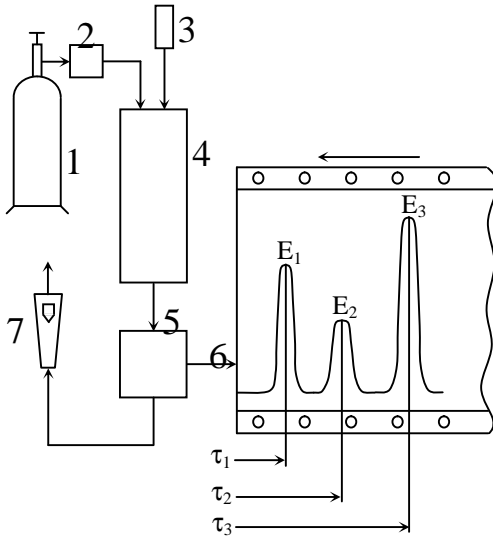
розділову колонку, де знаходиться адсорбент. Через малий обсяг аналізованого газу його розбавляють газом – носієм, що безупинно надходить з балона 1 у розділовий стовпчик пройшовши регулятор витрати 2 і забезпечуючи постійну швидкість руху газової суміші в розділовому стовпчику 4. У якості газу-носія використовуються як інертні гази (азот, аргон, гелій), так і інші гази (повітря, водень, вуглекислий газ) у залежності від фізико-хімічних властивостей аналізованих газів.

У розділовій колонці, заповненій адсорбентом, аналізована суміш розділяється на компоненти. Першим на виході зі колонки через час τ_1

Аналогічне явище виникає при русі різних молекул через адсорбент, що представляє собою молекулярне сито. Молекули газу, що мають велику силу взаємодії з молекулами адсорбенту, будуть відставати від молекул газу з меншими силами взаємодії (силами зв'язку) з адсорбентом. Це приведе до поділу газу на виході з адсорбенту на окремі компоненти, кожний з яких пройде через відповідні детектори для визначення його процентного вмісту в газовій суміші.

Принципова схема газового хроматографа з допоміжними елементами представлена на рисунку 6.9. Невеликий фіксований обсяг аналізованого газу (від 0,1 до 20 см³ у залежності від типу приладу) з дозатора 3 вводиться в

з'являється компонент, що має найменшу адсорбційну здатність, слідом, через час τ_2 , другий компонент, що має більш велику адсорбуємість, і останнім (якщо газ складається з трьох компонентів) через час τ_3 виходить третій компонент, що має найбільшу адсорбційну здатність.



1 – балон з газом-носієм;
 2 – регулятор витрати газу-носія;
 3 – дозатор аналізованого газу;
 4 – розділова колонка; 5 – детектор;
 6 – ділянка діаграмного папера з хроматограмою; 7 - ротаметр
 Рисунок 6.9 – Принципова схема газового хроматографа

вигляді функції часу, що представляють собою хроматографічні піки, що записуються на діаграмній стрічці 6 (чи зображуються на дисплеї комп'ютера).

Хроматограма дає представлення про якісний і кількісний склад аналізованої газової суміші. Час виходу кожного компонента з розділової колонки чи, теж саме, час появи сигналу (τ_1 , τ_2 , τ_3) на хроматограмі подає інформацію про природу кожного компонента, а площа чи висота піка (E_1 , E_2 , E_3) визначає кількісний склад газової суміші.

Перед проведенням газового аналізу хроматограф проходить калібрування, що виконується по контрольних сумішах чи по чистих газах. Отримана функціональна залежність чи так називана градууюваль-

Після поділу кожен компонент разом з газом – носієм надходить у детектор 5, у якому виконується аналіз обраних компонентів. Детектори хроматографів, які використовуються, засновані на використанні якої-небудь фізичної чи фізико-хімічної властивості аналізованого компонента газової суміші. Тип детектора і його характеристики визначають такі можливості хроматографа як тривалість аналізу, оптимальний обсяг проби, режим аналізу і ін. Детектор повинен мати малу інерційність, високу чутливість, стабільність метрологічних характеристик і лінійну залежність вихідного сигналу від концентрації аналізованого компонента.

Детектор після аналізу кожного компонента видає вихідні електричні сигнали у

на характеристика приладу може бути представлена або графічно, або у виді каліброваних коефіцієнтів.

В даний час випускаються хроматографи для лабораторного і промислового використання. Лабораторні характеризуються підвищеною точністю, універсальністю, великим числом аналізованих компонентів, підвищеними вимогами до умов експлуатації і з комп'ютерною обробкою отриманих хроматограмм. Промислові хроматографи мають більш вузьке призначення, а сигнал, що виробляється ними, використовується при оперативному й автоматичному керуванні технологічним процесом. Так, наприклад, хроматограф із серії «Газохром» (Росія і Україна), відноситься до числа спеціалізованих, призначених для експресного визначення концентрації O_2 , CO_2 , N_2 , H_2 , CO , CH_4 і вуглеводнів до бутану включно в продуктах згоряння різних видів палив, що спалюються в промислової і стаціонарної котельнях, печах і інших тепловикористовуючих установках. Відносна погрішність виміру складає $\pm 5\%$, тривалість аналізу всіх компонентів досягає 10 хв.

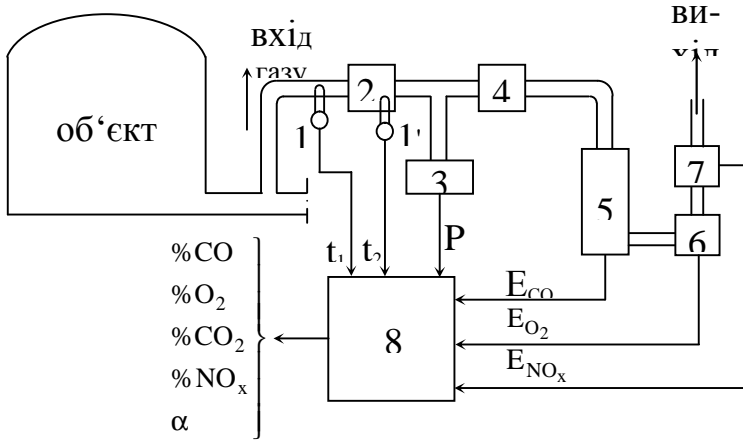
Велике поширення одержали комбіновані газоаналізатори для промислового використання при налагодженні теплового режиму агрегатів і контролю якості спалювання палива. У цих приладах використовується портативний оптико-акустичний газоаналізатор для визначення змісту CO у продуктах згоряння, а вміст кисню й оксиду азоту визначається в окремому блоці з використанням електрохімічних осередків (ЕХО).

Зміст CO_2 і визначення коефіцієнта витрати повітря виконується аналітично в мікропроцесорному блоці. На рисунку 6.10 приведена схема переносного комбінованого газоаналізатора, що складається з наступних основних блоків: пробозабірника 2, фільтра 4, оптико-акустичного аналізатора 5 з допоміжними елементами, електрохімічних осередків 6, для визначення O_2 і NO_x , мікропроцесорного пристрою 8 з перетворювачами сигналів датчиків температури і тиску.

Аналізований газ (продукти згоряння палива) безупинно відсмоктується з представницької крапки об'єкта за допомогою забірника 2. Далі газ проходить через фільтр 4 і направляється в оптико-акустичний аналізатор 5, що видає електричний сигнал E_{CO} , пропорційний змісту CO у продуктах згоряння. Перед виходом газу в атмосферу він проходить електрохімічний осередок 6, де робиться аналіз на O_2 за допомогою електрохімічного сенсора гальванічного типу з видачею електричного сигналу E_{O_2} .

Електричні сигнали від датчиків і перетворювачів надходять у мікропроцесорний блок, що видає інформацію про склад аналізованого газу ($\%CO$, $\%CO_2$, $\%O_2$, $\%NO_x$) і обчислене значення коефіцієнта витрати повітря α . Для виміру температури газу t_1 у газозоді використовується кабельна термопара типу КТМС хромель-алюмелевого гра-

дування, що знаходиться в пробозабірнику на вході газового потоку. Температура навколишнього середовища t_2 вимірюється цифровим датчиком температури (мікросхема DS1820), що також розташовується в пробозабірнику. Перетворені сигнали від датчиків температури і від датчика абсолютного тиску 3 надходять у мікропроцесорний блок 8, що дозволяє в безупинному режимі коректувати показання газоаналізатора при зміні температури газових середовищ і абсолютного тиску.



1, 1' – термопари; 2 – пробозабірник; 3 – датчик абсолютного тиску газу; 4 – фільтр; 5 – оптико-акустичний аналізатор; 6 – електрохімічний осередок O_2 ; 7 – електрохімічний осередок NO ; 8 - мікропроцесор

Рисунок 6.10 – Блок-схема газоаналізатора для визначення якості спалювання палива

Мікропроцесор робить обчислення об'ємної частки диоксиду вуглецю за обмірюваним значенням об'ємної частки кисню, використовуючи вираження:

$$\%CO_2 = \frac{\%CO_2' (20,9 - \%O_2)}{20,9} \quad (6.4)$$

а також обчислення коефіцієнта витрати повітря відповідно до вираження:

$$\alpha = \frac{20,9}{20,9 - \%O_2} \quad (6.5)$$

де $\%CO_2'$ - паливний коефіцієнт CO_2 ;

$\%O_2$ – обмірюване значення об'ємної частки O_2 .

Основні характеристики газоаналізаторів такого типу наступні:

- погрішність показань $\pm 5\%$;

- живлення – нікель-кадмієві акумулятори для роботи протягом 4 годин чи мережне;
- алфавітно-цифровий ЖКІ-індикатор;
- можливість підключення до вищих ЕОМ/принтер;
- вага до 1,5 кг.

6.8 Портативний газоаналізатор Quintox

Інструментальне обстеження паливостпалюючих пристроїв є найважливішою частиною енергетичного аудита промислових підприємств. Сучасним устаткуванням для таких обстежень є портативний газоаналізатор Quintox.

ОПИС ПРИБАДУ

QUINTOX вимірює й розраховує:

- температуру газів, що йдуть
- температуру підігрітого або навколишнього повітря
- різниця температур газів, що йдуть, і повітря (температуру нетто)
- зміст кисню (O_2)
- зміст монооксиду вуглецю (CO)
- зміст вуглекислого газу (CO_2)
- к.п.буд. згоряння (брутто й нетто)
- надлишкове повітря й втрати з газами, що йдуть

Спеціальні датчики приладу дозволяють вимірювати й розраховувати:

- розрідження в газоходах
- зміст NO_x
- зміст SO_2

QUINTOX складається з 3 компонентів (рисунок 6.11):

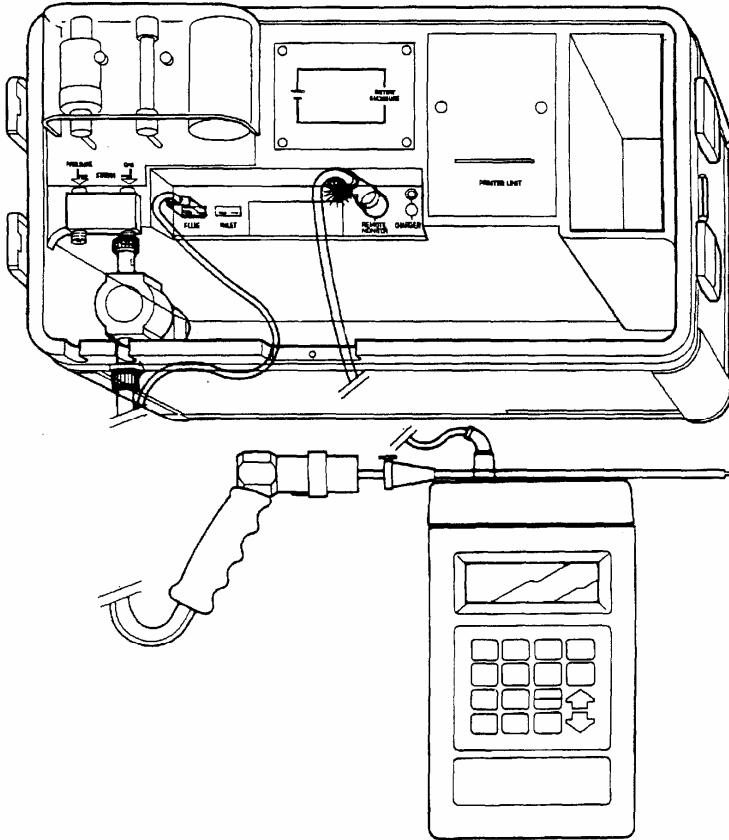


Рисунок 6.11 - Загальний вид газоаналізатора QUINTOX

1. **ВИНОСНИЙ БЛОК КЕРУВАННЯ (ВБУ):**
 - працює на відстані до 20 м від аналізатора
 - показує обмірювані аналізатором дані
 - розраховує дані
 - управляє роботою аналізатора
2. **АНАЛІЗАТОР:**
 - одержує проби газів від газозаборних зондів
 - видаляє водяну пару й тверді частки
 - подає гази на датчики
 - скидає відпрацьовані гази в атмосферу
 - аналізує дані для ВБУ

- роздруковує дані в стандартному або певному користувачем форматі
- виводить дані через рознімання RS232
- харчується від батареї або зовнішнього джерела
- працює із закритою захисною кришкою

3. ГАЗОВІДБОРНИЙ ЗОНД:

- відбирає проби димових газів для аналізатора
- вимірює температуру газів
- працює на відстані до 5 м від аналізатора

6.8.1 Клавіатура ВБУ

QUINTOX включається й управляється із клавіатури ВБУ, на якій є 14 сенсорних клавіш прямокутної форми й 2 клавіші у формі стрілок. Натискання клавіш супроводжується звуковим сигналом.

виконує 2 функції:



SET/CAL вибирає параметр, якому треба змінити, напр., Temperature (температура);
ENTER уводить установлений параметр, напр.: Fahrenheit (шкала Фаренгейта).

Виконують 2 функції:

1. перегортають на дисплеї 11 "сторінок"



уведених даних.

2. Перебирають варіанти можливих значень параметра. напр.: вимір температури в °C або °F.



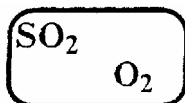
Клавіша Функцій

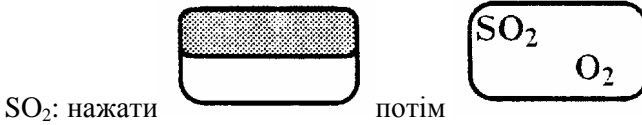
Доступ до верхнього регістрів функціями

тра для клавіш із подвій-

Інші клавіші виконують чотири функції:

- вивід інформації на дисплей
- виконання якої-небудь функції
- вибір параметра для зміни
- уведення одного із двох параметрів, наприклад:





Функціональні клавіші показують необхідний параметр і ще три величини. Наприклад: натискання



виведе на дисплей температуру навколишнього повітря плюс ще три параметри:

AMBIENT	C	26.7
SENSOR	C	26.7
FLUE	C	180.0
INLT	NOT FITTED	

КЛАВІША:	ПОКАЗАННЯ ДИСПЛЕЯ АБО ФУНКЦІЯ:
ON/OFF	включення й вимикання живлення
SET/CAL	початок зміни параметрів
ENTER	уведення зміненого параметра
FUNCTION	доступ до верхнього регістра функціональних клавіш
↑	"пролистыває" дані або списки варіантів
↓	"пролистыває" у зворотному напрямку
AMBIENT	показує температуру навколишнього повітря + 3 параметри
INLET	показує температуру вхідного повітря + 3 параметри
CONTRAST	включає й виключає підсвічування екрана
FLUE	показує температуру газів, що йдуть, + 3 параметри
SCALE	показує включення/вимикання (ON/OFF) режиму компенсації + 3 параметри
NETT	показує температуру нетто + 3 параметри
TIME	показує дату, час + 2 параметри
PUMP	включає й виключає насос
CO	показує вміст CO + 3 параметри
NO	показує вміст NO + 3 параметри

CO ₂	показує вміст CO ₂ + 3 параметри
NO ₂	показує вміст NO ₂ + 3 параметри
O ₂	показує вміст O ₂ +3 параметри
SO ₂	показує вміст SO ₂ + 3 параметри
NO _x	показує зміст NO _x + 3 параметри
AUX	показує додаткові датчики + 2 параметри
FUEL	показує обране паливо і його характеристики
PRESSURE	показує тиск + 3 параметри
LOSSES	показує загальні втрати + 3 види втрат
EFF	показує к. п. д. + 3 параметри
λ	показує надлишок повітря + 3 параметри
PRINT	починає роздруківку даних

6.8.2 Дисплей ВБУ

ВБУ постачений чотирехстрочним матричним жидкокристаллическим дисплеєм з регульованою контрастністю й підсвічуванням.

Дисплей постійно показує 4 параметри до тих пор, поки користувач не перейде до установки інших параметрів.

При включенні живлення на дисплеї починається зворотний відлік, що триває до завершення калібрування, потім починається калібрування датчика кисню, а потім вибір палива.

Потім на дисплеї з'являються поточний час, дата, стабільність датчиків і ресурс батареї.

6.8.3 Фіксація показань

Якщо натиснути клавішу функцій, а потім клавішу П, показання фіксуються. При цьому оновлюються тільки показання ресурсу батарей. Якщо функція AUTO PRINT (автораспечатка) активна (ON), то оновлюються також поточний час і дата. Для повернення в нормальний режим, знову натисніть зелену

клавішу й клавішу ІМ. У режимі фіксації кожний рядок дисплея оточений символами #.

У режимі фіксації можна пролистувати всі параметри натисканням відповідних функціональних клавіш або стрілок.

У цьому режимі можна одержати кілька однакових роздруківок. Крім того, цей режим дозволяє відобразити той самий набір показань у різних одиницях виміру (напр., ppm або mg/m³, °C або °F і т.д.). Для порівняння можна змінювати одиниці між роздруківками для того, щоб одержати роздруківку тих самих показань у різних одиницях.

Звичайний режим дисплея

```

AMBIENT C 26.7
SENSOR C 26.7
FLUE C 180.0
INLT NOT FITTED
    
```

Режим фіксації

```

# AMBIENTC 26.7 #
# SENSOR C 26.7 #
# FLUE C 180.0 #
# INLTNOT FITTED #
    
```

6.8.4 Принтер

Убудований принтер здійснює роздруківку стандартних або обраних користувачем даних з 16 знаками в рядку:

Стандартна роздруківка

Пояснення

```

***KANE-MAY***
**KM QUINTOX**

DATE 04-06-92
TIME 16:56:56

NATURAL GAS

O2 %.....20.9
CO ppm.....0.0
Prs NOT FITTED
EFF %.....100.0
XAIR FAULT
CO2 %... .....0.0

NO ppm..... 0.0
NO2 NOT FITTED
NOx ppm..... 0.0
SO2 ppm..... 0.0
REF. %O2..... 3.0

NETT C 0.0
FLUE C 25.0
INLT C 25.0
AMBIENT C 25.0
    
```

Виготовлювач

Модель аналізатора

Дата

Час

Вид палива

Вміст кисню

Вміст CO

Вимір розрідження в газоході

Розрахунок к.п.д.

Розрахунок надлишку повітря

Розрахунок змісту CO₂

Вимір оксиду азоту

Вимір NO₂

Розрахунок NO_x

Вимір SO₂

Зміст O₂ для розрахунку mg/m³

Температура нетто

Температура газів, що йдуть

Температура повітря на вході

Температура навколишнього повітря

Користувальницька роздруківка дозволяє роздруковувати будь-який набір параметрів у потрібному користувачеві порядку.

6.8.5 Датчики приладу, які розраховують параметри

Стан датчиків визначається на етапі калібрування.

Датчик H_2O являє собою металловоздушну батарею з незалежним живленням і обмеженою дифузією з 2-річною гарантією й калібрується користувачем після включення живлення. Дисплей ВБУ показує час, що залишився, служби датчика. Якщо дисплей показує FAULT, прокачайте через аналізатор чисте повітря протягом 1 хвилини, а потім пері калібруйте або замініте датчик.

З виміряється в ppm або mg/m^3 . Мікроелементи - датчики CO забезпечують компенсацію по водні.

Показання датчика обнуляються при включенні живлення. Їх також можна обнулити прокачиванием свіжого повітря. ВБУ видає звуковий сигнал 1 раз у секунду, коли зміст ІЗ перевищує 400 ppm. На дисплеї при цьому кожні 7 секунд з'являється повідомлення:

```
-----
CO ppm .... 570
****HIGH!****
-----
```

Контрольний рівень CO, при якому включається сигналізація, можна змінити. Після виміру рівнів 3 понад 4000 ppm датчику потрібно 12 годин на відновлення.

Розрахунок змісту CO_2 у відсотках ґрунтується на змісті O_2 у димових газах і змісті вуглецю в паливі. Високий зміст CO_2 означає низькі втрати з газами, що йдуть

Вимірювання NO , NO_2 і SO_2 виробляється за допомогою відповідних мікроосередків, результати виражаються в ppm і mg/m^3 . Для підвищення точності вимірів на датчиках є фільтри, а також дані по перехресній чутливості.

Показання датчиків обнуляються при включенні живлення. Їх також можна скинути шляхом прокачивания чистого повітря.

До приладу можна підключати до 4 додаткових датчиків.

Обмірювані значення тяги (розрідження) виражаються в миллибарах, гектопаскалях або дюймах водяного стовпа. Показання датчика

обнуляються користувачем із блоку керування перед початком вимірів. Обмірюване значення зберігається на дисплеї або в роздруківці до відновлення або скасування. Пиловий фільтр видаляє з газу домішки перед його подачею в датчик.

При спалюванні палива з високою концентрацією SO_2 для захисту датчика 3 між пиловим фільтром і датчиком PPO_2 устанавлюється спеціальний фільтр, що містить перманганат калію й має термін служби близько 12 годин.

QUINTOX розраховує к.п.буд. горіння, з огляду на температуру нетто -температура газів, що йдуть, мінус температура повітря на вході.

Температура газів, що йдуть, вимірюється зондом. Навколишня температура вимірюється або умонтованім датчиком, або додатковим датчиком температури, або тим же зондом.

Умантований акумулятор забезпечує автономну роботу приладу в плинні 8 годин. Залишковий ресурс батарей показується на дисплеї ВБУ. Батареї заряджаються від зовнішнього джерела живлення.

Повна зарядка батарей займає 12 годин. Батареї повністю заряджені, коли при підключеному зарядному пристрої ресурс батарей на дисплеї $> 150\%$. QUINTOX працює від зовнішнього джерела живлення, навіть якщо батареї сильно вивряджені.

Надлишок повітря показується на дисплеї в %.

Стехиометричне спалювання палива неможливо й небажано. Під надлишком повітря мається на увазі різниця між необхідною кількістю повітря для повного згорання палива й фактично використуваною кількістю повітря.

Значення к.п.д. процесу спалювання палива бруто й нетто показуються в % на дисплеї й на стандартній роздруківці.

КПД. бруто = 100% мінус втрати тепла з газами, що йдуть, втрати на паротворення й на хімічний недопал.

КПД нетто = 100% мінус втрати тепла з газами, що йдуть, і втрати на хімічний недожог.

Загальні втрати з газами, що йдуть, виражаються у відсотках і розраховуються на підставі 3 обмірюваних величин:

- втрати тепла газів, що йдуть, за рахунок різниці температури палива й повітря на вході в казан і температури газів, що йдуть;

- втрати на паротворення (тільки для розрахунку ефективності бруто);

- втрати на хімічний недожог. Розраховуються зі співвідношення CO_2 і CO .

На NO доводиться 95-98% всіх оксидів азоту в крапці відбору. NO з'єднується із H_2O звичайно поза димарем. NO є абсорбентом і тому погано піддається аналізу. В екологічному законодавстві викиди NO виражаються в концентрації NO_2 або NO_x . QUINTOX або безпосередньо вимірює, або розраховує концентрацію NO_x :

датчик NO : $\text{NO}_x = 5\% \times \text{NO} + \text{NO}$

датчик $\text{NO} + \text{датчик } \text{NO}_2 = \text{NO} + \text{NO}_2$.

У додатку М приведена інструкція до роюои з приладом QUINTOX KM 9006.

7 АНАЛІЗ ЯКОСТІ ВОДИ, ПАРИ І КОНДЕНСАТУ

7.1 Загальні положення

У теплоенергетичних агрегатах, таких як парові котли теплових станцій, котли-утилізатори промислових печей, системи випарного охолодження металургійних печей і в інші, основним теплоносієм є вода. Це зв'язано з тим, що чиста вода має ряд переваг у порівнянні з іншими типами теплоносіїв (рідкі метали, газові середовища, рідкі органічні речовини й ін.): найвища теплоємність, порівняно низька температура кипіння, нетоксичність і, звідси, безпечні умови експлуатації агрегатів, мала агресивність до конструктивних елементів установок. Однак, основним недоліком води є гарна розчинність у ній різних солей, лугів, кислот і навіть газоподібних середовищ, таких як кисень, вуглекислий газ і інші. Наявність у воді сторонніх речовин різко погіршує її експлуатаційні характеристики через корозію конструкційних елементів, відкладення солей на внутрішніх поверхнях труб, що в остаточному підсумку приводить до погіршення передачі тепла, перевитраті труб і передчасному виходу устаткування з ладу.

На підприємствах, де використовується вода як теплоносій, особливо на теплових електростанціях, виконується безупинний контроль якості живильної води, пари і конденсату. Контроль водно-хімічного режиму визначає роботу установок по хімоводоочищенню води і дозволяє забезпечити безпечну і надійну роботу устаткування теплоенергетичного агрегату.

Для здійснення контролю якості води, пари і конденсату і роботи установок очищення води і конденсату необхідно вимірювати різноманітні показники якості середовищ, що відрізняються за хімічним складом. Ці середовища знаходяться під різним надлишковим тиском, мають різну температуру, відрізняються по кількості механічних і інших домішок. Унаслідок цього застосовуються різні методи і засоби аналізу складу води, пари і конденсату. До числа найбільш розповсюджених методів аналізу, застосовуваних у промислових аналізаторах, відносяться різновиди електрохімічного оптичного і теплового методів. Найбільше застосування одержали прилади, засновані на вимірі питомої електропровідності розчинів, у лабораторній практиці, при автоматичному хімічному контролі водяного режиму паросилових установок, при визначенні ефективності роботи установок очищення

води, у промислових теплообмінниках і в інших установках.

Вимірювальні прилади, призначені для виміру питомої електропровідності, одержали назву кондуктометричні аналізатори рідини. У залежності від градуювання шкали вторинного приладу й умов вимірів кондуктометричні аналізатори рідини одержали такі назви:

- кондуктометри – застосовуються в основному в лабораторних умовах і градуюються в одиницях «сименс на сантиметр» ($\text{См}\cdot\text{см}^{-1}$) чи «мікросименс на сантиметр» ($\text{мкСм}\cdot\text{см}^{-1}$);
- солеміри – застосовуються у виробничих умовах для виміру показників якості, що характеризують зміст солей у парі, конденсаті і живильній воді парових котлів, і градуюються по NaCl (на умовний зміст у розчині цих солей) в одиницях «міліграм на кілограм» (мг/кг), «мікрограм на кілограм» (мкг/кг) чи «міліграм на літр» (мг/л) і «мікрограм на літр» (мкг/л);
- концентратоміри – використовуються для виміру концентрацій розчинів солей, кислот, лугів і градуюються у відсотках значення масової концентрації.

7.2. Електродні кондуктометричні аналізатори

У кондуктометричних аналізаторах води як чуттєвий елемент використовуються два електроди, плоских чи циліндричних, поміщених у водяне середовище. У залежності від місця установки електродів вони розділяються на заглибні, проточні і магістральні. Заглибні перетворювачі опускаються в резервуар з контрольованою рідиною. Через проточний перетворювач протікає проба аналізованої рідини, що пройшла в більшості випадків попередню підготовку. Магістральні

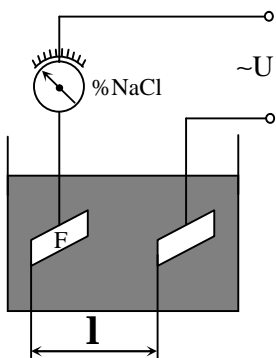


Рисунок 7.1 – Електродний первинний перетворювач

перетворювачі вводяться безпосередньо в трубопровід, по якому тече аналізована рідина.

Заглибні перетворювачі (рисунок 7.1) застосовують у лабораторних кондуктометрах при виконанні вимірів підвищеної точності. До заглибних електродів, виконаних із платини, підводиться перемінний струм. При використанні постійного струму відбувається поляризація електродів, тобто на їхній поверхні збираються іони протилежного заряду, що створює внутрішню про-

ти–ЕРС і збільшення опору розчину.

Вимір концентрацій солей у воді (розчині) виконується по величині струму I , що протікає через рідину, і вимірюється міліамперметром, що має відповідне градування (%NaCl, мг/л і ін.). Струм, що протікає через електроди, визначається електропровідністю розчину, геометричними параметрами електродів F і відстані між ними l . Використовуючи закон Ома, можна зв'язати ці величини функціонально залежністю, тобто:

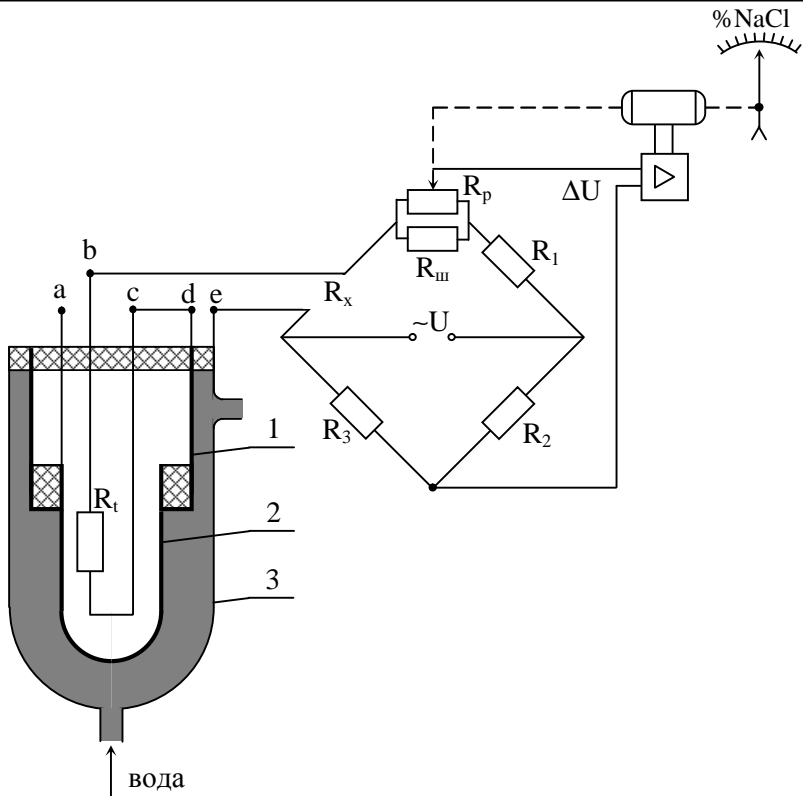
$$I = \frac{U}{R}; \quad R = \frac{l}{F \cdot \chi}; \quad I = \frac{U \cdot \chi \cdot F}{l}.$$

Позначивши співвідношення між постійними величинами через "k", одержимо формулу, по якій виробляється градування кондуктометра:

$$k = \frac{U \cdot F}{l}; \quad I = k \cdot \chi. \quad (7.1)$$

Таким чином, вимірюючи струм по показанню міліамперметра, можна визначити концентрацію солей в аналізованій рідині (живильна вода, конденсат пари й ін.) При малих концентраціях солей (до 5 %) електропровідність (чи питома електропровідність, См/см) лінійно залежить від концентрації цих солей. Так, наприклад, концентрація розчинених речовин, яку приходиться визначати при контролі якості пари, конденсату, живильної і котлової води, на кілька порядків менше 5 %, що сприяє підвищенню точності виміру при сталості інших параметрів. Однак, у конденсаті пари й у живильній воді енергетичних котлів, крім невеликої кількості солей звичайно присутні розчинені гази (аміак NH_3 , вуглекислий газ CO_2) і гідразин N_2H_4 . Наявність газів і гідразину змінює електропровідність конденсату і живильної води, і в показання кондуктометру необхідно вводити виправлення або попередньо видаляти з води розчинені гази і гідразин. Для більш точного визначення концентрації солей у воді на електростанціях роблять дегазацію шляхом випарювання частини рідини, а також застосовують Н-катионітові фільтри, що затримують аміак і гідразин.

У промислових умовах для оперативного керування якістю води частіше застосовуються проточні і магістральні електродні перетворювачі з безупинною реєстрацією показників якості. Первинні перетворювачі кондуктометрів можуть включатися в різні автоматичні вимірювальні схеми. На рисунку 7.2 представлена найбільш розповсюджена схема урівноваженого моста, одне з пліч якого є проточним електродним перетворювачем кондуктометру. Корпус пе-



1 – електрод для великих концентрацій солей; 2 – електрод для малих концентрацій солей; 3 – корпус електродного перетворювача

Рисунок 7.2 – Схема з'єднання проточного електродного перетворювача з автоматичним мостом

ретворювача 3 служить одним електродом, другим електродом є два ізольованих між собою циліндра 1,2 різні діаметри і висоти. Підключення електродів 1 чи 2 здійснюється в залежності від змісту солей у воді: при великих концентраціях підключається до електрода 1 (як на рисунку 7.2) і при малих концентраціях роблять переключення електричної схеми на електрод 2. Така конструкція електродного перетворювача дозволяє розширити діапазон вимірюваної концентрації солей і підвищити чутливість приладу. Усередині циліндричного електрода 2 знаходиться терморезистор R_t, що компенсує зміну опору рідини при зміні її температури і виключає вплив цього фактора на показання вторинного приладу. Наприклад, при підвищенні температури розчинну опір терморезистора зростає, а розчину, навпаки, зменшується, що і приводить до ефекту, що компенсує.

Аналізована рідина безупинно прокачується через проточний кондуктометр і при зміні концентрації солей пропорційно змінюється опір рідини R_x . При цьому, у вимірювальній діагоналі мостової схеми, що живиться перемінною напругою U , з'являється різниця потенціалів ΔU . Електронний підсилювач, підсилюючи сигнал ΔU , живить виконавчий механізм, що переміщає движок реохорда R_p і приводить міст у стан рівноваги ($\Delta U=0$). Таким чином, кожному положенню движка реохорда відповідає визначене значення електропровідності, тобто зміст солей у рідині. Стрілка вимірювального приладу, механічно зв'язана з валом виконавчого механізму, укаже на зміст солей в аналізованій рідині.

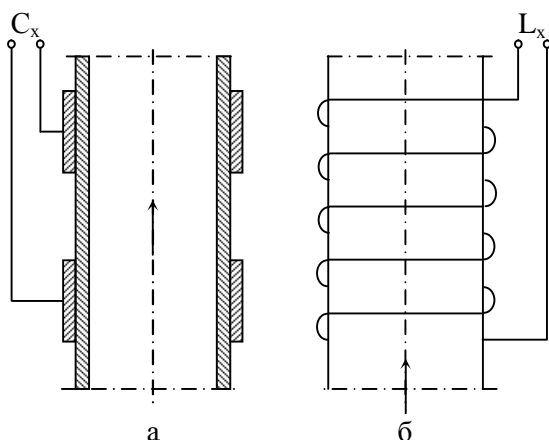
Електродами кондуктометрами заглибного типу роблять виміри електропровідності мережної, живильної води і конденсату в діапазоні від 10^{-6} до $1,9$ См/см при діапазоні робочих температур $25 \pm 15^\circ\text{C}$ с граничною основною погрішністю $\pm 2,5\%$.

Недоліками електродних кондуктометрів є поляризація і забруднення електродів продуктами електрохімічних реакцій, що протікають на їхній поверхні, а також речовинами, що знаходяться в розчинах. На практиці поверхні електродів піддають періодичному механічному і хімічному очищенню чи здійснюють повну заміну електродів.

7.3 Безелектродні кондуктометри

Безелектродні кондуктометри не контактують з аналізованою рідиною і не мають недоліків, які мають електродні кондуктометри, що підвищує надійність їхньої роботи і збільшує точність виміру. Такі прилади набули широкого застосування в різних галузях промисловості для виміру електропровідності водяних розчинів електролітів. На теплових і атомних електростанціях безелектродні кондуктометри використовуються для контролю концентрацій регенераційних розчинів кислоти, лугу і солі, а також для виміру електропровідності хімічно знесоленої води. Однак, безелектродні кондуктометри не використовують для контролю якості пари, конденсату турбін і живильної води парових котлів через меншу чутливість у порівнянні з електродними кондуктометрами.

Як чуттєві елементи в безелектродних кондуктометрах використовують ємнісні, індуктивні і трансформаторні перетворювачі. Схема ємнісного й індуктивного перетворювача представлена на рисунку 7.3. Між концентрацією розчину і вихідних величин перетворювачів (C_x – ємністю і L_x - індуктивністю) існує складна залежність. Це зв'язано з тим, що крім природи розчину на вихідні величини перетворювачів впливають геоме-



а – ємнісні перетворювачі;

б – індуктивні перетворювачі

Рисунок 7.3 – Безелектродні первинні перетворювачі

При зміні електропровідності аналізованої рідини змінюється ємність конденсатора C_x первинного перетворювача. Величина виникаючого розбалансу моста, пропорційна теплопровідності розчину і посилена електронним блоком, подає інформацію на що показує і реєструє пристрої, що показує і реєструє, про концентрацію розчиненої речовини у воді. У резонансних схемах для виміру величини індукції L_x безелектродного індуктивного перетворювача використовується резонансний контур, частота власних коливань якого залежить від індуктивності L_x первинного безелектродного перетворювача.

Різновидом безелектродного індуктивного перетворювача є трансформаторний перетворювач (рисунок 7.4), у якому аналізований розчин протікає по кільцевій пластмасовій трубі, що утворює замкнений контур.

Трансформаторний перетворювач складається з первинної обмотки, на яку подається перемінна напруга $U_{вх}$ частотою 50 Гц, вторинної вимірювальної обмотки, з якої знімається напруга $U_{вих}$ і компенсаційної обмотки, на яку подається компенсаційна напруга U_k частотою 50 Гц. Перераховані обмотки об'єднані кільцевим рідким контуром, що виконує роль сердечника трансформатора.

При зміні концентрації солей (лугів, кислот і ін.) в аналізованій рідині змінюється перемінний магнітний потік у рідкому контурі, і вихідна напруга $U_{вих}$ буде однозначно визначати зміст солей у рідині.

тричні параметри і матеріал самих перетворювачів, частота живлення й інші фактори. Тому градуовальні характеристики визначаються експериментально для конкретного перетворювача і розчину.

У якості вторинних вимірювальних приладів використовуються мостові і резонансні схеми, що живляться від генераторів високої частоти. У мостових схемах плічми моста є конденсатори, одним із яких є конденсатор ємнісного перетворювача (рисунок 7.3 а).

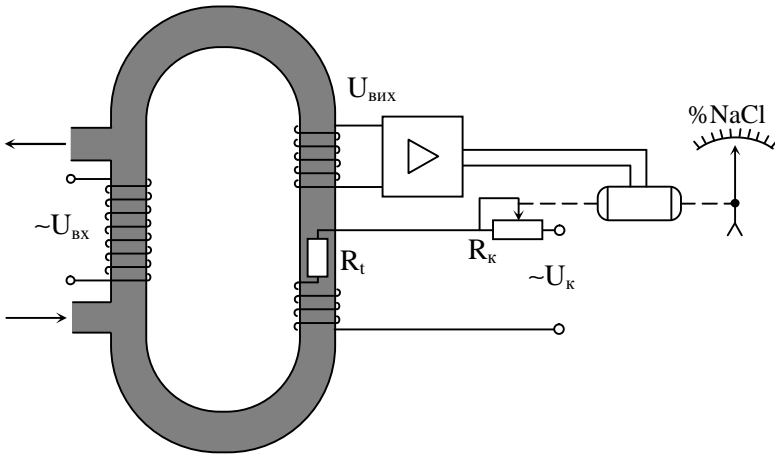


Рисунок 7.4 – Безелектродний трансформаторний кондуктометр

Для зменшення впливу коливань напруги і частоти живильної мережі передбачений компенсаційний контур, що створює перемінний магнітний потік у рідкому контурі, спрямований назустріч основному потоку, створюваному первинною обмоткою. Зростання компенсаційного магнітного потоку, керованого вихідною напругою $U_{\text{вих}}$ через підсилювач, виконавчий механізм і компенсаційний опір, відбувається до повної компенсації основного магнітного потоку. Величина компенсаційного магнітного потоку, таким чином, буде визначатися положенням движка реохорда $R_{\text{к}}$, що залежить від значення $U_{\text{вих}}$. Стрілка вимірювального приладу, кінематично зв'язана з валом виконавчого механізму, укаже на концентрацію розчинених у воді речовин.

Для автоматичної корекції впливу температури аналізованої рідини на показання вимірювального приладу кондуктометра використовується напівпровідниковий компенсаційний терморезистор $R_{\text{т}}$. При збільшенні температури аналізованої рідини збільшується ступінь дисоціації молекул розчинених речовин і збільшується магнітний потік. Одночасно зменшується опір терморезистора і зростає струм у компенсаційному ланцюзі, збільшуючи компенсаційний магнітний потік.

Безелектродні трансформаторні кондуктометри розраховані на діапазон виміру питомої електропровідності 0,01 – 1,0 См/см при основній погрішності, що допускається, 2,5 %.

7.4 Потенціометричний метод аналізу води

Потенціометричний метод аналізу якості води і різних розчинів

грунтується на законі Нерста. На відміну від кондуктометрів, у яких визначається загальна концентрація солей (лугів кислот і ін.), потенціометричні аналізатори визначають концентрацію конкретного іона (конкретної розчиненого у воді речовини), а також величину рН розчину. Сутність даного явища полягає в тому, що при зануренні будь-якого металевго стрижня (електрода) у розчин, відбувається перехід іонів цього металу в розчин через значне (у 81 разів) ослаблення зв'язків між атомами. Перехід іонів буде відбуватися доти, поки кількість іонів, що перейшли в розчин, не буде дорівнювати кількості іонів, що повернулися з розчину на поверхню металу. У результаті цього явища на поверхні металу виникає електричний потенціал, що залежить від активної концентрації іонів цього металу в розчині. Вимір поверхневого потенціалу електрода дозволяє судити про концентрацію відповідних іонів у розчині.

Величина потенціалу на поверхні електрода в залежності від концентрації іонів визначається по рівнянню Нерста:

$$E = E_0 + RT \frac{\ln a}{n \cdot F}, \quad (7.2)$$

де E_0 – нормальний потенціал;

R – газова постійна, (8,314 кДж/(кмоль·К));

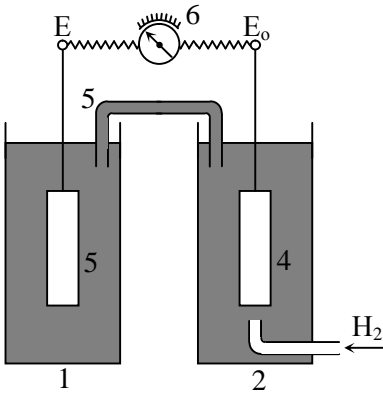
T – абсолютна температура;

n – заряд іонів;

F – число Фарадея ($9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$).

Для виміру поверхневого потенціалу E необхідно замкнути електричний ланцюг, вводючи в розчин другий електрод, що називається електродом порівняння. Потенціал цього електрода повинний залишатися постійним у процесі виміру. Як електрод порівняння використовується пластина з платини, занурена в розчин з активною концентрацією іонів водню, рівною одиниці при нормальному тиску і температурі. На рисунку 7.5 представлена схема виміру концентрації конкретного іона в розчині з використанням осередку порівняння. У вимірювальному осередку 1 з аналізованим розчином розташований спеціальний (селективний) електрод 3, що призначений для визначення концентрації визначеного компонента. В осередку порівняння 2 платиновий електрод поміщений у розчин, через який пропускається водень під тиском. Два осередки електрично зв'язані між собою перемичкою з рідким електролітом 5.

Різниця потенціалів між двома електродами $\Delta E = E - E_0$ згідно за-



- 1 – вимірювальний осередок;
- 2 – осередок порівняння;
- 3 – селективний електрод;
- 4 – платиновий електрод;
- 5 – перемичка;
- 6 – вимірювальний прилад

Рисунок 7.5 – Схема потенціометричного аналізатору розчину

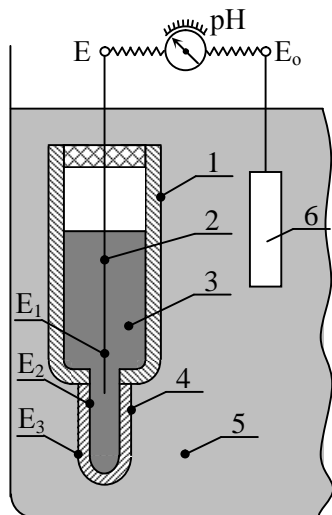
водню в розчинах, тобто для визначення рН розчинів. При розчиненні у воді кислот підвищується концентрація іонів водню і величина рН знижується, а при розчиненні лугу концентрація іонів водню знижується і рН росте. Чиста вода, як нейтральна речовина, має значення рН=7. Таким чином, відхилення числа рН у водяних розчинах від 7 у ту чи іншу сторону характеризує міру їх кислотних чи лужних властивостей. При експлуатації парових котлів теплових електростанцій постійно контролюється величина рН живильної води, значення якої повинно бути на рівні $9,1 \pm 0,1$. Як коригувальні добавки в живильну воду вводиться аміак, кількість якого можна визначити за показниками рН – метрів.

Для виміру рН у лабораторних і промислових умовах використовуються скляні робочі електроди, що відрізняються широким діапазоном аналізованих середовищ, високими метрологічними характеристиками і простотою конструкції. У скляних електродах водневій функції має чуттєва тонкостінна мембрана, виконана з літєвого чи натрієвого скла. Водневій функції мембрани обумовлюються тим, що відбувається заміщення іонів лужних металів (Na, Li), що знаходяться усередині силікатних ґрат скла, більш рухливими іонами водню.

кону Нернста однозначно визначається концентрацією аналізованого компонента, розчиненого у воді. Область застосування потенціометричних методів виміру концентрації визначених іонів у багатокомпонентних розчинах значно розширилася завдяки створенню нових іоноселективних електродів, що мають виборний характер дії стосовно таких катіонів і аніонів як Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Pb^{2+} , Cl^- , Br^- , I^- і ін.

Створені лабораторні потенціометричні перетворювачі, які називаються іонометрами, є універсальними приладами, що забезпечуються комплектом іоноселективних електродів, які дозволяють робити вимір концентрації перерахованих вище іонів.

Найбільше широко потенціометричні прилади застосовуються для виміру активної концентрації іонів



- 1 – контактний електрод;
 2 – скляна трубка; 3 – розчин кислоти; 4 – мембрана;
 5 – аналізований розчин;
 6 – допоміжний електрод
- Рисунок 7.6 – Схема робочого скляного електрода

Один з варіантів скляного робочого електрода, застосовуваного для визначення рН розчинів у промислових умовах (зокрема на теплових електростанціях), представлений на рисунку 7.6. Електрод виконаний з товстостінної скляної трубки 1, до кінця якої припаяна чутлива мембрана з літєвого скла 4. На зовнішній поверхні мембрани при зануренні її в аналізований розчин 5 розвивається потенціал E_3 , що залежить від активної концентрації іонів водню. Усередині скляного електрода знаходиться розчин кислоти 3 постійної концентрації, що замикає електричний ланцюг між мембраною 4 і контактним електродом 2. Потенціали E_1 (на контактному електроді) і E_2 (на внутрішній поверхні мембрани) залишаються постійними при постійній температурі розчину.

У якості допоміжних (порівняльних) електродів найчастіше використовують заглибний хлорсрібний електрод, усередині якого знаходиться срібний дріт (електрод), занурений у 3,5 нормальний розчин КСІ, що містить кристали хлористого срібла. Електричний потенціал E_0 , що розвивається допоміжним електродом, складає 12 мВ. Вивідні контакти з потенціалами E і E_0 робочого і допоміжного електродів (осередків) підключаються до вторинного вимірювального приладу, що має градування в одиницях рН.

Експлуатовані в промисловості рН – метри працюють у комплекті з автоматичними потенціометрами і мають п'ять діапазонів виміру числа рН: 1; 2,5; 10; 15. Гранична припустима погрішність рН – метрів складає $\pm 1,0\%$ діапазону виміру.

Широке поширення рН – метри одержали на теплових електростанціях для контролю кислотно-лужних характеристик живильної води парових котлів.

7.5 Вимір концентрації газів, що містяться у воді і парі

Розчинені у воді гази і присутні в парі, такі як кисень, вуглекислий газ, водень і інші впливають на роботу технологічного устаткування, що контактує з водою і парою. Найбільшу небезпеку представляє кисень, що викликає корозію металу внутрішніх поверхонь водяних і парових трактив різних промислових і лабораторних установок.

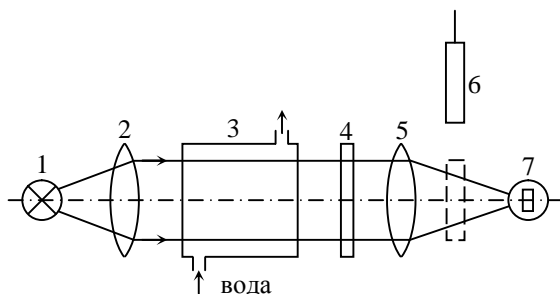
Повне видалення всіх газів з води і пари вимагає великих витрат, як енергетичних так і матеріальних у виді хімічних реагентів, що економічно недоцільно. Тому, для кожного типу технологічного агрегату встановлюються регламентні норми концентрації окремих компонентів газового середовища у воді і парі. Так, наприклад, для енергетичних парових котлів зміст розчиненого кисню в живильній воді повинен складати 7 – 10 мкг/кг.

Підвищення надійності експлуатації технологічного устаткування може бути забезпечено безупинним чи періодичним контролем і автоматичним регулюванням змісту розчиненого у воді кисню. У залежності від концентрації кисню у воді використовуються фотокolorиметричні, електрохімічні і кондуктометричні методи.

Фотокolorиметричні методи засновані на вимірі прозорості (оптичної щільності) аналізованої води, інтенсивність фарбування якої залежить від концентрації у воді кисню. Фарбування води виконується спеціальними хімічними реактивами, що змінюють свій колір при взаємодії з розчиненим киснем. Вимір інтенсивності фарбування води робиться спеціальними хімічними реактивами, що змінюють свій колір при взаємодії з розчиненим киснем.

Вимір інтенсивності фарбування води проводиться у фотокolorиметричних аналізаторах, у яких здійснюється перетворення вимірюваної величини (кисневмісту) у зміну електричного опору фоторезистора (рисунок 7.7). Аналізована вода набирається в спеціальну кювету 5, у яку автоматично вводиться визначений обсяг реактиву. Ступінь послаблення світлового потоку, що проходить через кювету від джерела 1, залежить від інтенсивності фарбування води, що визначається концентрацією розчиненого кисню. Світловий потік, що падає на фоторезистор 7, а отже, і його електричний опір знаходиться в однозначній залежності від вимірюваної величини – змісту розчиненого кисню у воді. Фоторезистор включений у мостову схему автоматичного мосту, шкалу вимірювального приладу якого відградувано у одиницях масової концентрації, мг/кг, мкг/кг.

Фотокolorиметричні аналізатори кисню є приладами дискретної



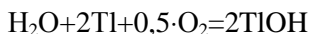
1 – джерело світла; 2, 5 – лінзи; 3 – робоча камера; 4 – світлофільтр; 6 – контрольний світлофільтр; 7 – фоторезистор

Рисунок 7.7 – Схема фотоколориметричного аналізатора кисню у воді

визначення мікроконцентрацій розчиненого у воді кисню. Дія кондуктометричних аналізаторів заснована на використанні хімічних реакцій з яким-небудь реагентом, що супроводжуються зміною електропровідності аналізованої води. Основна вимога до реагенту – він повинен швидко і повно реагувати з розчиненим у воді киснем з утворенням сильного електроліту і не вступати в реакції з водою і її домішками.

З багатьох випробуваних реагентів найбільшою мірою приведеним вище умовам задовольняє металевий талій (Тl). Однак, слід зазначити основний недолік талія – токсичність як самого металу, так і його з'єднань.

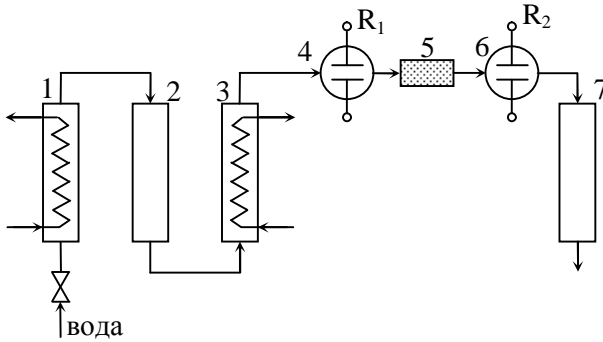
Принципова схема кондуктометричного аналізатора для виміру мікроконцентрацій розчиненого у воді кисню приведена на рисунку 7.7. Проба аналізованої води пропускається через термостат – холодильник 1 і надходить на фільтр 2 для знесолення води, заповнений іонообмінними смолами. Знесолена проба пропускається через додатковий холодильник 3 і кондуктометричний перетворювач 4 для виміру початкової електропровідності води і далі в патрон 5 з поліетилену, заповнений дрібнодисперсним металевим талієм. У патроні відбувається хімічна реакція взаємодії талія з киснем.



Гідроокис талія ТlOH, що утворився, добре розчиняється у воді і є сильним електролітом, при цьому електропровідність розчину підвищується пропорційно змісту розчиненого у воді кисню. Зміна електропровідності води після талієвого патрону фіксується кондуктометричним перетворювачем 6. Для очищення води від токсичних продуктів реакції на виході приладу установлений фільтр 7.

дії, що є основним недоліком приладів цього типу. Однак переклад приладів на безупинний режим ускладнює їхню конструкцію і різко збільшує витрату реагентів для фарбування води.

Найбільше поширення на теплових електростанціях одержали кондуктометричні киснеміри для



1, 3 – холодильники; 2 – фільтр для знесолення води; 4, 6 – електродні перетворювачі; 5 – патрон з талієм; 7 – фільтр

Рисунок 7.8 – Схема кондуктометричного перетворювача для виміру кисню у воді

Вимірювальна схема киснеміра являє собою міст, у якому опори R_1 і R_2 кондуктометричних перетворювачів 4 і 6 включені в протилежні плечі моста. При такому з'єднанні зміна електропровідності вихідної води, впливаючи на опір обох перетворювачів 4 і 6, не викликає зміну небалансу моста. Зміна концентрації кисню в аналізованій воді приводить до зміни опору R_2 перетворювача 6. Розбаланс моста, що виникає, пропорційний концентрації кисню, підсилюється підсилювачем, потім перетворюється у вихідний сигнал постійного струму 0...5 мА і вимірюється автоматичним міліамперметром.

Кондуктометричний аналізатор випускається класу точності 6 з діапазоном виміру 0-30 мкг/л O_2 .

Кондуктометричний метод використовується також для визначення вмісту водню в живильній воді і парі парових котлів на теплових електростанціях. Поява водню в пароводяному тракту котла і величина його концентрації характеризує інтенсивність протікання процесу корозії металу внутрішніх поверхонь труб. Швидкість корозії металу залежить від водяного і температурного режиму експлуатації парового котла. Безупинний автоматичний контроль за воднем у воді і парі дозволяє оперативно втручатися в роботу котельної установки і встановлювати оптимальні режими роботи котла.

Використовувані на теплових електростанціях воднеміри засновані на вимірі теплопровідності газової суміші, у якій знаходиться водень. У відмінності від багатьох газів, таких як N_2 , 3_2 , 3 , CH_4 , O_2 і інші, теплопровідність водню в 5 – 7 разів вище, що дозволяє з достатньою

точністю визначати концентрацію водню в газовій суміші. Для виділення водню з аналізованої суміші (конденсату) її пропускають через кисневу атмосферу. При цьому, чим більше водню міститься у воді, тим більша кількість його буде виділятися в навколишнє кисневе середовище. Таким чином, по концентрації водню в кисневому середовищі можна судити про вміст водню, розчиненого у воді (конденсаті пари). Прилади, засновані на вимірі теплопровідності газової суміші, одержали назву термокондуктометричні аналізатори.

Аналізатор складається з наступних пристроїв і елементів (рисунок 7.9): неврівноваженого моста з манганіновими резисторами R_1 , R_0 , R_2 і платиновими резисторами R_3 , R_4 ; стабілізованого джерела живлення ДЖС; вимірювального приладу ВП; електролізера Ел, заповненого водняним розчином їдкою калію, для одержання чистого кисню; прийомної колонки ПК, у яку надходить контрольована проба води чи конденсату пари. Чуттєвий елемент (резистор) R_3 поміщений у герметично закриту камеру, заповнену чистим киснем (порівняльним газом). Чуттєвий елемент (резистор) R_4 поміщений у робочу камеру, що з'єднана з верхньою частиною прийомного стовпчика.

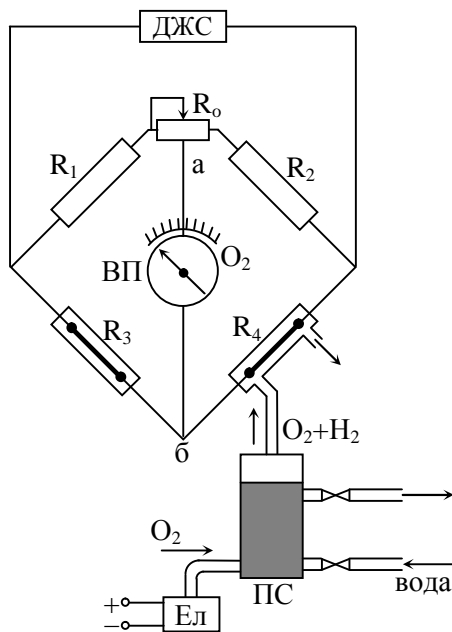


Рисунок 7.9 – Схема термокондуктометричного аналізатора для виміру водню в воді чи пари

Кисень з електролізера безупинно подається в прийомний стовпчик ПС. Одночасно в цей стовпчик надходить аналізована проба конденсату чи води, при цьому конденсат (вода) стикається з газоподібним киснем і виділяє розчинений водень. Газова суміш, що складається з кисню і водню, надходить у робочу камеру з чуттєвим елементом (резистором) R_4 . Наявність водню в робочій камері різко збільшує тепловіддачу від нагрітого до $100\text{ }^\circ\text{C}$ платинових дроту до стінок камери за рахунок збільшення теплопровідності газового шару. Темпера-

тура чуттєвого елемента R_4 знижується, а отже, зменшується його опір. При цьому, на вершинах вимірювальної діагоналі моста через порушення його рівноваги з'явиться напруга, величина якої буде визначатися концентрацією водню в газовій суміші. Вимірювальний прилад, встановлений у газовій діагоналі моста, вкаже вміст водню в живильній воді (конденсаті).

Для зниження впливу температури стінок камери на показання вимірювального приладу служить плече порівняння R_3 , яке аналогічне R_4 і знаходиться в камері, яка заповнена киснем, а перемінний резистор R_0 служить для початкового балансування моста (для установки стрілки вимірювального приладу в нульове положення).

Шкалу вторинного приладу аналізаторів, застосовуваних для визначення розчиненого у воді і парі водню, градуюють у мікрограмах на літр (мкг/л) чи в мікрограмах на кг (мкг/кг). Діапазон виміру воднеміру складає 0 – 20 і 0 – 200 мкг/кг H_2 , гранична погрішність не перевищує $\pm 6\%$.

8 ВИМІР ВОЛОГОСТІ ГАЗІВ

8.1 Загальні положення

Водяна пара, що міститься в деяких газах, є небажаним компонентом. Так, надлишкова кількість водяної пари у газоподібному паливі приводить до зменшення теплоти згоряння газу, що знижує температуру в топковому просторі агрегату. Волога, що міститься в продуктах згоряння, викликає корозію конструктивних елементів газовідводячих трактив і погіршує роботу димаря. У таких газах, як захисні атмосфери, використовувані при проведенні спеціальних видів термообробки й в інших технологічних операціях, волога повинна практично бути відсутньою. У доменних печах гаряче повітряне дуття повинне містити визначену кількість водяної пари з метою стабілізації ходу доменної плавки.

Приведені приклади показують, що постійний чи періодичний контроль змісту водяної пари у різних газах дозволяє забезпечувати оптимальний технологічний режим у різних агрегатах.

Зміст водяної пари у газах виражається абсолютною чи відотною вологістю.

Абсолютна вологість показує ваговий вміст водяної пари в одному кубометрі вологого чи сухого газу при нормальних умовах. Перерахування абсолютної вологості, віднесеної до сухого і вологого газу, виробляється по формулі:

$$f = \frac{f_0}{1 + (f/804)}, \quad (8.1)$$

де f – вміст водяної пари, віднесений до вологого газу, г/м^3 ;

f_0 – вміст водяної пари, віднесений до сухого газу, г/м^3 ;

804 – щільність водяної пари при 0°C і 101,325 кПа, г/м^3 .

Відносна вологість показує відношення водяної пари, що міститься в 1 м^3 газовій суміші, до максимально можливого вмісту водяної пари, що відповідає стану насичення при тій же температурі. Відносна вологість виражається у відносних одиницях чи у відсотках і визначається по формулі:

$$\varepsilon = \frac{f}{f_H} 100, \% \quad (8.2)$$

де f – поточний вміст водяних пар у газі, г/м^3 ;

f_n – максимально можливий вміст водяної пари у газі в стані насичення при даній температурі, г/м³.

Відносна вологість може бути виражена через парціальні тиски водяних пар по формулі:

$$\varepsilon = \frac{P_n}{P_{п.н.}} 100, \% \quad (8.3)$$

де P_n – поточне значення парціального тиску водяної пари у газі, Па;

$P_{п.н.}$ – парціальний тиск водяної пари у газі при насиченні його парою, Па.

У виробничих умовах вологість газів часто виражають температурою точки роси, що представляє собою температуру, при якій газ насичений парами води і надлишкова волога випадає у виді крапельок води на навколишніх поверхнях. Вплив температури на парціальний тиск і вміст водяної пари у стані насичення показано в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 – Парціальний тиск і абсолютна вологість газового середовища в стані насичення

t, °C	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
$P_{п.н.}$, кПа	0,013	0,038	0,102	0,260	0,611	1,227	2,370	4,241	7,375
f_n , г/м ³ сухий	0,10	0,28	0,81	2,1	4,8	9,8	18,9	35,1	63,1

Якщо тиск вологого газу відрізняється від нормального (101,325 кПа), то робиться перерахунок значення f_n , приведене в таблиці 8.1, по формулі:

$$f = f_n \frac{101,325 - P_{п.н.}}{P - P_{п.н.}}, \quad (8.4)$$

де P – абсолютний тиск аналізованого газу, кПа.

Для виміру абсолютної і відносної вологості використовуються різні методи, основними з яких є: психрометричний, конденсаційний (метод точки роси) і сорбційний методи.

8.2 Психрометричний метод

Вимір вологості приладами, що одержали назву "психрометри", засновано на вимірі температури газового середовища двома термометрами, один із яких знаходиться у вологому середовищі, наприклад,

обернути вологою тканиною. Два термометри, сухий і вологий, будуть мати різні показання, тому що відбудеться зниження температури вологого термометра в результаті витрати тепла на випар рідини в навколишнє середовище (в аналізований газ). Чим нижче вологість навколишнього середовища, тим інтенсивніше йде випар вологи з поверхні мокрого термометра. Отже, різниця в показаннях сухого і мокрого термометрів буде тим більше, чим нижче вологість аналізованого газу. По різниці температур і температурі сухого термометра за допомогою таблиць чи номограм визначається вологість газу. На малюнку 8.1 приведена номограма для визначення абсолютної вологості за показниками температури сухого термометра і різниці температур сухого і вологого термометрів. Відносна вологість розраховується по формулі (8.2), у якій абсолютна вологість (поточний зміст водяної пари у газі) f визначається по номограмі (рисунок 8.1), а максимально можлива кількість водяної пари f_n по температурі сухого термометра по довідкових таблицях.

Психрометричний метод виміру вологості газових середовищ реалізований у приладах різної конструкції від переносних до автоматичних. На рисунку 8.2 представлена схема автоматичного психрометра,

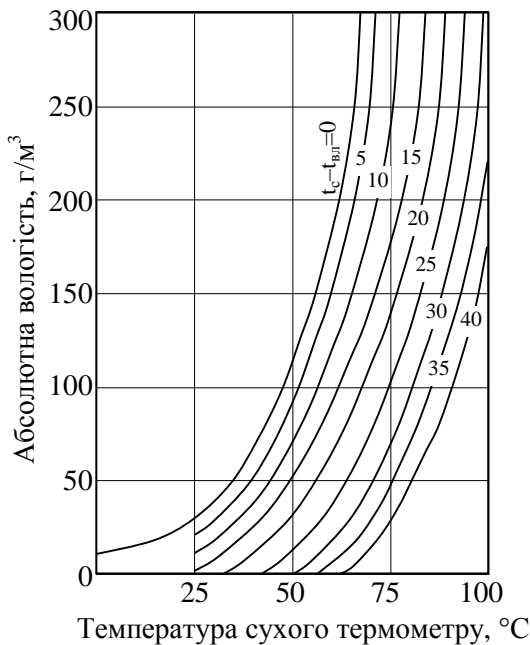
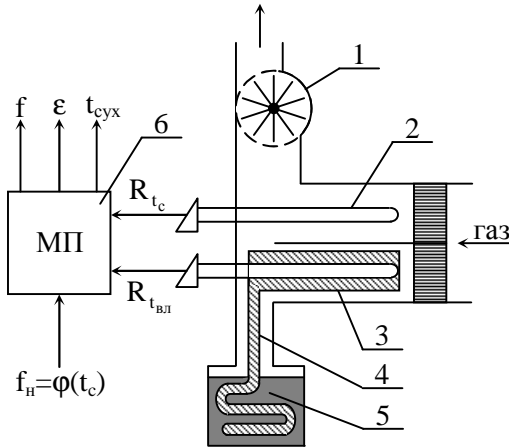


Рисунок 8.1 – Номограма для визначення вологості газів

у якому використаний мікропроцесорний пристрій для обробки й одержання інформації про абсолютну і відносну вологість газового середовища.

Прилад складається з робочої камери, розділеної на дві половини, у кожній з яких розташовані термометри опору. Один з термометрів (сухий термометр) визначає дійсну температуру газового середовища, t_c . Другий термометр (чуттєва його частина) обернутий вологим гігроскопічним матеріалом.

Аналізоване газове середовище безупинно прокачується через газові



1 – вентилятор; 2 – "сухий" термометр; 3 – "мокрый" термометр; 4 – волога тканина; 5 – судина з водою; 6 – мікропроцесор
Рисунок 8.2 - Психрометр

камери за рахунок розрядження, створюваного вентилятором 1. Інформація про різницю температур між «сухим» і «мокрим» термометром надходить у мікропроцесор (МП), у якому виконуються рішення двох рівнянь:

$$f = f_{\text{нас}} \cdot a \cdot (t_{\text{сух}} - t_{\text{вол}}); \quad \varepsilon = \frac{f}{f_{\text{нас}}} \cdot 100\% , \quad (8.5)$$

де f – поточне значення вологості аналізованого газового середовища, г/м^3 ;
 $f_{\text{нас}}$ – значення абсолютної вологості газу в стані насичення при даній температурі ($t_{\text{сух}}$), г/м^3 ;
 A – постійна приладу (психрометра).

У блок пам'яті мікропроцесора вводяться табличні дані $f_{\text{нас}}$ при різній температурі газового середовища, тобто $f_{\text{нас}} = \varphi(t_{\text{сух}})$, і постійна приладу A .

Мікропроцесор видає наступні дані: абсолютну вологість f , відносну вологість ε і температуру газового середовища $t_{\text{сух}}$.

8.3 Конденсаційний метод виміру вологості

Конденсаційний метод чи метод точки роси заснований на вимірі температури гладкої металевої поверхні в момент випадання на ній конденсату, тобто в момент, коли водяна пара, що міститься в газі, досягає насичення. Для одержання конденсату робиться поступове охо-

лодження металеві пластинки зі зворотної сторони холодною водою чи спеціальним холодоагентом до температури точки роси ($t_{r.p.}$). При відомій початковій температурі газового середовища (t_r) і температурі точки роси ($t_{r.p.}$) можна визначити абсолютну і відносну вологість, використовуючи табличні дані по тиску і щільності насичених пар води (Додаток К).

Приклад 8.1. Визначити абсолютну і відносну вологість повітря, якщо температура повітря дорівнює $+25^\circ\text{C}$, а температура точки роси склала $+5^\circ\text{C}$.

Рішення. Використовуючи табличні дані, визначимо абсолютну вологість по температурі точки роси: $f=6,8 \text{ г/м}^3$.

Визначимо максимальну кількість водяної пари, що може міститися в повітрі в стані насичення при температурі повітря $+25^\circ\text{C}$, по табличних даних: $f_{\text{макс}}=23,1 \text{ г/м}^3$.

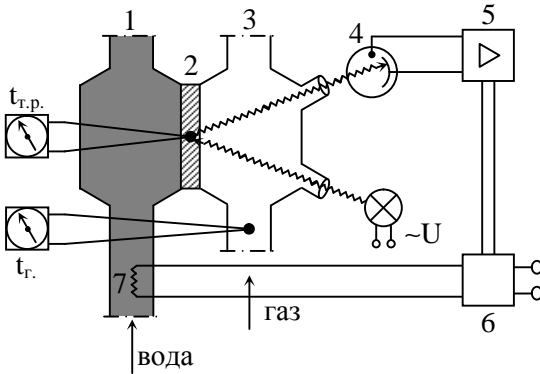
Відносна вологість визначиться відношенням:

$$\varepsilon = \frac{f}{f_{\text{макс}}} 100\% = \frac{6,8}{23,1} 100\% = 29,4\% .$$

Для визначення вологості газових середовищ (повітря, паливних газів, технологічних газів і інших газових середовищ) використовуються вологоміри, у яких момент появи роси на металевій пластинці фіксується візуально чи автоматично.

На рисунку 8.3 показана схема приладу, у якому безупинно автоматично підтримується температура точки роси. Прилад складається з двох зчленованих між собою камер: холодильної 1 і газової 3. Між камерами розташовується металева пластинка 2 із дзеркальною поверхнею на газовій стороні.

Через камери безупинно прокачується охолоджена вода й аналізований газ. При поступовому зниженні температури металеві пластинки 2 на її дзеркальній поверхні при визначеній температурі з'являються крапельки води (роса) з охолодженого газу. При цьому різко зменшиться освітленість фотоелемента 4, а на виході підсилювача 5 електричний сигнал буде дорівнювати нулю і реле 6 включить нагрівач 7, розташований у холодильній камері. Підвищення температури води приведе до збільшення температури пластинки і до випару вологи. Сигнал, що з'явився, на виході підсилювача, відключить через реле нагрівач і при цьому знову почнеться процес охолодження пластинки до появи роси. Таким чином, система автоматично буде підтримувати температуру пластинки близької до температури точки роси. Встановлений у металевій пластинці чуттєвий елемент (наприклад, термістор)



- 1 – холодильна камера; 2 – металева пластинка; 3 – газова камера; 4 – фотоелемент; 5 – електронний підсилювач; 6 – реле; 7 – нагрівач

Рисунок 8.3 – Конденсаційний вологомір

зв'язано з застосуванням мікропроцесорного блоку, у пам'ять якого введені табличні дані по змісту водяної пари у газовому середовищі в стані насичення при різній температурі.

покаже на вторинному приладі невеликі коливання температури навколо температури точки роси.

Прилади для виміру вологості, засновані на вимірі точки роси, відрізняються великою точністю і можуть застосовуватися в промислових об'єктах, де необхідно безупинно вимірювати вологість технологічних газів.

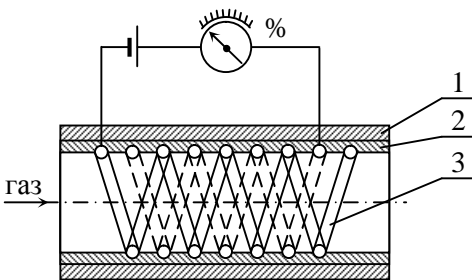
Подальше удосконалення конденсаційного методу виміру вологості

8.4 Сорбційний метод виміру вологості

У цьому методі використовується властивість деяких речовин поглинати вологу з аналізованого газу і змінювати свої електричні характеристики в залежності від змісту вологи в газі.

Сорбційний метод виміру вологості використовується в кулонометричних і електричних вологомірах.

На рисунку 8.4 показана схема кулонометричного вологоміра, заснованого на вимірі струму електролізу тієї води, що утвориться при поглинанні сорбентом з аналізованого газу.



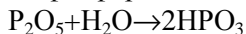
- 1 – трубка; 2 – плівка P_2O_5 ; 3 – платиновий електрод

Рисунок 8.4 – Кулонометричний вологомір

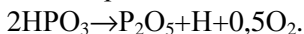
Датчик приладу являє собою циліндричну трубку 1 невеликого діаметру, на внутрішній поверхні якої розміщені

два спіральних платинових електроди 3. Електроди розташовуються в тонкому шарі фосфорного ангідриду 2. У сухому виді фосфорний ангідрид має великий електричний опір, а при насиченні вологою опір різко падає.

Аналізований газ з постійною швидкістю пропускають через трубку датчика. Якщо в газі мається волога, то вона поглинається фосфорним ангідридом з утворенням фосфорної кислоти по реакції:



Під впливом напруги, прикладеної до електродів, відбувається електроліз фосфорної кислоти по реакції:



У сталій рівновазі кількість поглиненої вологи в одиницю часу дорівнює кількості вилученої. Чим більше вологи в аналізованому газі, тим більше струм електролізу, що є мірою концентрації вологи.

Кулонометричні вологоміри призначені для виміру мікроконцентрацій вологи в газах від 10^{-4} % до 1 % в об'ємних одиницях з погрешністю $\pm(5 - 10)\%$.

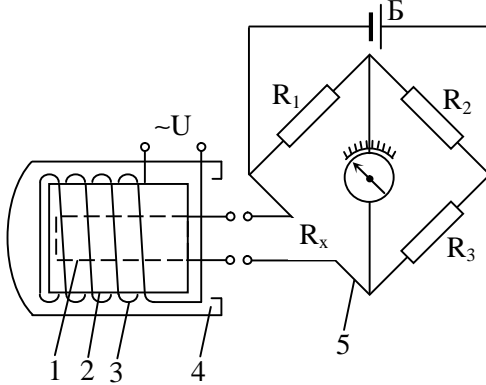
У промислових умовах при визначенні концентрації водяної пари у газових середовищах підвищеної вологості застосовуються електролітичні датчики, що не підігріваються, і датчики, що підігріваються.

Датчики, що не підігріваються, мають чуттєвий елемент, виконаний з гігроскопічного матеріалу, наприклад, вологосорбуючі плівки з окису алюмінію. У середині матеріалу розташовуються два електроди, що зв'язані з мостовою електричною схемою. При зміні вологості аналізованого газу змінюється електропровідність шару гігроскопічного матеріалу, що знаходиться між двома електродами. Величина електричного опору матеріалу є мірою концентрації вологи в аналізованому газі.

Принцип дії датчиків, що підігріваються, заснований на вимірі температури гігроскопічного матеріалу в той момент, коли тиск водяної пари над поверхнею насиченого розчину гігроскопічної солі хлористого літію врівноважується тиском водяної пари вимірюваного газового середовища.

Датчик, що підігрівається, (рисунок 8.5) являє собою терморезистор 1, на якому знаходиться шар склотканини 2, просочений розчином хлористого літію. На шарі склотканини розташовується нагрівач 3 із платинового чи срібного дроту. Датчик поміщений у ковпачок 4 з нержавіючої сталі.

У датчику постійно протікають два процеси, що роблять проти-лежний вплив: випар вологи з просоченої розчином хлористого літію склотканини за рахунок тепла нагрівача і поглинання вологи внаслід-



- 1 – терморезистор; 2 – склотканина;
- 3 – електронагрівник; 4 – ковпачок;
- 5 – вимірювальний прилад

Рисунок 8.5 – Схема електролітичного вологоміра з датчиком, що підігрівається

док гігроскопічності солі.

Рівновага настає, коли парціальний тиск водяної пари в аналізованому газі (у який знаходиться датчик) зрівнюється з парціальним тиском водяної пари над насиченим розчином хлористого літію.

Температура датчика, при якій установлюється рівновага тисків пари води, однозначно зв'язана з вологістю аналізованого газу, тобто з температурою точки роси. Стала температура усередині датчика в момент рівноваги

парціальних тисків водяної пари вимірюється терморезистором, включеного в схему вимірювального моста 5. Точка роси в гігрометрах, що підігріваються, відраховується від -45 до $+60$ С. Датчики, що підігріваються, мають стабільну залежність $R=f(t)$, тому мають гарну взаємозамінність, їхня погрішність не перевищує 2%.

9 ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

9.1 Вимірювання струму, напруги та заряду.

Загальні відомості. Струми й напруги є найпоширенішими електричними величинами, які доводиться вимірювати. Вибір засобів вимірювань може визначатися сукупністю факторів: передбачуваним розміром вимірюваної величини, родом струму (постійною або змінною), частотою, необхідною точністю вимірів, умовами проведення експерименту (лабораторні, цехові, польові й т.п.), впливом зовнішніх умов (температури, магнітного поля, вібрацій і т.д.) і ін.

Визначення значень напруг здійснюють, як правило, прямими вимірюваннями; струмів – крім прямих вимірювань, широко використовують непрямі вимірювання, при яких вимірюється спадання напруги U на резисторі з відомим опором R , включеному в ланцюг вимірюваного струму I_x . Значення струму знаходять за законом Ома: $I_x = U / R$. У цьому випадку погрішність результату виміру ΔI_x визначається погрішністю напруги DU і погрішністю DR , обумовленою відмінністю номінального значення опору R від істинного значення опору R_n . Погрішність ΔI_x може бути знайдена за правилами обробки результатів спостереження при непрямих вимірюваннях.

Діапазон вимірюваних струмів і напруг досить широкий. Наприклад, при біологічних дослідженнях, космічних дослідженнях, вимірах у вакуумі, необхідно вимірювати постійні струми, що становлять доли фемтоампер (10^{-15} А), а в потужних енергетичних установках, на підприємствах кольорової металургії, хімічної промисловості – струми, що досягають сотень кілоампер. Для виміру струмів і напруг у такому широкому діапазоні значень випускаються різні засоби вимірювань, що забезпечують можливість вимірювань у певних піддіапазонах. Засоби вимірювань струмів і напруг роблять, як правило, багатограничними. Для розширення межі вимірів струму застосовують шунти й вимірювальні трансформатори постійного струму - у ланцюгах постійного струму й вимірювальні трансформатори змінного струму - у ланцюгах змінного струму. Для розширення меж вимірювань напруги використовують дільники напруги, додаткові резистори й вимірювальні трансформатори напруги.

Весь діапазон вимірюваних струмів і напруг можна умовно розбити на три піддіапазона: малі, середні й більші значення. Найбільш

забезпеченими засобами вимірювань є піддиапазон середніх значень (орієнтовно: для струмів - від одиниць міліамперів до десятків амперів; для напруг - від одиниць мілівольтів до сотень вольтів). Саме для цього піддиапазона створені засоби вимірювань з найменшою погрішністю вимірювання струмів і напруг. Це не випадково, тому що при вимірюванні малих і великих струмів і напруг виникають додаткові труднощі.

При вимірюванні малих струмів і напруг ці труднощі обумовлені термо-ЕДС у вимірювальному ланцюзі, резистивними і ємнісними зв'язками вимірювального ланцюга зі сторонніми джерелами напруги, впливом зовнішнього магнітного поля, шумами елементів вимірювального ланцюга й інших причин.

Термо-ЕДС виникають у місцях з'єднання різнорідних металів (у місцях пайки й зварювання провідників, у місцях зіткнення рухомих і нерухомих контактів перемикачів і т.п.) внаслідок нерівномірного температурного поля засобу вимірювань.

Зовнішнє перемінне магнітне поле теж може внести істотні перекручування за рахунок ЕДС, що наводять у проводах й інших елементах ланцюга, що з'єднує джерело

малої вимірюваної величини із засобом вимірювань.

Цілком усунути вплив відзначених факторів не вдається. Тому вимірювання малих струмів і напруг здійснюються з більшою погрішністю.

Вимірювання великих струмів і напруг мають свої особливості й труднощі. Наприклад, при вимірюванні великих постійних струмів з використанням шунтів на шунтах розсіюється велика потужність, що приводить до значного нагрівання шунтів і появи додаткових погрішностей. Для зменшення розсіювання потужності і усунення перегріву необхідно збільшувати габарити шунтів або застосовувати спеціальні додаткові заходи по штучному охолодженню. У результаті шунти виходять громі-

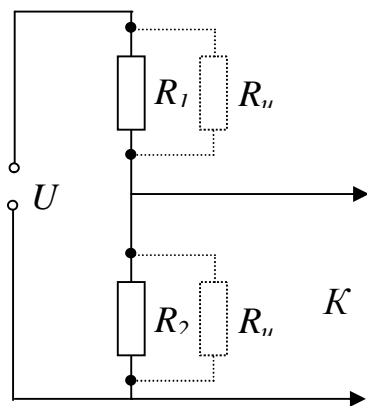


Рисунок 9.1 – Схема впливу опору ізоляції на коефіцієнт розподілу дільника напруги

збільшувати габарити шунтів або застосовувати спеціальні додаткові заходи по штучному охолодженню. У результаті шунти виходять громі-

здкими й дорогими. При вимірюванні великих струмів дуже важливо стежити за якістю контактних з'єднань, по яких протікає струм. Погана якість контактного з'єднання може не тільки спотворити режим ланцюга й, отже, результат виміру, але й призвести до обгорання контакту за рахунок великої потужності, що розсіюється на контактному опорі. При вимірі більших струмів можуть виникати додаткові погрішності від впливу на засоби вимірювань сильного магнітного поля, створюваного навколо шин струмом, що протікає.

При вимірюванні великих напруг зростають вимоги до якості ізоляційних матеріалів, застосовуваних у засобах вимірювань, як для зменшення погрішностей, що виникають від струмів втрати через ізоляцію, так і для забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу. Наприклад, якщо для розширення меж вимірювань використовується дільник напруги, то зі збільшенням вимірюваної напруги опір дільника потрібно збільшувати. При вимірюванні великих напруг опір дільника може виявитися порівняним з опором ізоляції, що призведе до погрішності розподілу напруги й, отже, до погрішності вимірів. З малюнка 9.1, що ілюструє вплив ізоляції на коефіцієнт розподілу, треба, що замість номінального коефіцієнта розподілу $K_{ном} = R_2 / (R_1 + R_2)$ реальний коефіцієнт розподілу буде визначатися виразом $K = (R_2 \parallel R_{из2}) / [(R_1 \parallel R_{из1}) + (R_2 \parallel R_{из2})]$, де знак \parallel означає паралельне з'єднання. Труднощі урахування реального коефіцієнта розподілу полягають в тому, що опір ізоляції може змінюватися залежно від стану навколишнього середовища (запиленості, вологості й т.п.).

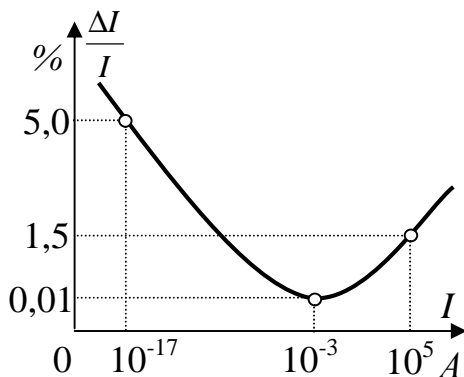


Рисунок 9.2 – Зміна погрішності вимірювань постійного струму залежно від розміру вимірюваної величини

Звідси треба, що при вимірюванні великих струмів і напруг, крім звичайних погрішностей, виникають погрішності, обумовлені специфікою цих вимірювань.

Характерна зміна погрішності вимірювань залежно від розміру вимірюваної величини ілюструється (рисунок 9.2) якісно (для наочності

залежно від розміру вимірюваної величини ілюструється (рисунок 9.2) якісно (для наочності

використовується змінного масштаб по осях) на прикладі робочих засобів вимірювань постійних струмів, що випускають промисловістю.

При вимірюванні змінних струмів і напруг велике значення має частота вимірюваної величини. Частотний діапазон вимірюваних струмів і напруг досить широкий: від часток герца (інфранизькі частоти) до сотень мегагерц і більше.

Всім засобам вимірювань змінних струмів і напруг властива частотна погрішність, обумовлена зміною опорів індуктивних й ємнісних елементів засобів вимірювань зі зміною частоти, втратами на перемагнічування ферромагнітних матеріалів, втратами на вихрові струми в металевих деталях засобів вимірювань, впливом паразитних індуктивностей й ємностей (на високих частотах). Ці причини не дозволяють отримати однакову точність вимірювань у всьому зазначеному діапазоні частот. У документації на засоби вимірювань змінних струмів і напруг обов'язково вказується область частот, у якій гарантується визначена точність вимірювань даним засобом. Область частот від 20 Гц до одиниць кілогерців є найбільш забезпеченою засобами вимірювань, що випускаються промисловістю, змінних струмів і напруг. У більш широкій області частот використовують електронні й цифрові прилади, а з електромеханічних приладів – термоелектричні й електростатичні прилади. Електронні вольтметри дозволяють вимірювати змінні напруги із частотою до 10^3 МГц, однак погрішність вимірювання

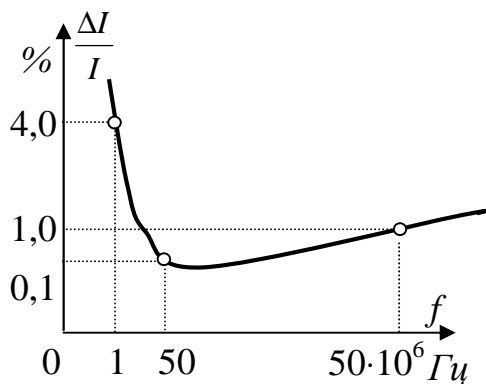


Рисунок 9.3 – Зміна погрішності вимірів змінного струму залежно від частоти

зі збільшенням частоти зростає. Збільшення погрішності вимірювання з ростом частоти є загальною закономірністю для засобів вимірювань струмів і напруг, що пояснюється зазначеними вище причинами. При вимірах на частотах нижче 20 Гц з'являються свої труднощі, обумовлені недостатньою інерційністю рухомої частини електромеханічних приладів. При вимірі змінних у часі величин обер-

таючий момент, що діє на рухому частину приладу, теж змінюється в часі. Зі зменшенням частоти обертаючого моменту інерція рухомої частини недостатня для одержання сталого відхилення покажчика. Ця особливість сильно проявляється на інфранизьких частотах. Подолання цих труднощів шляхом збільшення інерції рухомої частини вимірювального механізму недоцільно, тому що при цьому буде зменшуватися чутливість засобу вимірювань. Тому для виміру струмів і напруг інфранизьких частот потрібні спеціальні пристрої усереднення (інтегрування) вимірюваних величин. Із засобів вимірювань, що випускають серійно, слід зазначити термоелектричні прилади, наприклад амперметр типу Т210, що вимірює змінні струми із частотою від 1 Гц. У цих приладів функцію інтегрування виконує термоелектричний перетворювач.

На рисунку 9.3 якісно (для наочності використовується змінний масштаб по осях) ілюструється характерна зміна погрішності вимірів залежно від частоти на прикладі робочих засобів вимірювань змінних струмів (десятки міліампер), що випускають промисловістю.

Вимірювання постійних струму та напруги

Для вимірювань постійних струмів та напруг найчастіше використовують магнітоелектричні прилади, яким властиві висока чутливість, точність, широкий діапазон вимірювань. Магнітоелектричні прилади з вмонтованими шунтами та додатковими резисторами дають змогу вимірювати струм від 10^{-8} до 50 A , а напругу – від 10^{-5} до 1000 V .

Основні схеми вимірювань постійних напруги та струму наведені на рисунку 9.4. При вимірюванні напруги вольтметром з додатковим резистором (рисунок 9.4, б) матимемо:

$$U_x = U_v + I_v R_d = U_v \left(1 + \frac{R_d}{R_v} \right),$$

де U_x – покази вольтметра, I_v , R_v – струм та опір вольтметра, R_d – опір додаткового резистора.

Номінальний струм додаткового резистора повинен збігатися за значенням зі струмом повного відхилення вольтметра, а його опір обирається таким, що щоб множник $1 + \frac{R_d}{R_v}$ був цілим числом, кратним 2; 5 або 10. клас точності додаткового резистора повинен бути вищим від класу точності вольтметра.

Вимірюючи струм за допомогою мілівольтметра з шунтом (рисунк 9.4, з), матимемо

$$I_X = I_{Ш} + I_{mV} = \frac{U_{Ш}}{R_{Ш}} + \frac{U_{Ш}}{R_{mV}} = \frac{U_{Ш}}{R_{Ш}} \left(1 + \frac{R_{Ш}}{R_{mV}} \right),$$

де $U_{ш}$, $I_{ш}$, $R_{ш}$ – спад напруги на шунті, його струм і опір, відповідно; R_{mV} , I_{mV} , – опір і струм мілівольтметра, відповідно.

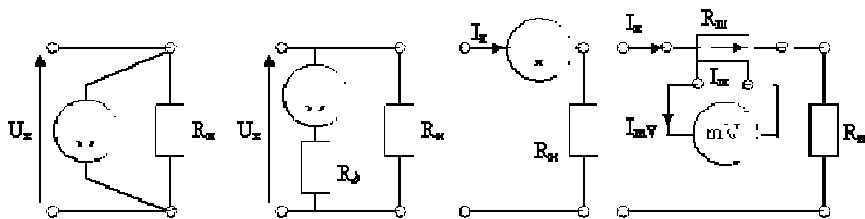


Рисунок 9.4 – Основні схеми вимірювань струму та напруги

Мілівольтметр під'єднується до потенціальних затискачів шунта каліброваними дротами з нормованим опором, що дорівнює 0,035 Ом для пари дротів. Спади напруги на дротах враховуються при градуванні мілівольтметра, тому його покази визначаються спадом напруги на шунті, тобто $U_{mV} = U_{ш}$.

При $\frac{I_{mV}}{I_{Ш}} \leq 0,003 K$, де K – клас точності шунта, значенням

струму I_{mV} нехтують (похибка від цього не перевищує 0,3 K) і значення I_X визначають за формулою

$$I_X = \frac{U_{mV}}{R_{Ш}} = \frac{U_{mV}}{U_{Шном}} \cdot I_{Шном},$$

де $U_{шном}$, $I_{шном}$ – номінальні значення напруги і струму шунта.

Номінальна напруга шунта і межа вимірювання мілівольтметра повинні збігатися, а клас точності шунта повинен бути вищим від класу точності мілівольтметра.

Для вимірювання струмів, які перевищують 10 кА (що відповідає максимальному значенню номінального струму серійних шунтів), можна скористатися паралельним з'єднанням декількох шунтів, при якому потенціальні затискачі усіх ввімкнених паралельно в коло вимірюваного струму шунтів з'єднуються каліброваними дротами із затискачами вольтметра.

Для вимірювань дуже великих струмів, а також при вимірюванні струму в колах високої напруги, коли для захисту обслуговуючого персоналу необхідно ізолювати коло вимірювального приладу від високої напруги, застосовують вимірювальні трансформатори постійного струму разом з магнітоелектричними амперметрами.

Електродинамічні прилади за точністю не поступаються магнітоелектричним, однак їх діапазони вимірювань дещо менші (від 1 мА до 10 А по струму і від 1 до 600 В по напрузі) і вони споживають значно більшу потужність, тому їх застосування на постійному струмі обмежене. Через порівняно вузькі діапазони вимірювань, порівняно велике споживання і невисоку точність не знаходять широкого застосування на постійному струмі феродинамічні і електромагнітні прилади.

Суттєву перевагу порівняно з перерахованими вище приладами мають електростатичні вольтметри: на постійному струмі вони практично не споживають потужності від досліджуваного об'єкта – їх вхідний опір може досягати 10^{14} Ом , що визначає особливу доцільність їх застосування для вимірювання напруги в малопотужних колах. Не менш важливе практичне значення має також можливість застосування електростатичних вольтметрів для прямих вимірювань високих напруг до 300 кВ .

Найширші можливості для вимірювань постійних напруг і струму мають аналогові і цифрові електронні прилади. Важливими позитивними властивостями електронних приладів є їх широкодіапазонність (від пікоампер до десятків ампер і від нановольт до кіловольт), мале споживання енергії від досліджуваного об'єкта і висока точність: найточніші аналогові електронні прилади постійного струму мають клас точності $0,2$, а цифрові – навіть $0,002$. До переваг цифрових приладів слід віднести також їх високу швидкодію, автоматичний вибір діапазону вимірювань, визначення полярності вимірюваної величини, а також можливість передачі і реєстрації результатів вимірювань.

Найточніші вимірювання напруги здійснюються за допомогою компенсаторів напруги постійного струму.

Якщо вимірювана напруга U_x не перевищує верхньої границі вимірювань компенсатора, то вона подається безпосередньо на затискачі X компенсатора. Похибка вимірювання залежить від класу точності компенсатора і може бути зведена до $0,001\dots 0,002\%$.

Слід мати на увазі, що точність вимірювань, що відповідає класу точності компенсатора, може бути забезпечена тільки при достатній

плавності регулювання компенсаційної напруги, яка, в свою чергу, залежить від чутливості нуль-індикатора. Чутливість повинна бути такою, щоб зміні компенсаційної напруги на значення, що відповідає цінні ступеня наймолодшої декади чи цінні поділki вимірювального реохорда, відповідало відхилення вказівника нуль-індикатора не менш ніж на дві поділki у випадку світлового вказівника і на одну поділku – для стрілкового нуль-індикатора.

Недостатня чутливість змушує експериментатора при врівноваженні компенсатора обмежитись більш грубими ступенями регулювання компенсаційної напруги, що призводить до збільшення похибки квантування, границя якої $\left|d_{KB}\right|_{\max} = \frac{0,5\Delta U_K}{U_K} \cdot 100\%$, де ΔU_K – ціна

ступеня наймолодшої із декад компенсатора, зміна якої призводить до помітної зміни показів нуль-індикатора.

Якщо вимірювана величина перевищує верхню границю вимірювання компенсатора, що у більшості випадків становить від 1,2 до 2,4 В, використовують подільники напруги (рисунок 9.5,а). Серійні

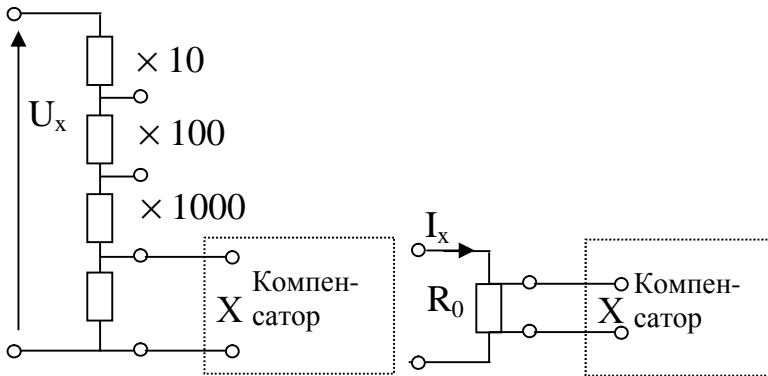


Рисунок 9.5 – Схеми вимірювання струму та напруги компенсатором напруги постійного струму

подільники напруги дають змогу розширити границю вимірювань компенсатора до 1000 В. Здебільшого вони мають коефіцієнти ділення 10, 100 та 1000, клас точності від 0,0005 до 0,005.

Вимірювання струму за допомогою компенсатора полягає у вимірюванні спаду напруги на відомому опорі R_0 (рисунок 9.5, б).

Значення опору R_0 вибирають таким, щоб спад напруги на ньому не перевищував верхньої границі вимірювань компенсатора з врахуванням того, що потужність, яка виділяється в опорі R_0 при протіканні струму I_x , не повинна перевищувати номінального значення опору для даної вимірювальної котушки.

Для точних вимірювань великих постійних струмів використовують метод компарування – безпосереднього порівняння двох однорідних величин, одна з яких пропорційна вимірюваній величині, а інша може бути виміряна з високою точністю. Вимірювання великих постійних струмів зводиться до вимірювання порівняно невеликого струму, значення якого може бути визначене з високою точністю.

На рисунку 9.6 наведена схема резистивного компаратора струму, заснованого на порівнянні спадків напруг, що створюються вимірюваним високим струмом I_x та компенсувальним струмом I_2 на двох точних резисторах R_1 та R_2 . оскільки струм $I_2 = I_x \frac{R_1}{R_2}$ при $R_1 \ll R_2$

значно менший від струму I_x , він може бути точно виміряний, наприклад, за спадком напруги на зразковому опорі R_0 за допомогою цифрового вольтметра.

Точність компарування струмів наведеним способом обмежена складністю виготовлення високоточних та високостабільних резисторів (мір опору) для великих постійних струмів.

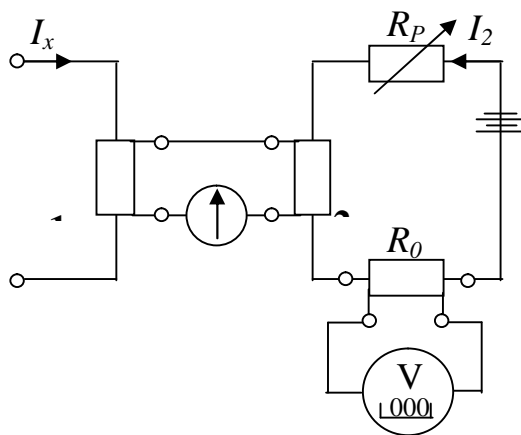


Рисунок 9.6 – Принципова схема резистивного компаратора струму

Для точних вимірювань дуже великих постійних струмів (десятки кілоампер) використовують магнітні компаратори. При компаруванні урівноваженням магніторушійних сил як компарувальні перетворювачі використовуються обмотки, коефіцієнти перетворення яких дорівнюють, відповідно,

$$k_1 = \frac{F_1}{I_1} = w_1 \quad \text{та}$$

$k_2 = \frac{F_2}{I_2} = w_2$. Оскільки відношення кількості витків w_1/w_2 є вели-

чиною сталою, що не залежить від впливних факторів, то похибка вимірювання відношення струмів за умови використання високочутливих перетворювачів недокомпенсації може бути зведена до $10^{-4} \dots 10^{-5}$ %.

Найпоширенішими засобами вимірювань постійних струмів і напруг є амперметри (мікро-, мілі-, кілоамперметри) і вольтметри (мікро-, мілі-, кіловольтметри), а також універсальні й комбіновані прилади (наприклад, мікрровольтнаноамперметри, нановольтамперметри й т.п.). Широко використовувані засоби вимірювань постійних струмів і напруг представлені в таблицях 9.1 й 9.2.

Таблиця 9-1- Засоби вимірювань постійних струмів

Прилади, використовувані при вимірі постійних струмів	Верхня межа вимірів, А				Найменша погрішність вимірювань, % відповідна		
	найменший	найбільший			найменшій верхній межі вимірювань	найбільшій верхній межі вимірювань	значенню усередині діапазону вимірювань
		пряме вмикання	с зовнішнім шунтом	с трансформатором постійного струму			
Цифрові	10^{-17}	10	$7,5 \cdot 10^3$	-	5,0	0,7	0,01
Електронно-аналогові	$5 \cdot 10^{-10}$	1	-	-	5,0	4,0	0,5
Магніто-електричні	$3 \cdot 10^{-7}$	50	$2 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^5$	0,5	1,5	0,2
Електро-магнітні	$5 \cdot 10^{-3}$	30	-	-	0,5	1,5	0,5
Електро-динамічні	$5 \cdot 10^{-3}$	10	-	-	0,2	0,2	0,2

Для вимірювань досить малих постійних струмів і напруг застосовують електрометри й фотогальванометричні прилади. Як приклад можна вказати цифрові універсальні мікровольтметри-електрометри типу В7-29 з діапазоном вимірювань постійного струму від 10^{-17} до 10^{-13} А и типу В7-30 з діапазоном вимірювань струму від 10^{-15} і до 10^{-7} А. Прикладом фотогальванометричних приладів є нановольтамперметр типу Р341, що має найменший діапазон вимірювань постійних струмів 0,5–0–0,5 нА й постійних напруг 50–0–50 нВ. При вимірюванні малих і середніх значень постійних струмів і напруг найбільше поширення дістали цифрові й магнітоелектричні прилади. Вимірювання великих постійних струмів здійснюють, як правило, магнітоелектричними кілоамперметрами з використанням зовнішніх шунтів, а досить великих струмів - з використанням трансформаторів постійного струму. Для вимірювань великих постійних напруг використовують магнітоелектричні й електростатичні кіловольтметри. Вимірювання постійних струмів і напруг можна виконувати й іншими приладами (див. таблиці 9.1 й 9.2). Варто мати на увазі, що електродинамічні амперметри й вольтметри рідко використовують для технічних вимірювань струмів і напруг у ланцюгах постійного струму. Їх частіше застосовують (поряд із цифровими й магнітоелектричними приладами високих класів точності) як зразкові прилади при перевірці засобів вимірювань більш низького класу точності. У таблицях 9.1 й 9.2 не зазначені термоелектричні прилади, тому що застосовувати їх у ланцюгах постійного струму недоцільно через відносно велику потужність, споживану ними з ланцюга вимірювання.

Вимірювання змінних струму та напруги

Особливістю вимірювань змінних струмів і напруг є те, що вони змінюються в часі. У загальному випадку величина, що змінюється в часі, може бути цілком представлена миттєвими значеннями в будь-який момент часу. Змінні в часі величини можуть також бути охарактеризовані своїми окремими параметрами (наприклад, амплітудою) або інтегральними параметрами, у якості яких використовують діюче значення

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt},$$

середнєвипрямлене значення

$$X_{\text{срв}} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt,$$

і середнє значення

$$X_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt,$$

Таблиця 9-2 - Засоби вимірювань постійних напруг

Прилади, використовувані при вимірюванні постійних напруг	Верхня межа вимірів, В			Найменша погрішність вимірювань, % відповідно до		
	Найменший	найбільший		найменшій верхній межі вимірювань	найбільшій верхній межі вимірювань	значенню усередині діапазону вимірювань
		пряме включення	с додатковим опором			
Цифрові	$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	-	1,0	$5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Електронно-аналогові	$5 \cdot 10^{-8}$	10^3	-	5,0	1,5	0,5
Магніто-електричні	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	1,0	1,5	0,2
Електро-статичні	30	$7,5 \cdot 10^4$	-	0,5	1,5	0,5
Електро-магнітні	1,5	$0,6 \cdot 10^3$	-	0,5	0,5	0,5
Електро-динамічні	7,5	$0,6 \cdot 10^3$	-	0,2	0,2	0,2

де $x(t)$ – величина, що змінюється в часі. Таким чином, при вимірюванні змінних струмів і напруг можуть вимірятися їх діючі, амп-

літудні, середневипрямлені, середні й миттєві значення. У практиці електричних вимірювань найчастіше доводиться вимірювати синусоїдальні змінні струми й напруги, які звичайно характеризують діючим значенням. Тому переважна більшість засобів вимірювань змінних струмів і напруг градууються в діючих значеннях для синусоїдальної форми кривої струму або напруги.

Робочими засобами вимірювань змінних струмів і напруг є амперметри (мікро-, мілі-, кілоамперметри), вольтметри (мікро-, мілі-, кіловольтметри), компенсатори змінного струму, універсальні й комбіновані прилади, а також, прилади, що реєструють і електронні осцилографи.

Вимірювання значень змінних струмів і напруг здійснюють різними засобами вимірів, найпоширеніші з яких наведені в таблицях 9.3 й 9.4. Порівняння цих таблиць із таблицями 9.1 й 9.2 показує, що найменші верхні межі вимірювань змінних струмів і напруг на кілька порядків більше, ніж постійних. Це пояснюється тим, що впливи зовнішнього змінного магнітного поля й паразитних резистивно-ємкісних зв'язків, відзначені вище, особливо сильно впливають при вимірюванні змінних величин. Малі змінні струми вимірюють цифровими, електронними й випрямними приладами, малі змінні напруги - електронними вольтметрами. Найбільш широкий діапазон вимірювань змінних при прямому включенні засобів вимірів забезпечують випрямні прилади. Вони мають відносно широкий діапазон і при вимірюванні змінних напруг. Ці прилади роблять, як правило, багатограничними. Варто також урахувати, що ці прилади при відключенні випрямляча використовуються як магнітоелектричні прилади для вимірів постійних струмів і напруг. Завдяки такій універсальності й невеликим габаритам випрямні прилади широко застосовуються в лабораторній і виробничій практиці.

Змінні струми понад кілоампер й змінні напруги понад кіловольт вимірюють за допомогою зовнішніх вимірювальних трансформаторів струму або напруги електромагнітними, випрямними й електродинамічними приладами. Вимірювання високих змінних напруг (до 75 кВ) при прямому включенні засобів вимірювань дозволяють здійснювати електростатичні кіловольтметри, наприклад кіловольтметр типу С100.

У найбільш широкому частотному діапазоні при вимірюванні змінних струмів працюють термоелектричні й електронні прилади, а при вимірюванні змінних напруг – електронні й електростатичні при-

лади. Термоелектричні вольтметри мають обмежене застосування через велику потужність, споживану ними з ланцюга виміру. У найбільш вузькому частотному діапазоні працюють електродинамічні й електромагнітні прилади. Верхня межа їхнього частотного діапазону звичайно не перевищує одиниць кілогерців. Варто мати на увазі, що цифри, наведені в таблицях 9.3 й 9.4, характеризують граничні можливості різних приладів. При цьому не можна однозначно зв'язувати цифри, що характеризують верхні межі діапазону вимірювань, із цифрами, що характеризують частотний діапазон. Зв'язок між діапазоном вимірюваних величин і частотним діапазоном для різних засобів вимірів різний. Однак можна вказати загальну закономірність: зі збільшенням значення вимірюваної величини верхня межа частотного діапазону, як правило, зменшується. При цьому спостерігається й інша закономірність, відзначена раніше: зі збільшенням частоти погрішність вимірювань збільшується. Наприклад, термоелектричний міліамперметр Т15 класу точності 1,0 на межі вимірювань 100 *мА* має верхню граничну частоту 50 МГц, а на межі 300 *мА* – 25 МГц. Цей же прилад припускає можливість вимірювань струму до 100 *мА* при частоті до 100 МГц і струму до 300 *мА* при частоті до 50 МГц із погрішністю не більше $\pm 4,0$ %.

При вимірюваннях діючих значень змінних струмів і напруг, форма кривої яких відрізняється від синусоїдальної, виникає додаткова погрішність. Ця погрішність мінімальна в засобів вимірювань, що працюють у широкій смузі частот, за умови, що вихідний сигнал цих засобів визначається діючим значенням вхідної величини. Найменш чутливі до зміни форми кривої змінних струмів і напруг термоелектричні, електростатичні й електронні прилади.

Найбільш точні вимірювання діючих значень синусоїдальних струмів і напруг можна здійснити електродинамічними приладами, цифровими приладами й компенсаторами змінного струму. Однак погрішність вимірювань змінних струмів і напруг більше, ніж постійних.

Наприклад, компенсатор змінного струму типу ДО509 в області частот від 40 до 60 Гц вимірює ЕДС і напруги з мінімальною основою погрішністю, що припускається $\pm 0,1$ %. Таку ж точність у більш широкій області частот забезпечують електродинамічні амперметри й міліамперметри типу Д5054 і вольтметри типу Д5055.

Для вимірювання діючого значення змінних струму і напруги промислової частоти найчастіше користуються електромагнітними, електродинамічними і феродинамічними приладами, а на підвищених

частотах – термоелектричними, електростатичними, випрямними і електронними (аналоговими та цифровими).

Таблиця 9-3- Засоби вимірювань змінних струмів

Прилади, використувані при вимірюванні змінних струмів	Верхня межа вимірювань, А			Частотний діапазон, Гц	Найменша погрішність вимірювань, %
	найменший	найбільший			
		пряме включення	с вимірювальним трансформатором струму		
Цифрові	$2 \cdot 10^{-5}$	10	-	$45 - 2 \cdot 10^4$	0,4
Електронні аналогові	10^{-5}	1	-	$10 - 10^7$	0,5
Термоелектричні	$5 \cdot 10^{-3}$	50	10^2	$1 - 10^8$	1,0
Електромагнітні	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^5$	$45 - 3 \cdot 10^3$	0,5
Випрямні	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^2$	10^4	$30 - 2 \cdot 10^4$	1,5
Електродинамічні	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^2$	$6 \cdot 10^2$	$45 - 4 \cdot 10^3$	0,1

Середнє випрямлене та амплітудне значення вимірюють випрямними і електронними приладами.

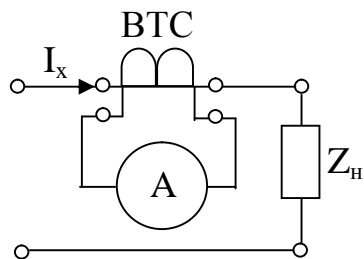


Рисунок 9.7 – Схеми вимірювання змінного струму з ВТС

Середня область значень змінних струму та напруги (приблизно від 10 мА до 10 А і від 1 до 600 В) охоплюється діапазонами вимірювань приладів усіх перелічених вище систем, однак при виборі конкретних типів приладів слід враховувати їх характерні особливості.

Таблиця 9-4- Засоби вимірювань змінних напруг

Прилади, використовувані при вимірюванні змінних напруг	Верхня межа вимірювань, В				Частотний діапазон, Гц	Найменша погрішність вимірів, %
	найменший	найбільший				
		пряме включення	с зовнішнім додатковим опором	с вимірювальним трансформатором напруги		
Цифрові	0,01	10^3	-	-	$4 - 10^5$	0,15
Електронні аналогові	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^2$	-	-	$10 - 10^9$	0,5
Термоелектричні	0,5	$6 \cdot 10^2$	$7,5 \cdot 10^2$	$6 \cdot 10^5$	$45 - 10^4$	0,5
Електромагнітні	0,5	$1,2 \cdot 10^3$	-	$3 \cdot 10^4$	$30 - 2 \cdot 10^4$	0,5
Випрямні	30	$7,5 \cdot 10^4$	-	-	$20 - 1,4 \cdot 10^7$	0,5
Електродинамічні	7,5	$6 \cdot 10^2$	-	$3 \cdot 10^4$	$45 - 2 \cdot 10^3$	0,1

Для вимірювань струму менше за 1 mA і напруги нижче ніж $0,1 \text{ V}$ застосовують електронні прилади, нижні границі вимірювань досягають 10^{-9} A і 10^{-6} V . Вимірювання дуже малих струмів (до 10^{-12} A) можна також здійснювати вимірюванням спаду напруги на резисторі за допомогою електронного вольтметра. Найвищу границю вимірювання по струму мають електромагнітні амперметри (300 A), а по напрузі – електростатичні вольтметри (300 kV).

Сучасні цифрові вимірювальні прилади можуть вимірювати діюче значення змінної напруги частотою від $1,5 \text{ Гц}$ до 1 МГц в діапазоні $1 \text{ мкВ} \dots 750 \text{ В}$ з похибкою $0,05 \%$, а навіть $0,02 \%$, а діюче значення змінного струму від 10 мкА до 2 А з точністю до $0,05 \%$.

Для розширення границь вимірювань амперметрів змінного струму застосовують вимірювальні трансформатори струму ВТС (рисунки 9.7). Значення вимірюваного струму визначають як

$$I_X = k_I I_A,$$

де k_I – номінальний коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму.

Похибка вимірювання містить похибки амперметра і коефіцієнта трансформації трансформатора струму. Щоб зменшити вплив останньої, клас точності вимірювального трансформатора струму беруть завжди вищим за клас точності амперметра.

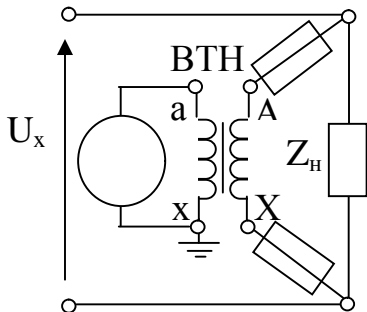


Рисунок 9.8 – Схеми вимірювань змінної напруги з ВТН

струму без розриву кола, по якому він протікає, можна скористатися трансформатором струму з роз'ємним магніто проводом у вигляді кліщів.

Напругу, яка перевищує 600 В, вимірюють, використовуючи вимірювальні трансформатори напруги (ВТН, рисунок 9.8). Для схеми рисунка 9.8

$$U_X = k_U U_V,$$

де k_U – номінальний коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги.

Якщо напруга кола перевищує 600 В, вторинну обмотку і корпус трансформатора заземляють.

На похибку вимірювання напруги впливає похибка коефіцієнта трансформації трансформатора напруги, тому необхідно, щоб його клас точності був вище від класу точності вольтметра.

Прилади прямого перетворення забезпечують вимірювання струму і напруги з похибкою не менше 0,1 %. Точніші вимірювання здійснюються компараторами. Спрощені схеми вимірювань струму і напруги за допомогою термоелектричних компараторів подані на рисунку 9.9. Порівняння діючих значень постійного і змінного струмів здійснюються за допомогою термоелектричного перетворювача ТП (рисунки 9.9,а), який складається з нагрівача та термопари. Спочатку

перемикач SA ставлять в положення 1. Значення термо-ЕРС, що виникає, дорівнюватиме

$$E_X = k_n I_X^2,$$

де k_n - коефіцієнт перетворення ТП; I_X - діюче значення струму.

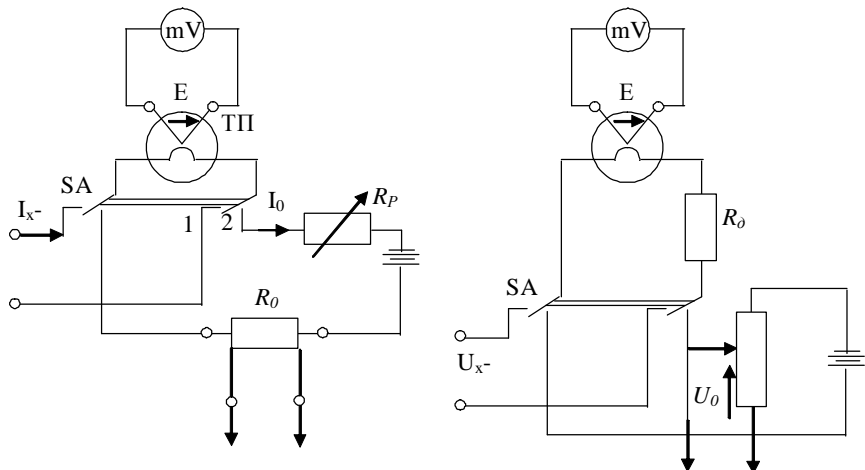


Рисунок 9.9 – Спрощені схеми вимірювань змінних струмів та напруг з використанням компаратора

Вимірявши за допомогою мілівольтметра значення E_x , перемикають SA в положення 2 і регулюють значення постійного струму до отримання термо-ЕРС E_0 , яка за значенням дорівнювала б E_x , тобто добиваються попереднього показу мілівольтметра.

Враховуючи, що $E_X = k_n I_X^2 = E_0 = k_n I_0^2$ (значення k_n для постійного змінного струму залишається однаковим), маємо $I_X^2 = I_0^2$, тобто $I_X = I_0$ (для діючих значень), і, вимірявши значення I_0 за допомогою компенсатора постійного струму, визначаємо I_X . Схема вимірювання напруги (рис. 9.9,б) відрізняється наявністю додаткового резистора R_d в колі нагрівача. Для розширення діапазону вимірювань компаратора по струму використовують шунти, по нарузі – додаткові резистори.

Похибка вимірювань змінного струму (напруги) за допомогою компаратора складається із похибки вимірювання постійного струму (напруги) і похибки порівняння значень I_X і I_0 (U_X і U_0). Остання залежить в основному від рівності значень k_n на змінному і постійному струмі. Вона зростає зі збільшенням частоти вимірюваного струму

через вплив поверхневого ефекту на опір нагрівача і збільшення паразитних провідностей. Для точних вимірювань замість мілівольметра використовують компенсатор постійного струму.

Промислові зразки термоелектричних компараторів забезпечують вимірювання змінних струму та напруги в діапазоні частот 20 Гц...200 кГц з похибкою 0,02...0,05% в діапазоні частот від 200 Гц до 20 кГц зі збільшенням цієї похибки для крайніх значень частотного діапазону до 0,2...0,5 %.

Для вимірювань несинусоїдних струмів та напруг слід користуватися приладами, робочий частотний діапазон яких охоплює усі ті гармонічні складові досліджуваного сигналу, нехтування якими недоступно за умов потрібної точності вимірювань. Зокрема, для вимірювань діючих значень несинусоїдних струмів і напруг найкраще користуватися термоелектричними, електродинамічними, електростатичними і електронними приладами, для вимірювання середньовипрямлених значень – електронними, градуйованими в середньовипрямлених значеннях, а для вимірювання амплітудних значень напруг - електронними піковими вольтметрами.

Більшість випрямних і багато електронних приладів мають шкали, градуйовані в діючих значеннях вимірюваного струму і напруги, а відхилення їх вказівника пропорційні середнім чи амплітудним значенням. Незважаючи на широкий робочий діапазон частот, такі прилади не слід використовувати для вимірювань діючих значень несинусоїдних струмів і напруг, оскільки в таких умовах їм властиві значні похибки від впливу форми кривої вимірюваної величини.

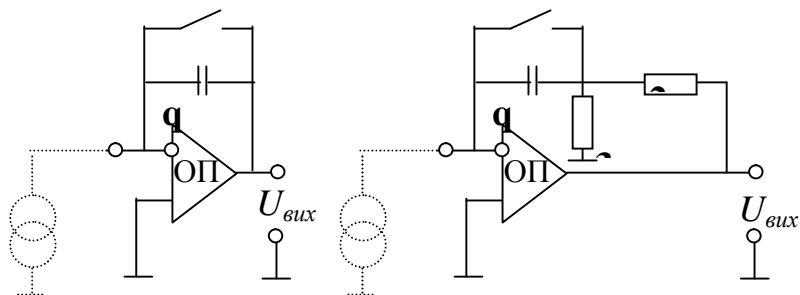


Рисунок 9.10 – Схема вимірювання лінійних струмів та напруг у трифазному колі

Відзначимо деякі особливості вимірювань струмів і напруг у трифазних ланцюгах. У загальному випадку в несиметричних трифазних ланцюгах число необхідних засобів вимірювань струмів і напруг відповідає числу вимірюваних величин, якщо кожна вимірювана величина вимірюється своїм приладом. При вимірюваннях у симетричних трифазних ланцюгах досить зробити вимірювання струму або напруги тільки в одній лінії (фазі), тому що в цьому випадку всі лінійні (фазні) струми й напруги рівні між собою. Зв'язок між лінійними й фазними струмами й напругами залежить від схеми включення навантаження. Відомо, що для симетричних трифазних ланцюгів цей зв'язок визначається співвідношеннями: $I_l = I_\phi$ й $U_l = \sqrt{3} U_\phi$ при з'єднанні навантаження зіркою й $I_l = \sqrt{3} I_\phi$ й $U_l = U_\phi$ при з'єднанні навантаження трикутником. У несиметричних трифазних ланцюгах при вимірах струмів і напруг за допомогою вимірювальних трансформаторів можна заощадити на кількості використовуваних вимірювальних трансформаторів. Для прикладу на малюнку 9.10, а наведена схема вимірювань трьох лінійних струмів з використанням двох вимірювальних трансформаторів, а на малюнку 9.10, б – аналогічна схема вимірювань лінійних напруг. Ці схеми засновані на відомих співвідношеннях для трифазних ланцюгів: $\mathcal{I}_A + \mathcal{I}_B + \mathcal{I}_C = 0$ і $\mathcal{U}_{AB} + \mathcal{U}_{BC} + \mathcal{U}_{CA} = 0$. У схемі вимірювань струмів струми I_A й I_B вимірюються амперметрами A_1 й A_2 з урахуванням коефіцієнтів трансформації K_1 і K_2 вимірювальних трансформаторів струму, тобто $I_A = K_1 I_1$ й $I_B = K_2 I_2$. Амперметр A_3 включений таким чином, що через нього тече сума струмів, тобто $\mathcal{I}_3 = \mathcal{I}_1 + \mathcal{I}_2$. Якщо $K_1 = K_2$, то $K\mathcal{I}_3 = K\mathcal{I}_1 + K\mathcal{I}_2 = \mathcal{I}_A + \mathcal{I}_B = -\mathcal{I}_C$. Так як знак "мінус" означає зміну фази струму, а показання амперметрів, як відомо, не залежать від фази вимірюваного струму, то, отже, по показанню амперметра A_3 можна визначити струм $I_C = KI_3$. Варто мати на увазі, що для правильного підсумовування струмів необхідно стежити за правильністю включення генераторних затискачів вимірювальних трансформаторів. Неправильне включення генераторних затискачів одного із трансформаторів (у первинному або вторинному ланцюзі) призведе до зміни фази одного із підсумовуваних струмів, і результат вийде неправильний. Схема для вимірювання лінійних напруг працює аналогічно. Подібні схеми можуть бути використані для вимірювання фазних струмів і напруг. Для вимірювань струмів і напруг у трифазних ланцюгах можна використовувати засоби вимірювань цих вели-

чин, призначені для однофазних ланцюгів. Крім цих засобів, промисловістю випускаються спеціальні прилади для вимірювання в трифазних ланцюгах, що дозволяють більш швидко й зручно виконати необхідні вимірювання. Наприклад, цифровий комбінований прилад типу Ф48611 призначений для вимірювань діючих значень струму у фазах I_A, I_B, I_C і напруг U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} й інших величин. Прилад використовується в комплекті із зовнішніми вимірювальними трансформаторами струму 10 000 А/5 А, трансформаторами напруги 10 000 В/100 В і іншими допоміжними засобами. Режим вимірювань може бути ручний й автоматичний, при якому прилад забезпечує почергове вимірювання кожної вимірюваної величини. Результати вимірювань відтворюються з урахуванням коефіцієнтів трансформації вимірювальних трансформаторів. Для вимірювань струмів, напруг й інших величин у трифазних ланцюгах застосовують також вимірювальні комплекти, наприклад, типу ДО506 (для трипровідних мереж) і типу ДО505 (для трьох- і чотирипровідних мереж).

Вимірювання середньовипрямлених $X_{срв}$ й амплітудних X_m значень синусоїдальних струмів і напруг труднощів не викликають, тому що ці значення однозначно пов'язані з діючим значенням X синусоїди: $X_{срв} = X/1,11$ і $X_m = \sqrt{2} X$. Для вимірювань середньовипрямлених струмів і напруг, форма кривої яких відрізняється від синусоїдальної, потрібно використовувати засоби вимірювань з вихідним сигналом, що обумовлюється середньовипрямленим значенням вхідної величини. До таких засобів належать випрямні прилади й деякі електронні й цифрові прилади. При градуїровці цих засобів у діючих значеннях синусоїди вимірюване середньовипрямлене значення знаходять, ділячи показання приладів на коефіцієнт 1,11. Погрішність від зміни форми кривої струмів і напруг у цих приладів тим менше, ніж ширше їхній частотний діапазон. Для вимірювань амплітудних значень струмів і напруг, форма кривої яких відрізняється від синусоїдальної, потрібно використовувати засоби вимірювань, вихідний сигнал яких визначається амплітудним значенням вхідної величини. До таких засобів належать деякі цифрові прилади. При градуїровці цих приладів у діючих значеннях синусоїди вимірюване амплітудне значення знаходять, множачи показання приладів на коефіцієнт $\sqrt{2}$. Для вимірювань амплітуд імпульсних струмів і напруг застосовують імпульсні електронні прилади.

Середнє значення змінного струму або напруги характеризує постійну складову, що міститься у вимірюваному струмі або напрузі.

Для вимірювання середніх значень змінних струмів і напруг звичайно застосовують магнітоелектричні прилади.

Миттєві значення змінних струмів і напруг вимірюють приладами, що реєструють, і електронними осцилографами. Варто мати на увазі, що за миттєвим значенням можна визначити й інші значення струмів і напруг (середні, середньовипрявлені, діючі, амплітудні).

Вимірювання електричних зарядів

Особливість вимірювань зарядів полягає в тому, що об'єкти досліджень, заряди яких вимірюють, є дуже малопотужними і з високим внутрішнім опором. Тому вимірювальні кола засобів вимірювань зарядів можуть будуватись з використанням вимірювальних підсилювачів із дуже високим входним опором. Приклад такого вимірювального кола наведений на рисунку 9.11. В цьому колі використовується неінвертуючий підсилювач на основі операційного підсилювача з входним каскадом на польовому транзисторі. Напряга, що надходить на вхід підсилювача

$$U_{вх} = \frac{q}{C} \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC},$$

де C - еквівалентна ємність паралельно з'єднаних ємності досліджуваного об'єкта, кабелю та входної ємності вимірювального кола; R — еквівалентний опір паралельно з'єднаних опору досліджуваного об'єкта, опору ізоляції кабелю та входного опору вимірювального кола.

Вихідна напруга підсилювача

$$U_{вих} = \frac{q}{C} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}.$$

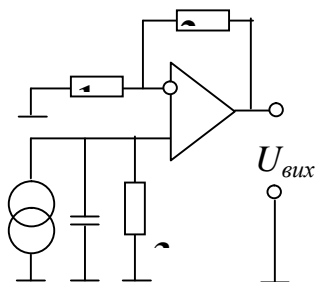


Рисунок 9.11 – Вимірювальне коло перетворювача заряду

Основним недоліком такої схеми є залежність вихідної напруги від ємності, основною складовою якої є ємність кабелю, яка суттєво змінюється залежно від положення кабелю, температури та вологості.

Сьогодні поряд з підсилювачами напруги у вимірювальних колах засобів вимірювань зарядів використовуються перетворювачі заряду в напругу (рисунок 9.12). Їх, звичайно, називають підсилювачами заряду (інтегральними

підсилювачами струму). Якщо конденсатор попередньо розряджений, то при надходженні на вхід підсилювача за схемою (рис. 9.12,а) електричного заряду $q_{\text{вх}}$ на його виході за умови що $k \gg 1$ одержимо

$$U_{\text{вих}} = -\frac{q_{\text{вх}}}{C}.$$

Для періодичного розряду конденсатора перед кожним наступним вимірюванням передбачений ключ S.

Підсилювач заряду за схемою на рисунку 9.12,б дозволяє отримати високий коефіцієнт підсилення без особливого зменшення ємності C . Оскільки для такого підсилювача

$$U_{\text{вих}} = -\frac{q_{\text{вх}}}{C} \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right),$$

то підвищення коефіцієнта підсилення може бути здійснено за рахунок відношення R_2/R_3 .

9.2 Вимірювання потужності, енергії та показників якості електроенергії

Загальні відомості

Потужність та енергія є основними характеристиками більшості фізичних об'єктів процесів та явищ. Тому вимірювання цих величин займає значне місце серед методів вимірювань фізичних величин. У зв'язку з величезним зростанням споживання енергії, пошуків нових джерел енергії, повсюдним впровадженням заходів з економії енергетичних ресурсів все більшого значення набуває підвищення точності вимірювань потужності та енергії.

У сучасній практиці доводиться вимірювати потужності від частот піковат (потужність сигналів радіолокаційних станцій) до десятків гігават (потужність сучасних електричних станцій) і енергій відповідно від $10^{-20} \dots 10^{-25}$ Дж (енергія радіосигналу за секунду) до $10^{18} \dots 10^{20}$ Дж (енергія, яку виробляють електричні станції за один рік).

Як і інші енергетичні електричні величини, потужність і енергію необхідно вимірювати в широкому діапазоні частот – від нуля (постійний струм) до 10^9 Гц і більше.

Потужність в електричному полі постійного струму можна подати як:

$$P = UI \quad ; \quad P = I^2 R; \text{ або } P = \frac{U^2}{R},$$

де I - струм в колі; U - спад напруги на опорі R .

Активна потужність в однофазному електричному колі змінного струму визначається як середнє значення потужності за період T :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt,$$

де u , i та p – відповідно, миттєві значення напруги, струму та потужності.

У випадку, коли струм та напруга є синусними функціями часу, активна потужність визначається як

$$P = UI \cos \varphi.$$

Множник $\cos \varphi$ називають коефіцієнтом потужності, а добуток $UI = S$ – повною потужністю (при чисто активному навантаженні, тобто при $\cos \varphi = 1$).

При розрахунку різних електротехнічних пристроїв і для оцінки їх ефективності користуються поняттям реактивної потужності, яка для синусоїдного процесу визначається як

$$Q = UI \sin \varphi.$$

У загальному випадку змінного періодичного процесу з несинусоїдною формою кривих струму та напруги активна потужність знаходиться як сума потужностей гармонічних складових:

$$P = \sum_{k=1}^n P_k = \sum_{k=1}^n U_k I_k \cos j_k$$

Коефіцієнт потужності визначається як відношення активної потужності до повної

$$k_j = \frac{P}{S}.$$

Для багатофазного кола активна та реактивна потужності визначаються як

$$P = \sum_{i=1}^n U_{j_i} I_{j_i} \cos j_i ; \quad Q = \sum_{i=1}^n U_{j_i} I_{j_i} \sin j_i .$$

де U_{j_i} , та I_{j_i} , - діючі значення фазних напруг та струмів, j_i - кут фазового зсуву між відповідними фазними напругами та струмами; n - кількість фаз.

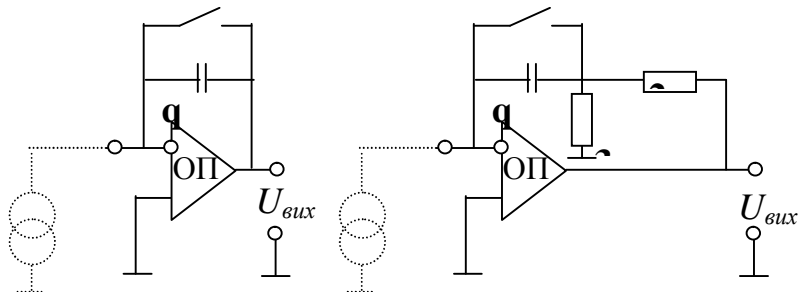


Рисунок 9.12 – Схеми підсилювачів заряду (інтегральних підсилювачів струму)

Вирази для електричної енергії, що є інтегралом від потужності по часу, отримують інтегруванням наведених вище виразів для потужності. Тому лічильник електричної енергії складається з вимірювального перетворювача потужності та інтегратора, яким є механічний або електричний лічильник.

Вимірювання потужності постійного та однофазного змінного струму

Для вимірювання потужності в колах постійного струму і змінного струму частотою 50...1000 Гц; використовуються переважно електродинамічні та феродинамічні ватметри. Ці прилади, особливо електродинамічні ватметри, використовуються також для вимірювань у звуковому діапазоні частот - до 10...50 кГц. У цьому випадку вони мають або фіксовані частоти або порівняно вузький частотний діапазон.

При вимірюванні на постійному струмі, а також на змінному струмі частотою до 200...400 Гц похибки електродинамічних ватметрів становлять 0,1 % і більше, а феродинамічних - не менше 0,2 %. При цьому похибка переходу від постійного струму до змінного частотою не вище 200 Гц у перших дорівнює 0,02...0,1 %, у других - 0,1...0,5 %.

Границі вимірювань електро- та феродинамічних ватметрів звичайно не нижче відповідно 0,1 А та 30 В. Розширення границь вимірювань у бік малих значень напруги та струму, зменшення споживання від досліджуваного об'єкта досягають попереднім підсиленням

вхідних параметрів. Відомі електродинамічні ватметри (класу 0,05...0,1) з підсилювачами для діапазону частот до 10^4 Гц.

Промисловістю випускаються ватметри для вимірювань потужності в колах постійного струму, в однофазних та трифазних колах змінного струму класів точності 0,1...2,5.

Існує також широка номенклатура самописних ватметрів. Для реєстрації потужності в колах звукової частоти використовуються осцилографічні ватметри.

Електродинамічні та феродинамічні ватметри здебільшого градууються при $\cos\varphi = 1$. При вимірюваннях активної потужності в колах з малим $\cos\varphi$ можливі великі похибки за рахунок дуже малих показів, а також через наявність кутової похибки d_K , яка збільшується зі зменшенням $\cos\varphi$. У таких випадках необхідно використовувати так звані малокосинусні ватметри з $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,1$ або $0,2$.

Електростатичні ватметри доцільно використовувати для вимірювань потужності змінного струму при частотах понад 1 кГц включно до декількох мегагерц і при малих $\cos\varphi$. В цих умовах електростатичні ватметри забезпечують вищу точність, ніж електродинамічні. Електростатичні ватметри класів 0,1 та 0,2 використовують головним чином як зразкові прилади для перевірки інших типів ватметрів на підвищених частотах,

Одним з прикладів реалізації ватметрів прямим перемноженням вхідних величин є застосування перетворювачів Холла. При цьому в струмове коло ватметра вмикається обмотка, яка створює магнітне поле, а допоміжний струм живлення перетворювача Холла пропорційний вимірюваній напрузі. На основі перетворювачів Холла створені ватметри з похибкою 0,2...0,5% для вимірювань активної потужності в однофазних колах змінного струму в діапазоні частот від 40 до 450 Гц.

Ватметри, в основу принципу дії яких закладений модуляційний метод, забезпечують достатньо високу точність вимірювання активної потужності в промисловій електромережі – до 0,02...0,05% при коефіцієнті потужності, що дорівнює одиниці. Перевагою таких ватметрів є можливість порівняно простого отримання результату у вигляді цифрового, коду. Частотний діапазон вхідних сигналів для таких ватметрів не перевищує 20 кГц.

Для отримання добутку двох величин на підвищених частотах (до 10 МГц) використовують пристрої з прямим і непрямим перемноженням вхідних величин. Найпоширенішими з перших є перемножу-

вачі, побудовані на диференційних транзисторних парах, з використанням методу змінної крутизни. Вихідна напруга такого пристрою пропорційна добуткові двох вхідних напруг. Під'єднання до виходу цього перемножувача пристрою усереднення дозволяє отримати на виході напругу, що дорівнює потужності. Цей метод перетворення покладено в основу спеціалізованих інтегральних мікросхем, наприклад AD734 фірми Analog Devices і інших, із смугою пропускання вхідних сигналів до 1...10МГц та похибкою перемноження в межах $\pm 0,25...1,0\%$.

Здебільшого ватметри на основі непрямого перемноження вхідних величин реалізують залежність вигляду $4u_1u_2 = (u_1+u_2)^2 - (u_1 - u_2)^2$. Точність таких ватметрів залежить від похибок і неідеальностей їх основних вузлів – квадраторів. Незважаючи на порівняну простоту таких ватметрів, їх точність не перевищує $\pm 1,0\%$. При вимірюваннях в промисловій електромережі широке застосування знайшли ватметри, в яких здійснюється проміжне перетворення миттєвих значень напруги і струму в цифровий код за допомогою АЦП з подальшим обчисленням за вищевказаним алгоритмом значень активної, реактивної і повної потужності. Таким вимірювачам потужностей властиві висока швидкодія (час вимірювання - від двох до десяти періодів повторення промислової частоти), висока точність вимірювання (похибка в межах $\pm 0,05...0,20\%$) та зручність форми результату вимірювань для подальшого використання.

Потужність в колі постійного струму можна також визначити опосередковано, вимірюючи струм та напругу (рис. 9.13):

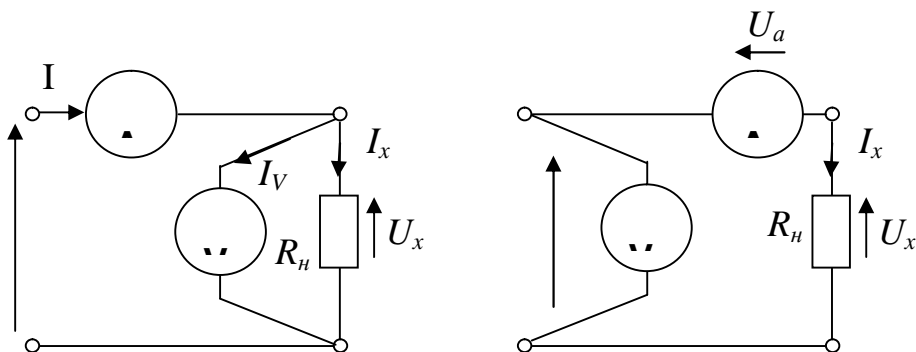


Рисунок 9.13 – Схеми вимірювання потужності в колах постійного струму за допомогою амперметра і вольтметра

$$P = U \cdot I,$$

де U та I - покази вольтметра і амперметра, відповідно.

Похибка вимірювання потужності в цьому випадку складається з похибки вольтметра, похибки амперметра і методичної похибки. Остання зумовлена споживанням потужності приладами і залежить від схеми їх ввімкнень. Для схеми (рис. 9.13.а) маємо: $U = U_x$,

$$I = I_X + I_V, \text{ звідки } P_I = U \cdot (I_X + I_V) = P_x + P_V,$$

де $P_x = U \cdot I_x$ - значення вимірюваної потужності, $P_V = U \cdot I_V$ - потужність, яку споживає вольтметр.

Значення потужності, визначене за показами вольтметра і амперметра у цій схемі перевищує P_x на величину P_V , тобто спостерігається додатна відносна методична похибка

$$d_{M1} = \frac{P_V}{P_x} = \frac{R_V}{\frac{U^2}{R_H}} = \frac{R_H}{R_V} \cdot 100\%.$$

Відповідно для схеми (рис. 9.13.б) маємо:

$$I = I_X \quad ; \quad U = U_X + U_a,$$

звідки

$$P_2 = I \cdot (U_X + U_a) = P_x + P_a,$$

а відносна методична похибка

$$d_{M2} = \frac{P_a}{P_x} = \frac{I^2 R_a}{I^2 R_H} = \frac{R_a}{R_H} \cdot 100\%.$$

Отже, значення похибки методу для обидвох схем залежить від відношення потужності, яку споживає прилад, до вимірюваної потужності. При вимірюванні порівняно великих потужностей це відношення нехтовно мале. При вимірюванні малих потужностей необхідно вибирати схему, яка забезпечує меншу похибку методу. За необхідності цю похибку можна звести до незначної, ввівши поправку на потужність, яку споживає відповідний прилад, і визначити P_x за формулою:

$$\text{- для схеми рис. 9.13,а } P_x = UI - P_V = UI - \frac{U^2}{R_V};$$

$$\text{- для схеми рис. 9.13,б } P_x = UI - P_a = UI - I^2 R_a.$$

Значення P_v та P_a можна визначити, враховуючи значення параметрів приладів та їх показів.

Для вимірювань потужності за допомогою вольтметра та амперметра найчастіше використовують магнітоелектричні прилади, які мають широкий діапазон вимірювань, порівняно високу точність (до 0,1%). Для вимірювань з вищою точністю можна використати цифрові прилади. При використанні останніх відпадає потреба враховувати споживання приладів, оскільки воно незначне.

За наявності ватметрів з відповідною межею вимірювань безумовно перевагу треба віддати прямому вимірюванню потужності ватметром як на постійному струмі, так і на змінному струмі. Як і у випадку вимірювань за допомогою вольтметра та амперметра, існують два види схеми вимірювань потужності ватметром (рисунки 9,14,а і б). Вимірювання потужності супроводжуються одночасним контролем значень напруги та струму. Тому в схемах передбачені контрольні вольтметр та амперметр. Результат вимірювань визначається за показами ватметра:

$$P = C_w n,$$

де C_w та n - ціна поділки ватметра і кількість поділок, на які відхилиться вказівник. Не важко перекоонатись, що для схем (рисунки 9,14,а і б) ватметри, крім потужності досліджуваного об'єкта, показують потужність, яку споживають вимірювальні прилади. Зокрема, для схеми (рисунк 9,14, а) покази ватметра

$$P_1 = C_w n = P_v + P_x + P_{UW},$$

а методична похибка

$$d_{M1} = \frac{P_v + P_{UW}}{P_x},$$

де P_v та P_{UW} - потужності, що їх споживають вольтметр та коло напруги ватметра. Для схеми (рисунк 9,14,б) відповідно

$$P_2 = C_w n = P_n + P_x + P_{IW};$$

$$d_{M2} = \frac{P_a + P_{IW}}{P_x}.$$

де P_a та P_{IW} - потужності, що їх споживають амперметр та струмове коло ватметра.

При вимірюванні великих потужностей, коли потужність, яку споживають прилади, і відповідно похибка методу нехтовно малі, можна вибрати будь-яку із наведених двох схем. Під час вимірювання

малої потужності необхідно вибрати ту схему, для якої значення похибки методу буде малим.

Похибку методу можна зменшити до незначної, якщо ввести поправку на споживання приладів і визначити P_x за формулою:

- для схеми (рисунок 9.14,а):

$$P_x = C_w n - (P_V + P_{UW}) = C_w n - \left(\frac{U^2}{R_U} + \frac{U^2}{R_{UW}} \right);$$

- для схеми (рисунок 9.14,б):

$$P_x = C_w n - (P_n + P_{IW}) = C_w n - (I^2 R_a + I^2 R_{IW}).$$

На практиці для врахування споживання приладів при вимірюванні потужності користуються схемою (рисунок 9.14,а), оскільки потужність, яку споживають вольтметр та коло напруги ватметра, можна визначити досить точно: опір вольтметра та опір кола напруги ватметра задаються для цих приладів з похибкою, яка не перевищує їх клас точності. Опори амперметра та струмового кола ватметра відомі дуже наближено. Зауважимо, що при використанні в схемі (рис. 9.14,а) електростатичного чи електронного вольтметра їх споживання можна нехтувати.

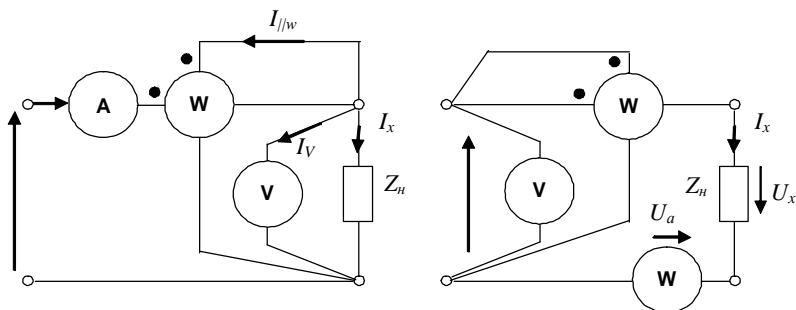


Рисунок 9.14 – Схеми вимірювань потужності в колах постійного та однофазного змінного струму

Електродинамічні і феродинамічні ватметри градуують здебільшого при $\cos\varphi_{\text{ном}} = 1$. Для вимірювань малих потужностей звичайно при малих значеннях $\cos\varphi$ необхідно використовувати так звані малокосинусні ватметри з $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,1$ або $0,2$, які в цьому випадку забезпечують значно вищу точність завдяки значно більшому відхиленню вказівника і малому значенню кутової похибки. Електродинамічні ма-

локосинусні ватметри дозволяють вимірювати потужність, починаючи з $0,1 \text{ Вт}$, а електронні - з 10^{-7} Вт .

Електростатичні ватметри доцільно використовувати для вимірювань потужності змінного струму при частотах понад 1 кГц аж до декількох мегагерц і при малих $\cos\phi$. Електростатичні ватметри класів $0,1$ та $0,2$ використовують головним чином як зразкові для інших ватметрів на підвищених частотах.

Безпосереднє ввімкнення ватметра в коло здійснюється звичайно при значеннях струму до 5 А і напруги до 600 В . Якщо вимірюваний струм більший за 5 А , для розширення границь вимірювань ватметра використовують вимірювальні трансформатори струму, а при напругах понад 600 В - вимірювальні трансформатори струму та напруги (рисунок 9.15). З міркувань техніки безпеки заземляють вторинні обмотки та корпуси вимірювальних трансформаторів в схемі на рисунку 9.15,б, а ввімкнення вимірювального трансформатора напруги здійснюють через плавкі запобіжники.

Результати вимірювань для схеми рисунку 9.15,а

$$P_x = C_w n k_I$$

а для схеми рисунку 9.15,б

$$P_x = C_w n k_I k_U$$

де k_I та k_U - коефіцієнти трансформації вимірювальних трансформаторів струму та напруги.

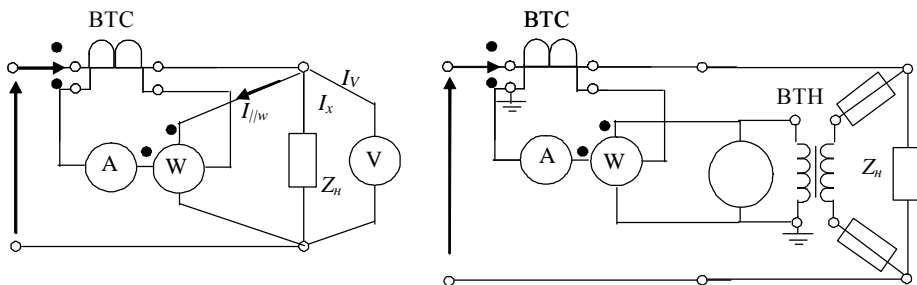


Рисунок 9.15 – Схеми вимірювань потужності з використанням вимірювальних трансформаторів струму та напруги

Відносна похибка вимірювання потужності дорівнюватиме сумі похибок ватметра та вимірювальних трансформаторів. Щоб ця похибка була можливо меншою, вимірювальні трансформатори повинні бути вищого класу точності, ніж ватметр. Зауважимо також, що наявність кутових похибок j_U вимірювальних трансформаторів напруги

та j_I вимірювальних трансформаторів струму може бути причиною великих кутових похибок ватметра. Дійсно, без урахування кутових похибок трансформаторів

$$P_w = UI \cos j ,$$

а з їх урахуванням

$$P_w^* = UI \cos(j + \Delta j) ,$$

де $\Delta j = j_U - j_I$.

Абсолютна кутова похибка ватметра

$$\Delta P_{wk} = P_w^* - P_w = UI \cos j [\cos \Delta j - 1 - \sin \Delta j \operatorname{tg} j] ,$$

а відносна кутова похибка

$$d_{wk} = \cos \Delta j - 1 - \sin \Delta j \operatorname{tg} j .$$

Розклавши $\sin Dj$ та $\cos Dj$ в степеневий ряд, матимемо:

$$d_{wk} = 1 - \frac{\Delta j^2}{2} - 1 - \Delta j \operatorname{tg} j = -\frac{\Delta j^2}{2} - \Delta j \operatorname{tg} j .$$

При малих значеннях Dj (на рівні $1^\circ \dots 2^\circ$ і менше) вираз похибки ватметра спрощується: $d_{wk} = -\Delta j \operatorname{tg} j$.

Отже, кутові похибки вимірювальних трансформаторів можуть бути причиною великих кутових похибок ватметра, особливо при порівняно великих кутах зсуву фаз. Так, при $j = 30^\circ$ і $Dj = 1^\circ$ кутова похибка ватметра становитиме -1% .

Вимірювання реактивної потужності в однофазних колах має певне значення при аналізі процесів обміну електроенергією в мережі, а також з метою дослідження надійності ізоляції в електричних машинах та мережах в робочому режимі.

Розповсюджені ватметри, в яких за допомогою відповідного фазоповертаючого пристрою здійснюється повертання, здебільшого, вектора напруги на 90° з подальшим використанням традиційного ватметра. Недоліком таких приладів є поява суттєвої методичної похибки вимірювання, особливо у випадку нелінійних спотворень форми кривої напруги. При цьому, якщо вектор першої гармоніки напруги зсувається на кут 90° , то вектори вищих гармонік – на зовсім інші кути. Тому частіше значення реактивної потужності однофазного споживача визначають, вимірявши його активну та повну потужності за допомогою ватметра, амперметра та вольтметра:

$$Q = \sqrt{(UI)^2 - P^2} .$$

Вимірювання активної та реактивної потужності в мережах трифазного змінного струму

Будь-яка трифазна чотирипровідна мережа може розглядатись як поєднання трьох однофазних мереж зі спільним (нульовим) проводом. Вимірювання активної потужності такої мережі може здійснюватись вимірюванням активної потужності кожної з фаз щодо нульового проводу за допомогою трьох однофазних ватметрів.

У трифазній мережі без нульового проводу (трипровідна мережа) навіть при несиметрії струмів та напруг активна потужність може бути визначена за показами двох ватметрів активної потужності, струмові кола яких вмикаються в будь-які дві лінії, а кола напруги поєднуються до них генераторними затискачами, інші затискачі кола напруги - до вільної лінії (рисунок 9.16). Значення активної потужності трифазного споживача у цьому випадку визначиться за алгебраїчною сумою показів двох ватметрів:

$$P_{3\phi} = P_{W1} + P_{W2}$$

Стосовно цієї схеми необхідно зробити певні застереження. Зробимо це на прикладі симетричної системи. Враховуючи фазові зсуви між відповідними напругами та струмами при повній симетрії, коли

$$U_{12} = U_{23} = U_{31} = U_{\text{Л}}, \quad \text{а} \quad I_1 = I_2 = I_3 = I_{\phi},$$

$j_1 = (U_1 \wedge I_1) = j_2 = (U_2 \wedge I_2), j_3 = (U_3 \wedge I_3) = j$, покази ватметрів будуть

$$P_{W1} = U_{\text{Л}} I_{\phi} \cos(30^\circ + j) \quad P_{W2} = U_{\text{Л}} I_{\phi} \cos(30^\circ - j),$$

звідки видно, що навіть при повній симетрії покази ватметрів можуть бути однаковими лише при $\phi = 0$. У загальному випадку їх покази різні. Так, при $\phi = 60^\circ$ (тобто $\cos\phi = 0,5$ – індуктивне навантаження)

матимемо $P_{W1} = 0$ і $P_{W2} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{\text{Л}} I_{\phi}$, а при $\phi = 90^\circ$ покази ватметрів будуть однаковими, але з протилежними знаками:

$$P_{W1} = -\frac{1}{2} U_{\text{Л}} I_{\phi}, \quad P_{W2} = \frac{1}{2} U_{\text{Л}} I_{\phi}, \quad \text{а отже} \quad P_{W1} + P_{W2} = 0.$$

Підкреслимо, що для визначення потужності трифазного споживача необхідно брати алгебричну суму показів ватметрів, а тому необхідно чітко дотримуватись правильного під'єднання генераторних затискачів ватметра.

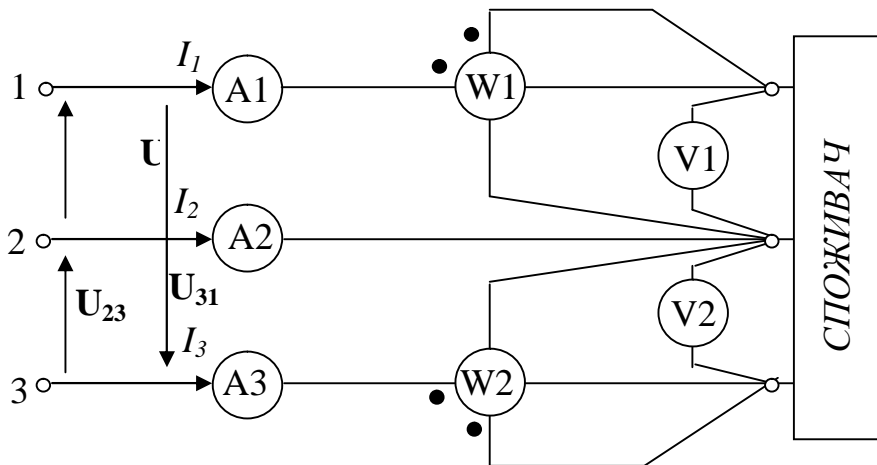


Рисунок 9.16 – Схема вимірювання активної потужності трифазного споживача

Існують спеціальні трифазні двоелементні (для трипровідної мережі) та триелементні (для чотирипровідної мережі) ватметри, окремі вимірювальні механізми яких встановлені на спільній осі, що дає можливість прямого вимірювання трифазної потужності.

Для вимірювання реактивної потужності в колах трифазного струму використовують однофазні ватметри активної потужності або трифазні вимірювачі реактивної потужності – варметри.

За повної симетрії для вимірювань реактивної потужності тричотирипровідного кола можна використати один ватметр, струмове коло якого вмикається послідовно в одну з трьох ліній, а коло напруги під'єднується до двох інших ліній. Генераторний затискач необхідно під'єднувати до лінії, що йде наступною в порядку чергування фаз відносно ліній, в яку ввімкнена струмова обмотка. Можливі варіанти такого увімкнення подані нарис. 9.17.

Враховуючи фазові зсуви між відповідними напругами та струмами, покази ватметрів дорівнюватимуть, відповідно:

$$P_{W1} = U_{23} I_1 \cos(90^\circ - j_1) = U_{\text{Л}} I_{\phi} \sin j_1 = \sqrt{3} U_{\phi} I_{\phi} \sin j_1$$

$$P_{W2} = U_{31} I_2 \cos(90^\circ - j_2) = \sqrt{3} U_{\phi} I_{\phi} \sin j_2$$

$$P_{W3} = U_{12} I_3 \cos(90^\circ - j_3) = \sqrt{3} U_\phi I_\phi \sin j_3.$$

Отже, значення реактивної потужності трифазного споживача визначимо з виразу:

$$Q_{3\phi} = \frac{P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}}{\sqrt{3}}.$$

Зауважимо, що наведена схема може використовуватися лише при простих асиметриях, наприклад при асиметрії струмів.

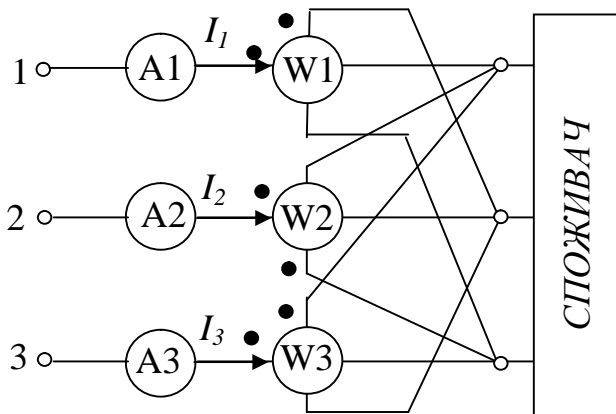


Рисунок 9.17– Схема вимірювання реактивної потужності трифазного споживача

Вимірювання енергії

Для вимірювань та обліку енергії постійного струму застосовують електродинамічні, та феродинамічні лічильники електричної енергії. Вони будуються на базі вимірників активної потужності, з подальшим інтегруванням їх вихідного сигналу за виразом $W = \int_{t_1}^{t_2} P dt$ (тут

$t_1 - t_2$ – інтервал часу, протягом якого вимірюється енергія). В окремих випадках, коли основним показником технологічного процесу є кількість спожитих ампер-годин або вольт-годин (в гальванічних ваннах під час зарядження акумуляторів і т.д.) застосовують лічильники ампер-годин або вольт-годин.

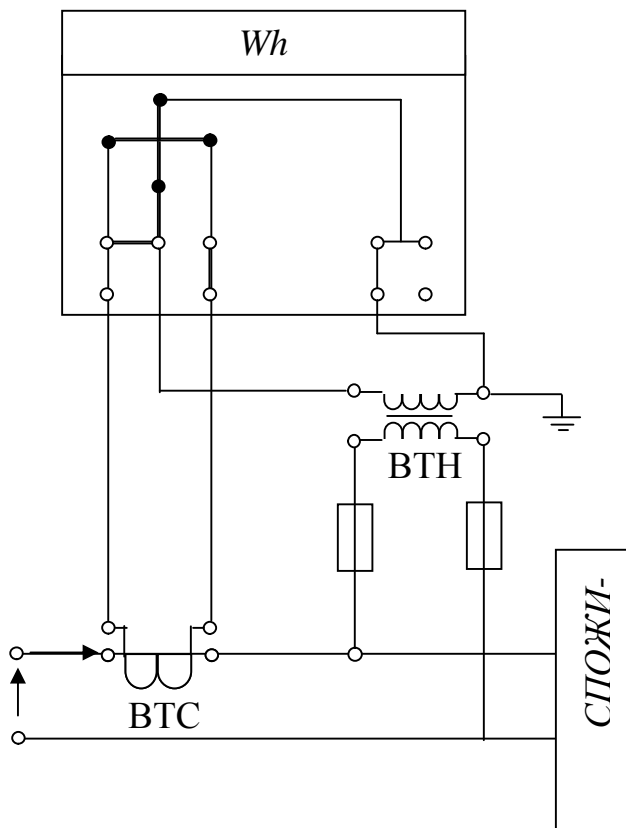


Рисунок 9.18 – Схема ввімкнення однофазного лічильника

В колах змінного струму промислової частоти вимірювання та облік електричної енергії здійснюється головним чином за допомогою індукційних лічильників електричної енергії. В найзагальнішому випадку, тобто при вимірюванні енергії порівняно потужних споживачів, лічильник вмикається через вимірювальні трансформатори струму, а при високих напругах – через вимірювальні трансформатори струму і вимірювальні трансформатори напруги (рисунок 9.18).

Основним недоліком індукційних лічильників є їх порівняно невисокий клас точності (не краще за 1,0) та вузький частотний діапазон

(здебільшого 45...62 Гц), наявність вищих гармонік суттєво погіршує їхню роботу.

Перспективнішим є застосування, особливо на електротранспорті та для обліку енергії в потужних плавильних печах, електронних лічильників.

Структурна схема такого лічильника наведена на рисунку 9.19.



Рисунок 9.19 – Структурна схема електронного лічильника електричної енергії

Лічильник виконується на базі первинного перетворювача потужності ППН в напругу $U_p = k_p P$. А оскільки одним з найзручніших варіантів інтегрування напруги є її проміжне перетворення в частоту, в схемі передбачений перетворювач напруги в частоту ПНЧ і подальше інтегрування частоти f_p , (підррахунок імпульсів) за допомогою інтегровального пристрою ПІ. Вихідний код N і буде пропорційний спожитій енергії за відповідний проміжок часу. Здебільшого як інтегровальний пристрій використовують мікропроцесор.

Похибка таких лічильників для обліку енергії промислової частоти при коефіцієнті потужності в межах 1,0...0,5 становить $\pm 0,1...1,0$ %.

Сьогодні в енергосистемах все ширше застосування знаходять вимірювально-інформаційні системи, які поряд з обліком споживаної електроенергії дають можливість здійснювати вимірювання та контроль цілого ряду параметрів, що характеризують електропостачання. Зокрема такі системи дозволяють здійснювати збирання, опрацювання та накопичення інформації про споживання електроенергії (активної, реактивної) за окремими підрозділами, агрегатами протягом розрахункового періоду часу (за добу, місяць, квартал) визначення середнього за певний проміжок часу (хвилина, година, доба) значення активної та реактивної енергії та окремо – в години максимуму та мінімуму навантаження енергосистеми; прогнозування споживання, енергії та сигналізацію перевищення заданої споживаної потужності; вивід інформації в код для її реєстрації та передавання в систему АСУ підприємства чи енергосистеми і ін.

Застосування таких систем дає можливість суттєво покращити використання енергоресурсів і забезпечити народному господарству значний економічний ефект.

Вимірювання показників якості електроенергії

Науково-технічний прогрес зумовив широке застосування електричної енергії в різних сферах діяльності людини. Електроенергія відіграє роль основного продукту, завдяки якому відбуваються виробничі процеси створення товарів та надання послуг. Поряд із завданнями максимальної економії енергетичних ресурсів актуальними проблемами є зменшення втрат електроенергії в електричних мережах та підвищення її якості протягом всього шляху її проходження від виробника до споживача.

Під якістю електроенергії розуміють ступінь відповідності її параметрів певним встановленим нормам значень. Параметром електроенергії називають величину, яка кількісно характеризує яку-небудь властивість електроенергії.

Норми якості електроенергії встановлюють за показниками її якості – величинами, які визначають якість електроенергії за одним або кількома її параметрами.

Вимогами міждержавного стандарту ГОСТ 13109-97 встановлено широке коло норм та показників якості електроенергії, що охоплюють більшість можливих варіантів нормальної експлуатації споживачами електричних мереж. У практиці аналізу роботи енергосистем здебільшого використовують групи показників якості електроенергії за такими ознаками:

- відхилення напруги (від номінального значення);
- коливання напруги;
- несинусоїдальність напруги;
- відхилення частоти;
- провал напруги та тимчасові перенапруги;
- несиметрія напруг (для трифазних мереж).

Відхилення напруги. Відхилення напруги від її номінального значення характеризується показником усталеного відхилення напруги DU_y на виводах приймачів електроенергії, нормальне допустиме значення якого дорівнює $\pm 5\%$, а гранично допустиме – $\pm 10\%$ від номінальної напруги $U_{ном}$.

Усталене відхилення напруги обчислюють за виразом:

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100\% ,$$

де $U_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N U_i^2}{N}}$ - усереднене середньоквадратичне значення напруги

з N спостережень (не менше 18 спостережень) за інтервал часу в одну хвилину; $U_{\text{ном}}$ - номінальна лінійна чи фазна напруга.

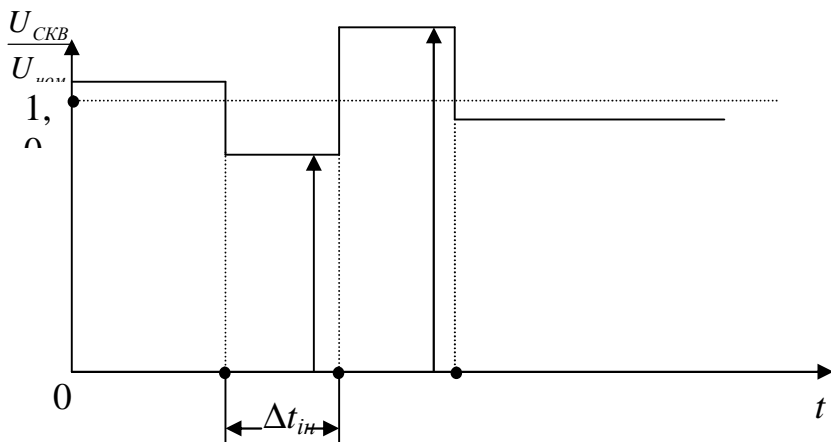


Рисунок 9.20 – Розмах зміни напруги для коливань напруги за формою меандра

Здебільшого усталене відхилення напруги dU_y визначається за показами автономних цифрових вольтметрів або як таких, що входять у склад складніших приладів чи інформаційно-вимірювальних систем.

Колівання напруги. Одним із основних показників, що характеризують коливання напруги, є розмах зміни напруги dU_t . Граничнодопустиме значення розмаху зміни напруги, обвідна якої, а отже, і середньоквадратичне значення напруги, має форму меандра (рисунок 9.20) і нормується стандартом ГОСТ 13109-97. Залежно від інтервалу Dt_{in} між змінами напруги, dU_t не повинен перевищувати $\pm 4\%$ при $Dt_{in} = 60$ хв і $\pm 0,4\%$ при $Dt_{in} = 0,1$ хв.

Розмах зміни напруги визначають за формулою:

$$\Delta U_t = \frac{U_i - U_{i+1}}{U_{\text{ном}}} 100\% ,$$

де U_i та U_{i+1} – значення екстремумів, що ідуть один за одним і ви- значаються на кожному на півперіоді основної частоти.

Несинусоїдальність напруги. Несинусоїдальність напруги характеризується коефіцієнтом спотворення форми кривої напруги та коефіцієнтом n -ї гармонічної складової.

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U ви- значається як

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^m U_n^2}}{U_1} 100\% ,$$

де U_1 – діюче значення напруги основної частоти; U_n – діюче значення n -ї гармоніки, причому в ГОСТ 13109-97 – регламентується $m = 40$.

Допускається визначити K_U як

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^m U_n^2}}{U_{\text{ном}}} 100\% .$$

Значення коефіцієнта n -ї гармонічної складової визначається як

$$K_{U_n} = \frac{U_n}{U_{\text{ном}}} 100\% .$$

Оцінюють значення цих коефіцієнтів як результат усереднення N їх вимірювань на інтервалі часу в $3s$. Кількість вимірювань повинна бути не менше ніж 9.

При цьому основними вимірювальними засобами є спектральні аналізатори та вимірювачі нелінійних спотворень електричних сигналів. Перші з них ґрунтуються на застосуванні системи фільтрів, кожен з яких налаштований на кратну основній частоту повторення. Останнім часом, завдяки розвиткові мікропроцесорів, використовують спеціальні алгоритми цифрових фільтрів, що базуються на опрацюванні миттєвих значень декретизованих сигналів. Такі прилади дають змогу отримувати спектральний розклад сигналів електромережі із задекларованою кількістю n гармонік з точністю не вище $\pm 1\%$. Другий вид пристроїв, що вимірюють лише значення k_U , будується на основі високодобротного фільтра, який відокремлює сигнал основної гармоніки від сумарного сигналу, залишаючи тільки сигнал, що характеризує вищі гармоніки, починаючи з другої. З відношення отриманого діючого значення напруги вищих гармонік до діючого значення напруги основної гармоніки U_1 , або номінальної напруги $U_{\text{ном}}$ знаходять коефі-

цієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги мережі k_U . Похибка вимірювання k_U при цьому становить не менше $\pm 0,5\%$.

Відхилення частоти. Відхилення частоти напруги змінного струму в електричних мережах характеризується показником відхилення частоти в $\pm 0,2$ Гц як нормально допустиме та $\pm 0,4$ Гц як гранично допустиме.

Вимірювання відхилення частоти Df здійснюють так. Для кожного i -го спостереження за встановлений проміжок часу вимірюють дійсне значення частоти і обчислюють усереднене значення частоти, як результат усереднення N спостережень f_i на проміжку часу 20 с за формулою

$$f_y = \frac{\sum_{s=1}^N f_s}{N}.$$

Кількість спостережень N повинна бути не менше 15.

Відхилення частоти визначають як

$$\Delta f = f_y - f_{\text{ном}},$$

де $f_{\text{ном}}$ - номінальне значення частоти.

Вимірювачі Df будуються здебільшого на основі цифрових схем визначення періоду повторення та частоти синусоїдальних сигналів, розглянутих вище, а також у наступному параграфі. При цьому точність вимірювання знаходиться в межах $\pm 0,05 \dots \pm 0,10\%$.

Провали напруги та тимчасові перенапруги. Провали напруги та тимчасові перенапруги можуть виникати в результаті перерегулювань систем стабілізації напруги або внаслідок комутаційних процесів мережі (рисунок 9.21).

Явище провалу напруги фіксується в момент часу $t_в$ коли з'являється різке зниження обвідної середньоквадратичного значення напруги на півперіоді основної частоти нижче від рівня $0,9U_{\text{ном}}$. Тривалість провалу $Dt_n = t_k - t_в$, де t_k - момент часу відновлення середньоквадратичного значення напруги за півперіод частоти мережі до значення $0,9U_{\text{ном}}$. Якісним показником провалу напруги є її глибина

$$\delta U_n = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{ном}}} 100\%,$$

де U_{min} - найменше зі всіх вимірних середньоквадратичних значень напруги.

Завдяки комутативним та атмосферним явищам в мережі найчастіше можливі два види різкого збільшення напруги. Перший з них

характеризується порівняно тривалим (до однієї хвилини) зростанням амплітуди напруги із збереженням форми сигналу, близької до синусоїдальної (рисунок 9.21,б). Це збільшення напруги називають часовою перенапругою. Початком цього явища вважають момент різкого перевищення амплітуди напруги U_m упродовж кожного півперіоду значення $1,1\sqrt{2} U_{ном}$ причому тривалість фронту такого зростання напруги не повинна перевищувати 5 мс, Закінчення перенапруги відбувається в момент повернення амплітуди контрольованої напруги до значення $1,1\sqrt{2} U_{ном}$. Інколи для визначення $\Delta t_{перU}$ використовують як граничне не амплітудне, а середньоквадратичне значення напруги ($1,1U_{ном}$). Крім тривалості $\Delta t_{перU}$, основним показником явища часової перенапруги вважають коефіцієнт часової перенапруги, що визначається з виразу

$$K_{перU} = \frac{U_{m\max}}{\sqrt{2}U_{ном}}$$

де $U_{m\max}$ – найбільше з виміряних за час контролю амплітудне значення вхідної напруги.

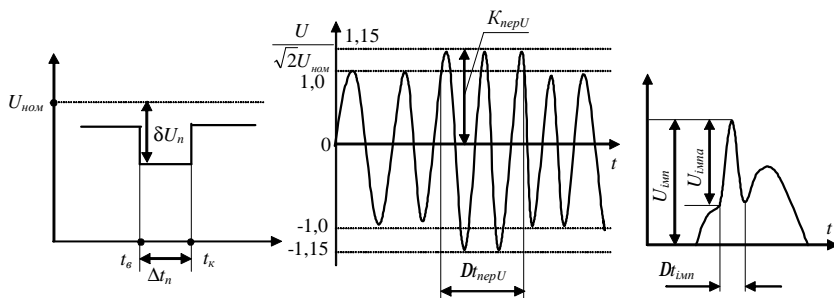


Рисунок 9.21 – Провал напруги (а); часова перенапруга (б) та імпульсне створення напруги (в)

Крім означених перевищень, в електричній мережі часто зустрічаються швидкі імпульсні спотворення форми напруги (рис. 9.21,в). Здебільшого тривалість таких одно- чи біполярних імпульсів становить $\Delta t_{имп} = 1\text{мкс}...5\text{мс}$. Розрізняють амплітуду власне імпульса $U_{a\text{имп}}$ відокремленого від кривої синусоїдальної напруги, та максимальне сумарне значення напруги $U_{имп}$ з урахуванням миттєвого значення си-

нусоїдальної напруги. Залежно від номінального значення напруги мережі $U_{ном}$ та її особливостей, максимальне значення $U_{имп}$ може сягати $(3...10) U_{ном}$. Так, наприклад, для мережі $U_{ном} = 220 \text{ кВ}$ – $(U_{имп})_{max}$ може досягати до 705 кВ .

Якщо для вимірювання показників часової перенапруги та провалів напруги здебільшого застосовують спеціалізовані цифрові вольтметри на основі АЦП та одно кристальних мікропроцесорів типу MCS[®] 51 чи з RISC-архітектурою, то для контролю імпульсів напруги частіше використовують імпульсні вольтметри. Найпростіші, але менш точні схеми з похибкою вимірювання в межах $\pm 1,0... \pm 5,0 \%$ реалізуються за допомогою різних варіантів випрямних схем амплітудного значення напруги на швидкодіючих напівпровідникових діодах. Застосування принципів побудови аналогових обчислювальних машин з різними функціональними і операційними перетворювальними схемами дає змогу точніше виділити момент появи і закінчення імпульсу на фоні синусоїдального сигналу напруги та визначити амплітуду імпульсу.

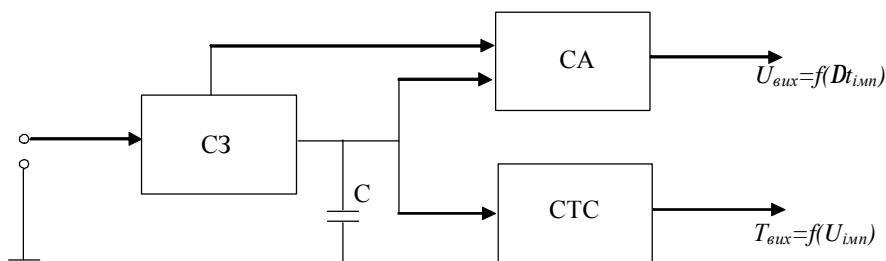


Рисунок 9.22 – Схема амплітудно-часового та часо-амплітудного перетворення імпульсів напруги

Один з варіантів реалізації таких вимірювачів з амплітудно-часовим перетворенням імпульсів напруги наведено на рисунку 9.22, де СЗ – схема заряду конденсатора С, СТС – стабілізатор струму розряду цього конденсатора, СА – схема аналізу розряду С.

Поява імпульсу напруги викликає заряд накопичу вального конденсатора до значення напруги, яке дорівнює амплітуді імпульсу $U_{имп}$. Після цього відбувається паралельне перетворення накопиченої напруги двома каналами. За допомогою вибраного режиму розрядження конденсатора, близького до лінійного, стабільним струмом схеми СТС на першому виході отримують прямокутний імпульс з періодом повторення $T_{вих} = f(U_{имп})$.

Похибка отриманого результату визначається явною не лінійністю розрядження конденсатора C і сягає $\pm 1,0 \dots \pm 2,0 \%$ для найменшої амплітуди імпульсу $(U_{\text{имп}})_{\text{min}} = 100 \text{ В}$ в мережі з $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$.

Одночасно схемою аналізу СА на другому виході формується напруга $U_{\text{вих}}$, пропорційна часу лінійного заряду конденсатора C , тобто

$$U_{\text{вих}} = \frac{k_t}{C} \int_0^{\Delta t_{\text{имп}}} i dt = \frac{k_t I \Delta t_{\text{имп}}}{C},$$

де I – струм заряду конденсатора, k_t – коефіцієнт пропорційності, що визначається особливостями схем СЗ та СА. Точність вимірювання мінімальних тривалостей $\Delta t_{\text{имп}}$ до 10 мкс та амплітуди імпульса до 100 В в мережі з $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$ становить $\pm 1,0 \dots \pm 2,5 \%$.

Несиметрія напруг. Відомо, що несиметричну трифазну систему напруг U_A, U_B, U_C можна розкласти на три симетричні системи – прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Для системи прямої послідовності, зображеної на векторній діаграмі (рисунок 9.23, а), зберігається та сама черговість векторів напруг, що й у розглянутій несиметричній системі. Тобто, якщо U_{1A} – вектор напруги прямої послідовності фази А, то для її інших векторів можна записати: $U_{1B} = a^2 U_{1A}$, $U_{1C} = a U_{1A}$. Причому вектор напруги прямої послідовності визначається з виразу:

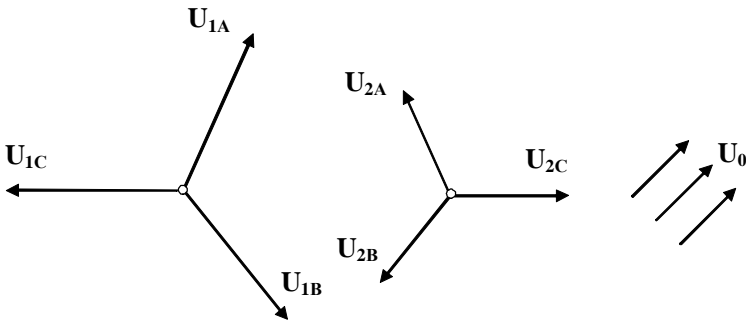


Рисунок 9.23 – Симетричні складові несиметричної системи напруг

$$U_{1A} = \frac{1}{3} (U_A + a U_B + a^2 U_C),$$

де a – фазний множник, який забезпечує повертання вектора на 120° і a^2 – на 240° :

$$a = e^{j(2/3)\pi} = -0,5 + j0,5\sqrt{3},$$

$$a^2 = e^{-j(2/3)\pi} = 0,5 - j0,5\sqrt{3},$$

де U_A, U_B, U_C – вектори фазних напруг несиметричної системи.

Вектори системи зворотної послідовності (рисунок 9.23, б) мають зворотну черговість орієнтації щодо первинної несиметричної трифазної системи, а напруга зворотної послідовності

$$U_{2A} = \frac{1}{3}(U_A + a^2U_B + aU_C),$$

$$U_{2B} = aU_{2A},$$

$$U_{2C} = a^2U_{2A}.$$

Система нульової послідовності складається з векторів, що збігаються по фазі (рисунок 9.23, в).

При цьому напруга нульової послідовності

$$U_{0A} = \frac{1}{3}(U_A + U_B + U_C).$$

Оскільки системи прямої, зворотної та нульової послідовностей симетричні, то абсолютні значення векторів фазних напруг в кожній системі однакові тобто $U_{1A} = U_{1B} = U_{1C} = U_1, U_{2A} = U_{2B} = U_{2C} = U_2, U_{0A} = U_{0B} = U_{0C} = U_0$.

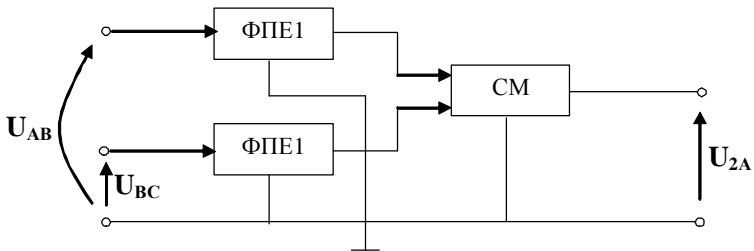


Рисунок 9.24 – Структурна схема вимірювача напруги зворотної послідовності

Несиметрія трифазної системи напруг характеризується такими показниками якості електроенергії, як коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю $K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} 100\%$ та коефіцієнт несиметрії

напруг за нульовою послідовністю $K_{0U} = \frac{U_0\sqrt{3}}{U_1} 100\%$.

Прийнято, що нормально допустимими в електричних мережах з номінальною напругою 380 В вважають $K_{2U} = 2\%$ і $K_{0U} = 2\%$.

Оскільки напруга нульової послідовності U_0 пропорційна сумі трьох фазних напруг, то основою структури для її вимірювання є схема суматора на операційному підсилювачі. Похибка такого вимірювача становить не менше $\pm 1,0\%$, оскільки рівень його вихідної напруги не перевищує десятків мілівольт. Більш високу точність забезпечують цифрові схеми з використанням АЦП і реалізацією алгоритму знаходження U_2 опрацюванням цифрової інформації.

Як видно з вище наведеного виразу, для визначення напруги зворотної послідовності необхідно виконати операції повороту векторів фазних напруг U_B і U_C на відповідні кути, що визначаються множителем a . Використовуючи замість фазних напруг лінійні, можна після нескладних перетворень спростити вираз для напруги зворотної послідовності

$$U_2 = \frac{1}{3} [U_{AB} + a^2 U_{BC} + U_{BC}] = \frac{1}{3} [U_{AB} + U_{BC} e^{-j(p/3)}].$$

Отже, у структурі цього вимірювача слід виконати поворот обох векторів лінійних напруг за допомогою фазоповертальних елементів ФПЕ1 та ФПЕ2 на кути, що відрізняються між собою на $\pi/3$, а схема матиме вигляд, зображений на рисунку 9.24, де СМ - суматор напруг.

Похибка вимірювання U_2 при цьому знаходиться в межах $\pm 1,0 \dots \pm 2,0\%$. Основними причинами похибок є відхилення від номінального значення коефіцієнтів перетворення ФПЕ1 та ФПЕ2, викликане зміною частоти мережі щодо значення номінальної робочої частоти цих вузлів, та наявність у формі напруги вищих гармонічних складових.

Дещо кращі результати забезпечують цифрові схеми з АЦП і мікропроцесором, що виконують у цифровій формі алгоритм знаходження U_2 . Однак і в цьому випадку суттєвими факторами, що визначають значення похибки вимірювання, є зміна частоти промислової мережі та вплив сигналів вищих гармонік.

Вимірювання частоти

Широкий діапазон частот електричних сигналів від часток герца до десятків гігагерц, різні вимоги до точності їх вимірювання зумовили велику різноманітність методів вимірювання частоти.

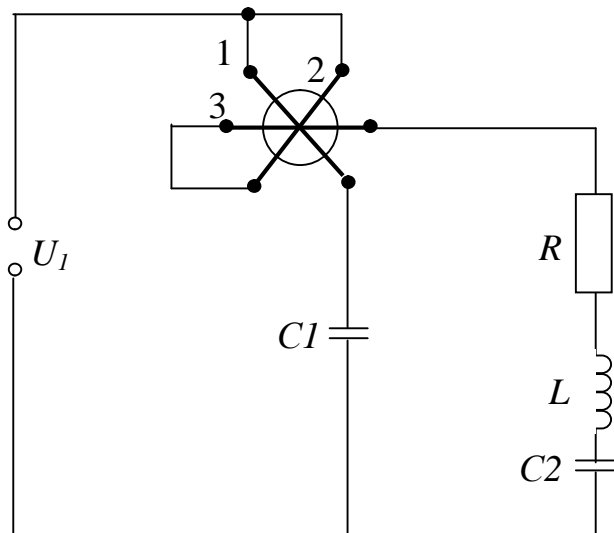


Рисунок 9.25 – Схема електродинамічного частотоміра

Для вимірювань та контролю частоти в промислових умовах в діапазоні від 20 до 2500 Гц з порівняно невисокою точністю (1...4 %) використовують електромеханічні частотоміри на базі логометрів електромагнітної, електро- чи феродинамічної систем. На рис. 9.25 наведена спрощена схема електродинамічного частотоміра. Наявність в колі

рухомих рамок 1 і 2 та нерухомої котушки 3, частотозалежних конденсаторів C_1 , C_2 та індуктивності L забезпечує однозначну залежність відхилення рухомої частини логометра від частоти:

$$a = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = F\left[\frac{\omega_x L - 1/(\omega_x C_2)}{1/(\omega_x C_1)}\right] = F(f_x)$$

Для вимірювання низької частоти у вузькому діапазоні (48-52, 45-55 Гц і т.д.) можуть застосовуватися резонансні частотоміри. Клас точності таких частотомірів 1-2,5.

У діапазоні високих і надвисоких частот частота може вимірюватися високочастотними резонансними частотомірами, у яких, на відміну від електромеханічних резонансних частотомірів, використовується коливальний контур з котушки індуктивності й конденсатора. Погрішність вимірювання частоти в цьому випадку становить $\pm(0,05-0,1)$ %.

Резонансний метод базується на порівнянні вимірюваної частоти з частотою власних коливань коливної ланки. Застосовується цей метод при вимірюванні частоти від сотень кГц до сотень ГГц. Основним вузлом резонансного частотоміра є коливна система у вигляді резонансного контуру із зосередженими реактивними елементами чи вузлами з розподіленими параметрами – вирізками коаксialьних чи смугових ліній або ж об'ємні резонатори (для частот у десятки ГГц).

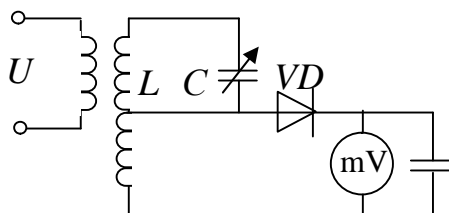


Рисунок 9.26 – Схема резонансного частотоміра

На рисунку 9.26 зображена схема резонансного частотоміра з коливною системою у вигляді контуру із зосередженими LC -параметрами. Вимірювальний LC -контур має індуктивний зв'язок з колом досліджуваного сигналу U_{fx} та автотрансформаторний зв'язок з колом індикатора. Регулюванням ємності C конденсатора змінної ємності настроюють частоту f_0 власних коливань LC -контура в резонанс з вимірюваною частотою f_x :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi LC} = f_x .$$

При цьому напруга в індикаторному колі зростає до максимального значення, що фіксується вихідним індикаторним пристроєм mV а значення вимірюваної частоти визначають за показами конденсатора змінної ємності. Похибка таких частотомірів звичайно не менше ніж 1%.

Найвищу точність вимірювання в діапазоні від часток герца до сотень мегагерц забезпечують цифрові частотоміри. Залежно від способу утворення інтервалу усереднення (часу) розрізняють частотоміри прямої лічби та обчислювальні.

Перші з них будуються на основі аналого-цифрової структури хронометра. При цьому протягом точно відомого інтервалу часу T_0 підраховується кількість імпульсів невідомої частоти.

Похибка вимірювання частотомірів прямої лічби визначається головним чином похибкою $d_{\text{бч}}$ від нестабільності так званої бази часу, тобто набору сигналів каліброваних міток часу, завдяки яким вибирається тривалість часу вимірювання T_0 , та похибки квантування $d_{\text{кв}}$:

$$d_u = \pm \left(d_{\sigma u} + \frac{1}{f_x T_0} \right).$$

Остання складова може сягати недопустимо великих значень на низьких частотах f_x , що вимагає додаткових схемних заходів - перемножувачів частоти чи використання спеціальних вагових функцій, що інколи призводять до суттєвого ускладнення структури.

В обчислювальних частотомірах, завдяки вибору практично сталого часу вимірювання та використанню циклічного перетворення вхідного сигналу, забезпечується майже однакова похибка вимірювання {соті частки відсотка) у всьому діапазоні частот.

Принцип дії обчислювального частотоміра за методом подвійного збігу пояснюють рисунки 9.27 та 9.28.

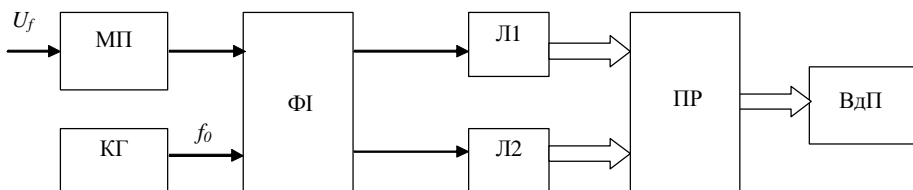


Рисунок 9.27 – Спрощена структурна схема обчислювального частотоміра

Відповідно до спрощеної структурної схеми цього частотоміра (рисунок 9.27) вхідна напруга U_{fx} вимірюваної частоти f_x нормується вхідним масштабуючим пристроєм МП до номінального рівня, зручного для подальшого опрацювання. У формувачі інтервалів ФІ задається строб-імпульс вимірювання з тривалістю $T_{вим}$ (рисунок 9.28,а), що встановлюється залежно від f_x . З виходу формувача імпульсів ФІ на перший лічильник Л1 частотоміра надходить певна послідовність імпульсів кількістю N_1 , яка дорівнює кількості повних періодів вхідного сигналу, синхронізованого з переднім та заднім фронтами строб-імпульса $T_{вим}$: $N_1 = T_{вим} f_x$ (рисунок 9.28,б). Одночасно, починаючи з переднього фронту $T_{вим}$ за допомогою другого лічильника Л2 визначається $N_2 = T_{вим} f_0$ - кількість імпульсів базової частоти від кварцового генератора КГ (рисунок 9.28,в). Мірою вимірюваної частоти буде відношення

$$N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{T_{вим} f_x}{T_{вим} f_0} = \frac{f_x}{f_0},$$

що визначається процесором ПР і фіксується відліковим пристроєм ВДП.

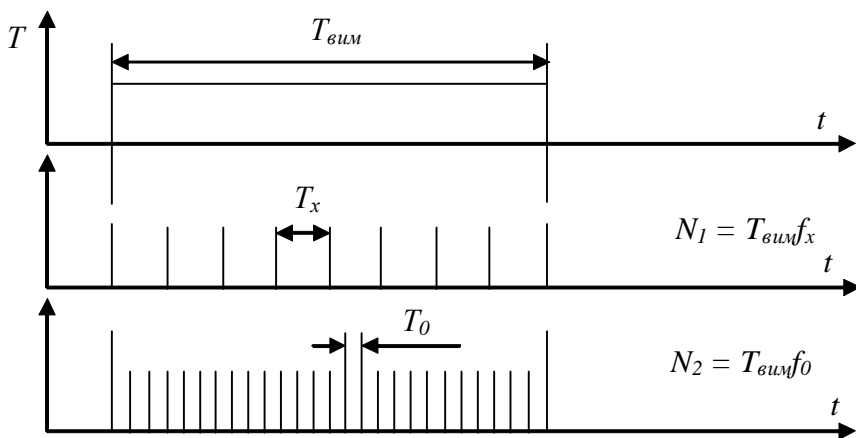


Рисунок 9.28 – Часові діаграми роботи обчислювального частотоміра

При вимірюванні низьких частот (до 1 Гц і нижче) інтервал $T_{вим}$ вибирають таким, що дорівнює одному періоду повторення $T_x = \frac{1}{f_x}$.

Вибираючи значення f_0 близьким до верхньої частоти діапазону вимірювання, отримують сталі значення похибки квантування $d_{кв} = \frac{1}{f_0 T_{вим}}$, яке для частотоміра з частотою $f_0 = 500$ МГц та $T_{вим} = 1$ с становить $2 \cdot 10^{-9}$. При цьому діапазон вхідних частот обчислювального частотоміра становить 0,1 Гц...500 МГц.

10 ВИМІРЮВАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

10.1 Загальні відомості

Ускладнення технологічних об'єктів і збільшення обсягу інформації привело до необхідності вимірювати чи контролювати одночасно сотні фізичних величин. Так, наприклад, система контролю і керування енергоблоком 800 МВт на тепловій електростанції містить у собі більш 1600 контрольованих параметрів, понад 1000 регулюючих блоків, 120 локальних контурів регулювання.

Переробка великих обсягів інформації, збільшення площі щитів, зайнятих вторинними приладами, локальними регуляторами і пристроями, що сигналізують та захищають, при фізіологічній обмеженості можливостей людини в переробці великих обсягів інформації привела до виникнення такого виду засобів вимірів, як вимірювальні інформаційні системи (ВІС).

По функціональному призначенню ВІС поділяють на:

- вимірювальні системи;
- системи автоматичного контролю;
- системи технічної діагностики;
- обчислювальні, вимірювально-обчислювальні комплекси.

По організації алгоритму функціонування ВІС розрізняють:

- системи з твердим, заздалегідь заданим алгоритмом функціонування;
- програмувальні системи;
- адаптивні системи.

У системах із твердим алгоритмом функціонування алгоритм роботи ВІС не міняється, і така система може застосовуватися в об'єктах працюючих у визначеному режимі. У програмувальних системах алгоритм роботи змінюється відповідно до заздалегідь заданої програми, що складається в залежності від умов функціонування об'єкта дослідження. В адаптивних системах алгоритм роботи змінюється, пристосовуючи до змін вимірюваних величин і умов роботи об'єкта. Для адаптивних систем потрібна менша кількість попередньої інформації, ніж для систем із твердим алгоритмом функціонування, що має велике значення для нових об'єктів, характеристики яких мало відомі.

Основними функціями ВІС є:

- одержання вимірювальної інформації від об'єкта;

- обробка вимірювальної інформації;
- представлення інформації оператору чи ЕОМ;
- формування керуючих впливів на об'єкт.

На рисунку 10.1 представлена узагальнена структурна схема ВІС, що містить наступні пристрої:

- пристрої виміру, що включають у себе первинні і вторинні вимірювальні перетворювачі і власне вимірювальний пристрій, що виконує операцію порівняння з мірою;
- пристрій обробки вимірювальної інформації, що виконує обробку вимірювальної інформації з визначеного алгоритму;
- пристрій збереження інформації;
- пристрій представлення інформації в цифровому виді;
- пристрій керування, що служить для організації взаємодії між об'єктом і іншими пристроями ;
- пристрій впливу на об'єкт.

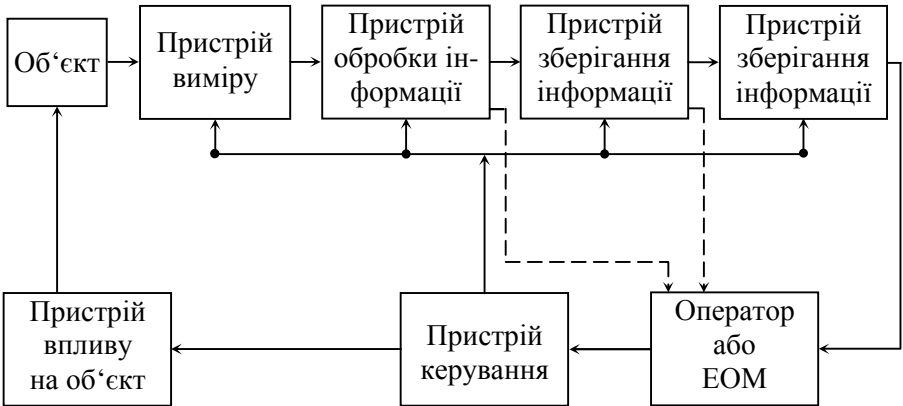


Рисунок 10.1 – Структурна схема вимірювальної інформаційної системи

Інформація від ВІС може видаватися оператору чи надходити в ЕОМ. Оператор ЕОМ може впливати на пристрій керування ВІС, змінюючи відповідно програму її роботи. При наявності в складі ВІС ЕОМ інформації до ЕОМ може надходити безпосередньо від пристроїв обробки чи збереження (пунктирні лінії на рисунку 10.1).

В існуючих ВІС за допомогою ЕОМ виконується також розрахунок техніко-економічних показників об'єкта, здійснюється контроль перебування тих чи інших параметрів у заданих межах, ведеться по визначених алгоритмах обробка вимірювальної інформації з метою діагностики технічних ситуацій і аналізу стану об'єкта і його елемен-

тів, виробляється реєстрація аварійних ситуацій.

Фізичні величини, вимірювані і контрольовані за допомогою ВІС, відрізняються великою розмаїтістю. Для того, щоб ВІС були універсальними, тобто придатними для виміру і контролю різноманітних величин, необхідно, щоб вони були представлені уніфікованими електричними сигналами.

У ВІС застосовують наступні уніфіковані сигнали:

- безупинні сигнали у виді постійних і перемінних струмів і напруг, параметри яких є інформативними параметрами. Діапазони виміру параметрів деяких безупинних уніфікованих сигналів нормовані державними стандартами. Ці сигнали називають нормативними. Приведення (нормування) параметрів сигналів до визначеного рівня здійснюється так названими вимірювальними перетворювачами, що нормують;
- імпульсні сигнали у виді серії імпульсів постійного струму, параметри яких (амплітуда, частота, тривалість імпульсів) є інформативними параметрами;
- кодово-імпульсні сигнали, наприклад, у виді імпульсів постійного струму чи напруги, комбінації яких передають значення кодованих вимірюваних величин.

Застосування тих чи інших уніфікованих сигналів залежить від необхідних характеристик ВІС, виду каналу зв'язку, форми представлення вимірювальної інформації (аналогова чи цифрова), використовуваної елементарної бази й ін.

10.2 Вимірювальні системи

До вимірювальних систем відносять системи, у яких переважає функція виміру, а функції обробки і збереження незначні чи відсутні зовсім. На вхід вимірювальної системи надходить безліч величин, що змінюються в часі і розподілені у просторі, а на виході одержують результати вимірів у виді іменованих чисел чи відносних вимірюваних величин.

Для усіх вимірювальних систем основою для побудови є наявність сприймаючих елементів – первинних вимірювальних перетворювачів (датчиків), елементів порівняння, мір і елементів видачі результату. У залежності від виду і числа різних елементів у структурі вимірювальних систем їх поділяють на багатокомпонентні, скануючі, мультиплікаційні і багатоточечні.

Багатоканальні вимірювальні системи являють собою один з най-

поширеніших видів і містять повний набір елементів (від датчиків до видачі результатів). Такі системи мають найбільш високу надійність, найбільш високу швидкодію і можливість індивідуального підбора засобів вимірів до вимірюваних величин, що виключає іноді необхідність уніфікації сигналів. Недолік таких систем – підвищена складність і вартість.

Вимірювальні системи, що сканують, виконують послідовно в часі вимір безліч величин за допомогою одного каналу виміру і містять один набір елементів і так називаний пристрій, що сканує. Цей пристрій переміщає датчик, називаний скануючим датчиком, у просторі усередині чи біля об'єкта. Траєкторія руху датчика може бути заздалегідь запрограмована або може змінюватися в залежності від отриманої в процесі сканування інформації.

Вимірювальні системи, що сканують застосовують у випадку, коли вимірювана величина розподілена в просторі, наприклад, поле температур поверхні злитка, поле тисків у робочому просторі якого-небудь об'єкта, поле концентрацій речовин в об'єкті і т.д. За допомогою систем, що сканують одержують кількісну оцінку значень вимірюваних параметрів у заданих точках і визначають екстремальні значення параметрів. Недоліком вимірювальних систем є відносно мала швидкодія через послідовне виконання операцій виміру для усіх вимірюваних величин.

Мультиплексовані вимірювальні системи чи системи з загальною мірою дозволяють протягом одного циклу виміру відомої величини виконати порівняння її з усіма відомими величинами, тобто визначити (вимірити) безліч величин без застосування комутуючих вузлів. Такі системи найчастіше використовуються в радіотехніці й електроніці і мають менше число елементів у порівнянні з іншими системами. Недоліком мультиплексованих вимірювальних систем є велике число елементів порівняння, рівне числу вимірюваних величин.

Багатоточечні вимірювальні системи застосовуються в складних об'єктах з великим числом вимірюваних величин. Число вимірювальних каналів у таких системах може досягати декількох тисяч. Багаторазове послідовне використання окремих вузлів вимірювального тракту приводить до послідовно-рівнобіжного принципу дії таких систем і до мінімальної складності. Для переключення окремих вузлів, що працюють паралельно і послідовно в часі, застосовуються вимірювальні комутатори, до яких надходять аналогові сигнали від усіх датчиків, встановлених в об'єкті. Комутатори можуть бути одноступінчаті і багатоступінчаті, а число ступіней комутації залежить від числа датчиків.

Достоїнством багатоточечних вимірювальних систем є менша кі-

лькість устаткування в порівнянні з багатоканальними системами. Недоліком цих систем є знижена швидкодія при великому числі опитуваних датчиків і деяке зниження точності за рахунок додаткової погрішності в самих комутуючих пристроях.

10.3 Телевимірювальні системи

У різних областях науки і техніки виникає необхідність здійснювати виміри на об'єктах, що знаходяться на значній відстані від стаціонарних засобів виміру і наступної обробки (наприклад за допомогою ЕОМ) інформації. Така необхідність виникає при вимірі параметрів об'єктів, розосереджених по площі (кілька районних котельень із загальним диспетчерським пунктом, нафто- і газопромисли, об'єкти атомної енергетики й ін.). У таких випадках найбільш зручним і економічно доцільним є застосування телевимірювальної системи.

Відмінність телевимірювальної системи від вимірювальної системи ближньої дії полягає в наявності спеціального каналу зв'язку. Під каналом зв'язку розуміють сукупність технічних засобів, необхідних для передачі інформації від різних джерел. Розрізняють провідні лінії зв'язку, радіолінії й оптичні лінії зв'язку.

Для передачі інформації від декількох джерел по одній лінії зв'язку застосовують різні принципи поділу каналів. Найбільше часто використовують часовий і частотний поділ каналів.

При часовому поділі відбувається послідовна передача по лінії зв'язку значень декількох вимірюваних величин, а поділ вимірювальних каналів виробляється за допомогою комутаторів.

При частотному поділі можлива одночасна передача по лінії зв'язку значень декількох вимірюваних величин. Для передачі кожної величини використовують визначену смугу частот.

У залежності від дальності передачі інформації, від необхідної точності й інших факторів телеметричні системи поділяють на струмові, частотні, час-імпульсні і цифрові.

У струмових системах величина вимірюваного параметра передається по провідних лініях зв'язку постійним струмом (0 – 5мА), вироблюваним перетворювачем. На приймаючій стороні установлюють вимірювальні комутатори, а приймаючі прилади, крім того, постачають блоками пам'яті для збереження показання до чергового підключення комутатора. Дальність дії токових систем обмежується погрішністю, внесеної мінливістю параметрів лінії зв'язку (опір приладів і ізоляції між проводами). Дальність дії токових телевимірювальних систем складає 7...20 км по повітряних лініях зв'язку і 20...25 км по кабельних лініях.

У частотних системах величина вимірюваного параметра передається по лініях зв'язку частотою синусоїдального струму чи частотою імпульсів постійного струму. Переданий по лінії зв'язку частотний сигнал перетвориться приймачем або в аналоговий сигнал, або в код для видачі результату виміру в цифровій формі. В даний час частотні системи широко поширені як системи далекої дії (кілька сотень кілометрів). Число одночасне переданих вимірюваних величин не перевищує 18 через виникаючі перешкоди у сусідніх частотних каналах.

У телевимірювальних системах, що використовують час-імпульсні сигнали, величина вимірюваного параметра передається по лініях зв'язку тривалістю імпульсів постійного струму чи інтервалами між імпульсами. На передавальній стороні використовується вимірювальний комутатор і час-імпульсний перетворювач, тобто перетворювач уніфікованої напруги в тимчасовий інтервал. На приймаючій стороні система містить перетворювач часового сигналу в код, кодовий перемикач, реєстри, що запам'ятовують коди кожного сигналу і вузол видачі результатів. Час-імпульсні системи відносять до систем далекої дії, а з радіоканалом дальність дії складає сотні і навіть тисячі кілометрів.

У цифрових телевимірювальних системах значення вимірюваної величини передається по лініях зв'язку кодовою комбінацією у виді комбінації імпульсів. Найбільше часто застосовується двоїчний код, що на приймаючій стороні перетвориться в одинично-десятковий код, більш зручний для цифрового відтворення вимірюваної величини. Істотними достоїнствами цифрових телевимірювальних систем є високі метрологічні характеристики, можливість роботи з різних каналів зв'язку, висока перешкодозахищеність і можливість виводу інформації на ЕОМ. Недолік таких систем у відносній складності апаратного виконання.

10.4 Принцип побудови функціональних схем контролю і керування технологічним об'єктом

Проектування будь-якого об'єкта супроводжується розробкою функціональної схеми контролю і керування, що є технічним документом, який входить у загальну принципову схему керування. На функціональній схемі вказуються місця добору сигналів (місця установки чутливих елементів), розміщення вимірювальних (вторинних) приладів із указівкою виконуваних ними функцій, а також регуляторів, сигналізаторів і інших засобів керування об'єктом, включаючи засоби телемеханіки й обчислювальної техніки. Прикладена до функціональної схеми специфікація, що містить відповідно до зазначених позицій на схемі розгорнуті характеристики використовуваних засобів контролю і регу-

лювання, є основою для складання заявочних відомостей на прилади.

На функціональній схемі спрощено зображують технологічний об'єкт і розташовують прилади і засоби автоматизації в умовних зображеннях із указівкою зв'язків між ними.

Основні умовні зображення приладів і засобів автоматизації (ДСТ 21.404–85) приведені в таблиці 10.1.

Таблиця 10.1 – Умовні позначки приладів і засобів автоматизації

Найменування	Позначення
Первинний вимірювальний перетворювач (чуттєвий елемент), вимірювальний прилад, регулятор, установлюваний по місцеві: – базове позначення – позначення, що допускається	
Прилад, установлений на щиті	
Виконавчий механізм	
Регулюючий орган	
Лампа сигнальна	
Дзвоник електричний	
Гудок електричний	

Для позначення вимірюваних і регульованих величин і функціональних ознак приладів прийняті прописні букви латинського алфавіту (таблиця 10.2)

Таблиця 10.2 – Буквені умовні позначки

Позначення	Вимірювана величина		Функції, виконувані приладом		
	Особливе значення першої букви	Додаткове значення першої букви	Відображення інформації	Формування вихідного сигналу	Додаткове значення
1	2	3	4	5	6
A	—	—	Сигналізація	—	—
B	Резервна буква	—	—	—	—
C	—	—	—	Регулювання	—
D	Щільність	Різниця, перепад	—	—	—
E	Будь-яка електрична величина	—	—	—	Чуттєвий елемент
F	Витрата	Співвідношення, частка, дріб	—	—	—
G	Розмір, положення, переміщення	—	—	—	—
H	Ручний вплив	—	—	—	Верхня межа величини
I	—	—	Показання	—	—









Продовження таблиці 10.2

1	2	3	4	5	6
J	—	Автоматичне переключення	—	—	—
K	Час, часова програма	—	—	—	Станція керування
L	Рівень	—	—	—	—
M	Вологість	—	—	—	—
O, N	Резервні букви	—	—	—	—
P	Тиск, вакуум	—	—	—	—
Q	Якість, склад, концентрація	Інтегрування, підсумовування	—	—	—
R	Радіоактивність	—	Реєстрація	—	—
S	Швидкість, частота	—	Сигналізація, включення, переключення	—	—
T	Температура	—	—	—	Дистанційна передача
U	Кілька різнорідних величин	—	—	—	—
V	В'язкість	—	—	—	—
W	Маса	—	—	—	—
Y	—	—	Перетворення	—	—


Буквені умовні позначки проставляються у верхній частині окружності при наступному порядку розташування букв: перша буква – основна вимірювана величина, друга буква – уточнює (якщо необхідно) значення першої величини, третя і так далі (чи друга) – позначення функціональної ознаки приладу. Якщо в приладі кілька функціональних ознак, то вони розташовуються в наступній послідовності: IRCSA – показання, реєстрація, регулювання, переключення, сигналізація. У ряді випадків для конкретизації вимірюваної величини, наприклад, концентрації речовини, біля окружності (праворуч) указується чи найменування символ вимірюваної величини: рН, O₂, СО і т.д.






Нижче приведені приклади побудови умовних позначок для приладів виміру і регулювання наступних фізичних величин:

Т – температура:






-  – первинний вимірювальний перетворювач (чуттєвий елемент (термопара, термометр опору й ін.);
-  – прилад для виміру температури, що показує, установлений по місцю (рідинний термометр, манометричний термометр і ін.);
-  – прилад для виміру температури одноточечний, що показує і реєструє, установлений на щиті (потенціометр, міст, логометр і ін.);
-  – прилад для виміру температури, що реєструє багатоточечний;
-  – прилад для виміру температури, що реєструє з регулюючим пристроєм (потенціометр із двохпозиційним регулюванням і ін.);
-  – регулятор температури;
-  – сигналізатор температури;
-  – безшкальний прилад з дистанційною передачею показань.

Р – тиск, розрідження:




-  – електричний датчик тиску (тензо– чи п'єзоперетворювач);

-  PT – дистанційна передача сигналу тиску;
-  PI – прилад для виміру тиску (розрядження), що показує (показуючий манометр, тягомір, напоромір, вакууметр);
-  PDI – прилад для виміру перепаду тиску, що показує (дифманометр);
-  PIR – прилад для виміру тиску, що показує, що реєструє;
-  PC – регулятор тиску



F – витрата:

-  FE – первинний вимірювальний перетворювач (чуттєвий елемент) для виміру витрати (діафрагма, сопло, труба Вентурі);
-  FC – регулятор витрати;
-  FIR – прилад для виміру витрати, що показує, що реєструє;
-  FQIS – прилад для виміру витрати, що показує, інтегруючий, із пристроєм для видачі сигналу після проходження заданої кількості речовини;
-  FT – прилад для дистанційної передачі сигналу від датчика витрати

L – рівень:

-  LE – первинний вимірювальний перетворювач для виміру рівня.
-  LIA^H_L – прилад для виміру рівня, що показує з контактним пристроєм для видачі сигналу по верхньому і нижньому значенню рівня.
-  LC – регулятор рівня.

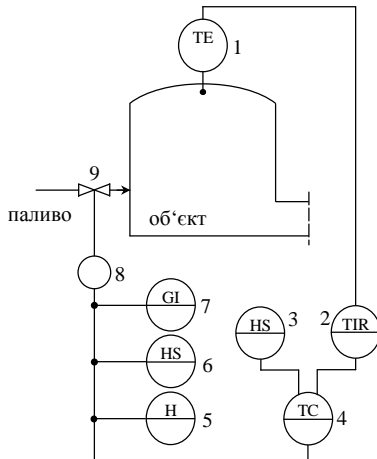
Q – якість:

-  ^{O₂} – прилад для виміру якості продукту, що показує (газоаналізатор для контролю змісту кисню).
-  ^{CO} – прилад для виміру якості продукту, що реєструє, з регулюючим пристроєм (газоаналізатор на CO з регулятором).

– позначення інших величин і операцій:

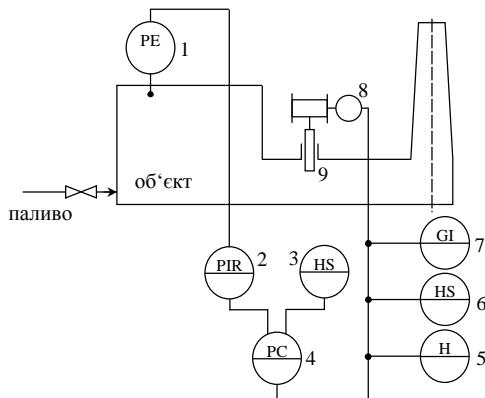
-  – прилад для контролю загасання факелу в печі, безшкальний.
-  – прилад для виміру щільності розчину.
-  – прилад для виміру струму, напруги, електричної потужності й інших електричних величин, що показує (амперметр, вольтметр і ін.).
-  – прилад для виміру вологості середовища, що реєструє.
-  – показчик положення, установлений на щиті, що показує (наприклад, положення регулюючого органа).
-  – апаратура для ручного дистанційного керування, установлена на щиті (кнопка, ключ керування).
-  – перемикач електричних ланцюгів (керування), установлений на щиті (задатчик, вибір виду керування й ін.).
-  ^K – обчислювальний пристрій, що виконує функцію множення на постійний множник, установлений на щиті.
-  ^{P/E} – перетворювач сигналу, установлений по місцеві (наприклад, перетворювач тиску в електричний сигнал).
-  – пускова апаратура (магнітний пускач, контактор).

На малюнках 10.2, 10.3, 10.4 показані найпростіші функціональні схеми виміру і регулювання температури, тиску і витрати, виконані відповідно до ДСТ 21.202 – 85.



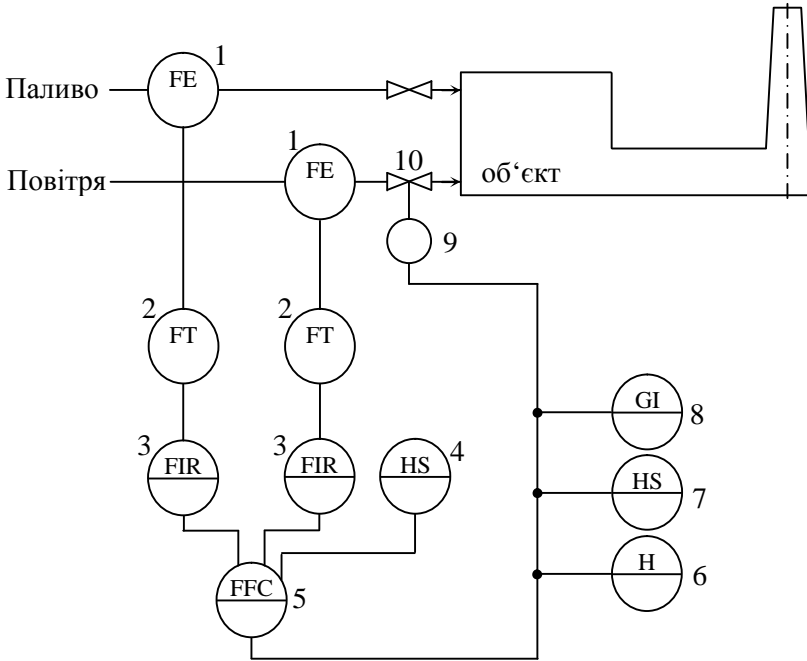
1 – датчик температури; 2 – вторинний показуючий і реєструючий прибор; 3 – ручний задатчик; 4 – регулятор; 5 – кнопки "більше-менше"; 6 – перемикач управління "автоматичне-ручне"; 7 – показчик положення регулюючого органа; 8 – виконавчий механізм; 9 – регулюючий орган

Рисунок 10.2 – Схема виміру і регулювання температури в печі



1 – датчик тиску електричний; 2 – показуючий і реєструючий прибор; 3 – задатчик; 4 – регулятор тиску; 5 – кнопки керування "більше-менше"; 6 – перемикач "автоматичне-ручне"; 7 – показчик положення регулюючого органа; 8 – виконавчий механізм; 9 – регулюючий орган

Рисунок 10.3 – Схема виміру і регулювання тиску



1 – пристрої, що звужують; 2 – перетворювачі перепаду тиску в електричні сигнали; 3 – показуючі і реєструючі витратоміри; 4 – задатчик; 5 – регулятор витрати; 6 – кнопки керування "більше–менше"; 7 – перемикач "автоматичне–ручне"; 8 – покажчик положення регулюючого органа; 9 – виконавчий механізм; 10 – регулюючий орган.
 Рисунок 10.4 – Схема виміру витрати і регулювання співвідношення паливо/повітря

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 256 с.
2. Тюрин Н.И. Введение в метрологию. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 304 с.
3. Широков К.П., Богуславский М.Г. Международная система единиц. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 157 с.
4. Шабалин С.А. Прикладная метрология. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 256 с.
5. Брянский Л.Н., Дойников А.С. Краткий справочник метролога. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 79 с.
6. Камке Д., Кремер К. Физические основы единиц измерения. – М.: Мир, 1980. – 203 с.
7. Основы метрологии и электрические измерения. / Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк, Е.М. Душин и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. 480 с.
8. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.В. Качество измерений. – Л.: Лениздат, 1987. – 295 с.
9. Основные термины в области метрологии. / М.Ф. Юдин, М.Н. Селиванов, О.Ф. Тищенко и др. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 113 с.
10. Качество и сертификация промышленной продукции. / А.Г. Гребенников, А.Г. Мялища, В.М. Рябченко и др. Учебное пособие – Харьков: Харьковский авиационный институт, 1998. – 395 с.
11. Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 228 с.
12. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергия, 1978. – 703 с.
13. Котов К.И., Шершевер М.А. Средства измерения, контроля и автоматизации технологических процессов. Вычислительная и микропроцессорная техника. – М.: Металлургия, 1989. – 496 с.

14. Крамарухин Ю.Е. Приборы для измерения температуры. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.
15. Кесова Л.А. Контроль и автоматическое управление пылеподачей на ТЭС. – К.: Вища школа, 1991. – 142 с.
16. Огнеупорные экранирующие насадки к отсасывающей термопаре. / Р.И. Сарбаш, А.И. Туяхов, А.Т. Яковенко // Бюллетень ЦИИН ЧМ – 1963 – № 13. – с. 49-50.
17. Поскачей А.А., Чарихов Л.А. Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью. – М.: Metallurgy, 1978. – 200 с.
18. Бухонина Л.В., Гитлин Л.Д., Шершевер М.А. Измерение и контроль технологических параметров. – К.: Техніка, 1984. – 183 с.
19. Влияние запыленности печной атмосферы на тепловую работу факела. / А.И. Туяхов // Сб. Совершенствование производства черных металлов. – К.: Техніка. – 1975. – с. 63-66.
20. Кегельман Д.Н., Эскин Н.Б. Наладка котельных установок. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1989 – 320 с.
21. Разработка система автоматического управления тепловым режимом мартеновских печей / М.Н. Стрелец, Н.Г. Земляной, А.А. Тарасенко, А.И. Туяхов. // Материалы научн. техн. конф. – Донецк, 1970 – с. 14-15.
22. Вепшек Я. Измерение низких температур электрическими методами. – М.: Энергия, 1980. – 224 с.
23. Глинков Г.М., Косырев А.И., Шевцов Е.К. Контроль и автоматизация металлургических процессов. – М.: Metallurgy, 1989. – 352 с.
24. Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С.. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 324 с.

ДОДАТОК А

Коефіцієнти розподілу Стьюдента

Таблиця А.1 – Коефіцієнти розподілу Стьюдента

Довірча імовірність, P	Кількість ступенів свободи, f						
	3	4	5	6	8	10	12
0,90	2,35	2,13	2,01	1,94	1,86	1,81	1,78
0,95	3,18	2,78	2,57	2,45	2,31	2,23	2,18
0,99	5,84	4,60	4,03	3,71	3,36	3,17	3,06
Довірча імовірність, P	Кількість ступенів свободи, f						
	18	22	30	40	60	120	∞
0,90	1,73	1,72	1,70	1,68	1,67	1,66	1,64
0,95	2,10	2,07	2,04	2,02	2,00	1,98	1,96
0,99	2,88	2,82	2,75	2,70	2,66	2,62	2,58

Таблиця А.2 – Значення t_k для різних P_k і n

P_k	n							
	2	3	4	5	6	7	8	9
0,05	15,56	4,97	3,56	3,04	2,78	2,62	2,51	2,43
0,02	38,97	8,04	5,08	4,10	3,64	3,36	3,18	3,05
0,01	77,96	11,46	6,53	5,04	4,36	3,39	3,71	3,54
0,005	77,97	36,5	14,46	9,43	7,41	6,37	5,73	5,31
P_k	n							
	10	12	14	16	18	20	∞	
0,05	2,37	2,29	2,24	2,20	2,17	2,145	1,96	
0,02	2,83	2,83	2,74	2,68	2,64	2,60	2,33	
0,01	3,23	3,23	3,12	3,04	3,00	2,93	2,58	
0,005	4,62	4,62	4,37	4,20	4,07	3,98	3,29	

ДОДАТОК Б

Монохроматичний коефіцієнт теплового випромінювання
різних матеріалів при $\lambda=0,65$ мкм

Матеріал	Температура, °C	ϵ_λ	Матеріал	Температура, °C	ϵ_λ
Залізо	1000	0,39	Платина рідка	1800	0,38
Залізо рідке	1500	0,36	Чавун твердий	20	0,37
Магній	20	0,59	Чавун рідкий	1400	0,40
Марганець	20	0,59	Хромель	20	0,35
Мідь тверда	20	0,11	Алюмель	20	0,37
Мідь рідка	1100	0,15	Алюміній оксид	20	0,22
Молібден твердий	1000	0,40	Алюміній оксид	1500	0,40
Молібден твердий	2000	0,36	Заліза оксид	20	0,70
Молібден рідкий	2500	0,33	Міді оксид	20	0,70
Нікель твердий	20	0,36	Нікелю оксид	20	0,90
Нікель рідкий	1500	0,37	Сталь хромонікелева окислена	20	0,85
Срібло тверде і рідке	—	0,07	Сталь вуглецевіста окислена	20	0,80
Вугілля (графіт)	1000	0,90	Чавун окислений	20	0,70
Вугілля (графіт)	2000	0,85	Алюмель окислений	20	0,87
Вугілля (графіт)	3000	0,81	Хромель окислений	20	0,78
Хром твердий	20	0,34	Фарфор	—	0,25–0,50
Хром рідкий	1900	0,39	Шамот	—	0,70–0,80
Сталь вуглецевіста тверда	20	0,44	Шлак рідкий	1650	0,65
Сталь вуглецевіста рідка	1600	0,37			
Платина тверда	1500	0,30			

ДОДАТОК В

**Коефіцієнт повного теплового випромінювання
(інтегральний коефіцієнт теплового випромінювання)
різних матеріалів**

Матеріал	t, °C	ϵ_T
Алюміній: полірований	200–600	0,04–0,06
сильноокислений	100–600	0,20–0,33
Вольфрам нить	230–2230 2800	0,54–0,31 0,39
Залізо: поліроване	425–1020	0,144–0,377
покрите товстим шаром іржі	40	0,85
лите неопрацьоване	925–1125	0,87–0,95
Сталь: листова шліфована	930	0,55
прокатана окислена	40	0,66
листова шорсткувата	4&	0,80 ,
розплавлена	1600–1800	0,28
Чавун: полірований	200	0,21
покритий плівкою окислений	40	0,70–0,80
шорсткуватий	40–250	0,95
розплавлений	1300–1400	0,29
Золото чисте поліроване	90–600	0,02–0,035
Латунь: полірована	275	0,03
прокачана	20	0,06
тьмяна пластина	40–260	0,22
окислена при нагріві до 600 °C	200–600	0,61–0,59
Мідь: полірована	90	0,02
полірована, злегка окислена	40	0,05
окислена при нагріванні до 600 °C	200–600	0,57–0,55
чорна окислена	40	0,76
розплавлена	1075–1275	0,16–0,13

Продовження додатка В

Матеріал	t, °C	ϵ_T
Нікель:		
полірований	40–260	0,05–0,07
окислений	40–260	0,35–0,49
проволока	260–1100	0,10–0,19
Платина:		
електролітична	260–500	0,06–0,10
стрічка	540–1100	0,12–0,14
проволока	200–1375	0,07–0,18
Срібло:		
поліроване	40–540	0,01–0,03
окислене	40–540	0,02–0,04
Азбест картон	40	0,96
Вогнетриви:		
слабо випромінюючі	1000	0,75
сильно випромінюючі	1000	0,85–0,90
Цегла:		
динас	1000	0,85
шамот	1000	0,59
магнезит	1000	0,38
Фарфор глазурований	40	0,93
Глина вогнетривка	90	0,91
Кварц	40–540	0,89–0,58
Слюда	40	0,75
Стекло пірекс	260–540	0,94–0,75
Вода, шар 0,1 мм і більше	40	0,96
Вугілля:		
нить	1050–1450	0,53
сажа	40	0,95
Обмазка із рідкого стекла с сажею	100–225	0,96–0,95

ДОДАТОК Д

Градуювальна характеристика хромель–копелевої (ХК)
термопар в діапазоні температур $-50...+800^{\circ}\text{C}$

Температура робочого кінця, $^{\circ}\text{C}$	Термоелектрорушійні сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-50	-3,110									
-40	-2,500	-2,561	-2,622	-2,683	-2,744	-2,805	-2,866	-2,927	-2,988	-3,049
-30	-1,890	-1,951	-2,012	-2,073	-2,134	-2,195	-2,256	-2,317	-2,378	-2,439
-20	-1,270	-1,336	-1,394	-1,456	-1,518	-1,580	-1,642	-1,704	-1,766	-1,828
-10	-0,640	-0,703	-0,766	-0,829	-0,892	-0,955	-1,018	-1,081	-1,144	-1,207
-0	-0,000	-0,064	-0,128	-0,192	-0,256	-0,320	-0,384	-0,448	-0,512	-0,576
+0	0,000	0,064	0,128	0,192	0,256	0,321	0,386	0,451	0,516	0,581
10	0,646	0,711	0,776	0,841	0,907	0,973	1,039	1,105	1,171	1,237
20	1,303	1,370	1,437	1,504	1,571	1,638	1,705	1,772	1,840	1,908
30	1,976	2,044	2,112	2,180	2,248	2,316	2,384	2,452	2,520	2,589
40	2,658	2,727	2,796	2,865	2,934	3,003	3,072	3,141	3,210	3,280
50	3,350	3,420	3,490	3,560	3,630	3,700	3,770	3,840	3,910	3,980
60	4,050	4,121	4,192	4,263	4,334	4,405	4,476	4,547	4,618	4,689
70	4,760	4,831	4,902	4,973	5,044	5,115	5,186	5,257	5,327	5,398
80	5,469	5,540	5,611	5,682	5,753	5,824	5,895	5,966	6,037	6,108
90	6,179	6,250	6,322	6,394	6,466	6,538	6,610	6,682	6,754	6,826
100	6,898	6,970	7,043	7,116	7,189	7,262	7,335	7,408	7,481	7,554
110	7,627	7,700	7,774	7,848	7,922	7,996	8,070	8,144	8,218	8,292
120	8,366	8,440	8,515	8,590	8,665	8,740	8,815	8,890	8,965	9,040
130	9,115	9,190	9,265	9,340	9,415	9,490	9,565	9,640	9,715	9,790
140	9,865	9,940	10,016	10,092	10,168	10,244	10,320	10,396	10,472	10,548
150	10,624	10,700	10,777	10,854	10,931	11,008	11,085	11,162	11,239	11,316
160	11,393	11,470	11,548	11,626	11,704	11,782	11,860	11,938	12,016	12,094
170	12,172	12,250	12,329	12,408	12,487	12,566	12,645	12,724	12,803	12,882
180	12,961	13,040	13,120	13,200	13,280	13,360	13,440	13,520	13,600	13,680
190	13,760	13,841	13,922	14,003	14,084	14,165	14,246	14,327	14,408	14,489
200	14,570	14,651	14,732	14,813	14,894	14,975	15,056	15,137	15,218	15,299
210	15,380	15,462	15,544	15,626	15,708	15,790	15,872	15,954	16,036	16,118

Продовження додатка Д

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійніва сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
220	16,200	16,283	16,366	16,449	16,532	16,615	16,698	16,781	16,864	16,947
230	17,030	17,113	17,196	17,279	17,362	17,445	17,528	17,611	17,694	17,777
240	17,860	17,943	18,026	18,109	18,192	18,275	18,358	18,441	18,524	18,607
250	17,690	18,773	18,856	18,939	19,022	19,105	19,188	19,271	19,354	19,437
260	19,520	19,604	19,688	19,772	19,856	19,940	20,024	20,108	20,192	20,276
270	20,360	20,444	20,528	20,612	20,696	20,780	20,864	20,948	21,032	21,116
280	21,200	21,284	21,368	21,452	21,536	21,620	21,704	21,788	21,872	21,956
290	22,040	22,124	22,208	22,292	22,376	22,460	22,544	22,628	22,712	22,796
300	22,880	22,964	23,048	23,132	23,216	23,300	23,384	23,468	23,552	23,636
310	23,720	23,804	23,888	23,972	24,056	24,140	24,224	24,308	24,392	24,476
320	24,560	24,645	24,730	24,815	24,900	24,985	25,070	25,155	25,240	25,325
330	25,410	25,496	25,582	25,668	25,754	25,840	25,926	26,012	26,098	26,184
340	26,270	26,356	26,442	26,528	26,614	26,700	26,786	26,872	26,958	27,044
350	27,130	27,217	27,304	27,391	27,478	27,565	27,652	27,739	27,826	27,913
360	28,000	28,087	28,174	28,261	28,348	28,435	28,522	28,609	28,696	28,783
370	28,870	28,957	29,044	29,131	29,218	29,305	29,392	29,479	29,566	29,656
380	29,740	29,827	29,914	30,001	30,088	30,175	30,262	30,349	30,436	30,523
390	30,610	30,697	30,784	30,871	30,958	31,045	31,132	31,219	31,306	31,393
400	31,480	31,567	31,654	31,741	31,828	31,915	32,002	32,089	32,176	32,263
410	32,350	32,438	32,526	32,614	32,702	32,790	32,878	32,966	33,054	33,142
420	33,230	33,318	33,406	33,494	33,582	33,670	33,758	33,846	33,934	34,022
430	34,110	34,198	34,286	34,374	34,462	34,550	34,638	34,726	34,814	34,902
440	34,990	35,078	35,116	35,254	35,342	35,430	35,518	35,606	35,694	35,782
450	35,870	35,958	36,046	36,134	36,222	36,310	36,398	36,486	36,574	36,662
460	36,750	36,838	36,926	37,014	37,102	37,190	37,278	37,366	37,454	37,542
470	37,630	37,718	37,806	37,894	37,982	38,070	38,158	38,246	38,334	38,432
480	38,510	38,598	38,686	38,774	38,862	38,950	39,038	39,126	39,214	39,302
490	39,390	39,478	39,566	39,654	39,742	39,830	39,918	40,006	40,094	40,128
500	40,270	40,358	40,446	40,534	40,622	40,710	40,798	40,886	40,974	41,062
510	41,150	41,238	41,326	41,414	41,502	41,590	41,678	41,766	41,854	41,942
520	42,030	42,118	42,206	42,294	42,382	42,470	42,558	42,646	42,734	42,822

ДОДАТОК Е

Градувальна характеристика хромель–алюмелевої
термопары в діапазоні температур $-200...+1300^{\circ}\text{C}$

Температура робочого кінця, $^{\circ}\text{C}$	Термоелектрорушійні сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200	-5,892									
-190	-5,730	-5,747	-5,764	-5,781	-5,797	-5,813	-5,829	-5,845	-5,861	-5,877
-180	-5,550	-5,568	-5,587	-5,605	-5,624	-5,642	-5,660	-5,677	-5,695	-5,712
-170	-5,354	-5,374	-5,394	-5,414	-5,434	-5,454	-5,474	-5,493	-5,512	-5,531
-160	-5,141	-5,163	-5,185	-5,207	-5,228	-5,249	-5,270	-5,291	-5,312	-5,333
-150	-4,913	-4,936	-4,959	-4,983	-5,006	-5,029	-5,051	-5,074	-5,096	-5,119
-140	-4,669	-4,694	-4,718	-4,743	-4,767	-4,792	-4,816	-4,840	-4,865	-4,889
-130	-4,410	-4,436	-4,462	-4,489	-4,515	-4,541	-4,567	-4,592	-4,618	-4,643
-120	-4,138	-4,166	-4,193	-4,221	-4,248	-4,276	-4,303	-4,330	-4,356	-4,383
-110	-3,852	-3,881	-3,910	-3,939	-3,968	-3,997	-4,025	-4,053	-4,082	-4,110
-100	-3,553	-3,583	-3,613	-3,644	-3,674	-3,704	-3,734	-3,763	-3,793	-3,822
-90	-3,242	-3,273	-3,305	-3,336	-3,368	-3,399	-3,430	-3,461	-3,491	-3,522
-80	-2,920	-2,952	-2,985	-3,017	-3,050	-3,082	-3,114	-3,146	-3,178	-3,210
-70	-2,586	-2,620	-2,653	-2,687	-2,720	-2,754	-2,787	-2,820	-2,854	-2,887
-60	-2,243	-2,278	-2,312	-2,347	-2,381	-2,416	-2,450	-2,484	-2,518	-2,552
-50	-1,889	-1,925	-1,960	-1,996	-2,031	-2,067	-2,102	-2,137	-2,173	-2,208
-40	-1,527	-1,563	-1,600	-1,636	-1,673	-1,709	-1,745	-1,781	-1,817	-1,853
-30	-1,156	-1,193	-1,231	-1,268	-1,305	-1,342	-1,379	-1,416	-1,453	-1,490
-20	-0,777	-0,815	-0,853	-0,891	-0,929	-0,967	-1,005	-1,043	-1,081	-1,118
-10	-0,392	-0,431	-0,469	-0,508	-0,547	-0,585	-0,624	-0,662	-0,701	-0,739
-0	0,000	-0,039	-0,079	-0,118	-0,157	-0,197	-0,236	-0,275	-0,314	-0,353
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,162
30	1,203	1,244	1,285	1,325	1,366	1,407	1,448	1,489	1,529	1,570
40	1,611	1,652	1,693	1,734	1,776	1,817	1,858	1,899	1,940	1,981
50	2,022	2,064	2,105	2,146	2,188	2,229	2,270	2,312	2,353	2,394
60	2,436	2,477	2,519	2,560	2,601	2,643	2,684	2,736	2,767	2,809
70	2,850	2,892	2,933	2,975	3,016	3,058	3,100	3,141	3,183	3,224

Продовження додатка Е

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійнісна сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
80	3,266	3,307	3,349	3,390	3,432	3,473	3,515	3,556	3,598	3,639
90	3,681	3,722	3,764	3,805	3,847	3,888	3,930	3,971	4,012	4,054
100	4,095	4,137	4,178	4,219	4,261	4,302	4,343	4,384	4,426	4,467
110	4,508	4,549	4,590	4,632	4,673	4,714	4,755	4,796	4,837	4,878
120	4,919	4,960	5,001	5,042	5,083	5,124	5,164	5,205	5,246	5,287
130	5,327	5,368	5,409	5,450	5,490	5,531	5,571	5,612	5,652	5,693
140	5,733	5,774	5,814	5,855	5,895	5,936	5,976	6,016	6,057	6,097
150	6,137	6,177	6,218	6,258	6,298	6,338	6,378	6,419	6,459	6,499
160	6,539	6,579	6,619	6,659	6,699	6,739	6,779	6,819	6,859	6,899
170	6,939	6,979	7,019	7,059	7,099	7,139	7,179	7,219	7,259	7,299
180	7,338	7,378	7,418	7,458	7,498	7,538	7,578	7,618	7,658	7,697
190	7,737	7,777	7,817	7,857	7,897	7,937	7,977	8,017	8,057	8,097
200	8,137	8,177	8,217	8,257	8,297	8,337	8,377	8,417	8,457	8,497
210	8,537	8,577	8,617	8,657	8,697	8,737	8,777	8,817	8,857	8,898
220	8,938	8,978	9,018	9,058	9,099	9,139	9,179	9,220	9,260	9,300
230	9,341	9,381	9,421	9,462	9,502	9,543	9,583	9,624	9,664	9,705
240	9,745	9,786	9,826	9,867	9,907	9,948	9,989	10,029	10,070	10,111
250	10,151	10,192	10,233	10,274	10,315	10,355	10,396	10,437	10,478	10,519
260	10,560	10,600	10,641	10,682	10,723	10,764	10,805	10,846	10,887	10,928
270	10,969	11,010	11,051	11,093	11,134	11,175	11,216	11,257	11,298	11,339
280	11,381	11,422	11,463	11,504	11,546	11,587	11,628	11,669	11,71	11,752
290	11,793	11,835	11,876	11,918	11,959	12,000	12,042	12,083	12,125	12,166
300	12,207	12,249	12,290	12,332	12,373	12,415	12,456	12,498	12,539	12,581
310	12,623	12,664	12,706	12,747	12,789	12,831	12,872	12,914	12,955	12,997
320	13,039	13,080	13,122	13,164	13,205	13,247	13,289	13,331	13,372	13,414
330	13,456	13,497	13,539	13,581	13,623	13,665	13,706	13,748	13,790	13,832
340	13,874	13,915	13,957	13,999	14,041	14,083	14,125	14,167	14,208	14,250
350	14,292	14,334	14,376	14,418	14,460	14,502	14,544	14,586	14,628	14,670
360	14,712	14,754	14,796	14,838	14,880	14,922	14,964	15,006	15,048	15,090
370	15,132	15,174	15,216	15,258	15,300	15,342	15,384	15,426	15,468	15,510
380	15,552	15,594	15,636	15,679	15,721	15,763	15,805	15,847	15,889	15,931
390	15,974	16,016	16,058	16,100	16,142	16,184	16,227	16,269	16,311	16,353
400	16,395	16,438	16,480	16,522	16,564	16,607	16,649	16,691	16,733	16,776
410	16,818	16,860	16,902	16,945	16,987	17,029	17,072	17,114	17,156	17,199

Продовження додатка Е

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійнісна сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
420	17,241	17,283	17,826	17,368	17,410	17,453	17,495	17,537	17,580	17,622
430	17,664	17,707	17,749	17,792	17,834	17,876	17,919	17,961	18,004	18,046
440	18,088	18,131	18,173	18,216	18,258	18,301	18,343	18,385	18,428	18,470
450	18,513	18,555	18,598	18,640	18,683	18,725	18,768	18,810	18,853	18,895
460	18,938	18,980	19,023	19,065	19,108	19,150	19,193	19,235	19,278	19,320
470	19,363	19,405	19,448	19,490	19,533	19,576	19,618	19,661	19,703	19,746
480	19,788	19,831	19,873	19,916	19,959	20,001	20,004	20,086	20,129	20,172
490	20,214	20,257	20,299	20,342	20,385	20,427	20,470	20,512	20,555	20,598
500	20,640	20,683	20,725	20,768	20,811	20,853	20,896	20,938	20,981	21,024
510	21,066	21,109	21,152	21,194	21,237	21,280	21,322	21,365	21,407	21,450
520	21,493	21,535	21,578	21,621	21,663	21,706	21,749	21,791	21,834	21,876
530	21,919	21,962	22,004	22,047	22,090	22,132	22,175	22,218	22,260	22,303
540	22,346	22,388	22,431	22,473	22,516	22,559	22,601	22,644	22,687	22,729
550	22,772	22,815	22,857	22,900	22,942	22,985	23,028	23,070	23,113	23,156
560	23,198	23,241	23,284	23,326	23,369	23,411	23,454	23,497	23,539	23,582
570	23,624	23,667	23,710	23,754	23,795	23,837	23,880	23,923	23,965	24,008
580	24,050	24,093	24,136	24,178	24,221	24,263	24,306	24,348	24,391	24,434
590	24,476	24,519	24,561	24,604	24,646	24,689	24,731	24,774	24,817	24,859
600	24,902	24,944	24,987	25,029	25,072	25,114	25,157	25,199	25,242	25,284
610	25,327	25,369	25,412	25,454	25,497	25,539	25,582	25,624	25,666	25,709
620	25,751	25,794	25,836	25,879	25,921	25,964	26,006	26,048	26,091	26,133
630	26,176	26,218	26,260	26,303	26,345	26,387	26,430	26,472	26,515	26,557
640	26,599	26,642	26,684	26,726	26,769	26,811	26,853	26,896	26,938	26,980
650	27,022	27,065	27,107	27,149	27,192	27,234	27,276	27,318	27,361	27,403
660	27,445	27,487	27,529	27,572	27,614	27,656	27,698	27,740	27,783	27,825
670	27,867	27,909	27,951	27,993	28,035	28,078	28,120	28,162	28,204	28,246
680	28,288	28,330	28,372	28,414	28,456	28,498	28,540	28,583	28,625	28,667
690	28,709	28,751	28,793	28,835	28,877	28,919	28,961	29,002	29,044	29,086
700	29,128	29,170	29,212	29,254	29,296	29,338	29,380	29,422	29,464	29,505
710	29,547	29,589	29,631	29,673	29,715	29,756	29,798	29,840	29,882	29,924
720	29,965	30,007	30,049	30,091	30,132	30,174	30,216	30,257	30,299	30,341
730	30,383	30,424	30,466	30,508	30,549	30,591	30,632	30,674	30,716	30,757
740	30,799	30,840	30,882	30,924	30,965	31,007	31,048	31,090	31,131	31,173
750	31,214	31,256	31,297	31,339	31,380	31,422	31,463	31,504	31,546	31,587

Продовження додатка Е

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійніва сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
760	31,629	31,670	31,712	31,753	31,794	31,836	31,877	31,918	31,960	32,001
770	32,042	32,084	32,125	32,166	32,207	32,249	32,290	32,331	32,372	32,414
780	32,455	32,496	32,537	32,578	32,619	32,661	32,702	32,743	32,784	32,825
790	32,866	32,907	32,948	32,990	33,031	33,072	33,113	33,154	33,195	33,236
800	33,277	33,318	33,359	33,400	33,441	33,482	33,523	33,564	33,604	33,645
810	33,686	33,727	33,768	33,809	33,850	33,891	33,931	33,972	34,013	34,054
820	34,095	34,136	34,176	34,217	34,258	34,299	34,339	34,380	34,421	34,461
830	34,502	34,543	34,583	34,624	34,665	34,705	34,746	34,787	34,827	34,868
840	34,909	34,949	34,990	35,030	35,071	35,111	35,152	35,192	35,233	35,273
850	35,314	35,354	35,395	35,435	35,476	35,516	35,557	35,597	35,637	35,678
860	35,718	35,758	35,799	35,839	35,880	35,920	35,960	36,000	36,041	36,081
870	36,121	36,162	36,202	36,242	36,282	36,323	36,363	36,403	36,443	36,483
880	36,524	36,564	36,604	36,644	36,684	36,724	36,764	36,804	36,844	36,885
890	36,925	36,965	37,005	37,045	37,085	37,125	37,165	37,205	37,245	37,285
900	37,325	37,365	37,405	37,445	37,484	37,524	37,564	37,604	37,644	37,684
910	37,724	37,764	37,803	37,843	37,893	37,923	37,963	38,002	38,042	38,082
920	38,122	38,162	38,201	38,241	38,281	38,320	38,360	38,400	38,439	38,479
930	38,519	38,558	38,598	38,638	38,677	38,717	38,756	38,796	38,836	38,875
940	38,915	38,954	38,994	39,033	39,073	39,112	39,152	39,191	39,231	39,270
950	39,310	39,349	39,388	39,428	39,467	39,507	39,546	39,585	39,625	39,664
960	39,703	39,743	39,782	39,821	39,861	39,900	39,939	39,979	40,018	40,057
970	40,096	40,136	40,175	40,214	40,253	40,292	40,332	40,371	40,410	40,449
980	40,488	40,527	40,566	40,605	40,645	40,684	40,723	40,762	40,810	40,840
990	40,879	40,918	40,957	40,996	41,035	41,074	41,113	41,152	41,191	41,230
1000	41,26	41,308	41,347	41,385	41,424	41,463	41,502	41,541	41,580	41,619
1010	41,657	41,696	41,735	41,774	41,813	41,851	41,890	41,929	41,968	42,006
1020	42,045	42,084	42,123	42,161	42,200	42,239	42,277	42,316	42,355	42,393
1030	42,432	42,470	42,509	42,548	42,586	42,625	42,663	42,702	42,740	42,779
1040	42,817	42,856	42,894	42,933	42,971	43,010	43,048	43,087	43,125	43,164
1050	43,202	43,240	43,279	43,317	43,356	43,394	43,432	43,471	43,509	43,547
1060	43,585	43,624	43,662	43,700	43,739	43,777	43,815	43,853	43,891	43,930
1070	43,968	44,006	44,044	44,082	44,121	44,159	44,197	44,235	44,273	44,311
1080	44,349	44,387	44,425	44,463	44,501	44,539	44,577	44,615	44,653	44,691
1090	44,729	44,767	44,805	44,843	44,881	44,919	44,957	44,995	45,033	45,070

ДОДАТОК Ж

**Градувальна характеристика
платинородій (10 %)–платинової терморпари (ПП)
в діапазоні температур 0–1600 °С**

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійніва сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,005	0,011	0,016	0,022	0,027	0,033	0,038	0,044	0,049
10	0,055	0,061	0,067	0,072	0,078	0,084	0,090	0,096	0,101	0,107
20	0,113	0,119	0,125	0,130	0,136	0,142	0,148	0,154	0,161	0,167
30	0,173	0,179	0,185	0,191	0,197	0,203	0,209	0,216	0,222	0,229
40	0,235	0,241	0,247	0,254	0,260	0,266	0,273	0,279	0,286	0,292
50	0,299	0,305	0,312	0,318	0,325	0,331	0,338	0,344	0,351	0,358
60	0,364	0,371	0,378	0,384	0,391	0,398	0,405	0,412	0,418	0,425
70	0,432	0,439	0,446	0,453	0,460	0,467	0,474	0,481	0,488	0,495
80	0,502	0,509	0,516	0,523	0,530	0,537	0,544	0,551	0,559	0,566
90	0,573	0,580	0,587	0,595	0,602	0,609	0,616	0,623	0,631	0,638
100	0,645	0,652	0,660	0,667	0,675	0,682	0,689	0,697	0,704	0,712
110	0,719	0,727	0,734	0,742	0,749	0,757	0,765	0,772	0,780	0,787
120	0,795	0,803	0,810	0,818	0,825	0,833	0,841	0,849	0,856	0,864
130	0,872	0,880	0,887	0,895	0,902	0,910	0,918	0,926	0,934	0,942
140	0,950	0,958	0,966	0,973	0,981	0,989	0,997	1,005	1,013	0,021
150	1,029	1,037	1,045	1,053	1,061	1,069	1,077	1,085	1,093	1,101
160	1,109	1,117	1,125	1,133	1,141	1,149	1,157	1,165	1,174	1,182
170	1,190	1,198	1,206	1,215	1,223	1,231	1,239	1,248	1,256	1,265
180	1,273	1,281	1,289	1,298	1,306	1,314	1,322	1,331	1,339	1,348
190	1,356	1,364	1,373	1,381	1,390	1,398	1,406	1,415	1,423	1,432
200	1,440	1,448	1,457	1,465	1,474	1,482	1,491	1,499	1,508	1,516
210	1,525	1,534	1,542	1,551	1,559	1,568	1,577	1,585	1,594	1,602
220	1,611	1,620	1,628	1,637	1,645	1,654	1,663	1,672	1,680	1,689
230	1,698	1,707	1,715	1,724	1,732	1,741	1,750	1,759	1,767	1,776
240	1,785	1,794	1,803	1,811	1,820	1,829	1,838	1,847	1,855	1,864
250	1,873	1,882	1,891	1,899	1,908	1,917	1,926	1,935	1,944	1,953
260	1,962	1,971	1,980	1,988	1,997	2,006	2,015	2,024	2,033	2,042
270	2,051	2,060	2,069	2,078	2,087	2,096	2,105	2,114	2,123	2,132
280	2,141	2,150	2,159	2,168	2,177	2,186	2,195	2,204	2,214	2,223

Продовження додатка Ж

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійніва сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
290	2,232	2,241	2,250	2,259	2,268	2,277	2,286	2,295	2,305	2,314
300	2,323	2,332	2,341	2,350	2,359	2,368	2,377	2,386	2,396	2,405
310	2,414	2,423	2,432	2,442	2,451	2,460	2,469	2,478	2,488	2,497
320	2,506	2,515	2,525	2,534	2,544	2,553	2,562	2,571	2,581	2,590
330	2,599	2,608	2,618	2,627	2,637	2,646	2,655	2,664	2,674	2,683
340	2,692	2,701	2,711	2,720	2,730	2,739	2,748	2,758	2,767	2,777
350	2,786	2,795	2,805	2,814	2,824	2,833	2,842	2,852	2,861	2,871
360	2,880	2,889	2,899	2,908	2,918	2,927	2,936	2,946	2,955	2,965
370	2,974	2,984	2,993	3,003	3,012	3,022	3,031	3,041	3,050	3,060
380	3,069	3,079	3,088	3,098	3,107	3,117	3,126	3,136	3,145	3,155
390	3,164	3,174	3,183	3,193	3,202	3,212	3,222	3,231	3,241	3,250
400	3,260	3,270	3,279	3,289	3,298	3,308	3,318	3,327	3,337	3,346
410	3,356	3,366	3,375	3,385	3,394	3,404	3,414	3,423	3,433	3,442
420	3,452	3,462	3,471	3,481	3,490	3,500	3,510	3,520	3,529	3,539
430	3,549	3,559	3,568	3,578	3,587	3,597	3,607	3,616	3,626	3,635
440	3,645	3,655	3,665	3,674	3,684	3,694	3,704	3,714	3,723	3,733
450	3,743	3,753	3,762	3,772	3,781	3,791	3,801	3,811	3,820	3,83,0
460	3,840	3,850	3,860	3,869	3,879	3,889	3,899	3,909	3,918	3,928
470	3,938	3,948	3,958	3,967	3,977	3,987	3,997	4,007	4,016	4,026
480	4,036	4,046	4,056	4,066	4,076	4,086	4,096	4,106	4,115	4,125
490	4,135	4,145	4,155	4,164	4,174	4,184	4,194	4,204	4,214	4,224
500	4,234	4,244	4,254	4,263	4,273	4,283	4,293	4,303	4,313	4,323
510	4,333	4,343	4,353	4,362	4,372	4,382	4,392	4,402	4,412	4,422
520	4,432	4,442	4,452	4,462	4,472	4,482	4,492	4,502	4,512	4,522
530	4,532	4,542	4,552	4,562	4,572	4,582	4,592	4,602	4,612	4,622
540	4,632	4,642	4,652	4,662	4,672	4,682	4,692	4,702	4,712	4,722
550	4,732	4,742	4,752	4,762	4,772	4,782	4,792	4,802	4,812	4,822
560	4,832	4,842	4,852	4,86S	4,873	4,883	4,893	4,903	4,913	4,923
570	4,933	4,943	4,953	4,96?	4,974	4,984	4,994	5,004	5,014	5,024
580	5,034	5,044	5,054	5,065	5,075	5,085	5,095	5,105	5,116	5,126
590	5,136	5,146	5,156	5,166	5,176	5,186	5,196	5,206	5,217	5,227
600	5,237	5,247	5,257	5,268	5,278	5,288	5,298	5,308	5,319	5,329
610	5,339	5,349	5,360	5,370	5,381	5,391	5,401	5,411	5,422	5,432 '

Продовження додатка Ж

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійнісна сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
620	5,442	5,452	5,462	5,473	5,483	5,493	5,503	5,513	5,524	5,534
630	5,544	5,554	5,565	5,575	5,586	5,596	5,606	5,617	5,627	5,638
640	5,648	5,658	5,669	5,679	5,690	5,700	5,710	5,720	5,731	5,741
650	5,751	5,761	5,772	5,782	5,793	5,803	5,813	5,824	5,834	5,845
660	5,855	5,865	5,876	5,886	5,897	5,907	5,918	5,928	5,939	5,949
670	5,960	5,970	5,981	5,991	6,002	6,012	6,022	6,033	6,043	6,054
680	6,064	6,075	6,085	6,096	6,106	6,117	6,127	6,138	6,148	6,159
690	6,169	6,180	6,190	6,201	6,211	6,222	6,232	6,243	6,253	6,264
700	6,274	6,285	6,295	6,306	6,316	6,327	6,338	6,348	6,359	6,369
710	6,380	6,391	6,401	6,412	6,422	6,433	6,444	6,454	6,465	6,475
720	6,486	6,497	6,507	6,518	6,528	6,539	6,550	6,560	6,571	6,581
730	6,592	6,603	6,613	6,624	6,634	6,645	6,656	6,667	6,677	6,688
740	6,699	6,710	6,720	6,731	6,741	6,752	6,763	6,773	6,784	6,794
750	6,805	6,816	6,827	6,837	6,848	6,859	6,870	6,881	6,891	6,902
760	6,913	6,924	6,934	6,945	6,955	6,966	6,977	6,988	6,998	7,009
770	7,020	7,031	7,042	7,052	7,063	7,074	7,085	7,096	7,106	7,117
780	7,128	7,139	7,150	7,160	7,171	7,182	7,193	7,204	7,214	7,225
790	7,230	7,247	7,258	7,269	7,280	7,291	7,302	7,313	7,323	7,334
800	7,345	7,356	7,367	7,377	7,388	7,399	7,410	7,421	7,432	7,443
810	7,454	7,465	7,476	7,486	7,497	7,508	7,519	7,530	7,541	7,552
820	7,563	7,574	7,585	7,596	7,607	7,618	7,629	7,640	7,650	7,661
830	7,672	7,683	7,694	7,705	7,716	7,727	7,738	7,749	7,760	7,771
840	7,782	7,793	7,804	7,815	7,826	7,837	7,848	7,859	7,870	7,881
850	7,892	7,903	7,914	7,926	7,937	7,948	7,959	7,970	7,981	7,992
860	8,003	8,014	8,025	8,036	8,047	8,058	8,069	8,080	8,092	8,103
870	8,114	8,125	8,136	8,147	8,158	8,169	8,180	8,191	8,203	8,214
880	8,225	8,236	8,247	8,259	8,270	8,281	8,292	8,303	8,314	8,325
890	8,336	8,347	8,358	8,370	8,381	8,392	8,403	8,414	8,426	8,437
900	8,448	8,459	8,470	8,482	8,493	8,504	8,515	8,526	8,538	8,549
910	8,560	8,571	8,583	8,594	8,606	8,617	8,628	8,639	8,651	8,662
920	8,673	8,684	8,695	8,707	8,718	8,729	8,740	8,752	8,763	8,775
930	8,786	8,797	8,808	8,820	8,831	8,842	8,853	8,865	8,876	8,888
940	8,899	8,910	8,922	8,933	8,945	8,956	8,967	8,978	8,990	9,001

Продовження додатка Ж

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійнісна сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
950	9,012	9,023	9,035	9,046	9,058	9,069	9,080	9,092	9,103	9,115
960	9,126	9,137	9,149	9,160	9,172	9,183	9,194	9,206	9,217	9,229
970	9,240	9,252	9,263	9,275	9,286	9,298	9,309	9,321	9,332	9,344
980	9,355	9,366	9,378	9,389	9,401	9,412	9,424	9,435	9,447	9,458
990	9,470	9,481	9,493	9,504	9,516	9,527	9,539	9,550	9,562	9,573
1000	9,585	9,596	9,608	9,619	9,631	9,642	9,654	9,665	9,677	9,688
1010	9,700	9,712	9,723	9,735	9,746	9,758	9,770	9,781	9,793	9,804
1020	9,816	9,828	9,839	9,851	9,862	9,874	9,886	9,897	9,909	9,920
1030	9,932	9,944	9,955	9,967	9,978	9,990	10,002	10,013	10,025	10,036
1040	10,048	10,060	10,072	10,083	10,095	10,107	10,119	10,130	10,142	10,153
1050	10,165	10,177	10,189	10,200	10,212	10,224	10,236	10,247	10,259	10,270
1060	10,282	10,294	10,306	10,317	10,329	10,341	10,353	10,365	10,376	10,388
1070	10,400	10,412	10,424	10,435	10,447	10,459	10,471	10,482	10,494	10,505
1080	10,517	10,529	10,541	10,552	10,564	10,576	10,588	10,600	10,611	10,623
1090	10,635	10,647	10,659	10,670	10,682	10,694	10,706	10,718	10,730	10,742
1100	10,754	10,766	10,778	10,789	10,801	10,813	10,825	10,837	10,848	10,860
1110	10,872	10,884	10,896	10,907	10,919	10,931	10,943	10,955	10,967	10,979
1120	10,991	11,003	11,015	11,026	11,038	11,050	11,062	11,074	11,086	11,098
1130	11,110	11,122	11,134	11,145	11,157	11,169	11,181	11,193	11,205	11,217
1140	11,229	11,241	11,253	11,264	11,276	11,288	11,300	11,312	11,324	11,336
1150	11,348	11,360	11,372	11,384	11,396	11,408	11,420	11,432	11,443	11,45
1160	11,467	11,479	11,491	11,503	11,515	11,527	11,539	11,551	11,563	11,575
1170	11,587	11,599	11,611	11,623	11,635	11,647	11,659	11,671	11,683	11,695
1180	11,707	11,719	11,731	11,743	11,755	11,767	11,779	11,791	11,803	11,815
1190	11,827	11,839	11,851	11,863	11,875	11,887	11,899	11,911	11,923	11,935
1200	11,947	11,959	11,971	11,983	11,995	12,007	12,019	12,031	12,043	12,055
1210	12,067	12,079	12,091	12,104	12,116	12,128	12,140	12,152	12,164	12,176
1220	12,188	12,200	12,212	12,224	12,236	12,248	12,260	12,272	12,284	12,296
1230	12,308	12,320	12,332	12,345	12,357	12,369	12,381	12,393	12,405	12,417
1240	12,429	12,441	12,453	12,465	12,477	12,489	12,501	12,513	12,526	12,538
1250	12,550	12,562	12,574	12,586	12,598	12,610	12,622	12,634	12,647	12,659
1260	12,671	12,683	12,695	12,707	12,719	12,731	12,743	12,755	12,768	12,780
1270	12,792	12,804	12,816	12,828	12,840	12,852	12,864	12,876	12,889	12,901

ДОДАТОК 3

**Градувальна характеристика
платинородій (30 %) – платинородієвої (6 %) терморпари
в діапазоні температур 300...1800 °С**

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійніва сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
300	0,431	0,434	0,437	0,440	0,443	0,446	0,449	0,452	0,456	0,459
310	0,462	0,465	0,468	0,472	0,475	0,478	0,481	0,484	0,488	0,491
320	0,494	0,497	0,500	0,504	0,507	0,510	0,513	0,517	0,520	0,524
330	0,527	0,530	0,534	0,537	0,541	0,544	0,547	0,551	0,554	0,558
340	0,561	0,564	0,568	0,571	0,575	0,578	0,582	0,585	0,589	0,592
350	0,596	0,600	0,603	0,607	0,610	0,614	0,618	0,621	0,625	0,628
360	0,632	0,636	0,639	0,643	0,646	0,650	0,654	0,658	0,661	0,665
370	0,669	0,673	0,677	0,680	0,684	0,688	0,692	0,696	0,699	0,703
380	0,707	0,711	0,715	0,719	0,723	0,727	0,731	0,735	0,738	0,742
390	0,746	0,750	0,754	0,758	0,762	0,766	0,770	0,774	0,778	0,782
400	0,786	0,790	0,794	0,799	0,803	0,807	0,811	0,815	0,819	0,823
410	0,827	0,831	0,835	0,840	0,844	0,848	0,852	0,857	0,861	0,866
420	0,870	0,874	0,878	0,883	0,887	0,891	0,895	0,900	0,904	0,909
430	0,913	0,917	0,922	0,926	0,931	0,935	0,939	0,944	0,948	0,953
440	0,957	0,961	0,966	0,970	0,975	0,979	0,984	0,988	0,993	0,997
450	1,002	1,007	1,011	1,016	1,020	1,025	1,030	1,034	1,039	1,043
460	1,048	1,053	1,057	1,062	1,066	1,071	1,076	1,081	1,085	1,090
470	1,095	1,100	1,105	1,109	1,114	1,119	1,124	1,129	1,133	1,138
480	1,143	1,148	1,153	1,157	1,162	1,167	1,172	1,177	1,182	1,187
490	1,192	1,197	1,202	1,206	1,211	1,216	1,221	1,226	1,231	1,236
500	1,241	1,246	1,251	1,257	1,262	1,267	1,272	1,277	1,282	1,287
510	1,292	1,297	1,302	1,308	1,313	1,318	1,323	1,328	1,334	1,339
520	1,344	1,349	1,354	1,360	1,365	1,370	1,375	1,381	1,386	1,392
530	1,397	1,402	1,407	1,413	1,418	1,423	1,428	1,434	1,439	1,445
540	1,450	1,455	1,461	1,466	1,472	1,477	1,483	1,488	1,494	1,499
550	1,505	1,510	1,516	1,521	1,527	1,532	1,538	1,543	1,549	1,554
560	1,560	1,566	1,571	1,577	1,582	1,588	1,594	1,600	1,605	1,611
570	1,617	1,623	1,628	1,634	1,639	1,645	1,651	1,657	1,662	1,668

Продовження додатка 3

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійніва сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
580	1,674	1,680	1,686	1,691	1,697	1,703	1,709	1,715	1,720	1,726
590	1,732	1,738	1,744	1,750	1,756	1,762	1,768	1,774	1,779	1,785
600	1,791	1,797	1,803	1,809	1,815	1,821	1,827	1,833	1,839	1,845
610	1,851	1,857	1,863	1,870	1,876	1,882	1,888	1,894	1,900	1,906
620	1,912	1,918	1,924	1,931	1,937	1,943	1,949	1,955	1,962	1,968
630	1,974	1,980	1,986	1,993	1,999	2,005	2,011	2,017	2,024	2,030
640	2,036	2,042	2,049	2,055	2,062	2,068	2,074	2,081	2,087	2,094
650	2,100	2,106	2,113	2,119	2,126	2,132	2,138	2,145	2,151	2,158
660	2,164	2,171	2,177	2,184	2,190	2,197	2,204	2,210	2,217	2,223
670	2,230	2,237	2,243	2,250	2,256	2,263	2,270	2,276	2,283	2,289
680	2,296	2,303	2,309	2,316	2,322	2,329	2,336	2,343	2,349	2,356
690	2,363	2,370	2,376	2,383	2,389	2,396	2,403	2,410	2,416	2,423
700	2,430	2,437	2,444	2,451	2,458	2,465	2,472	2,479	2,485	2,492
710	2,499	2,506	2,513	2,520	2,527	2,534	2,541	2,548	2,555	2,562
720	2,569	2,576	2,583	2,590	2,597	2,604	2,611	2,618	2,625	2,632
730	2,639	2,646	2,653	2,660	2,667	2,674	2,681	2,688	2,696	2,703
740	2,710	2,717	2,724	2,732	2,739	2,746	2,753	2,760	2,768	2,775
750	2,782	2,789	2,796	2,804	2,811	2,818	2,825	2,833	2,840	2,848
760	2,855	2,862	2,870	2,877	2,885	2,892	2,899	2,906	2,914	2,921
770	2,928	2,936	2,943	2,951	2,958	2,966	2,973	2,981	2,988	2,996
780	3,003	3,010	3,018	3,025	3,033	3,040	3,048	3,055	3,063	3,070
790	3,078	3,086	3,093	3,101	3,108	3,116	3,124	3,131	3,139	3,146
800	3,154	3,162	3,169	3,177	3,184	3,192	3,200	3,208	3,215	3,223
810	3,231	3,239	3,246	3,254	3,261	3,269	3,277	3,285	3,292	3,300
820	3,308	3,316	3,324	3,331	3,339	3,347	3,355	3,363	3,371	3,379
830	3,387	3,395	3,403	3,410	3,418	3,426	3,434	3,442	3,450	3,458
840	3,466	3,474	3,482	3,490	3,498	3,506	3,514	3,522	3,530	3,538
850	3,546	3,554	3,562	3,570	3,578	3,586	3,594	3,602	3,610	3,618
860	3,626	3,634	3,642	3,651	3,659	3,667	3,675	3,683	3,692	3,700
870	3,708	3,716	3,724	3,733	3,741	3,749	3,757	3,765	3,774	3,782
880	3,790	3,798	3,806	3,815	2,823	3,831	3,839	3,848	3,856	3,865
890	3,873	3,882	3,891	3,899	3,907	3,915	3,923	3,932	3,940	3,949
900	3,957	3,965	3,974	3,982	3,991	3,999	4,007	4,016	4,024	4,033

Продовження додатка 3

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійніва сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
910	4,041	4,049	4,058	4,066	4,075	4,083	4,092	4,100	4,109	4,117
920	4,126	4,135	4,143	4,152	4,160	4,169	4,178	4,186	4,195	4,203
930	4,212	4,221	4,229	4,237	4,246	4,255	4,264	4,272	4,281	4,289
940	4,298	4,307	4,316	4,324	4,333	4,342	4,351	4,360	4,368	4,377
950	4,386	4,395	4,404	4,412	4,421	4,430	4,439	4,448	4,456	4,465
960	4,474	4,483	4,492	4,500	4,509	4,518	4,527	4,536	4,544	4,553
970	4,562	4,571	4,580	4,589	4,598	4,607	4,616	4,625	4,634	4,643
980	4,652	4,661	4,670	4,679	4,688	4,697	4,706	4,715	4,724	4,733
990	4,742	4,751	4,760	4,769	4,778	4,787	4,796	4,805	4,815	4,824
1000	4,833	4,842	4,851	4,861	4,870	4,879	4,888	4,897	4,907	4,916
1010	4,925	4,934	4,943	4,953	4,962	4,971	4,980	4,989	4,999	5,008
1020	5,017	5,026	5,035	5,045	5,054	5,063	5,072	5,082	5,091	5,101
1030	5,110	5,119	5,129	5,138	5,148	5,157	5,166	5,176	5,185	5,195
1040	5,204	5,213	5,223	5,232	5,242	5,251	5,260	5,270	5,279	5,289
1050	5,298	5,307	5,317	5,326	5,336	5,345	5,354	5,364	5,373	5,383
1060	5,392	5,402	5,411	5,421	5,430	5,440	5,450	5,459	5,469	5,478
1070	5,488	5,498	5,507	5,517	5,526	5,536	5,546	5,555	5,565	5,574
1080	5,584	5,594	5,603	5,613	5,622	5,632	5,642	5,651	5,661	5,670
1090	5,680	5,690	5,699	5,709	5,718	5,728	5,738	5,748	5,757	5,767
1100	5,777	5,787	5,797	5,806	5,816	5,826	5,836	5,846	5,855	5,865
1110	5,875	5,885	5,895	5,904	5,914	5,924	5,934	5,944	5,953	5,963
1120	5,973	5,983	5,993	6,003	6,013	6,023	6,033'	6,043	6,053	6,063
1130	6,073	6,083	6,893	6,102	6,112	6,122	6,132	6,142	6,152	6,162
1140	6,172	6,182	6,192	6,203	6,213	6,223	6,233	6,243	6,253	6,263
1150	6,273	6,283	6,293	6,303	6,313	6,323	6,333	6,343	6,354	6,364
1160	6,374	6,384	6,394	6,404	6,414	6,424	6,434	6,444	6,455	6,465
1170	6,475	6,485	6,495	6,506	6,516	6,526	6,536	6,546	6,557	6,567
1180	6,577	6,587	6,598	6,608	6,619	6,629	6,639	6,649	6,660	6,670
1190	6,680	6,690	6,701	6,711	6,722	6,732	6,742	6,752	6,763	6,773
1200	6,783	6,793	6,804	6,814	6,825	6,835	6,845	6,856	6,866	6,877
1210	6,887	6,897	6,908	6,918	6,929	6,939	6,949	6,960	6,970	6,981
1220	6,991	7,002	7,012	7,023	7,033	7,044	7,054	7,065	7,075	7,086
1230	7,096	7,107	7,117	7,128	7,138	7,149	7,160	7,170	7,181	7,191

Продовження додатка 3

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійніва сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1240	7,202	7,213	7,223	7,234	7,244	7,255	7,266	7,276	7,287	7,297
1250	7,308	7,319	7,329	7,340	7,350	7,361	7,372	7,382	7,393	7,403
1260	7,414	7,425	7,435	7,446	7,456	7,467	7,478	7,489	7,499	7,510
1270	7,521	7,532	7,543	7,553	7,564	7,575	7,586	7,596	7,607	7,617
1280	7,628	7,639	7,650	7,660	7,671	7,682	7,693	7,704	7,714	7,725
1290	7,736	7,747	7,758	7,768	7,779	7,790	7,801	7,812	7,823	7,834
1300	7,845	7,856	7,867	7,877	7,888	7,899	7,910	7,921	7,931	7,942
1310	7,953	7,964	7,975	7,986	7,997	8,008	8,019	8,030	8,041	8,052
1320	8,063	8,074	8,085	8,086	8,107	8,118	8,129	8,140	8,150	8,161
1330	8,172	8,183	8,194	8,205	8,216	8,227	8,238	8,249	8,261	8,272
1340	8,283	8,294	8,305	8,316	8,327	8,338	8,349	8,360	8,371	8,382
1350	8,393	8,404	8,415	8,427	8,438	8,449	8,460	8,471	8,482	8,493
1360	8,504	8,515	8,526	8,538	8,549	8,560	8,571	8,582	8,594	8,605
1370	8,616	8,627	8,638	8,649	8,660	8,671	8,682	8,693	8,705	8,716
1380	8,727	8,738	8,749	8,761	8,772	8,783	8,794	8,805	8,817	8,828
1390	8,839	8,850	8,862	8,873	8,885	8,896	8,907	8,918	8,930	8,941
1400	8,952	8,963	8,974	8,986	8,997	9,008	9,020	9,031	9,043	9,054
1410	9,065	9,076	9,087	9,099	9,110	9,121	9,132	9,144	9,155	9,167
1420	9,178	9,189	9,201	9,212	9,224	9,235	9,246	9,257	9,269	9,280
1430	9,291	9,302	9,314	9,325	9,337	9,348	9,359	9,371	9,382	9,394
1440	9,405	9,416	9,428	9,439	9,451	9,462	9,473	9,485	9,496	9,508
1450	9,519	9,531	9,542	9,554	9,565	9,577	9,588	9,600	9,611	9,623
1460	9,634	9,645	9,657	9,668	9,680	9,691	9,703	9,714	9,726	9,737
1470	9,749	9,760	9,772	9,783	9,795	9,806	9,817	9,829	9,840	9,852
1480	9,863	9,875	9,886	9,898	9,909	9,921	9,933	9,944	9,956	9,967
1490	9,979	9,990	10,002	10,013	10,025	10,036	10,048	10,059	10,071	10,082
1500	10,094	10,106	10,117	10,129	10,140	10,152	10,164	10,175	10,187	10,198
1510	10,210	10,222	10,233	10,245	10,256	10,268	10,279	10,291	10,302	10,314
1520	10,325	10,337	10,348	10,360	10,371	10,383	10,395	10,406	10,418	10,429
1530	10,441	10,453	10,465	10,476	10,488	10,500	10,512	10,523	10,535	10,546
1540	10,558	10,570	10,581	10,593	10,604	10,616	10,628	10,639	10,651	10,663
1550	10,674	10,686	10,697	10,709	10,720	10,732	10,744	10,755	10,767	10,778
1560	10,790	10,802	10,814	10,825	10,837	10,849	10,861	10,872	10,884	10,895

ДОДАТОК І

**Градувальна характеристика
вольфраменій (5 %) – вольфраменісної (20 %) терморпарі
в діапазоні температур 0...2500°С**

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійнісна сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,013	0,025	0,037	0,050	0,062	0,074	0,087	0,099	0,111
10	0,124	0,136	0,149	0,161	0,174	0,186	0,199	0,211	0,224	0,237
20	0,250	0,263	0,275	0,288	0,301	0,314	0,327	0,339	0,352	0,365
30	0,378	0,391	0,404	0,417	0,430	0,443	0,456	0,469	0,482	0,495
40	0,508	0,521	0,534	0,548	0,561	0,574	0,587	0,600	0,613	0,627
50	0,640	0,653	0,666	0,680	0,693	0,707	0,720	0,734	0,747	0,761
60	0,774	0,788	0,801	0,815	0,828	0,842	0,855	0,869	0,882	0,896
70	0,910	0,924	0,938	0,951	0,965	0,979	0,993	1,007	1,020	1,034
80	1,048	1,062	1,076	1,090	1,104	1,118	1,132	1,146	1,160	1,174
90	1,188	1,202	1,216	1,231	1,245	1,259	1,273	1,287	1,302	1,316
100	1,330	1,344	1,359	1,373	1,388	1,402	1,417	1,431	1,446	1,460
110	1,475	1,489	1,504	1,519	1,534	1,548	1,563	1,578	1,593	1,607
120	1,622	1,637	1,652	1,667	1,682	1,697	1,711	1,726	1,741	1,756
130	1,771	1,786	1,801	1,816	1,831	1,846	1,862	1,877	1,892	1,907
140	1,922	1,937	1,953	1,968	1,983	1,998	2,014	2,029	2,044	2,059
150	2,075	2,090	2,106	2,121	2,137	2,152	2,168	2,183	2,199	2,214
160	2,230	2,246	2,261	2,277	2,293	2,308	2,324	2,340	2,355	2,371
170	2,387	2,403	2,419	2,435	2,451	2,466	2,482	2,498	2,514	2,530
180	2,546	2,562	2,588	2,594	2,610	2,626	2,643	2,659	2,675	2,691
190	2,707	2,723	2,739	2,755	2,772	2,788	2,804	2,820	2,836	2,853
200	2,869	2,885	2,901	2,918	2,934	2,950	2,967	2,983	2,999	3,016
210	3,032	3,048	3,065	3,081	3,097	3,114	3,130	3,146	3,163	3,179
220	3,195	3,212	3,228	3,244	3,261	3,277	3,293	3,310	3,326	3,342
230	3,359	3,375	3,391	3,408	3,424	3,441	3,457	3,474	3,490	3,507
240	3,523	3,540	3,556	3,573	3,589	3,606	3,622	3,639	3,655	3,672
250	3,688	3,705	3,721	3,738	3,754	3,771	3,787	3,804	3,820	3,837
260	3,853	3,807	3,886	3,903	3,919	3,936	3,952	3,969	3,985	4,002
270	4,019	4,035	4,052	4,069	4,085	4,102	4,119	4,135	4,152	4,169

Продовження додатка І

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійніва сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
280	4,185	4,202	4,219	4,235	4,252	4,269	4,285	4,302	4,319	4,335
290	4,352	4,369	4,385	4,402	4,419	4,435	4,452	4,469	4,485	4,502
300	4,519	4,536	4,553	4,569	4,586	4,603	4,620	4,637	4,653	4,670
310	4,687	4,704	4,721	4,737	4,754	4,771	4,788	4,805	4,821	4,838
320	4,855	4,872	4,889	4,906	4,923	4,939	4,956	4,973	4,990	5,007
330	5,024	5,041	5,058	5,075	5,092	5,108	5,125	5,142	5,159	5,176
340	5,193	5,210	5,227	5,244	5,261	5,277	5,294	5,311	5,328	5,345
350	5,362	5,379	5,396	5,413	5,430	5,446	5,463	5,480	5,497	5,514
360	5,531	5,548	5,565	5,582	5,599	5,615	5,632	5,649	5,666	5,683
370	5,700	5,717	5,734	5,751	5,768	5,784	5,801	5,818	5,835	5,852
380	5,869	5,886	5,903	5,920	5,937	5,954	5,971	5,988	6,005	6,022
390	6,039	6,056	6,073	6,090	6,107	6,124	6,141	6,158	6,175	6,192
400	6,209	6,226	6,243	6,260	6,277	6,294	6,311	6,328	6,345	6,362
410	6,379	6,396	6,413	6,430	6,447	6,464	6,481	6,498	6,515	6,532
420	6,549	6,566	6,583	6,600	6,617	6,634	6,651	6,668	6,685	6,702
430	6,719	6,736	6,753	6,770	6,787	6,804	7,821	6,838	6,855	6,872
440	6,884	6,906	6,923	6,940	6,957	6,974	6,991	7,008	7,025	7,042
450	7,059	7,076	7,093	7,110	7,127	7,144	7,161	7,178	7,195	7,212
460	7,229	7,246	7,263	7,280	7,297	7,314	7,331	7,348	7,365	7,382
470	7,399	7,416	7,433	7,450	7,467	7,484	7,501	7,518	7,535	7,552
480	7,569	7,586	7,603	7,620	7,637	7,654	7,671	7,688	7,705	7,722
490	7,739	7,756	7,773	7,790	7,807	7,824	7,841	7,858	7,875	7,892
500	7,909	7,926	7,943	7,960	7,977	7,994	8,010	8,027	8,044	8,061
510	8,078	8,095	8,112	8,129	8,146	8,163	8,180	8,196	8,213	8,230
520	8,247	8,264	8,281	8,298	8,315	8,332	8,348	8,365	8,382	8,399
530	8,416	8,433	8,450	8,467	8,484	8,501	8,517	8,534	8,551	8,568
540	8,585	8,602	8,619	8,636	8,653	8,670	8,686	8,703	8,720	8,737
550	8,754	8,771	8,788	8,805	8,822	8,839	8,855	8,872	8,889	8,906
560	8,923	8,940	8,957	8,974	8,991	9,008	9,024	9,041	9,058	9,075
570	9,092	9,109	9,126	9,143	9,160	9,177	9,193	9,210	9,227	9,244
580	9,261	9,278	9,295	9,312	9,329	9,346	9,362	9,379	9,396	9,413
590	9,430	9,446	9,463	9,480	9,497	9,514	9,531	9,548	9,565	9,582
600	9,598	9,615	9,632	9,648	9,665	9,682	9,698	9,715	9,732	9,748

Продовження додатка І

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійнівна сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
610	9,765	9,782	9,799	9,815	9,832	9,849	9,866	9,882	9,899	9,916
620	9,933	9,950	9,966	9,983	10,000	10,017	10,034	10,050	10,067	10,084
630	10,101	10,118	10,134	10,151	10,168	10,185	10,202	10,218	10,235	10,252
640	10,269	10,286	10,302	10,319	10,336	10,353	10,370	10,386	10,403	10,420
650	10,437	10,454	10,470	10,487	10,504	10,521	10,538	10,554	10,571	10,588
660	10,605	10,622	10,638	10,655	10,672	10,688	10,705	10,722	10,738	10,755
670	10,772	10,789	10,805	10,822	10,839	10,855	10,872	10,889	10,905	10,922
680	10,939	10,956	10,972	10,989	11,006	11,022	11,039	11,056	11,072	11,089
690	11,106	11,123	11,139	11,156	11,173	11,189	11,206	11,223	11,239	11,256
700	11,273	11,290	11,306	11,323	11,340	11,356	11,373	11,390	11,406	11,423
710	11,440	11,456	11,473	11,490	11,506	11,523	11,540	11,556	11,573	11,590
720	11,606	11,622	11,639	11,656	11,672	11,689	11,706	11,722	11,739	11,756
730	11,772	11,788	11,805	11,822	11,838	11,855	11,872	11,888	11,905	11,922
740	11,939	11,954	11,971	11,988	12,004	12,021	12,038	12,054	12,071	12,088
750	12,104	12,121	12,137	12,154	12,170	12,187	12,203	12,220	12,236	12,253
760	12,269	12,286	12,302	12,319	12,335	12,352	12,368	12,385	12,401	12,418
770	12,434	12,451	12,467	12,484	12,500	12,517	12,533	12,550	12,566	12,583
780	12,599	12,616	12,632	12,649	12,665	12,682	12,698	12,715	12,731	12,748
790	12,764	12,781	12,797	12,814	12,830	12,847	12,863	12,880	12,896	12,913
800	12,929	12,945	12,962	12,978	12,995	13,011	13,027	13,044	13,060	13,077
810	13,093	13,109	13,126	13,142	13,159	13,175	13,191	13,208	13,224	13,241
820	13,257	13,273	13,290	13,306	13,323	13,339	13,355	13,372	13,388	13,405
830	13,421	13,437	13,453	13,470	13,486	13,502	13,519	13,535	13,551	13,568
840	13,584	13,600	13,616	13,633	13,650	13,666	13,682	13,698	13,714	13,731
850	13,747	13,763	13,779	13,796	13,812	13,828	13,845	13,861	13,877	13,894
860	13,910	13,926	13,942	13,959	13,975	13,991	14,007	14,023	14,040	14,056
870	14,072	14,088	14,104	14,121	14,137	14,153	14,169	14,185	14,202	14,218
880	14,234	14,250	14,266	14,282	14,298	14,314	14,331	14,347	14,363	14,379
890	14,395	14,411	14,427	14,443	14,459	14,475	14,492	14,508	14,524	14,540
900	14,556	14,572	14,588	14,604	14,620	14,636	14,652	14,668	14,684	14,700
910	14,716	14,732	14,748	14,764	14,780	14,796	14,812	14,828	14,844	14,860
920	14,876	14,892	14,908	14,924	14,940	14,956	14,971	14,987	15,003	15,019
930	15,035	15,051	15,067	15,083	15,099	15,115	15,130	15,146	15,162	15,178

Продовження додатка І

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійнісна сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
940	15,194	15,210	15,226	15,241	15,257	15,273	15,289	15,305	15,320	15,336
950	15,352	15,368	15,384	15,399	15,415	15,431	15,447	15,463	15,478	15,494
960	15,510	15,526	15,542	15,557	15,572	15,588	15,603	15,619	15,635	15,651
970	15,665	15,683	15,698	15,714	15,730	15,745	15,761	15,777	15,792	15,808
980	15,824	15,839	15,855	15,871	15,886	15,902	15,918	15,933	15,949	15,965
990	15,980	15,995	16,011	16,027	16,042	16,058	16,074	16,089	16,105	16,121
1000	16,136	16,152	16,167	16,183	16,198	16,214	16,229	16,245	16,260	16,276
1010	16,291	16,307	16,322	16,338	16,353	16,369	16,384	16,400	16,415	16,431
1020	16,446	16,462	16,477	16,492	16,508	16,523	16,538	16,554	16,569	16,584
1030	16,600	16,616	16,631	16,646	16,662	16,677	16,692	16,708	16,723	16,738
1040	16,754	16,769	16,784	16,800	16,815	16,830	16,846	16,861	16,876	16,892
1050	16,907	16,922	16,938	16,953	16,968	16,984	16,999	17,014	17,030	17,045
1060	17,060	17,075	17,090	17,106	17,121	17,136	17,151	17,166	17,182	17,197
1070	17,212	17,227	17,242	17,258	17,273	17,288	17,303	17,318	17,334	17,349
1080	17,364	17,379	17,394	17,409	17,424	17,439	17,455	17,470	17,485	17,500
1090	17,515	17,530	17,545	17,560	17,575	17,590	17,606	17,621	17,636	17,651
1100	17,666	17,681	17,696	17,711	17,726	17,741	17,756	17,771	17,786	17,801
1110	17,816	17,831	17,846	17,861	17,876	17,891	17,906	17,921	17,936	17,951
1120	17,966	17,981	17,996	18,011	18,026	18,041	18,055	18,070	18,085	18,100
1130	18,115	18,130	18,145	18,160	18,175	18,190	18,204	18,219	18,234	18,249
1140	18,264	18,279	18,294	18,308	18,323	18,338	18,353	18,368	18,382	18,397
1150	18,412	18,427	18,442	18,456	18,471	18,486	18,501	18,516	18,530	18,545
1160	18,560	18,575	18,589	18,604	18,619	18,634	18,648	18,663	18,678	18,693
1170	18,707	18,722	18,737	18,751	18,766	18,781	18,795	18,810	18,825	18,839
1180	18,854	18,869	18,883	18,898	18,913	18,927	18,942	18,957	18,971	18,986
1190	19,000	19,015	19,029	19,044	19,059	19,073	19,088	19,103	19,117	19,132
1200	19,146	19,161	19,175	19,190	19,204	19,219	19,233	19,248	19,262	19,277
1210	19,291	19,306	19,320	19,335	19,349	19,364	19,378	19,393	19,407	19,422
1220	19,436	19,450	19,465	19,479	19,493	19,508	19,522	19,536	19,551	19,565
1230	19,580	19,594	19,609	19,623	19,637	19,652	19,666	19,680	19,695	19,709
1240	19,724	19,738	19,752	19,767	19,781	19,795	19,810	19,824	19,838	19,853
1250	19,867	19,881	19,896	19,910	19,924	19,939	19,953	19,967	19,982	19,996
1260	20,010	20,024	20,038	20,053	20,067	20,081	20,095	20,109	20,124	20,138

Продовження додатка І

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійні сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1270	20,152	20,166	20,180	20,195	20,209	20,223	20,237	20,251	20,266	20,280
1280	20,294	20,308	20,322	20,336	20,350	20,364	20,379	20,393	20,407	20,421
1290	20,435	20,449	20,463	20,477	20,491	20,505	20,520	20,534	20,548	20,562
1300	20,576	20,590	20,604	20,618	20,632	20,646	20,660	20,674	20,688	20,702
1310	20,716	20,730	20,744	20,758	20,772	20,786	20,800	20,814	20,828	20,842
1320	20,856	20,870	20,884	20,898	20,912	20,926	20,940	20,954	20,968	20,982
1330	20,996	21,010	21,024	21,038	21,052	21,066	21,079	21,093	21,107	21,121
1340	21,135	21,149	21,163	21,177	21,191	21,205	21,218	21,232	21,246	21,260
1350	21,264	21,288	21,302	21,316	21,330	21,344	21,357	21,371	21,385	21,399
1360	21,413	21,427	21,441	21,454	21,468	21,482	21,496	21,510	21,623	21,537
1370	21,551	21,565	21,579	21,592	21,606	21,620	21,634	21,648	21,661	21,675
1380	21,689	21,703	21,716	21,730	21,744	21,757	21,771	21,785	21,798	21,812
1390	21,826	21,840	21,853	21,867	21,881	21,894	21,908	21,922	21,935	21,949
1400	21,963	21,976	21,990	22,004	22,017	22,031	22,045	22,058	22,072	22,086
1410	22,099	22,113	22,127	22,140	22,154	22,168	22,181	22,195	22,208	22,222
1420	22,235	22,249	22,262	22,276	22,289	22,303	22,316	22,330	22,343	22,357
1430	22,370	22,384	22,397	22,411	22,424	22,438	22,451	22,465	22,478	22,492
1440	22,505	22,519	22,532	22,545	22,559	22,572	22,585	22,599	22,612	22,625
1450	22,639	22,653	22,666	22,679	22,693	22,706	22,719	22,733	22,746	22,759
1460	22,773	22,786	22,799	22,813	22,826	22,839	22,853	22,866	22,879	22,893
1470	22,906	22,919	22,933	22,946	22,959	22,973	22,986	22,999	23,013	23,026
1480	23,039	23,052	23,065	23,079	23,092	23,105	23,118	23,131	23,145	23,158
1490	23,171	23,184	23,197	23,211	23,224	23,237	23,250	23,263	23,277	23,290
1500	23,303	23,316	23,329	23,342	23,355	23,368	23,382	23,395	23,408	23,421
1510	23,434	23,447	23,460	23,473	23,486	23,499	23,513	23,526	23,539	23,552
1520	23,565	23,578	23,591	23,604	23,617	23,630	23,643	23,656	23,669	23,682
1530	23,695	23,708	23,721	23,734	23,747	23,760	23,773	23,786	23,799	23,812
1540	23,825	23,838	23,851	23,864	23,877	23,890	23,902	23,915	23,928	23,941
1550	23,954	23,967	23,980	23,993	24,006	24,019	24,031	24,044	24,057	24,070
1560	24,083	24,096	24,109	24,121	24,134	24,147	24,160	24,173	24,185	24,198
1570	24,211	24,224	24,237	24,249	24,262	24,275	24,287	24,300	24,313	24,325
1580	24,338	24,350	24,363	24,376	24,388	24,401	24,414	24,426	24,439	24,452
1590	24,464	24,476	24,489	24,502	24,514	24,527	24,540	24,552	24,565	24,578

Продовження додатка І

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійнівна сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1600	24,590	24,603	24,615	24,628	24,640	24,653	24,665	24,678	24,690	24,703
1610	24,715	24,728	24,740	24,753	24,765	24,778	24,790	24,803	24,815	24,828
1620	24,840	24,853	24,865	24,877	24,870	24,902	24,914	24,927	24,939	24,951
1630	24,964	24,977	24,989	25,001	25,014	25,026	25,038	25,051	25,063	25,075
1640	25,088	25,100	25,112	25,125	25,137	25,149	25,162	25,174	25,186	25,199
1650	25,211	25,223	25,235	25,248	25,260	25,272	25,285	25,297	25,309	25,322
1660	25,334	25,346	25,358	25,371	25,383	25,395	25,407	25,419	25,432	25,444
1670	25,456	25,468	25,480	25,493	25,505	25,517	25,529	25,541	25,554	25,566
1680	25,578	25,590	25,602	25,614	25,626	25,638	25,651	25,663	25,675	25,687
1690	25,699	25,711	25,723	25,735	25,747	25,759	25,772	25,784	25,796	25,808
1700	25,820	25,832	25,844	25,856	25,868	25,880	25,892	25,904	25,916	25,928
1710	25,940	25,952	25,964	25,976	25,988	26,000	26,012	26,024	26,036	26,048
1720	26,060	26,072	26,084	26,096	26,108	26,120	26,131	26,143	26,155	26,167
1730	26,179	26,191	26,203	26,215	26,227	26,239	26,250	26,262	26,274	26,286
1740	26,298	26,310	26,322	26,333	26,345	26,357	26,369	26,381	26,392	26,404
1750	26,416	26,428	26,440	26,451	26,463	26,475	26,487	26,499	26,510	26,522
1760	26,534	26,546	26,558	26,569	26,581	26,593	26,604	26,616	26,628	26,639
1770	26,651	26,663	26,674	26,686	26,698	26,709	26,721	26,733	26,744	26,756
1780	26,768	26,779	26,791	26,803	26,814	26,826	26,838	26,849	26,861	26,873
1790	26,884	26,896	26,907	26,919	26,930	26,942	26,953	26,965	26,976	26,988
1800	26,999	27,011	27,022	27,033	27,045	27,056	27,067	27,079	27,090	27,101
1810	27,113	27,124	27,135	27,147	27,158	27,169	27,181	27,192	27,203	27,215
1820	27,226	27,237	27,248	27,260	27,271	27,282	27,294	27,305	27,316	27,368
1830	27,339	27,350	27,361	27,372	27,383	27,395	27,406	27,417	27,428	27,439
1840	27,451	27,462	27,473	27,484	27,495	27,507	27,518	27,529	27,540	27,551
1850	27,563	27,574	27,585	27,596	27,607	27,619	27,630	27,641	27,652	27,663
1860	27,675	27,686	27,697	27,708	27,719	27,730	27,742	27,753	27,764	27,775
1870	27,786	27,797	27,808	27,819	27,830	27,841	27,853	27,864	27,875	27,886
1880	27,897	27,908	27,919	27,930	27,941	27,952	27,963	27,974	27,985	27,996
1890	28,007	28,018	28,029	28,040	28,051	28,062	28,073	28,084	28,095	28,106
1900	28,117	28,128	28,139	28,150	28,161	28,171	28,182	28,193	28,204	28,215
1910	28,226	28,237	28,248	28,259	28,270	28,280	28,291	28,302	28,313	28,324
1920	28,334	28,345	28,356	28,367	28,378	28,388	28,399	28,410	28,421	28,432

Продовження додатка І

Температура робочого кінця, °С	Термоелектрорушійніва сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1930	28,442	28,453	28,464	28,474	28,485	28,496	28,605	28,517	28,528	28,538
1940	28,549	28,560	28,571	28,581	28,592	28,603	28,613	28,624	28,635	28,645
1950	28,656	28,666	28,677	28,688	28,698	28,709	28,720	28,730	28,741	28,752
1960	28,762	28,773	28,783	28,794	28,804	28,815	28,825	28,836	28,846	28,857
1970	28,867	28,877	28,888	28,898	28,909	28,919	28,930	28,940	28,951	28,961
1980	28,971	28,981	28,991	29,002	29,012	29,022	29,033	29,043	29,053	29,064
1990	29,074	29,084	29,094	29,104	29,114	29,125	29,135	29,145	29,155	29,165
2000	29,177	29,187	29,197	29,207	29,217	29,228	29,238	29,248	29,258	29,268
2010	29,279	29,289	29,299	29,309	29,319	29,330	29,340	29,350	29,360	29,370
2020	29,381	29,391	29,401	29,411	29,421	29,432	29,442	29,452	29,462	29,472
2030	29,483	29,493	29,503	29,513	29,523	29,533	29,544	29,554	29,564	29,574
2040	29,584	29,594	29,604	29,614	29,624	29,634	29,645	29,655	29,665	29,675
2050	29,685	29,695	29,705	29,715	29,725	29,735	29,746	29,756	29,766	29,776
2060	29,786	29,796	29,806	29,816	29,826	29,836	29,846	29,856	29,866	29,876
2070	29,886	29,896	29,906	29,916	29,926	29,936	29,946	29,956	29,966	29,976
2080	29,986	29,996	30,006	30,016	30,026	30,036	30,046	30,056	30,066	30,076
2090	30,086	30,096	30,106	30,116	30,126	30,136	30,145	30,155	30,165	30,175
2100	30,185	30,195	30,205	30,215	30,225	30,234	30,244	30,254	30,264	30,274
2110	30,284	30,294	30,304	30,313	30,323	30,333	30,343	30,353	30,362	30,372
2120	30,382	30,392	30,402	30,411	30,421	30,431	30,441	30,451	30,460	30,469
2130	30,479	30,488	30,498	30,508	30,517	30,527	30,537	30,546	30,556	30,566
2140	30,575	30,585	30,594	30,604	30,613	30,623	30,632	30,642	30,651	30,661
2150	30,670	30,680	30,789	30,699	30,708	30,718	30,727	30,737	30,746	30,756
2160	30,765	30,775	30,784	30,793	30,803	30,812	30,821	30,831	30,840	30,849
2170	30,859	30,868	30,877	30,887	30,896	30,905	30,915	30,924	30,933	30,943
2180	30,952	30,961	30,977	30,979	30,988	30,998	31,007	31,016	31,025	31,034
2190	31,044	31,053	31,062	31,071	31,080	31,090	31,099	31,108	31,117	31,126
2200	31,136	31,145	31,154	31,163	31,172	31,181	31,190	31,200	31,209	31,218
2210	31,227	31,236	31,245	31,254	31,263	31,272	31,282	31,291	31,300	31,309
2220	31,318	31,327	31,336	31,345	31,354	31,363	31,372	31,381	31,390	31,399
2230	31,408	31,417	31,426	31,435	31,444	31,453	31,462	31,471	31,480	31,489
2240	31,498	31,507	31,516	31,525	31,534	31,542	31,551	31,560	31,569	31,578
2250	31,587	31,596	31,605	31,614	31,623	31,631	31,640	31,649	31,658	31,667

ДОДАТОК К

Градувальна таблиця
дротових термометрів опору

Температура T, °C	Платинові			Мідні	
	гр.20	гр. 21	гр. 22	гр. 23	гр. 24
	Опір, Ом				
-50	8,00	36,80	80,00	41,71	78,70
-40	8,40	38,65	84,03	43,97	82,96
-30	8,80	40,50	88,04	46,23	87,22
-20	9,20	42,34	92,04	48,48	91,48
-10	9,60	44,17	96,03	50,74	95,74
0	10,00	46,00	100,00	53,00	100,00
10	10,40	47,82	103,96	55,26	104,26
20	10,79	49,64	107,91	57,52	108,52
30	11,18	51,45	111,85	59,77	112,78
40	11,58	53,26	115,78	62,03	117,04
50	11,97	55,06	119,70	64,99	121,30
60	12,36	56,86	123,60	66,55	125,56
70	12,75	58,65	127,49	68,81	129,82
80	13,14	60,43	131,37	71,06	134,08
90	13,52	62,21	135,24	73,32	138,34
100	13,91	63,99	139,10	75,58	142,60
110	14,29	65,76	142,95	77,84	146,86
120	14,68	67,52	146,78	80,09	151,12
130	15,06	69,28	150,60	82,35	155,38
140	14,44	71,03	154,41	84,61	159,64
150	15,82	72,78	158,21	86,87	163,90
160	16,20	74,52	162,00	89,13	168,16
170	16,58	76,26	165,78	91,38	172,42
180	16,95	77,99	169,54	93,64	176,68
190	17,33	79,71	173,29	—	—
200	17,70	81,43	177,03	—	—

ДОДАТОК Л

Тиск і щільність насичених водяних пар

t, °C	Тиск		$\rho_{\text{макс}},$ г/м ³	t, °C	Тиск		$\rho_{\text{макс}},$ г/м ³
	кПа	мм.рт.ст.			кПа	мм.рт.ст.	
-5	0,401	3,01	3,25	12	1,401	10,51	10,67
-4	0,427	3,28	3,53	13	1,497	11,23	11,36
-3	0,463	3,47	3,83	14	1,597	11,98	12,08
-2	0,517	3,88	4,14	15	1,704	12,78	12,84
-1	0,563	4,22	4,49	16	1,817	13,63	13,65
0	0,611	4,58	4,85	17	1,937	14,53	14,50
1	0,656	4,92	5,20	18	2,062	15,47	15,39
2	0,705	5,59	5,57	19	2,196	16,47	16,32
3	0,757	5,68	5,95	20	2,337	17,53	17,32
4	0,813	6,10	6,37	21	2,486	18,65	18,35
5	0,872	6,54	6,80	22	2,642	19,82	19,44
6	0,935	7,01	7,27	23	2,809	21,07	20,60
7	1,005	7,54	7,79	24	2,984	22,38	21,81
8	1,072	8,04	8,28	25	3,168	23,76	23,07
9	1,148	8,61	8,83	26	3,361	25,21	24,40
10	1,227	9,20	9,41	27	3,565	26,74	25,79
11	1,312	9,84	10,02	28	3,780	28,35	27,26

ДОДАТОК М

Інструкція до роботи з прибором QUINTOX KM9006

1 Установка зонда й вологозбірника.

Дістаньте газовідбірний зонд із відсіку зберігання.

Зніміть вологозбірник із кришки корпусу й приєднаєте його до газового патрубку (з написом GAS). Трикутники на вологозбірник повинні бути спрямовані вістрям до патрубка.

Приєднаєте газоотборний зонд до входу вологозбірника.

Підключите кабель зонда до рознімання на середній панелі приладу, позначеному FLUE.

2 Підключення ВБУ

Дістаньте ВБУ зі спеціального відсіку. Приєднаєте 1,5 або 10-метровий кабель до верхнього рознімання на корпусі ВБУ з одного боку, і до рознімання на середній панелі приладу, позначеному REMOTE MONITOR, з іншої сторони.

3 Щоденні перевірки Перед початком вимірів:

3.1 Із вологозбірника повинна бути вилучена вода. Перед початком вимірів його варто встановити.

3.2 Пиловий фільтр повинен бути очищений.

3.3 Переконайтеся, що всі гвинти щільно затягнуті.

3.4 QUINTOX повинен бути встановлений на гладкій плоскій поверхні.

3.5 QUINTOX повинен перебувати у вертикальному положенні.

3.6 Перевірте штирьки кабелю ВБУ й рознімання на корпусі.

3.7 При роботі в тяжких умовах закривайте прилад кришкою.

3.8 Перевірте кабелі на наявність перегинів.

3.9 Переконайтеся, що залишкового ресурсу батарей вистачить для проведення вимірів.

4 Розташування зонда в газоході

10-мм отвір для зонда повинне розташовуватися за 2 D до виходу з газоходу, де D - діаметр газоходу.

Отвору діаметром понад 20 мм повинне додатково ущільнюватися, щоб запобігти перекручуванню результатів за рахунок підсмоктування повітря.

Помістіть зонд у центр газоходу, використовуючи фіксатор.

Виміри виробляються тільки ПІСЛЯ калібрування кисневого датчика. Переконайтеся у відсутності підсмоктувань повітря в газохід. Розташуйте зонд удалині від димососів, які створюють негативний тиск

понад 500 мм водяний стовп.

5 Установка параметрів

5.1 Включення живлення -- калібрування датчика O₂ -- вибір палива OLTNTOX почне аналізувати димові гази після калібрування кисневого датчика й вибору палива:

Використайте клавіші
КЛАВІШІ НА ВБУ

↑ ↓ ||

ENTER

для підтвердження вибору.
ПОКАЗАННЯ ДІСПЛЕЮ

1.

ON
OFF

```
-----
***KANE - MAY***
**KM QUINTOX**
-----
```

```
-----
*CALIBRATING*
      300
-----
```

```
SET O2 % = 20.9
O2 % ... xx.xx
```

2.

↑
↓

20.9%

```
TIME    16:47:00
DATE    07-05-92
INSTABILITY  0
BATTERY (%) 80
```

5.2 Зміна обраного палива

Точний вибір палива необхідний для розрахунку к.п.буд. Користувач має можливість вибрати стандартне паливо, характеристики якого занесені в прилад, або визначити свої характеристики (користувальницьке паливо). При першому включенні приладу за замовчуванням вибирається паливо NATURAL GAS з англійської стандартної таблиці палив.

ВИБІР СТАНДАРТНОГО ПАЛИВА:

Виберіть 1 з 9 таблиць палива, а потім вид палива:

КЛАВІШИ НА ВБУ

ПОКАЗАННЯ ДИСПЛЕЯ

1. **SET/CAL**

2. **FUEL**

STANDARD OR USER?
STANDARD FUEL

3. **↑**
↓ СТАНДАРТНОЕ ТОПЛИВО
ENTER

SELECT FUEL TABLE
ENGLISH

4. **↑**
↓ ТАБЛИЦА ТОПЛИВ
ENTER

SELECT FUEL TYPE
NATURAL GAS

5. **↑**
↓ ТОПЛИВО
ENTER

ВОЗВРАЩАЕТСЯ К
ПРЕДЫДУЩЕМУ

ДЛЯ ПРОВЕРКИ ВВЕДЕННЫХ ДАННЫХ:

FUEL

NATURAL GAS
K1g 0.350 K1n 0.393
K2 11.89 K3 9.83
K4 32 O2r 03.0

ВИБІР КОРИСТУВАЛЬНИЦЬКОГО ПАЛИВА

Уведення характеристик нестандартного палива:

КЛАВІШІ НА ВБУ

ПОКАЗАННЯ ДИСПЛЕЯ

1. **SET/CAL**

2. **FUEL**

STANDARD OR USER?
STANDARD FUEL

3. ↑
ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОЕ ТОПЛИВО
↓ (USER FUEL) **ENTER**

SET
K1g 0.000 K1n 0.000
K2 00.00 K3 0.00
K4 32 O2r 00.0

K1g = вища теплотворна здатність

K1n = нижча теплотворна здатність

K2 = теоретич. макс. CO; (%)

K3 = передбачувані втрати з пором (%)

K4 == значание альфа (32/48)

O2m ^ стандартний зміст O₂; (%) для розрахунку мг/м³

4. ↑
Ввести 1-ю цифру вместо 0
↓ **ENTER**

SET
K1g 0.000 K1n 0.000
K2 00.00 K3 0.00
K4 32 O2r 00.0

5. ПОВТОРЯЙТЕ п. 4 ДО КОНЦА ВВОДА

ENTER

ВОЗВРАЩАЕТСЯ К
ПРЕДЫДУЩЕМУ



ПРОВЕРКА ВВОДА

FUEL

USER FUEL
K1g 0.634 K1n 0.704
K2 19.00 K3 8.39
K4 32 O2r 11.0

ПІДСВІЧУВАННЯ Й КОНТРАСТНІСТЬ

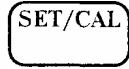


КЛАВІШИ НА ВБУ

1. 
2. 

ПОКАЗАННЯ ДИСПЛЕЯ



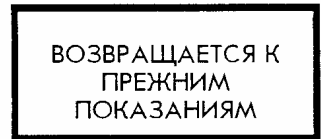
КЛАВІШИ НА ВБУ

1. 
2. 
3. 

ПОКАЗАННЯ ДИСПЛЕЯ



ЗМІНЮЙТЕ КОНТРАСТНІСТЬ



РОЗРАХУНОК К.П.Д. З ВИКОРИСТАННЯМ ВИЩОЇ АБО НИЖЧОЇ ТЕПЛОТВОРНОЇ ЗДАТНОСТІ

QUINTOX розраховує ККД, спалювання палива на підставі нижчої або вищої теплотворної здатності.

КЛАВІШИ НА ВБУ

ПОКАЗАННЯ ДИСПЛЕЯ

1. SET/CAL

SET EFFICIENCY
NET

2. EFF

3. ↑
↓

ENTER

ВОЗВРАЩАЕТСЯ К
ПРЕЖНИМ
ПОКАЗАНИЯМ

ВИМІР ТЕМПЕРАТУР НАВКОЛИШНЬОГО ПОВІТРЯ, ПОВІТРЯ НА ВХОДІ В КАЗАН І ДИМОВІ ГАЗИ

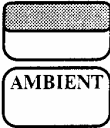
Температура навколишнього повітря й повітря на вході - 3 варіанти:

Варіант 1 Показувати температуру навколишнього повітря Варіант 2

Установити температуру повітря на вході в казан Варіант 3 Безупинно вимірювати температуру повітря на вході

Варіант 1 Показувати температуру навколишнього повітря КЛАВІШИ НА ВБУ

ПОКАЗАННЯ ДИСПЛЕЯ

1. 

AMBIENT	C	26.7
SENSOR	C	26.7
FLUE	C	180.0
INLT		NOT FITTED

Варіант 2 Установити температуру повітря на вході в котел

1. Установіть газовідбірний зонд у тракт подачі повітря для пальників.

1. Кабель зонда залишається підключеним до гнізда FLUE.

КЛАВІШИ НА ВБУ

ПОКАЗАННЯ ДИСПЛЕЯ

1. SET/CAL

SET INLET TEMP
NO

2. INLET

3. ↑↑
↓↓
УСТАНОВИТЬ

ENTER

PLACE PROBE BY
AIR INLET-----
FLUE .. C 50.004. ДОЖДИТЕСЬ СТАБИЛИЗАЦИИ
ПОКАЗАНИЙ

ENTER

INLT... C 50.0
AMBIENT C 26.7
O2 % ... 20.9
FLUE C 50.0

Варіант 3 Безупинно вимірювати температуру повітря на вході

1. Підключите додатковий зонд до рознімання INLET.

2. Помістите зонд у тракт подачі повітря для пальників.

КЛАВІШІ НА ВБУ

ПОКАЗАННЯ ДИСПЛЕЯ

1.

INLET

INLT... C 50.0
AMBIENT C 26.7
O2 % ... 5.9
FLUE C 180.0

Температура нетто й температура газів, що йдуть,

КЛАВІШІ НА ВБУ

ПОКАЗАННЯ ДИСПЛЕЯ

1.

NETT

NETT... C 130.0
O2 % ... 5.9
CO ppm 25
FLUE .. C 180.0

2.

FLUE

FLUE .. C 180.0
AMBIENT C 26.7
O2 % ... 5.9
Prs NOT FITTED

ВИБІР ОДИНИЦЬ ВИМІРУ Й ДОПОМІЖНИХ УСТАНОВОК

Для уведення 7 зазначених нижче установок натисніть



Для вибору установок используйте ↑ ↑ и **ENTER**

КЛАВІШИ НА ВБУ

ПОКАЗАННЯ ДИСПЛЕЯ

- | | | | |
|----|----------|---------|-------------------------------------|
| 1. | | | |
| 2. | | | |
| 3. | | | |
| 4. | ↑↑
↓↓ | ВЫБРАТЬ | SET LANGUAGE
ENGLISH |
| 5. | ↑↑
↓↓ | ВЫБРАТЬ | SET LINE REJECTION
50 Hz |
| 6. | ↑↑
↓↓ | ВЫБРАТЬ | SET ppm or mg/m ³
ppm |
| 7. | ↑↑
↓↓ | ВЫБРАТЬ | SET COMPENSATION
OFF |
| | | | SET TEMPERATUR
CELSIUS |

8.	↑↑ ↓↓	ВЫБРАТЬ	ENTER	SET Prs inWg
9.	↑↑ ↓↓	ВЫБРАТЬ	ENTER	SET REFERENCE O2 YES
10.	↑↑ ↓↓	ВЫБРАТЬ	ENTER	ПРЕЖНИЕ ПОКАЗАНИЯ

Вибір мови

Дозволяє вибрати 1 з 3 або 4 мов.

Частота напруги живлення

50 Hz = Європа, Росія; 60 Hz = США, Канада, Японія. Юж. Америка

ppm або mg/m³

Всі показання концентрації шкідливих речовин виражаються в ppm. ppm (ppm, наведені до стандартного змісту кисню), mg/m³ або mg/m³n (наведені до стандартного змісту O₂).

Якщо наведені показання використовуються при змісті PRO₂ вище 20%, після відповідного параметра на дисплей виведеться повідомлення O2>20%. Якщо на місці зміст кисню прилад показує FAULT (кисень не виміряється), то всі наведені показання автоматично замінюються непривеленими.

ppm parts per million - частин на мільйон
mg/m³n мг/м³ при 0°C и атмосферному тиску 1013 гПа.

Компенсація датчиків

Електрохімічні датчики володіють т.зв. перехресною чутливістю. Наприклад, H₂ і SO₂ у газах, що йдуть, збільшують показання З. Присутність NO₂ знижує показання по SO₂.

Наявність H_2S знижує показання по NO_2 .

Кожний датчик забезпечує компенсацію по одній речовині. Наприклад, датчик CO забезпечує компенсацію по H_2 на дисплеї позначається як H_2xc). QUINTOX автоматично коректує одержувані від датчиків сигнали, ґрунтуючись на встановлених коефіцієнтах виправлення.

Вибір температурної шкали

Температура вимірюється в $^{\circ}C$ (CELSIUS) або в $^{\circ}F$ (FAHRENHEIT).

Вибір одиниць виміру тиску

Тиск (розрідження) вимірюється в мільїбарах (гектопаскалях) - mbar/hpa або дюймах водяного стовпа.

Стандартний зміст кисню

Використається при вимірі концентрації в mg/m^3 і позначається на дисплеї ВБУ як O_2p . За замовчуванням використовується значення, прийняте для даного виду палива. Напр., для природного газу за замовчуванням встановлюється 3%:

NATURAL GAS			
K1g	0.350	K1n	0.393
K2	11.89	K3	9.83
K4	32	O2r	03.0

Однак користувач може встановити довільну величину в межах від 0 до 21%.

Використовуване значення стандартного змісту кисню показується в стандартній роздруківці.

ВИБІР ТИПУ Й ПЕРІОДИЧНОСТІ РОЗДРУКІВКИ

При необхідності можна задати інтервал між рас печатками в межах від 10 секунд до 90 хвилин.

QUINTOX має два види роздруківки: стандартами й користувацький. Формат обох роздруківок зберігається в пам'яті після відключення живлення.

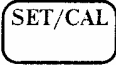







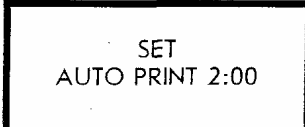
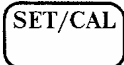

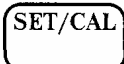

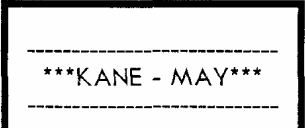
УСТАНОВКА АВТОМАТИЧНОЇ РОЗДРУКІВКИ

Щоб роздруківка відбувалася автоматично, користувач повинен вибрати AUTO PRINT ON і встановити потрібне значення інтервалу між черговими роздруківками в межах від 10 секунд до 90 хвилин.

Щоб вибрати AUTO PRINT:

КЛАВІШІ НА ВБУ

ПОКАЗАННЯ ДИСПЛЕЯ

1.		
2.		
3.		
4.		
5.	 ВИБРАТЬ напр., 2 минуты	
6.		
7.		
		

Після цього за допомогою клавіш-стрілок можна переглянути вміст роздруківки.

При автоматичній печатці з інтервалами від 10 секунд до 90 хвилин насос автоматично відключається в перервах між роздруківками й автоматично включається за 3 хвилини до початку печатки. Насос не відключається автоматично на період менш 5 хвилин. Його також мо-

жна відключати й включати вручну в будь-який момент натисканням клавiші PUMP.

Прилад можна запрограмувати таким чином, щоб під час автопечати насос працював безупинно. За додатковою інформацією звертайтеся в АТ "ВТИ".

КОНФІГУРАЦІЯ КОРИСТУВАЛЬНИЦЬКОЇ РОЗДРУКІВКИ

Користувач може створити будь-яку конфігурацію роздруківки в межах 40 рядків.

Наприклад, стандартна роздруківка використовує 23 з можливих 44 параметрів (див. нижче).

Щоб сконфігурувати користувальницьку роздруківку:

КЛАВІШІ НА ВБУ

ПОКАЗАННЯ ДИСПЛЕЯ

1. 

2. 



AUTO PRINT 0:30
OFF

Виберіть AUTO PRINT OFF и нужный интервал или OFF.

3. 



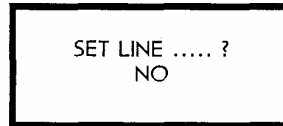
USER PRINTOUT?
NO

4. ↑
↓



USER PRINTOUT?
YES

5. 



SET LINE ?
NO

Якщо ви не хочете змінити конфігурацію користувальницької роздруківки, натисніть клавішу "SET/CAL ENTER". Після цього користувальницька роздруківка буде виводитися на принтер при кожному натискань на клавішу PRINT. Якщо ж ви хочете змінити конфігурацію, виберіть YES за допомогою клавіш-стрілок.

6. ↑
↓

SET LINE 1

KANE - MAY

7. SET/CAL

SET LINE 1

KANE - MAY

8. ↑ используйте стрелки для выбора

↓ напр., КМ QUINTOX - Параметр 2

SET LINE 1

9. ENTER

*** КМ QUINTOX***

SET LINE 2

KANE - MAY

10. Повторюйте пп. 8 і 9, поки не досягнете 40-й рядка
або

ВИБЕРІТЬ

#####

11. ENTER

На дисплеї з'являться показання, які були до
початку конфігурації роздруківки, або почне

роздруківку, якщо обрано режим AUTO PRINT.

ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ УВЕДЕНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ натисніть

QUINTOX виводить на принтер користувальницьку
роздруківку.

PRINT

Вибір стандартної роздруківки

Стандартна й користувальницька роздруківки зберігаються в пам'яті
приладу після відключення живлення.

КЛАВІШІ НА ВБУ

ПОКАЗАННЯ ДИСПЛЕЯ

1. 

2. 

3. Установите AUTO PRINT в ON или OFF .

4. 

5. ↑

↓

6. 

ДЛЯ ПРОВЕРКИ нажмите  QUINTOX выведет стандартную распечатку

AUTO PRINT 2:00
ON

USER PRINTOUT ?
YES

USER PRINTOUT?
NO

НОМЕР	ВИКОРИСТОВУВАНІ	НОМЕР РЯДКА
ПАРАМЕТРА	ПАРАМЕТРИ	Й ЗНАЧЕННЯ
(МАКС. 40 РЯДКІВ)		

42		1	НАЧАЛО РАСПЕЧАТКИ
43		2	
1		3	ИЗГОТОВИТЕЛЬ
2		4	МОДЕЛЬ ПРИБОРА
43		5	
3	DATE 04-06-92	6	ДАТА
4	TIME 16:56:56	7	ВРЕМЯ
43		8	
11	NATURAL GAS	9	ВЫБРАНН. ТОПЛИВО
43		10	
21	O2 %.....20.9	11	СОДЕРЖАНИЕ O ₂
23	CO ppm.....0.0	12	СОДЕРЖАНИЕ CO
10	Prs NOT FITTED	13	ДАВЛЕНИЕ
25	EFF %.....100.0	14	ЭФФЕКТИВНОСТЬ
22	XAIR FAULT	15	ИЗБЫТОК ВОЗДУХА
24	CO2 %... ..0.0	16	СОДЕРЖАНИЕ CO ₂
43		17	
30	NO ppm..... 0.0	18	СОДЕРЖАНИЕ NO
31	NO2 NOT FITTED	19	СОДЕРЖАНИЕ NO ₂
32	NOx ppm..... 0.0	20	СОДЕРЖАНИЕ NO _x
33	SO2 ppm..... 0.0	21	СОДЕРЖАНИЕ SO ₂
17	REF. %O2..... 3.0	22	СТАНДАРТ. O ₂
43		23	
18	NETT C 0.0	24	ТЕМП. НЕТТО
19	FLUE C 25.0	25	ТЕМП. УХ. ГАЗОВ
20	INLT C 25.0	26	Т ВОЗДУХА НА ВХОДЕ
9	AMBIENT C 25.0	27	Т ОКР. ВОЗДУХА
44	#####	37	КОНЕЦ РАСПЕЧАТКИ

Невикористані параметри: 5, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 16, 26, 27, 28, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41.

*) роздруковка видається на російській мові

КОРИСТУВАЛЬНИЦЬКА РОЗДРУКІВКА - МОЖЛИВІ ПАРАМЕТРИ (МАКСИМУМ - 40)

НОМЕР Й НАИМЕНОВАНИЕ	ОБЪЯСНЕНИЕ
1	ИЗГОТОВИТЕЛЬ ПРИБОРА
2	МОДЕЛЬ ПРИБОРА
3	ДАТА
4	ВРЕМЯ
5	СТАБИЛЬНОСТЬ УХ. ГАЗОВ
6	РЕСУРС БАТАРЕИ
7	СОСТОЯНИЕ ДАТЧИКА 02
8	ТЕМПЕРАТУРА ДАТЧИКА
9 10	ТЕМП. ОКР. ВОЗДУХА
11	ДАВЛЕНИЕ
12	ВЫБРАННОЕ ТОПЛИВО
13	ВЫСШАЯ ТЕПЛОТВ. СП. ТОПЛИВА
14	НИЗШАЯ ТЕПЛОТВ. СП. ТОПЛИВА
15	ТЕОРЕТИЧ. МАКС. СО2
16	МАКС. ТЕОР. ПОТЕРИ НА ПАРООБР.
17	ЗНАЧЕНИЕ α ДЛЯ ВЫБР. ТОПЛИВА
18	СТАНДАРТ. 02 ДЛЯ ИЗМ. В mg/m3n
19	ТЕМПЕРАТУРА НЕТТО
20	ТЕМПЕРАТУРА УХ. ГАЗОВ
21	ТЕМП. ВОЗДУХА НА ВХОДЕ В КОТЕЛ
22	СОДЕРЖАНИЕ O2, В УХ. ГАЗАХ
23	ИЗБЫТОК ВОЗДУХА (РАСЧЕТНЫЙ)
24	СОДЕРЖАНИЕ СО В УХ. ГАЗАХ
25	СОДЕРЖ. СО2 В УХ. ГАЗАХ (РАСЧЕТН.)
26	КПД СЖИГАНИЯ (РАСЧЕТНЫЙ)
27	ОБЩИЕ ПОТЕРИ (РАСЧЕТНЫЕ)
28	ПОТЕРИ БЕЗ УЧЕТА ПАРООБРАЗ-Я
29	ПОТЕРИ НА ПАРООБРАЗОВАНИЕ
30	ПОТЕРИ ИЗ-ЗА ХИМ. НЕДОЖЕГА
31	СОДЕРЖАНИЕ NO В УХ. ГАЗАХ
32	СОДЕРЖАНИЕ NO2 В УХ. ГАЗАХ
33	СОДЕРЖАНИЕ NOx В УХ. ГАЗАХ (РАСЧ.)
34	СОДЕРЖАНИЕ SO2, В УХ. ГАЗАХ
35	СОДЕРЖАНИЕ ВОДОРОДА
36	СОДЕРЖАНИЕ СЕРОВОДОРОДА
37	СОДЕРЖАНИЕ HCN
38	СОЛЯНАЯ КИСЛОТА
39	ХЛОР
40	ПЕРЕКРЕСТНАЯ ЧУВСВИТ. СО/H2
41	ПОКАЗАНИЯ ДОП. ДАТЧИКА 1
42	ПОКАЗАНИЯ ДОП. ДАТЧИКА 2
43	ПУНКТИРНАЯ ЛИНИЯ
44	ПУСТАЯ ЛИНИЯ

КОНЕЦ РАСПЕЧАТКИ

Роздруківка вмісту пам'яті

Нижче показана послідовність дій для роздруківки вмісту пам'яті приладу. Така роздруківка може бути використана для перевірки поточних установок, а також при звертанні до дистриб'ютора встаткування із приводу сервісу.

Для печатки вмісту пам'яті (64 позиції - від 0 до 63):

КЛАВІШИ НА ВБУ

ПОКАЗАННЯ ДИСПЛЕЯ

SET/CAL

39

SET

SET/CAL

ENTER SERVICE CODE
----->0000<-----



Найти сообщ-е PRINT MEMORY ?



CALIBRATE SENSOR?
NO

ENTER

PRINT MEMORY?
NO



Выберите YES



PRINT MEMORY?
YES

ENTER

PRINT MEMORY 0



Выберите нужные позиции



ENTER

Дисплей показывает содержимое памяти.

Принтер друкує номер позиції, дату, час і вміст. Після цього дисплей вертається до тих показань, які були до роздруківки пам'яті.

4. РОБОТА ІЗ ПРИЛАДОМ

4.1 Звичайний порядок роботи

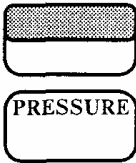
- I. Приєднаєте вологозбірник до аналізатора.
2. Приєднаєте газовідбірний зонд до аналізатора.
3. Підключите ВБУ до аналізатора.
4. Включите живлення й откалібруйте датчик PRO_2 у чистому повітрі.
5. Виберіть паливо.
6. Якщо повітря на вході в казан підігрівається, установите його температуру.
7. Помістите зонд у газохід.
8. Дочекайтеся стабілізації показань (займає від 30 сек до 3 хв).
 9. Установите, які дані будуть показуватися на дисплеї ВБУ(див. 5.7).
 - 10.Для роздруківки даних натисніть [PRINT 1 (див. 4.8).
 11. Видалите зонд із газоходу й прокачайте через аналізатор чисте повітря. 12.Отключите живлення.

4.2 Вимір тяги (розрідження)

1. Вимірюйте розрідження ПЕРЕД тем. як приступитися до виміру змісту речовин у газах, що йдуть.
2. Приєднаєте зонд до входу, позначеному PRESSURE. Переконастися, що гвинт щільно затягнуть.

3. КЛАВІШІ НА ВБУ

ПОКАЗАННЯ ДИСПЛЕЯ



Prs	mBar	0.0
O2	%...	5.9
CO	ppm....	25
FLUE	C	180.0

4. Помістите зонд у газохід і дочекайтеся стабілізації показань.

5. КЛАВИШІ НА ВБУ

ПОКАЗАННЯ ДИСПЛЕЯ

SET/CAL



PRESSURE

Prs	#mBar	0.5
O2	%...	5.9
CO	ppm....	25
FLUE	C	180.0

Обмірюване значення розрідження зберігається на дисплеї й у роздруківці до відключення живлення.

4.3 Підвищення к.п.буд.

Зверніть увагу на показання змісту ПР_O₂ і CO, які визначають к. п. буд. спалювання палива.

5.4 Час роботи

Менш 1 години: Регулярно перевіряйте вологозбірник і фільтри.

Більше 1 години: Регулярно перевіряйте вологозбірник і фільтри.

Після кожної години витягайте зонд із газоходу для перекалібровки датчиків у чистому повітрі.

Акумулятор, заряджений на 100%, забезпечує 4 години безперервної роботи приладу при включеному насосі й підсвічуванні дисплея.

4.5 Фільтр SO₂

При високих концентраціях SO₂ використайте спеціальний фільтр, що містить перманганат калію.

Термін служби: 12 годин Строк зберігання: 1 рік.

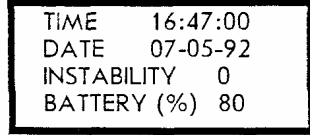
4.6 Тест на задимленість

QLTNTOX не має засобів для автоматичного визначення задимленості.

1. Замість газовідборного зонда підключите зонд для визначення запиленості (KMCSPP6).
2. Установите на зонд паперовий фільтр (поставляється із зондом).
3. Помістите зонд у газохід.

4. КЛАВІШІ НА ВБУ

ПОКАЗАННЯ ДИСПЛЕЯ



Через 50 сек вийміть паперовий фільтр і по прикладеній таблиці визначите запиленість.

ПРИМІТКА: потужність насоса - 2 літри у хв.

4.7 Перегляд даних

Варіант 1: Натисканням клавіші виводиться відповідний параметр плюс ще 3 параметри.

Варіант 2: Клавіші (і (циклічно пролистывають всі дані в нижньому рядку, залишаючи три верхні рядки незмінними (построчний режим).

Варіант 3: Клавіші (і (- циклічно пролистывають 11 дисплейних сторінок по 4 рядки кожна (посторінковий режим).

Перемикання з порядкового режиму в посторінковий і назад осуществляется натисканням клавіші SET/CAL ENTER, потім (.

Варіант 1: На дисплей виводяться 4 параметри при натискань будь-якої клавіші, крім:

ON/OFF Включає/виключає живлення.

SET/CAL Починає зміна параметра.

ENTER Уводить змінений параметр.

PRINT Починає роздруківку.

PUMP Включає/виключає насос.

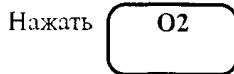
CONTRAST Включає/виключає підсвічування.



Переводить клавіатуру у верхній регістр.

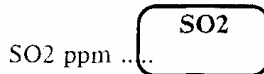
Пример:

1 Показать O₂



O₂ %
CO ppm
CO₂ %
NETT

2 Показать SO₂



SO₂ ppm
NETT
O₂ %
CO ppm

Вариант 2: построчный режим, например:

O2	ppm ...	75
CO	ppm ...	0
CO2	ppm ...	75
NOx	ppm ...	0



O2	ppm ...	75
CO	ppm ...	0
CO2	ppm ...	75
SO2	ppm ...	0

Коли в останньому рядку з'явився потрібний параметр, можна натисканням клавіші (перемістити його на 1 рядок нагору. Потім можна в такий же спосіб знайти наступний параметр. Таким чином, можна сформувати сторінку з будь-яких чотирьох параметрів.

Ілющенко В.І., Туяхов А.І., Саф'янц С.М.

Вимірювання в енергетиці
