

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Конспект лекцій
з дисципліни:
«Вимірювальна техніка»
Частина 1

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

Конспект лекцій з дисципліни «Вимірювальна техніка» Частина 1 для студентів спеціальності G3 «Електрична інженерія», I ступеня вищої освіти (бакалавр), освітньої програми «Енергоефективність та енергозбереження» денної та заочної форми навчання / «Запорізька політехніка» нац. ун-т. Каф. електропостачання промислових підприємств; уклад.: В.Ю. Міщенко. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2026. 73 с.

Укладачі:

В.Ю. Міщенко, к.т.н., старш.викл.

Рецензент:

Ю.Б. Ліуш, к.т.н., доцент

Відповідальний за випуск:

Шрам О.А., зав. кафедри, к.т.н.

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

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

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Основні поняття.....	6
1.1 Загальні відомості.....	6
1.2 Що таке ЄСКД та ЄСТД.....	10
1.3 Одиниці фізичних величин. Система одиниць СІ.....	13
2 Одиниці фізичних величин.....	16
2.1 Виникнення і розвиток одиниць фізичних величин.....	16
2.2 Уніфікація одиниць фізичних величин. Створення метричних мір.....	17
2.3 Система одиниць фізичних величин.....	18
2.4 Міжнародна система одиниць.....	20
2.5 Основні і додаткові одиниці системи СІ.....	22
2.6 Кратні і дільні одиниці. Правила їх утворення.....	25
3 Вимірювання неелектричних величин на об'єктах енергоменеджменту.....	27
3.1 Загальні поняття.....	27
3.2 Технічні аспекти.....	30
3.3 Практичні міркування.....	31
3.4 Властивості рідини й пари.....	32
3.5 Планування та проведення вимірювань.....	33
4 Контактні термометри.....	39
4.1 Термометри розширення.....	39
4.2 Манометричні термометри.....	42
4.3 Дилатометричні термометри.....	45
4.4 Біметалічні термометри.....	46
4.5 Термоелектричні термометри (термопари).....	48
4.6 Компенсаційний метод виміру термо-ЕРС термопар.....	51
4.7 Метрологічні характеристики контактних термометрів.....	54
4.8 Практичні аспекти використання контактних термометрів..	56
5 Безконтактні термометри.....	57
5.1 Одноколірний пірометр.....	58
5.2 Двоколірний інфрачервоний пірометр.....	60
5.3 Волоконно-оптичні пірометри.....	62
5.4 Стандартні пірометри.....	66

Перелік джерел посилань.....	73
------------------------------	----

ВСТУП

Метою вивчення навчальної дисципліни «Вимірювальна техніка» є формування системи теоретичних знань про основні функціональні обов'язки фахівців з енергетики, вивчення основних законів електротехніки, основних елементів системи електропостачання, сфери застосування електричної енергії, уміння пояснити фізичний зміст законів фізики та електротехніки.

В результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен знати: – основні та додаткові фізичні величини; – алгоритм вимірювання неелектричних величин на об'єктах енергоменеджменту; – будову та принцип дії різних приладів для виміру температури; – як проводиться вимір та витрати газу, рідини та пару; – сучасні методики та прилади для виміру аеродинамічної енергії та сонячної радіації.

Дисципліна “Вимірювальна техніка” передбачена навчальним планом для ознайомлення студентів з основними методами та сучасними приладами вимірювання неелектричних величин для подальшого застосування цих знань в сфері енергетичного менеджменту та аудиту.

Метрологія ґрунтується на досягненнях майже усіх наук про природу. Розвиток метрології підвищує науковий і технічний рівень вимірювань, що сприяє подальшому розвитку наукового і технічного прогресу. Майже усі форми людської діяльності вимагають метрологічного забезпечення

При розробці, виробництві, експлуатації технічних систем, контролі стану навколишнього середовища, в медицині, торгівлі, при обліку витрат матеріально-технічних ресурсів, а також в інших видах діяльності суспільства вимірювання були, є і будуть одними з найважливіших умов досягнення поставлених цілей. Позбутися них не вдається нікому. В той же час багато хто не може позбутися неприємностей, пов'язаних з невірно виконаними вимірюваннями.

1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ

1.1 Загальні відомості

Вимірювальна техніка – галузь науки і техніки, що вивчає методи і засоби отримання дослідним шляхом інформації про величини, які характеризують властивості і стани об'єктів дослідження та виробничих процесів [1,2].

При описі явищ і процесів, а також властивостей матеріальних тіл використовуються різні фізичні величини, число яких досягає кількох тисяч: електричні, магнітні, просторові й часові; механічні, акустичні, оптичні, хімічні, біологічні й ін. При цьому зазначені величини відрізняються не тільки якісно, але й кількісно й оцінюються різними числовими значеннями.

Що ж таке фізична величина?

Фізична величина — це властивість, загальна в якісному відношенні багатьом фізичним об'єктам, але в кількісному відношенні індивідуальна для кожного об'єкту. Наприклад, довжина, маса, електропровідність і теплоємність тіл, тиск газу в посуді і т.д.

Встановлення числового значення фізичної величини здійснюється шляхом вимірювання. Результатом вимірювання є кількісна характеристика у вигляді іменованого числа з одночасною оцінкою ступеня наближення отриманого значення вимірюваної величини до істинного значення фізичної величини. Істинне значення фізичної величини – значення фізичної величини, яке ідеальним чином характеризує в якісному та кількісному відношенні відповідну фізичну величину.

Вимірювання — це дія, спрямована на знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом, порівнюючи її з одиницею вимірювання за допомогою засобів вимірювальної техніки [1-3].

При реалізації будь-якого процесу вимірювання необхідні технічні засоби, що здійснюють сприйняття, перетворення й подання числового значення фізичних величин. Технічні засоби й різні методи вимірювань складають основу вимірювальної техніки. Будь-який виробничий процес характеризується великим числом параметрів, що змінюються в широких межах. Для підтримки необхідного режиму технологічної установки необхідне вимірювання зазначених параметрів. При цьому чим достовірніше здійснюється вимірювання

технологічних параметрів, тим краще якість цільового вихідного продукту

Вимірювальна техніка – це практична, прикладна область метрології.

Метрологія – наука про вимірювання

Метрологія - наука про різні міри і співвідношення між ними.

Слово **метрологія** утворено з двох грецьких слів: «**метро**» – **міра** і «**логос**» – вчення, що буквально можна перевести як «вчення про міри». Виміри є одним з найважливіших шляхів пізнання природи, дають кількісну характеристику оточуючого світу, допомагають розкрити діючі в природі закономірності.

Предметом метрології є витяг (отримання) шляхом вимірювання кількісної інформації про властивості об'єктів і процесів із заданою точністю і достовірністю. Найважливішим завданням метрології є розробка методів і засобів вимірювання, а також забезпечення єдності вимірювання, яка вирішується при дотриманні двох умов: вираз результатів вимірювання в узаконених одиницях і встановлення допустимих похибок результатів вимірювання і меж, за які вони не повинні виходити, при заданій імовірності. Похибки вимірювання вказуються в паспорті, технічних умовах (ТУ) та іншій нормативній документації, що надається засобу вимірювання [2].

Технічні умови – документ, що встановлює технічні вимоги, яким повинні відповідати продукція, процеси чи послуги. Технічні умови можуть бути стандартом, частиною стандарту або окремим документом

Об'єктами метрології є одиниці фізичних величин, засоби і методи вимірювання, методики виконання вимірювання, сталони.

Предмет метрології – це отримання кількісної та якісної інформації про властивості фізичних об'єктів і процесів, встановлення та застосування наукових організаційних основ, розроблення технічних засобів, правил і норм, необхідних для досягнення єдності й необхідної точності вимірювань.

Методи метрології – це сукупність фізичних і математичних методів, які використовуються для отримання вимірювальної інформації. До методів метрології належать: планування та організація вимірювального експерименту, методи і методики вимірювань, методи відтворення, зберігання та передавання одиниць фізичних величин,

методи вимірювальних перетворень сигналів, опрацювання результатів вимірювань [2].

Засоби метрології – це сукупність засобів вимірювальної техніки, які застосовуються для підготовки та здійснення експерименту, а також системи організації метрологічного контролю і нагляду за засобами вимірювальної техніки.

До засобів метрології належать:

- еталони одиниць фізичних величин;
- стандартні зразки складу і властивостей речовин та матеріалів;
- робочі засоби вимірювальної техніки;
- система метрологічного контролю і нагляду за засобами

вимірювальної техніки під час їх виробництва, застосування та ремонту. Як наука про вимірювання, метрологія є частиною технічної фізики, мета якої це вирішування науково-теоретичної проблеми вимірювальної техніки.

Вимірювальна інформація – одна із складових частин пізнання людиною матеріального світу за допомогою експериментальних методів пізнання. Експериментальна інформація безперервно вдосконалюється у процесі покращення вимірювального експерименту. При цьому відбуваються постійне уточнення вимірювальної інформації, вивільнення її від супутніх похибок і наближення до абсолютної істини. В результаті аналізування отриманої вимірювальної інформації людина пізнає навколишнє середовище.

До методів експериментальної інформатики відносять: сприйняття, порівняння, відтворення, спостереження, контроль, вимірювання, розпізнавання образів, діагностику, ідентифікацію, випробування та експериментальні дослідження.

Сприйняття – це відображення найпростіших характеристик довколишнього середовища органами почуття людини або спеціальними технічними засобами (сенсорами, індикаторами) – сигналами, зручними для подальшого використання.

Порівняння – це відображення подібності чи відмінності об'єктів логічним висновком. Відомо, що більшість матеріальних об'єктів виявляють себе одночасно у двох відношеннях, а саме еквівалентності і порядку. Відповідно, і порівняння об'єктів здійснюється за еквівалентністю та за інтенсивністю, тобто за розміром.

Відтворення у метрології – це створення матеріальних об’єктів, що характеризуються фізичною величиною наперед заданого значення за допомогою спеціального технічного засобу, який називають мірою. Особливість – безпосередня участь міри в процедурі вимірювання. Наприклад, вимір маси на важільних вагах з урівноваженням гирями. Міра маси – гиря (кг).

Спостереження – це відображення властивості, залежності, стану або ситуації словесним чи графічним описом. Спостереження є таким методом пізнання, який здійснюється за допомогою як органів почуття людини, так і спеціальних технічних засобів. Спостереження – це складова частина всіх експериментальних методів пізнання. Як метод пізнання спостереження має задовольняти таким основним вимогам: планомірність, цілеспрямованість й систематичність.

Вимірювання – це відображення вимірюваних величин їхніми значеннями шляхом експерименту та обчислень за допомогою спеціальних технічних засобів. Вимірювання є комплексною інформаційною процедурою, що ґрунтується на використанні щонайменше двох методів пізнання: відтворення і порівняння.

Контроль – це відображення відповідності між станом об’єкта і заданою нормою відповідним висновком (придатний чи непридатний). В техніці переважає контроль фізичних величин та параметрів процесів. Контроль параметрів – це відображення співвідношення між контрольованим параметром та нормою.

Ідентифікація – це відображення залежності між величинами, що характеризують матеріальний об’єкт, математичною або логічною моделлю. Ідентифікацію розпочинають із визначення типу моделі об’єкта, що відображає залежність між його параметрами, після чого визначають основні параметри моделі, ступінь, точність і вірогідність оцінки.

Діагностика – це відображення загального стану об’єкта та причин цього стану діагнозом із зазначенням особливостей стану і локалізацією відхилень від норм.

Розпізнавання об’єктів – це відображення даного об’єкта за сукупністю його властивостей одним із класів множини цих об’єктів. Розпізнавання об’єктів проводиться шляхом сприйняття їхніх характеристик, порівняння й аналізу на основі попередньої класифікації даної множини об’єктів.

Випробування – це відображення стану досліджуваного об'єкта під час дії на нього сукупності регламентованих факторів сертифікатом.

Експериментальні дослідження – це відображення складного матеріального об'єкта або ситуації, що характеризується сукупністю взаємопов'язаних величин, системою відповідних моделей. Важливе місце серед експериментальних методів пізнання займають вимірювання, за допомогою яких отримують необхідну кількісну та якісну інформацію. Наявність вимірювальної інформації про об'єкт дослідження дає можливість більш ефективно використовувати усі інші експериментальні методи пізнання – від спостереження до експериментального дослідження.

1.2 Що таке ЄСКД та ЄСТД?

Єдина система конструкторської документації (ЄСКД) Це система постійно діючих технічних і організаційних вимог, що забезпечують взаємний обмін конструкторської документації без її переоформлення між країнами СНД, галузями промисловості і окремими підприємствами, розширення уніфікації продукції при конструкторській розробці, спрощення форми документів і скорочення їх номенклатури, а також єдність графічних зображень; механізовану і автоматизовану розробку документів і, найголовніше, готовність промисловості до організації виробництва будь-якого виробу на будь-якому підприємстві в найкоротший термін. Стандарти системи ЄСКД позначають перед номером стандарту цифрою 2 [5,6].

Єдина система технологічної документації (ЄСТД) Ця система встановлює обов'язковий порядок розробки, оформлення і збереження всіх видів технологічної документації на машино- і приладобудівних підприємствах країни для виготовлення, транспортування, встановлення і ремонту виробів цих підприємств. Єдині правила розробки, оформлення і збереження технологічної документації дають змогу використовувати прогресивні способи машинної її обробки і полегшують передачу документації на інші підприємства. Стандарти ЄСТД позначають перед номером стандарту цифрою 3. На рисунку 1.1 представлена класифікація.

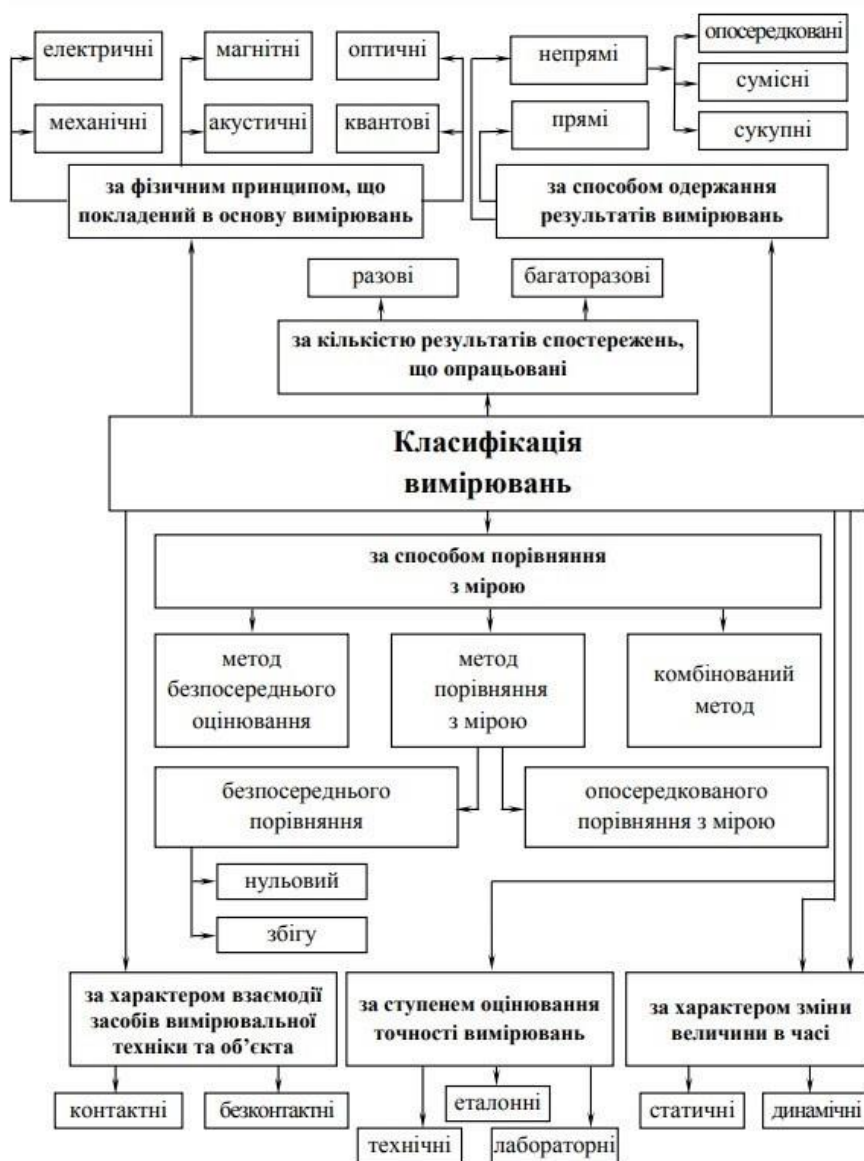


Рисунок 1.1 – Класифікація різних вимірювань [1]

Вимірювання можуть бути прямі та непрямі.

Сутність **прямого** вимірювання полягає у вимірюванні однієї величини, значення якої знаходить експериментатор безпосередньо без перетворення її роду та використання відомих залежностей. Пряме вимірювання – це вимірювання однієї величини, в якому її значення одержують безпосередньо за показом відповідного приладу X_n , без необхідних для знаходження значення вимірюваної величини додаткових обчислень .

$$x = X_n$$

Приклади прямих вимірювань: вимірювання сили струму амперметром, вимірювання температури термометром, вимірювання інтервалу часу годинником, вимірювання електричного опору омметром.

Значення вимірюваної величини вважається знайденим прямим вимірюванням, коли шкала приладу проградуєвана у відповідних значеннях вимірюваної величини. Вимірювання вважається також прямим і тоді, коли результат знаходять, опрацьовуючи результати спостережень без перетворення роду величини.

Сутність **непрямого** вимірювання полягає у знаходженні однієї чи декількох вимірюваних величин після перетворення роду величини чи обчислення за відовими залежностями їх від декількох величин аргументів, що вимірюються прямо. Непрямі вимірювання можуть бути опосередкованими, сукупними та сумісними

Опосередковане вимірювання – це непряме вимірювання однієї величини з перетворенням її роду чи обчисленнями за результатами вимірювань інших величин, з якими вимірювана величина пов'язана явною функціональною залежністю. Характерним для опосередкованих вимірювань є функціональне вимірювальне перетворення, яке здійснюється або шляхом фізичного вимірювального перетворювання, або шляхом числового вимірювального перетворення. Наприклад, при опосередкованих вимірюваннях потужності постійного струму її визначають чи на основі прямих вимірювань струму та напруги за формулою $P=U \cdot I$, чи на основі фізичного вимірювального перетворення добутку $U \cdot I$ в іншу фізичну величину.

Сукупне вимірювання – це непряме вимірювання, в якому значення декількох одночасно вимірюваних однорідних фізичних

величин отримують розв'язанням рівнянь, що пов'язують різні сполучення цих величин, які вимірюються прямо чи опосередковано. Метою сукупних вимірювань є знаходження шляхом числових вимірювальних перетворень значень декількох фізичних величин за неможливості їх окремого прямого вимірювання. При цьому завдяки усередненню досягається ще й зменшення випадкової похибки вимірювання.

Прикладом сукупних вимірювань може бути вимірювання опору кожного з резисторів R_1 , R_2 , які з'єднані послідовно та паралельно. В результаті прямого вимірювання омметром послідовно з'єднаних опорів еквівалентний опір дорівнює $R_{\text{послідовно}} = R_1 + R_2$, а сумарна послідовність паралельно з'єднаних резисторів становить $1/R_{\text{паралельно}} = 1/R_1 + 1/R_2$. Із системи двох рівнянь із двома невідомими обчислюється невідомі значення опорів R_1 , R_2 , які виміряні сукупно.

Сумісне вимірювання – це непряме вимірювання, в якому значення декількох одночасно вимірюваних різномірних величин отримують розв'язанням рівнянь, які пов'язують їх з іншими фізичними величинами, що вимірюються прямо чи опосередковано.

1.3 Одиниці фізичних величин. Система одиниць СІ

Одиниця фізичної величини згідно з ДСТУ 2681 – 94 – це певний розмір величини, прийнятий за угодою Генеральної конференції з мір та ваги для кількісного відображення однорідних з нею величин.

Як ми вже з'ясували суть вимірювання полягає у порівнянні розміру вимірюваної величини з деяким її значенням, прийнятим за одиницю.

Об'єктом вимірювання є фізичні величини, які прийнято ділити на основні і похідні. Основні величини не залежать одна від одної, але вони можуть служити основою для встановлення зв'язків з іншими фізичними величинами: кг, м, с. Похідні величини – фізичні величини, одиниці вимірювання яких складені з інших одиниць або вони можуть бути отримані за певною формулою, що показує залежність їх від інших фізичних величин: кг/м^3 ; м/с^2 ; м^2 .

Сукупність основних і похідних одиниць ФВ, утворена відповідно до прийнятих принципів, називається системою одиниць фізичних величин.

Чинні одиниці вимірювання відображенні в Системі Інтернаціональній (СІ), яка містить: 7 основних одиниць, 2 додаткові одиниці, та похідні одиниці.

Як основні величини прийняті: метр, кілограм, секунда, ампер, кельвін, моль і кандела, які введені ДСТУ ISO 80000-1:2016.

ОСНОВНІ ОДИНИЦІ СІ [1,2]:

1. Метр [м], [m] дорівнює відстані, яку долає у вакуумі плоска електромагнітна хвиля за $1/299792458$ долю секунди.

2. Секунда [с], [s] шкала атомного часу (АТ) дорівнює 9192631770 періодам випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атому Cs133.

3. Кілограм [кг], [kg] дорівнює вазі води при температурі 4°C (оскільки в цих умовах вода має максимальну густину), що вкладається в об'єм 10^{-3} м³.

4. Ампер [А], [A] дорівнює силі постійного струму, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних провідниках безмежної довжини нехтовно малої площі поперечного перерізу, що знаходиться у вакуумі на відстані 1м один від одного, створює силу взаємодії у $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

5. Кельвін [К], [K] дорівнює $1/273,16$ частині термодинамічної температури потрійної точки води.

6. Моль [моль], [mol] дорівнює кількості речовини, яка містить стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів C^{12} у масі $0,012$ кг.

7. Кандела [кд], [kd] дорівнює силі монохроматичного світла, що випромінюється на частоті $540 \cdot 10^{12}$ Гц із силою $1/683$ Вт/ср.

ДОДАТКОВІ ОДИНИЦІ [1,2]

1. Радіан [рад], [rad] дорівнює куту між двома радіусами кола, довжина дуги між якими дорівнює радіусу.

2. Стерадіан [ср], [sr] дорівнює тілесному куту з вершиною у центрі сфери, що вирізає на поверхні сфери площу, яка дорівнює площі квадрата із стороною в радіус сфери.

Похідні одиниці – отримують за допомогою основних та додаткових. Окрім того існують позасистемні одиниці. Наприклад, години, літри, градуси Цельсія, гектар, тонна, вольт-ампер, тощо.

Властивості СІ:

— універсальність (містить всі існуючі фізичні одиниці);

- когерентність (похідні одиниці можуть бути виражені через основні);
- має високу точність відтворення;
- частковість (це властивість поділення основних одиниць на частки;
- кратність (це властивість до отримання більшої величини.

ЧАСТКОВІСТЬ ТА КРАТНІСТЬ

Найменування і позначення приставок СІ для утворення десяткових кратних і часткових одиниць і їх множники представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Найменування і позначення приставок СІ

Приставка			Множник	Приклади
Найменування	Позначення			
	міжнародне	українське		
Гіга	G	Г	10 ⁹	гігават – ГВт
Мега	M	М	10 ⁶	мегаом – МОм
Кіло	k	к	10 ³	кілометр – км
Гекто	h	г	10 ²	гектолітр – гл
Дека	da	да	10 ¹	декалітр – дал
Деци	d	де	10 ⁻¹	дециметр – дц
Санти	c	с	10 ⁻²	сантиметр – см
Мілі	m	м	10 ⁻³	мілівольт – мВ
Мікро	μ	мк	10 ⁻⁶	мікроампер – мкА
Нано	n	н	10 ⁻⁹	наносекунда – нс

2 ОДИНИЦІ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

2.1 Виникнення і розвиток одиниць фізичних величин

Одиниці фізичних величин почали з'являтися з того моменту, коли у людини виникла необхідність виразити будь-що кількісно. Це могла бути кількість предметів, і в цьому випадку одиницею виступав один предмет. Але далі задача ускладнилася, оскільки виникла необхідність визначати кількість таких об'єктів, які не піддавалися поштучному обліку – рідин, сипучих тіл та інших. З'явилась міра об'єму. Ці міри були одночасно і одиницями об'єму при вимірюваннях. Потреба вимірювання довжини викликала появу мір довжини.

Першими мірами довжини були частини тіла людини: крок, локоть, стопа. Вони були одночасно і одиницями довжини.

Масу речовини визначали по її вазі. Різницю між вагою і масою встановили тоді, коли виявили, що в різних точках земної кулі вага однієї і тієї ж маси неоднакова і залежить від сили земного тяжіння. Однак звичка ототожнювати масу і вагу, називати масу вагою залишилась і на даний час і є причиною багатьох непорозумінь і похибок.

Окрім кількісного визначення властивостей тіла і речовини виникла необхідність кількісно характеризувати і процеси. Так виникла потреба вимірювати час. Першою одиницею часу була доба – зміна дня і ночі.

На **першому етапі** свого розвитку одиниці тієї чи іншої величини, як правило, були безпосередньо пов'язані з мірами. Розмір одиниці вимірюваної величини дорівнював розміру величини, який відтворювався мірою [2].

Другий етап розвитку одиниць був пов'язаний з розвитком науки і прогресом техніки наукового експерименту. Було виявлено, що властивості фізичних об'єктів, які було покладено в основу створення мір, не володіють тим ступенем постійності і відтворюваності, яких потребує наука і техніка. Тому другий етап характеризується відмовою від одиниць величин, відтворюваних природою, і закріпленням їх в речових зразках. Найбільш характерною для переходу від першого етапу до другого є історія створення метричних мір, яка завершилася створенням речових, предметних еталонів одиниці довжини і маси – метра і кілограма.

Третій етап розвитку одиниць фізичних величини був наслідком подальшого бурного розвитку науки і зростання вимог до точності вимірювань. Виявилось, що виготовлені людиною речові еталони фізичних величин не в змозі забезпечити зберігання і передачу цих одиниць з тією точністю, яка стала необхідною. Відкриття нових фізичних явищ, виникнення і розвиток атомної та ядерної фізики дозволили знайти шляхи більш точного і надійного відтворення одиниць ряду фізичних величин. Відмінність третього етапу – відрив одиниць фізичних величин від міри, від кількісних характеристик властивостей фізичних об'єктів. Одиниці вимірювань залишилися такими, якими вони були встановлені на другому етапі. Характерним прикладом є одиниця довжини – метр. Відкриття можливості точного відтворення довжини з використанням довжини хвилі монохроматичного світла не змінило одиницю довжини. Метр лишився метром, але використання довжини світлової хвилі дозволило підвищити точність його відтворення на один десятичний знак [2].

2.2 Уніфікація одиниць фізичних величин. Створення метричних мір

З основного рівняння вимірювання випливає, що числові значення вимірюваних величин залежать від використаних одиниць вимірювання. Якщо здійснювати довільний вибір одиниць, то результати вимірювань буде важко зіставляти. Отже, порушиться єдність вимірювань.

Для забезпечення єдності вимірювань важливе значення має уніфікація одиниць фізичних величин.

Спочатку одиниці фізичних величин вибиралися довільно, без будь-якого зв'язку між собою, що створювало великі труднощі. Значна кількість довільних одиниць однієї величини ускладнювала порівняння результатів вимірювань, виконаних різними спостерігачами.

В кожній країні, а іноді і місті, створювались свої одиниці. Перевід одних одиниць в інші був досить складним і приводив до суттєвого зниження точності результатів вимірювань.

Наприклад, використовувались такі одиниці довжини:

1 аршин = 16 вершам = 28 дюймам = 0,71120 м

1 дюйм = 25,4 мм

1 сажень = 3 аршинам = 7 фунтам = 2,1336 м

1 верста = 500 саженьям = 1,0668 км

З розвитком науки і техніки, а також міжнародних зв'язків труднощі використання результатів вимірювань зростали і гальмували подальший науково-технічний прогрес.

Історично першою системою одиниць фізичних величин була ухвалена 7 квітня 1795 року Національними зборами Франції метрична система мір. До її складу увійшли одиниці довжини, площі, об'єму та ваги, в основу яких було покладено дві одиниці: метр та кілограм.

Було запропоновано вважати одиницею довжини довжину 10-мільйонної частини чверті меридіана Землі, який проходить через Париж. Цю одиницю назвали метром. За одиницю маси було взято масу 0,001 м³ (1дм³) чистої води при температурі її найбільшої густини (+4°C). Цю одиницю назвали кілограмом.

При введенні метричної системи була також прийнята десятична система утворення кратних і дільних одиниць. Десятичність метричної системи є однією з найважливіших її переваг.

Оскільки при більш точних вимірюваннях земного меридіана були отримані різні значення основної одиниці довжини, в 1872 р. Міжнародна комісія по прототипам метричної системи прийняла рішення перейти від одиниць довжини і маси, заснованих на природніх еталонах, до одиниць, заснованих на умовних матеріальних еталонах.

В 1875 р. у Парижі було скликано дипломатичну конференцію, на якій 17 держав, у тому числі і Росія, підписали Метричну конвенцію. У відповідності з цією конвенцією:

- встановлювались міжнародні прототипи метра і кілограма;
- створювалось Міжнародне бюро мір і ваг;
- створювався Міжнародний комітет мір і ваг, який складався з вчених різних країн (18 чоловік), однією з функцій якого було керівництво діяльністю Міжнародного бюро мір і ваги;
- встановлювалось скликання 1 раз на 6 років Генеральних конференцій з мір і ваг.

Були виготовлені зразки метра і кілограма із сплаву платини і іридію.

2.3 Система одиниць фізичних величин

Спочатку були утворені системи одиниць, основані на трьох одиницях. Ці системи охоплювали велике коло величин, умовно одержавших назву **механічних**.

Серед всіх цих систем перевага віддається системам, утвореним на одиницях довжини – маси – часу як основних.

В 1832 р. К.Ф. Гаусом була розроблена система одиниць, яку він назвав абсолютною, з основними величинами були взяті: міліметр, міліграм, секунда. Основні величини запропонованої Гаусом системи відображають найзагальніші властивості матерії - масу і основні форми існування тобто простір і час. В зв'язку з цим її і подібні системи називали абсолютними, хоча це не зовсім відповідає дійсності, тому що в кінці минулого віку В. Томсон запропонував систему побудовану на двох основних величинах L і T . Відомі системи з одною основною величиною, а також так звані природні систем одиниць, що базуються на універсальних фізичних константах.

Повними одиницями системи Гауса були міліметр, міліграм і секунда, розміри яких незручні для практики. Тому в 1881 р. Міжнародний конгрес електриків (МКЕ) прийняв систему одиниць СГС з основними одиницями - сантиметр, грам, секунда. Із трьох її різновидів добре відомі електростатична СГСЕ, електромагнітна СГСМ і симетрична СГС системи одиниць. Остання ще й зараз має обмежене застосування в теоретичних розділах фізики і астрономії. Цей самий конгрес прийняв практичні електричні одиниці - вольт, ампер і фарад, а в 1889 р. II Конгрес МКЕ - джоуль, ват і генрі [2].

В 1901 р. італійський інженер Джорджі запропонував систему МКС з основними одиницями - метр, кілограм, секунда.

Протягом деякого часу застосовували так звану **технічну систему одиниць**, побудовану по схемі довжина – сила – час. При застосуванні метричних одиниць основними одиницями цієї системи є метр – кілограм– сила – секунда (МКГСС). Кілограм-сила – це сила, яка надає масі в один кілограм прискорення $9,80665 \text{ м/с}^2$.

Зручність цієї системи полягала в тому, що застосування як основної – одиниці сили – спрощувало розрахунки і отримання залежностей для багатьох величин, що застосовуються в техніці.

Недолік її полягає в тому, що одиниця маси в ній виявлялася похідною і чисельно рівною 9,81 кг, що порушує метричний принцип десятичності мір.

Другий недолік – подібність найменування одиниці сили – кілограм – сила і метричної одиниці маси – кілограма, що приводить до плутанини.

Третій недолік системи МКГСС – її неузгодженість з електричними одиницями.

Оскільки системи механічних одиниць охоплювали не всі фізичні величини, для окремих галузей науки і техніки системи одиниць розширювались шляхом додавання ще одної основної одиниці. Так з'явилась система теплових одиниць метр – кілограм – секунда – градус температурної шкали (МКСГ) [1].

Той же італійський інженер Джорджі показав, що на її основі можна побудувати когерентну практичну систему механічних і електричних одиниць, якщо за четверту основну одиницю взяти одну із практичних електричних одиниць.

Додаванням одиниці сили струму – ампера була отримана когерентна практична система електромагнітних одиниць (МКСА), придатна для електричних і магнітних вимірювань

Система теплових одиниць МКСК в якості четвертої основної одиниці містить одиницю температури – кельвін, а система світлових одиниць МСК - метр, секунда, кандела.

Всі ці системи когерентні і на їх основі побудована Міжнародна система одиниць SI.

Залежно від форми запису рівнянь електромагнітного поля, які використовуються для утворення похідних одиниць, системи одиниць електричних і магнітних величин можуть бути **нераціоналізовані** і **раціоналізовані**. Раціоналізація цих рівнянь запропонована в кінці минулого сторіччя англійським фізиком Хевісайдом і полягає в тому, що множник 4 залишається тільки в рівняннях, пов'язаних з сферичною симетрією (закон Гауса, Кулона), а в більшості інших рівнянь відсутній. Тому за однакових розмірів основних одиниць розміри окремих похідних одиниць нераціоналізованої і раціоналізованої систем різні.

2.4 Міжнародна система одиниць

Наявність численних систем одиниць фізичних величин, а також велика кількість позасистемних одиниць, незручності, виникаючі на практиці у зв'язку з перерахунками при переході від одної системи до іншої, викликали необхідність утворення єдиної універсальної системи одиниць, яка б охоплювала всі галузі науки і техніки і була прийнята в міжнародному масштабі.

В 1948 р. на IX Генеральній конференції з мір і ваги було запропоновано прийняти для міжнародних зносин єдину практичну систему одиниць. За основні рекомендувались: метр, кілограм (одиниця маси), секунда і одна з електричних одиниць.

У 1954 році X Генеральна конференція з мір і ваги встановила шість основних одиниць (метр, кілограм, секунда, ампер, градус Кельвіна, свічка) практичної системи одиниць для міжнародних відносин. На цей час членами Метричної конференції стали близько 40 найрозвинутіших держав. Одночасно Міжнародний комітет з мір і ваги створив комісію щодо розробки єдиної Міжнародної системи одиниць. Система одержала назву **Міжнародної системи одиниць**, скорочено СІ (SI — початкові букви французької *Système International*).

Після X Генеральної конференції Міжнародний комітет з мір і ваги підготував перелік похідних одиниць нової системи і запропонував назвати її Міжнародною системою одиниць.

В 1960 р. XI Генеральна конференція остаточно прийняла нову систему, надавши їй назву Міжнародна система одиниць (*System International*) із скороченим позначенням „SI”, в українській транскрипції „СІ”.

Міжнародна система одиниць фізичних величин є найбільш досконалою і універсальною серед всіх, що були раніше. Вона охоплює фізичні величини механіки, електродинаміки, термодинаміки і оптики, які пов'язані між собою фізичними законами.

Потреба в єдиній Міжнародній системі одиниць настільки велика, а переваги її настільки переконливі, що за короткий час вона набула широкого міжнародного визнання і поширення.

Організація об'єднаних націй з освіти, науки і культури (ЮНЕСКО) закликала усі країни ухвалити Міжнародну систему одиниць. Сьогодні 115 держав приєдналися до Метричної конвенції, і в більшості країн система СІ визнана чинною законодавчо.

У 1981 році в СРСР уведено в дію стандарт ГОСТ 8.417—81 „Одиниці фізичних величин“, у якому за основу взято Міжнародну систему одиниць, і затверджено до обов'язкового виконання. Міжнародна організація по стандартизації також прийняла рекомендації щодо переходу на одиниці Міжнародної системи одиниць.

У 1997 році Держстандарт України ухвалив постанову про введення у державі Міжнародної системи одиниць ДСТУ 3651.097 "Метрологія. Одиниці фізичних величин Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні назви, положення та позначення". Він повністю втратив чинність 1 січня 2018 року. На заміну всій серії цих метрологічних стандартів (ДСТУ 3651.0, ДСТУ 3651.1 та ДСТУ 3651.2) прийшов новий сучасний міжнародний стандарт **ДСТУ ISO 80000** (зокрема, його перша частина — **ДСТУ ISO 80000-1:2016**

2.5 Основні і додаткові одиниці системи СІ

У 1954 році Х Генеральна конференція з мір і ваги затвердила основні одиниці Міжнародної системи одиниць, які мають охоплювати всі галузі науки і техніки, бути основою для утворення похідних одиниць, забезпечувати зручність для практичних вимірювань і відтворюватися за допомогою установок і еталонів з найбільшою точністю.

На даний час система СІ складається з семи основних одиниць, двох додаткових і ряду похідних, кількість яких не обмежена.

Основними одиницями СІ є метр, кілограм, секунда, ампер, кельвін, кандела, моль (остання одиниця прийнята в 1971 р.).

Додаткові одиниці СІ: одиниця плоского кута - **радіан** і одиниця тілесного кута - **стерадіан**, необхідні для утворення похідних одиниць, пов'язаних з кутовими величинами.

Основні одиниці системи СІ зі скороченими позначеннями українськими та латинськими буквами наведені у табл. 2.1.

Визначення основних одиниць відповідно до рішення Генеральної конференції з мір і ваги:

Метр – довжина шляху, який проходить світло у вакуумі за $1/29979245$ долю секунди;

Кілограм – одиниця маси, що дорівнює масі Міжнародного прототипу кілограма;

Таблиця 2.1 – Основні і додаткові одиниці системи SI

величина		одиниця		
найменування	розмірність	найменування	позначення	
			міжнародне	українське
ОСНОВНІ ВЕЛИЧИНИ				
Довжина	L	Метр	m	м
Маса	M	Кілограм	kg	кг
Час	T	Секунда	s	с
Сила електричного струму	I	Ампер	A	А
Термодинамічна температура	Θ	Кельвін	K	К
Кількість речовини	N	Моль	mol	моль
Сила світла	J	Кандела	cd	кд
ДОДАТКОВІ ВЕЛИЧИНИ				
Плоский кут	-	Радіан	rad	рад
Тілесний кут	-	Стерадіан	sr	ср

Секунда дорівнює 9192631770 періодам випромінювання, яке відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133;

Ампер – сила незмінного струму, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних проводах нескінченної довжини і знехтовно малої площі поперечного перерізу, розміщених у вакуумі на відстані 1м один від одного, викликає між провідниками силу взаємодії, яка дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н на кожний метр довжини;

Кельвін – одиниця термодинамічної температури – дорівнює $1/273,16$ частина термодинамічної температури потрійної точки води;

Кандела – сила світла в заданому напрямку джерела, що випускає монохроматичне випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц енергетичною силою світла в цьому напрямку 1 Вт/683 ср.

Моль – кількість речовини, яка містить стільки ж структурних елементів (молекул, атомів, частинок), скільки міститься атомів у вуглеці-12 масою 0,012 кг.

При застосуванні моля структурні елементи мають бути специфіковані і можуть бути атомами, молекулами, іонами, електронами та іншими частинками або специфікованими групами частинок

Радіан – кут між двома радіусами кола, дуга між якими дорівнює радіусу.

Стерадіан – тілесний кут з вершиною в центрі сфери, який вирізає на поверхні сфери площу, що дорівнює площі квадрата зі стороною, яка дорівнює радіусу сфери.

Крім температури Кельвіна (позначення T), допускається вживання також температури Цельсія (позначення t), яка визначається як $t = T - T_0 = T - 273,15$ і виражається в градусах Цельсія $^{\circ}\text{C}$, тоді, коли температура Кельвіна виражається в кельвінах K [5,6].

Перевагами Міжнародної системи одиниць СІ слід визначити такі:

- універсальність – що забезпечує її використання в науці, техніці і господарстві, тобто охоплення всіх галузей науки і техніки;
- уніфікація одиниць для всіх областей і видів вимірювань (механічних, теплових, електричних, магнітних, акустичних, світлових тощо);

Наприклад, замість ряду одиниць роботи і енергії: $\text{кгс}\cdot\text{м}$, ерг , кал , $\text{Вт}\cdot\text{с}$, Дж та інших, які застосовувались раніше, в СІ передбачена одна системна одиниця джоуль (Дж) як одиниця роботи, енергії, кількості теплоти.

- замість декількох одиниць тиску (ат , атм , $\text{кгс}/\text{м}^2$, мм рт. ст. , бар , $\text{дин}/\text{см}^2$, $\text{Н}/\text{м}^2$, Торр , Па) введено одну одиницю – паскаль (Па), як універсальну системну одиницю тиску, механічної напруги, модуля пружності;

- когерентність (узгодженість) одиниць - всі похідні одиниці в СІ отримують з рівнянь зв'язку між величинами, в яких коефіцієнти дорівнюють одиниці;

- використання зручних для практичних вимірювань основних та похідних одиниць;

- можливість відтворення одиниці з високою точністю у відповідності з їх визначенням;

- спрощений запис рівнянь і формул в фізиці, хімії та інших науках, а також в технічних розрахунках в зв'язку з відсутністю коефіцієнтів перерахунку;
- зменшення кількості допускаємих до використання одиниць;
- єдина система утворення кратних і дольних одиниць для одиниць, що мають власні найменування;
- полегшення процесу навчання;
- сприяння розвитку міждержавних науково-технічних та економічних зв'язків.

2.6 Кратні і дольні одиниці. Правила їх утворення

Розміри метричних одиниць, у тому числі і одиниць Міжнародної системи (СІ), для багатьох випадків незручні: або дуже великі, або дуже малі. Тому користуються кратними і дольними одиницями, тобто одиницями, в ціле число разів більшими або меншими основної одиниці даної системи.

Одиниця, що в ціле число разів більша за системну або позасистемну, називається **кратною** одиницею.

Одиниця, що в ціле число разів менша за системну або позасистемну, називається **дольною** (частковою) одиницею.

Найпрогресивнішим способом утворення кратних та дольних одиниць є прийнята у метричній системі мір десятикова кратність між великими і малими одиницями. Десяткові кратні та дольні одиниці від одиниць СІ утворюються шляхом використання множників та приставок від 10^{18} до 10^{-24} .

В таблиці 2.2 приведено список десятикових множників і відповідних приставок, які використовують на даний час.

При утворенні кратних і дольних одиниць дотримуються певних правил:

- позначення приставки пишеться разом з позначенням одиниці, до якої вона приєднується;
- приставки можна приєднувати тільки до простих найменувань одиниці, які не містять приставок. Приєднання двох і більше приставок не дозволяється.

Наприклад, замість найменування одиниці „мікромікрофарад” слід використовувати найменування “пікофарад”.

- якщо одиниця, до якої вибирається приставка, утворена як добуток або відношення одиниць, приставку приєднують до найменування першої одиниці;

Наприклад, для одиниці паскаль-секунда на метр ($\text{Па} \cdot \text{с}/\text{м}$) правильно писати: кілопаскаль-секунда на метр ($\text{кПа} \cdot \text{с}/\text{м}$), неправильно: $\text{Па} \cdot \text{кс}/\text{м}$.

Для ряду одиниць, отримавших широке поширення, приставка застосовується у другому сомножнику. Наприклад, $\text{Вт}/\text{см}^2$, $\text{А}/\text{мм}^2$.

- якщо одиниці піднесені в степінь, приставку приєднують до найменування вихідної одиниці.

Наприклад, приставку “кіло” для одиниці об’єму (м^3) приєднують до слова “метр”, в результаті утворюється кратна одиниця: кубічний кілометр (км^3).

- вибір десятичної кратної або дольної одиниці від одиниці СІ або іншої одиниці диктується зручністю її використання.

Наприклад, немає необхідності користуватися одиницею см (10^{-2} м), якщо вимірюються розміри в сто разів менші (10^{-4} м). В данному випадку більше підійдуть мкм (10^{-6} м) або мм (10^{-3} м).

На практиці кратні і дольні одиниці вибирають таким чином, щоб числове значення вимірюваної величини знаходилось в межах від 0,1 до 1000. При виборі мм переміщення в 10^{-4} м отримує значення 0,1 мм, при виборі мкм – 100 мкм. Отже, обидві одиниці задовольняють прийнятим правилам. Якій одиниці віддати перевагу залежить від діапазона вимірювань, точності відліку показів та інших факторів.

В різних областях вимірювань склалися свої кратні і дольні одиниці, однак державний стандарт містить рекомендації по їх вибору і охоплює понад 100 фізичних величин.

3 ВІМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН НА ОБ'ЄКТАХ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ

3.1 Загальні поняття

На об'єктах енергоменеджменту потрібно вимірювати параметри потоків рідких і газоподібних речовин: витрати, кількість речовини, швидкість потоку, тиск і температуру.

Вибір засобів вимірювань здійснюється на основі певних критеріїв, відносна важливість яких залежить від цілей установки вимірників і робочих умов на об'єкті [3].

Первинними за використанням й основними є критерії: вартість, діапазон вимірювань, похибка, вимоги при установці розглянутого вимірника. З похибкою також тісно зв'язана відтворюваність результатів.

Будь-яке підприємство завжди прагне придбати відповідне обладнання за мінімально можливою ціною. Наприклад, для системи КІП (контроль і планування) похибка може бути менш важливою, ніж відтворюваність, однак зворотна картина може мати місце в тому випадку, коли необхідно оцінити ефективність якого-небудь устаткування, наприклад котла. Оскільки витрати на забезпечення малої похибки вимірювань перевищують такі для забезпечення відтворюваності результатів вимірювань, при здійсненні вибору необхідно все ретельно зважити для того, щоб якнайкраще використати інвестиції капіталу.

Діапазон вимірювань приладу може бути представлений як ефективний діапазон або повний діапазон вимірювань. Цей параметр описує ті межі вимірювань, у яких даний вимірник здатний працювати із зазначеними похибками й відтворюваністю результатів. Наприклад, якщо деякий вимірник здатний вимірювати витрату потоку в межах від мінімального рівня 1,25 кг/с до максимального рівня 12,5 кг/с, то повний діапазон або діапазон вимірювань буде дорівнювати 10:1.

Звичайно для витратомірів, наприклад, турбінних у паспортах приводяться кілька значень витрат:

$Q_{\max}$ - найбільша витрата при якій лічильник може працювати короткочасно, наприклад, не більше години за добу, зберігаючи при цьому метрологічні характеристики;

Q_N - номінальна витрата, звичайно дорівнює половині найбільшої; при ній лічильник може працювати безупинно протягом терміну служби;

Q_t - перехідна витрата, при якій й вище якої відносна похибка нормується класом точності;

Q_{min} - найменша витрата, при якій й вище якої похибка нормується звичайно подвійним класом точності, і нижче якої похибка не нормується.

Похибка характеризує якість вимірювального приладу й “істинність” його показань. Виробники можуть наводити похибку своїх вимірювальних приладів одним із двох наступних способів:

Як відсоток від обмірюваного значення, або фактичного показу – відносна похибка приладу. Якщо вимірник має похибку $\pm 4\%$ від дійсної витрати потоку й дає показання 6,75 кг/с, то дійсна витрата потоку буде перебувати в межах від 6,48 кг/с до 7,02 кг/с.

Як відсоток від відхилення повної шкали (ВППШ) – зведена похибка приладу. Якщо вимірник має похибку $\pm 4\%$ ВППШ і максимальна витрата потоку, що здатний вимірювати даний прилад, становить 12,5 кг/с, тоді при зафіксованій витраті потоку 6,75 кг/с істинне значення буде перебувати в діапазоні від 6,25 кг/с до 7,25 кг/с, тобто $6,75 \pm 4\%$ від 12,5.

У нас вимірювальні прилади характеризуються класом точності – узагальненою характеристикою засобу вимірювань, обумовленої межами допуску основних і додаткових похибок, а також іншими властивостями засобів вимірювань, що впливають на точність, значення яких установлюють у стандартах на окремі види засобів вимірювань.

Основною похибкою засобу вимірювань називається похибка засобу вимірювань, використовуюваного в нормальних умовах.

Додаткова похибка – похибка засобу вимірювальної техніки, що виникає додатково при застосуванні засобу в умовах відхилення хоча б однієї з величин, що впливають, від нормального значення або її виходу за межі області нормальних значень.

Користувачі повинні з'ясувати, який із зазначених способів використаний для конкретного вимірника, оскільки це істотно впливає на інтерпретацію показань витратоміра.

Досвід показує, що найважливішим, часто вирішальним, особливо в умовах діючих схем трубопроводів, критерієм вибору виду

витратоміра є вимоги до вимірювальних ділянок трубопроводу, які властиві тому або іншому витратоміру. Мається на увазі забезпечення необхідних довжин прямолінійних ділянок трубопроводу до й після витратоміра, при яких зберігається турбулентність вимірюваних потоків. Для різних видів витратомірів ці вимоги різні: максимальні довжини вимірювальних ділянок потрібні для витратомірів на стандартних звужувальних пристроях (з урахуванням додаткових ділянок між першими й другим місцевими гідравлічними опорами проти потоку), трубок Піто, вихрових і щитових витратомірів. Мінімальні - для турбінних і витратомірів об'ємної дії.

В умовах діючих схем трубопроводів вимоги до довжин вимірювальних ділянок часом бувають нездоланими через витрати на реконструкцію трубопроводів, особливо великих діаметрів, хоча за іншими критеріями розглянутий витратомір є найбільш прийнятним.

Під відтворюваністю результатів вимірника розуміють його здатність давати однакове показання для ідентичного вимірюваної витрати потоку при двох або декількох послідовних вимірюваннях.

Додаткове міркування полягає в тому, що іноді може виявитися дешевше вимірювати, наприклад, споживання води, замість витрати палива, витраченого на нагрівання води, при збереженні прийнятної точності одержуваних результатів. Така ситуація може виникнути, якщо виявиться неможливим виправдати організацію вимірювань витрати пари на основі оцінки витрат і очікуваних вигід, що може мати місце в тих випадках, коли витрати на енергію на об'єкті малі або коли вимоги до діапазону вимірювань такі, що система вимірювання витрати пари виходить дуже дорогою. У подібних випадках можна прийняти альтернативний підхід, заснований на вимірюванні, скажемо, подачі живильної води, замість прямого вимірювання витрати пари.

Звичайно паливні витратоміри (наприклад, витратоміри для нафтопродуктів, газові лічильники, лічильники електроенергії) дешевше, ніж вимірники енергії на подальших етапах її перетворення, наприклад пароміри. Вимірювання витрати води простіше, ніж пари, тому, наприклад, більш практичним може бути вимірювання витрати води, що проходить через калорифер, і вимірювання збільшення температури в калорифері, ніж безпосереднє вимірювання витрати пари. У деяких випадках споживання енергії можна оцінити на підставі

дешевих вимірників годин роботи обладнання (наприклад, споживання електроенергії повітряним компресором).

При виборі конкретних видів вимірника користувач повинен брати до уваги три наступні фактори:

- технічні аспекти (діапазон вимірювань, похибка, відтворюваність результатів);
- практичні міркування (обмеження з установки, вимоги з технічного обслуговування);
- властивості рідини й пари (коливання тиску або температури, ступінь сухості).

3.2 Технічні аспекти

Залежно від кінцевого застосування вимірника користувач повинен визначити прийнятні межі діапазону вимірювань, похибки й відтворюваності результатів вимірювань [3,4].

Необхідний діапазон буде залежати від знання користувачем очікуваних витрат. Якщо відсутні «переносні» для експрес-аналізу вимірювальні прилади, діапазон вимірювань необхідно оцінювати або розраховувати на основі власного досвіду користувача. Максимальне навантаження може бути розраховане на основі максимального навантаження технологічного процесу й/або максимального опалювального навантаження приміщень. Потім необхідні розміри вимірників можуть бути визначені відповідно до цих максимальних очікуваних витрат потоку. Ціль полягає в тому, щоб максимальна припустима витрата вимірника перевищувала максимальну очікувану витрату на мінімально можливу величину. Крім того, діапазон вимірювань обраного витратоміра повинен бути достатнім, щоб забезпечити нормальний робочий діапазон зміни витрати й можливість вимірювання мінімальних очікуваних витрат із прийнятною точністю.

При пікоподібному характері витрати вимірник вибирають за його нормованою максимальною витратою з урахуванням припустимої тривалості такої витрати й максимально можливої тривалості піка навантаження.

При стабільному характері витрати вимірник вибирають за номінальною або експлуатаційною витратою.

Вибір витратоміра з тим же внутрішнім діаметром, що й у трубопроводу, у який він повинен бути убудований, може виявитися помилковим, оскільки в багатьох випадках головні паропроводи мають завищені розміри з урахуванням можливого збільшення витрати пари в майбутньому. Тому при низьких витратах подібний вимірник буде працювати в області нижньої границі свого ефективного діапазону, де його точність буде знижуватися.

Точно так само буде помилкою вибирати розміри вимірювальних апаратів з урахуванням планованих збільшень витрат у майбутньому. Непередбачені обставини можуть перешкодити такому розширенню і якщо навіть воно відбудеться, існуючі вимірники часто легко можуть бути переградуйовані або постачені новими первинними елементами.

Якщо існує невизначеність у витратах, що підлягають вимірюванню, проведення точного аналізу роботи системи може полегшити завдання користувача. Це може зажадати установки тимчасових вимірників і/або залучення фахівців для оцінки витрат.

Додатковим міркуванням при визначенні виду вимірника є облік способу використання вимірника. Мова в цьому випадку йде про те, наприклад, чи здатний даний вимірник фіксувати миттєву витрату потоку або повинен мати функцію підсумовування. Більшість сучасних вимірників являють собою витратоміри, постачені пристроями підсумовування з нагромадженням результату.

3.3 Практичні міркування

При виборі вимірника варто брати до уваги вимоги до його механічної надійності й вимоги до нормального технічного обслуговування можливості переградуювання. Якщо якусь роботу необхідно виконати на самому вимірнику, то наскільки складно це реалізувати? Наскільки важливо уникнути втрати точності даним вимірником або порушення безперервності одержання його показань? Як часто потрібно переградуювання вимірника?

У лінії, у якій установлений вимірник, можуть виникати короткочасні перепади тиску, і якщо вони можуть відбуватися досить часто, необхідно вибрати такий вимірник, що не буде ушкоджений подібними перепадами тиску.

Для будь-якого конкретного місця установки варто також урахувати відповіді на питання, поміщені нижче.

Чи є мінімально необхідні прямі відрізки труби до й після місця установки вимірника? Чи можлива установка струменевипрямлювачів при недостатніх довжинах прямолінійних ділянок?

Чи може вимірник бути встановлений у даному місці? Чи має кріплення трубопроводу достатню міцність? Чи забезпечений нормальний доступ для здійснення технічного обслуговування вимірника?

Чи перебуває місце установки вимірника на горизонтальній або вертикальній ділянці трубопроводу? Якщо це місце розташоване на вертикальній ділянці, то чи спрямований потік нагору або вниз? Деякі види вимірників повинні розташовуватися на горизонтальних ділянках трубопроводу, тому що в протилежному випадку вертикальна ділянка буде порушувати справедливність рівнянь, які використовуються для розрахунку витрати потоку за допомогою об'ємного аналізу.

Чи буде потік пари переміщатися тільки в одному напрямку або ж існує можливість реверса потоку? Деякі вимірники (ультразвукові, індукційні) є односпрямованими, і в деяких випадках виникнення реверса потоку може приводити до їхнього ушкодження.

Чи буде даний вимірник працювати у високій або низькій точці системи трубопроводів? Всі пароміри повинні бути оснащені повітряними клапанами й, при необхідності, конденсатовідвідниками й спускними отворами. У ряді випадків, щоб організувати облік вологої пари, потрібна установка сепараторів [3,4].

3.4 Властивості рідини і пари

Вимірники, які встановлюються в місцях з нестабільним тиском, можуть бути оснащені, при необхідності, компенсаторами тиску. З огляду на додаткові витрати, пов'язані з установкою подібних компенсаторів, виправданість розгляду такого варіанта може бути виправдана тільки в тих випадках, коли потрібна висока точність вимірювань.

Альтернативний підхід передбачає градування вимірника за середнім значенням тиску й допущення про те, що помилки, обумовлені

низьким тиском, будуть компенсуватися помилками протилежного знака при високому тиску.

Якщо розглядається варіант із компенсацією, він може передбачати організацію додаткового відводу тиску, що використовується для вимірювання дійсного статичного тиску, або установку температурного датчика, розташованого вище вимірника. Корекція або за температурою, або тільки за тиском може застосовуватися тільки для насиченої пари. Недоліком обох зазначених методів є неможливість точного контролю перегрітої пари. Якщо існують умови перегріву пари, то потрібні як організація відводу тиску, так і установка температурного давача. Умови для перегріву пари звичайно виникають нижче ділянок зниження тиску, тому компенсація перегріву по-справжньому виправданий у тих випадках, коли мова йде про великих споживачів пари. Додаткові витрати на компенсацію необхідно зіставити з потенційною економією, що вимагає точного знання споживання.

Витратоміри для нафтопродуктів повинні бути розраховані на ту температуру, при якій нафтопродукти надходять у витратомір. Якщо температура нафтопродуктів на вході у витратомір відрізняється від номінальної для даного витратоміра, при визначенні витрати необхідно вводити поправочний коефіцієнт.

На роботу таких вимірників як вимірювальні діафрагми й трубки Піто негативно впливають потоки з високим вмістом крапель води, наприклад, потік пари з невисоким ступенем сухості. Згодом гострі краї вимірювальних діафрагм під дією ерозії зношуються, що викликає зміну коефіцієнта витрати. У випадку трубок Піто один або кілька верхніх відводів тиску можуть виявитися затопленими. Вище будь-якого місця установки вимірника, проти потоку, коли краплі води можуть створювати проблеми, повинні бути встановлені сепаратори. Ці сепаратори забезпечують не тільки видалення більшої частини віднесених крапель води, але також поліпшують гомогенізацію фракції водяної пари, що залишається.

3.5 Планування та проведення вимірювань

Відповідно до Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» під терміном «**вимірювання**» розуміється відображення

фізичних величин їх значеннями за допомогою експерименту та обчислень із застосуванням спеціальних технічних засобів.

Вимірювання є складовою частиною процесу збору інформації під час проведення енергоаудиту [3,4]. Вони проводяться тоді, коли є потреба оцінити достовірність інформації, отриманої з документальних джерел, доповнити або перевірити статистичні показники по об'єкта енергетичного аудиту, а також під час визначення фактичних характеристик режимів роботи окремих споживачів енергії. Для здійснення вимірювань застосовуються наявні на об'єкті системи обліку та контролю ПЕР, стаціонарні та переносні засоби контрольно-вимірювальної техніки.

Основні кроки щодо планування вимірювання показано на рисунку 3.1 [4].



Рисунок 3.1 – Основні кроки щодо планування вимірювання

Обсяг інформації, отриманої шляхом проведення вимірювань, встановлюють енергоаудитори залежно від об'єкта енергетичного аудиту та поставлених мети і завдань. Немає потреби робити

вимірювання, результати яких не будуть застосовані при формуванні висновків енергетичного аудиту. Саме тому, вимірювання мають плануватися.

Щоб уникати цього, аудитору, під час планування вимірювань, необхідно визначитися з найбільш доцільним місцем проведення вимірювань. Для цього необхідно дати відповідь на такі запитання (див. рисунок 3.2) [4]:

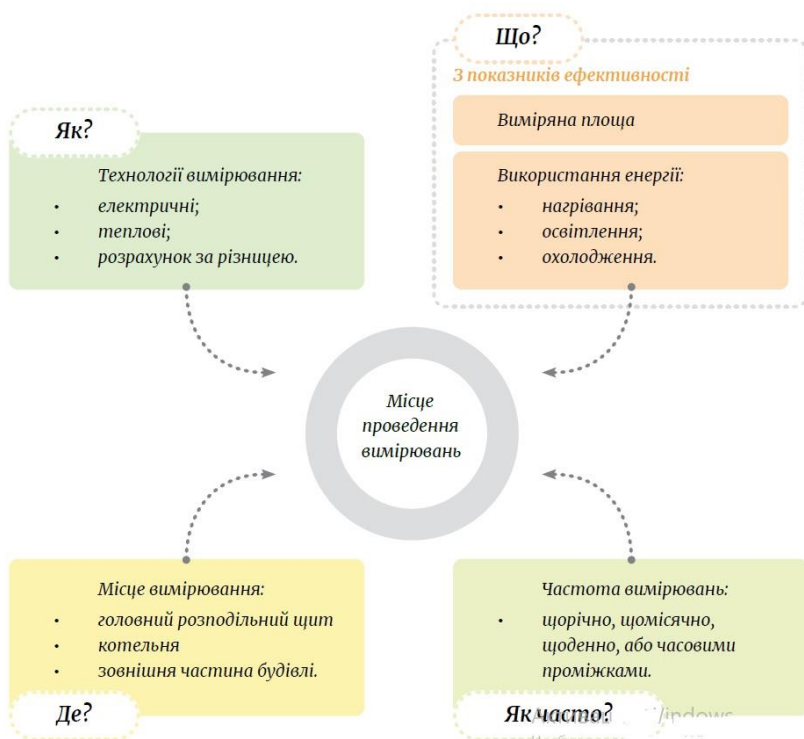


Рисунок 3.2 – Послідовність визначення доцільного місця проведення вимірювань

- що (який параметр, величину) необхідно вимірювати?
- яку міру, точність та метод вимірювання, а також вимірювальний засіб слід обрати?
- якими мають бути тривалість та періодичність вимірювань?

- яке оптимальне місце проведення вимірювання?

Згідно з ISO 50002:2016

Для будь-якого вимірювання та збирання даних на об'єкті енергоаудитор і організація мають узгодити план вимірювань. План вимірювань, за необхідності, переглядають на основі результатів, отриманих енергетичним аудитором під час енергоаудиту. Основні елементи, які повинні бути включені в план вимірювання, це:

- 1) перелік відповідних (контрольних) точок вимірювання, пов'язаних із ними процесів і вимірювального обладнання;
- 2) виявлення будь-яких додаткових точок вимірювання, відповідного вимірювального обладнання, пов'язаних із ними процесів та можливості встановлення обладнання;
- 3) необхідні точність і повторюваність вимірювань, і пов'язана з ними невизначеність вимірювань (нестабільність замірів);
- 4) тривалість та періодичність вимірювання, тобто окремі точки даних або безперервний моніторинг;
- 5) частота збору даних для кожного виміру;
- 6) відповідний період часу, коли діяльність є репрезентативною;
- 7) відповідні змінні, що надаються організацією, наприклад, робочі параметри і дані виробництва;
- 8) відповідальність за проведення вимірювань, у тому числі, список осіб, які працюють для організації або за її дорученням;

Примітка 1. Відповідальна особа може бути від організації, енергетичного аудитора або зовнішнього органу, такого як субпідрядник.

- 9) калібрування і простежуваність вимірювального обладнання (якщо це реально або практично можливо).

Примітка 2. Важливо, щоб деякі необхідні дані, такі як щомісячна продуктивність і рахунки за комунальні послуги за попередні періоди, надавала сама організація: організація уточнює достовірність своїх власних даних щодо енергії, виробництва та інше; аудитор підтверджує, що аналіз ґрунтується на правильно виміряних даних і зазначає, яким чином було отримано інформацію, тобто покази, зняті з лічильника, номінальні (прогнозні) чи розраховані іншим способом; аналіз також підтверджує, що набори даних є порівнюваними.

Методики вибіркового дослідження можуть знадобитися, коли з практичної чи економічної точки зору недоцільно вивчити всю доступну інформацію під час енергетичного аудиту. Вибіркове дослідження описано в ISO 19011:2011, пункт В.3. Процедури і методи слід обирати на основі їх придатності до характеру та обсягу робіт з енергоаудиту.

Метод вимірювання — це сукупність засобів використання вимірювальної техніки та принципів вимірювання. Метод вимірювання повинен мати мінімально допустиму похибку і сприяти вилученню систематичних похибок або переводу їх у розряд випадкових.

В залежності від обраного методу вимірювання, інформація, що буде отримана під час проведення вимірювань, матиме певний рівень достовірності. Тому під час планування проведення вимірювань необхідно визначитися з відповідними методами проведення вимірювань. Відповідно до специфіки вимірювань можуть застосовуватися різні методи вимірювання, які вказуються у розділі звіту з енергоаудиту, що стосується проведення вимірювань.

Метод вимірювань вибирають за такими критеріями [4]:

- придатність методу (передусім за точністю) для виконання конкретного завдання вимірювання фізичної величини;

- забезпеченість методу легітимними засобами вимірювальної техніки (ЗВТ);

- простота реалізації методу, висока продуктивність праці під час вимірювання. Перевагу надають прямим вимірюванням (наприклад, з безпосереднім оцінюванням), автоматизованим методам.

Відповідно до Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність»: методика виконання вимірювань — сукупність процедур і правил, виконання яких забезпечує одержання результатів вимірювань з гарантованою точністю.

Застосування відповідних методик виконання вимірювань (МВВ) в енергоаудиторській діяльності пов'язане з необхідністю забезпечення єдності вимірювань, а саме: результати вимірювань повинні виражатись в одиницях фізичних величин Міжнародної системи одиниць і повинна бути відома похибка цих вимірювань. МВВ об'єднують основні компоненти системи забезпечення єдності вимірювань (величини, що вимірюються, одиниці величин, методи вимірювань, метрологічні

характеристики засобів вимірювання, форма та вид представлення результатів вимірювань та ін.).

На сьогоднішній день загальні вимоги щодо розроблення МВВ визначається Державною системою забезпечення єдності вимірювань (ДСВ)⁸.

4 КОНТАКТНІ ТЕРМОМЕТРИ

4.1 Термометри розширення

Фундаментальною основою роботи термометрів розширення є кінетична теорія речовини. При підвищенні температури збільшується кінетична енергія атомів та молекул, що призводить до зростання амплітуди їхніх коливань навколо положення рівноваги в кристалічній ґратці (для твердих тіл) або збільшення середньої відстані між молекулами (для рідин). Макроскопічно це проявляється як збільшення геометричних розмірів тіла. Для рідинних термометрів ключовим є явище об'ємного розширення.

Рівняння стану, що описує зміну об'єму рідини від температури в першому наближенні, має лінійний вигляд:

$$V_t = V_0(1 + \beta t),$$

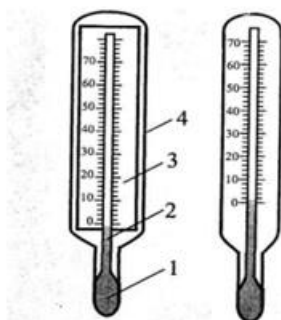
де V_0 - початковий об'єм рідини при нульовій температурі;

t - температура в градусах Цельсія;

β - середній коефіцієнт об'ємного теплового розширення.

Однак, слід зазначити, що для прецизійних вимірювань цієї формули недостатньо, оскільки сам коефіцієнт β не є константою і слабо залежить від температури. Тому в точній метрології використовують поліноміальні залежності вищих порядків. Крім того, при конструюванні термометра необхідно враховувати не лише розширення робочої рідини, а й теплове розширення матеріалу оболонки (скла). Видиме розширення рідини в капілярі є різницею між реальним розширенням рідини та збільшенням об'єму скляного резервуара. Тому для забезпечення чутливості приладу необхідно обирати рідини з коефіцієнтом розширення, що значно перевищує коефіцієнт розширення скла.

Конструктивно термометри розширення реалізуються у кількох основних варіантах, кожен з яких адаптований під специфічні умови застосування. Найбільш відомим є рідинний скляний термометр, який складається з резервуара, заповненого термометричною рідиною, та припаяного до нього капіляра (рисунок 4.1).



а б

а) кийковий; б) технячний із вкладеною шкалою

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

Рисунок 4.1 – Рідинні термометри

За способом виконання шкали розрізняють паличні термометри та термометри з вкладеною шкалою. Паличні термометри характеризуються тим, що вони виготовляються з товстостінного капіляра, зовнішній діаметр якого становить 6-8 мм. Шкала наноситься шляхом травлення або гравіювання безпосередньо на зовнішню поверхню скляної трубки. Така конструкція забезпечує високу механічну міцність і точність, оскільки виключається можливість зміщення шкали відносно капіляра. Термометри з вкладеною шкалою мають іншу будову: тонкий капіляр припаяний до резервуара, а позаду нього розміщується пластина з молочного скла, алюмінію або картону, на яку нанесено поділки. Вся ця конструкція поміщається всередину захисної скляної оболонки. Цей тип зручніший для зчитування показів, але потенційно менш точний через можливе зміщення шкальної пластини [5].

Окремим класом є газові термометри постійного об'єму. Вони базуються на законі Шарля, згідно з яким тиск ідеального газу при постійному об'ємі прямо пропорційний його абсолютній температурі. Газовий термометр складається з балона, заповненого інертним газом (гелієм, азотом або воднем), з'єднаного з високоточним манометром.

Газові термометри відіграють виняткову роль у метрології як первинні еталони термодинамічної температури. Вони дозволяють відтворювати шкалу Кельвіна в широкому діапазоні. Проте через їхню громіздкість, складність експлуатації та необхідність введення численних поправок (на неідеальність газу, адсорбцію стінками, теплове розширення балона), у промисловості як робочі засоби вони практично не використовуються.

Якість та довговічність рідинного термометра критично залежать від матеріалів, з яких він виготовлений. Скло для резервуарів повинно проходити спеціальну термічну обробку - старіння. Це необхідно для усунення залишкових внутрішніх напружень та стабілізації молекулярної структури. Якщо скло не пройшло належного старіння, з часом об'єм резервуара може незворотно зменшуватися ("усаджуватися"), що призводить до систематичного підвищення нульової точки термометра. Для вимірювання температур до 350-400 °C використовують спеціальні термометричні стекла, а для більш високих температур (до 600 °C і вище) застосовують кварцове скло, яке має надзвичайно малий коефіцієнт розширення та високу температуру розм'якшення.

Вибір термометричної рідини визначається необхідним діапазоном вимірювань. Ртуть є неперевершеною рідиною для точних вимірювань у діапазоні від -35 до +600 °C. Вона не змочує скло, що забезпечує чіткий меніск і високу точність зчитування, а також легко отримується в хімічно чистому вигляді. Для вимірювання температур вище температури кипіння ртуті при атмосферному тиску (356,7 °C), капілярний простір над ртуттю заповнюють інертним газом (наприклад, азотом) під тиском до кількох десятків атмосфер, що запобігає кипінню. Для низькотемпературних вимірювань, де ртуть замерзає, використовують органічні рідини: етиловий спирт (до -80 °C), толуол (до -90 °C), пентан (до -200 °C). Органічні рідини, на відміну від ртуті, змочують скло, що може призводити до похибок при швидкому зниженні температури через стікання плівки рідини по стінках капіляра [6].

Метрологічні властивості термометрів розширення визначаються їх геометричними параметрами. Чутливість термометра, тобто величина переміщення стовпчика рідини на один градус зміни температури, прямо пропорційна об'єму резервуара і обернено

пропорційна площі поперечного перерізу капіляра. Це означає, що для створення високочутливого лабораторного термометра (наприклад, для калориметрії) необхідно використовувати великий резервуар і надзвичайно тонкий капіляр. Однак зменшення діаметра капіляра обмежене технологічними можливостями та зростанням гідравлічного опору руху рідини.

Інерційність термометра - це час, необхідний для прийняття ним температури середовища. Вона залежить від маси резервуара, теплопровідності скла та теплофізичних властивостей самої термометричної рідини. Складні термометри мають порівняно велику інерційність, що робить їх непридатними для вимірювання швидкозмінних температур. Показник теплової інерції може становити від десятків секунд до хвилин у спокійному повітрі.

Точність скляних термометрів може бути дуже високою. Зразкові ртутні термометри 1-го розряду дозволяють вимірювати температуру з похибкою не більше 0,002-0,01 °C. Технічні термометри зазвичай мають ціну поділки 0,5-2 °C і відповідну похибку.

Незважаючи на активний розвиток електроніки, рідинні термометри не втрачають своєї актуальності. У побуті вони знайомі кожному у вигляді медичних, кімнатних та віконних термометрів. У промисловості вони широко застосовуються для місцевого контролю температури там, де не потрібна дистанційна передача показів і де відсутня вібрація. Їх встановлюють на трубопроводах, баках, у системах опалення та вентиляції, зазвичай захищаючи металевими оправами від механічних пошкоджень. Особливо важливу роль ртутні термометри відіграють у лабораторіях метрологічного контролю, де вони виступають як вторинні еталони для періодичної перевірки інших типів датчиків температури завдяки своїй довготривалій стабільності.

4.2 Манометричні термометри

Манометричні термометри (рисунок 4.2) представляють собою окремий клас приладів, принцип дії яких базується на фундаментальному термодинамічному зв'язку між температурою та тиском робочої речовини в замкнутому об'ємі. Конструктивно такий термометр являє собою герметичну систему, що складається з трьох основних елементів: термобалона, який занурюється у вимірюване

середовище, капілярної трубки, що виконує роль передавальної лінії, та манометричного приладу (найчастіше з трубчастою пружиною Бурдона або багатовитковою гелікоїдальною пружиною), шкала якого проградуєвана безпосередньо в одиницях температури. При нагріванні термобалона тиск робочої речовини всередині системи зростає, цей тиск передається через капіляр до пружини манометра, викликаючи її розкручування і переміщення стрілки по шкалі.



1 – балон; 2 – вимірювальна трубка; 3 – манометр

Рисунок 4.2 – Манометричний термометр

Класифікація манометричних термометрів здійснюється за фазовим станом робочої речовини, що заповнює термосистему, оскільки це визначає характер залежності тиску від температури та особливості шкали приладу [5].

Газові манометричні термометри (ТГП) заповнюються інертним газом, найчастіше азотом, або гелієм для низьких температур. Їхня робота описується законом Шарля, згідно з яким тиск газу при постійному об'ємі лінійно залежить від температури. Це забезпечує важливу перевагу - рівномірну шкалу по всьому діапазону вимірювань. Такі термометри можуть охоплювати широкий діапазон температур від глибокого холоду ($-200\text{ }^{\circ}\text{C}$) до високих температур ($+600\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Рідинні манометричні термометри (ТЖП) повністю заповнюються рідиною, що має високий коефіцієнт теплового розширення і низьку стисливість (ртуть, ксилол, пропіловий спирт, силіконові масла). У цих приладах зміна тиску виникає внаслідок намагання рідини розширитися при нагріванні в замкнутому об'ємі, що створює значне гідравлічне зусилля. Рідинні термометри також мають рівномірну шкалу, але їхній діапазон обмежений властивостями рідини.

Конденсаційні або парові термометри (ТКП) мають свою специфіку: термобалон заповнюється низькокиплячою рідиною (хлористий метил, ацетон, фреони) лише частково (на $2/3$ об'єму), а решта простору заповнена її насиченою парою. Тиск у такій системі дорівнює тиску насиченої пари при даній температурі і не залежить від об'єму (поки є рідка фаза). Оскільки залежність тиску насиченої пари від температури є різко нелінійною (експоненційною), шкала таких термометрів є вкрай нерівномірною: стиснута на початку діапазону і розтягнута в кінці.

Однією з головних переваг манометричних термометрів перед звичайними скляними є можливість дистанційного вимірювання. Капіляр, виготовлений з міді або сталі, може мати довжину від 1,6 до 60 метрів, що дозволяє винести показуючий прилад на щит управління, подальше від місця вимірювання. Однак наявність довгого капіляра вносить специфічну похибку. Температура навколишнього повітря вздовж траси прокладання капіляра може змінюватися, що впливає на об'єм робочої речовини в ньому і додає похибку до показів. Для компенсації цього впливу в газових та рідинних термометрах застосовують спеціальні біметалеві компенсатори в механізмі манометра або використовують другу, "глуху" капілярну лінію, яка йде паралельно основній, але не підключена до термобалона, і віднімає температурний вплив механічним шляхом.

Манометричні термометри цінуються за свою автономність та безпеку. Вони не потребують джерел електричного живлення, що робить їх ідеальними для використання на об'єктах з підвищеною вибухонебезпекою, де електрична іскра може призвести до катастрофи. Вони стійкі до вібрацій, що дозволяє встановлювати їх на двигунах, компресорах та суднах. Багато моделей оснащуються самописцями (дисковими діаграмами) для архівації даних або електроконтактними групами для найпростішої автоматики (сигналізації) [6].

Серед обмежень слід відзначити складність ремонту: при пошкодженні капіляра або розгерметизації системи прилад фактично не підлягає відновленню в польових умовах і потребує заміни або заводського ремонту. Також термобалони часто мають значні розміри, що збільшує інерційність і унеможливує вимірювання в точкових зонах або малих об'ємах.

Основні споживачі манометричних термометрів - це хімічна та нафтогазова промисловість (вибухонебезпечні зони), суднобудування (контроль температури вихлопних газів дизелів, масла, води охолодження), харчова промисловість (автоклави). Вони також широко використовуються в комунальному господарстві в автоматизованих теплових пунктах як надійні та прості індикатори.

4.3 Дилатометричні термометри

Дилатометричні термометри використовують ефект лінійного теплового розширення твердих тіл. Зміна довжини твердого стержня при нагріванні описується законом:

$$L_t = L_0(1 + \alpha \Delta T),$$

де α - температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР).

Ключова ідея полягає у використанні двох матеріалів, у яких значення α суттєво відрізняються. Абсолютне видовження одного окремого стержня зазвичай занадто мале для візуальної реєстрації без складних підсилювачів, тому використовують різницевий ефект.

Типова конструкція дилатометричного термометра, часто звана "трубка-стержень", складається із зовнішньої металевої трубки, виготовленої з матеріалу з високим коефіцієнтом розширення (латунь, алюміній або спеціальні сталі), та внутрішнього стержня з матеріалу з надзвичайно низьким коефіцієнтом розширення. Найчастіше для стержня використовують інвар (сплав заліза з 36% нікелю), який в діапазоні звичайних температур майже не змінює своїх розмірів. Стержень і трубка жорстко з'єднані (зварені) на одному кінці - це і є чутливий елемент. Інший кінець трубки закріплений на корпусі приладу, а вільний кінець внутрішнього стержня впирається у важільний передавальний механізм. При нагріванні трубка подовжується, "тягнувши" за собою точку зварювання, в той час як довжина стержня майже не змінюється. В результаті внутрішній стержень ніби "втягується" всередину трубки, і це відносне переміщення перетворюється механізмом на поворот стрілки.

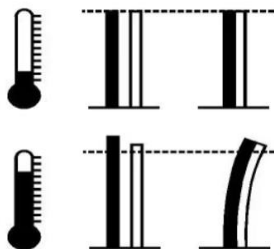
Дилатометричні термометри не відносяться до класу прецизійних приладів. Їхня точність зазвичай обмежується класами 1.5-2.5. Це

пов'язано з наявністю механічних люфтів у передавальному механізмі, тертям та можливим гістерезисом деформації металів при багаторазовому нагріванні-охолодженні. Однак, їхньою головною перевагою є здатність розвивати значне механічне зусилля при розширенні. Це дозволяє використовувати їх не лише для індикації, а й як елементи прямої дії, що безпосередньо керують клапанами або потужними електричними перемикачами без додаткових підсилювачів.

У промисловості прості дилатометричні датчики використовуються в системах захисту від перегріву, в термостатах прасок та бойлерів. У науці ж термін "дилатометрія" має інше значення: високоточні лабораторні дилатометри використовуються для дослідження фазових переходів у сплавах, спікання кераміки та поведінки полімерів, вимірюючи найменші зміни об'єму зразка при зміні температури з нанометровою точністю [6].

4.4 Біметалічні термометри

Біметалічний термометр є логічним розвитком ідеї використання різниці коефіцієнтів теплового розширення. Основний елемент - біметалева пластина, яка виготовляється шляхом міцного з'єднання (гарячої прокатки або зварювання вибухом) двох різнорідних металевих смуг по всій поверхні дотику. Одна смуга (активний шар) виготовляється з металу з високим ТКЛР (латунь, інвар з добавками марганцю та міді), інша ("пасивний шар") - з інвару. Оскільки шари жорстко зв'язані, при нагріванні активний шар прагне подовжитися більше, ніж пасивний. Це призводить до виникнення внутрішніх напружень, які змушують пластину вигинатися в бік пасивного шару. Кривизна вигину строго залежить від температури (рисуюнок 4.3).



Рисуюнок 4.3 – Вигин пари металів при змінні темпаратури

Для практичного використання проста пластина є незручною через малу величину переміщення кінця. Щоб отримати великий кут повороту осі при компактних розмірах, біметалеву стрічку формують у вигляді спіралі (подібно до пружини балансу механічного годинника) або у вигляді гвинтової (гелікоїдальної) пружини. Гелікоїдальна форма дозволяє розмістити чутливий елемент у вузькій трубці-шупі. При зміні температури пружина закручується або розкручується, обертаючи вісь, що проходить через центр пружини і з'єднана безпосередньо зі стрілкою приладу на циферблаті.

Характеристики біметалічного термометра (рисунок 4.4) (чутливість, лінійність шкали) визначаються правильним підбором пари металів. Чим більша різниця їхніх коефіцієнтів розширення, тим більшою буде чутливість приладу. Крім того, матеріали повинні мати високу межу пружності, щоб деформації залишалися зворотними і не переходили в пластичну область, що призвело б до незворотної зміни калібрування. Також важлива корозійна стійкість та стабільність властивостей у часі [5].

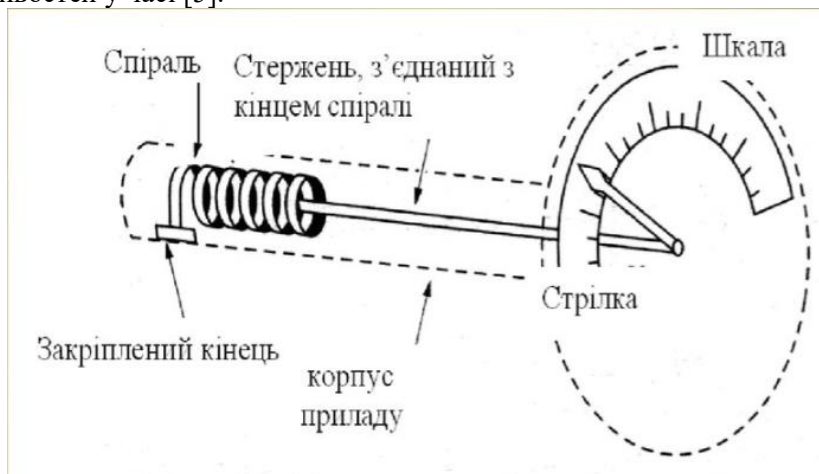


Рисунок 4.4 – Біметалічний термометр

Робочий діапазон біметалічних термометрів зазвичай лежить в межах від -70 до $+600$ °С. Нижня межа визначається крихкістю

матеріалів при низьких температурах, а верхня - початком процесів рекристалізації в металах та втратою пружних властивостей (повзучістю), що призводить до втрати точності.

Біметалічні термометри знайшли масове застосування завдяки своїй надійності, дешевизні та вібростійкості. Вони є стандартом для місцевого контролю температури в системах опалення, вентиляції та кондиціювання (HVAC), у харчовій промисловості ("щупові" термометри для м'яса), у нафтохімії. Окрім показуючих приладів, біметалеві елементи є серцем більшості електромеханічних термостатів та теплових реле захисту електродвигунів, де вигин пластини розмикає електричний контакт при перегріві.

4.5 Термоелектричні термометри (термопари)

Термоелектричні термометри, або термопари, є найпоширенішими датчиками температури в промисловості. Їхня робота базується на термоелектричному ефекті, відкритому Томасом Йоганном Зеєбеком у 1821 році. Суть ефекту полягає в тому, що якщо скласти замкнуте електричне коло з двох різнорідних провідників (термоелектродів) і підтримувати місця їх з'єднання (спаї) при різних температурах, то в колі виникає електрорушійна сила (термо-ЕРС), і протікає електричний струм.

З точки зору фізики твердого тіла, цей ефект пояснюється залежністю енергії вільних електронів від температури. При нагріванні одного кінця провідника концентрація та енергія електронів на цьому кінці зростає, і вони починають дифундувати до холодного кінця, створюючи різницю потенціалів. Оскільки різні метали мають різну густину станів електронів і різну роботу виходу, різниця потенціалів у кожному з них буде різною.

Результуюча термо-ЕРС в колі визначається саме різницею температур спаїв та властивостями матеріалів і не залежить від розподілу температури вздовж самих провідників (за умови їхньої однорідності). Формула для термо-ЕРС має вигляд, а принцип дії представлений на рисунку 4.5:

$$E_{AB} = \int_{T_{cold}}^{T_{hot}} (S_A(T) - S_B(T)) dT,$$

де S_A та S_B - коефіцієнти Зеєбека для матеріалів А та В.

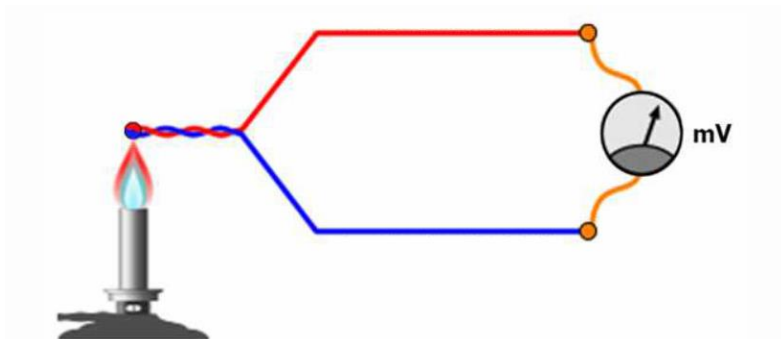


Рисунок 4.5 – Принцип дії термопары [5]

Для забезпечення взаємозамінності термопары стандартизовані міжнародними нормами (ІЕС 60584). Найпопулярніші типи:

- тип К (Хромель-Алюмель) – "Робоча конячка" термометрії. Забезпечує добрий компроміс між вартістю, чутливістю (близько 41 мкВ/°С) та діапазоном (від -200 до +1200 °С). Має майже лінійну характеристику. Однак у відновлювальних атмосферах (водневих) при високих температурах схильна до "зеленої гнилі" - вибіркового окислення хрому, що призводить до значного дрейфу показів;

- тип J (Залізо-Константан) – відрізняється високою чутливістю (50-55 мкВ/°С) і низькою ціною. Використовується до 750 °С. Головний недолік - електрод із заліза іржавіє у вологому середовищі, що обмежує термін служби;

- тип N (Ніхросіл-Нісіл) – розроблена як покращена альтернатива типу К. Має значно кращу стабільність при високих температурах (до 1300 °С) і стійкість до окислення, але коштує дорожче;

- типи S, R (Платинові групи) – виготовляються з платини та сплавів платини з родієм. Використовуються як еталонні термопары та для вимірювання високих температур (до 1600 °С) в окислювальних середовищах. Вони надзвичайно стабільні, хімічно інертні, але мають малу чутливість (6-10 мкВ/°С) і дуже високу вартість;

- тип В (Платина-родій 30% / Платина-родій 6%) – дозволяє вимірювати температури до 1800 °С.

Матеріали для термопар підбираються за комплексом критеріїв: висока температура плавлення, стійкість до хімічної корозії у робочому середовищі, стабільність кристалічної структури при циклічних нагрівах, високий коефіцієнт термо-ЕРС та лінійність характеристики. Крім того, важлива технологічність - можливість виготовлення дроту з суворо нормованим складом, щоб забезпечити взаємозамінність датчиків без індивідуального градуювання.

Промисловий датчик на основі термопари - це складна конструкція. Термоелектроди ізолюються один від одного керамічними трубками ("бусами") або мінеральною ізоляцією (порошок оксиду магнію MgO) всередині гнучкого металевого кабелю. Робочий спай (гарячий кінець) формується зварюванням. Існує три основних типи виконання спаю:

1) ізольований. Спай електрично ізольований від зовнішнього захисного чохла. Це захищає від електричних завад, але збільшує теплову інерцію;

2) заземлений. Спай приварений безпосередньо до захисного чохла. Це забезпечує чудову теплопередачу і швидку реакцію, але робить систему вразливою до "земляних петель" і завад;

3) відкритий. Електроди виступають безпосередньо в середовище без захисту. Забезпечує миттєву реакцію (для газів), але датчик швидко руйнується механічно або хімічно.

Термопари покривають найширший діапазон серед усіх контактних датчиків (таблиця 4.1): від близьких до абсолютного нуля температур (термопари золото-залізо/хромель) до $+2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (вольфрам-ренієві термопари). Точність термопар регламентується класами допуску. Для стандартних промислових термопар (тип К, клас 1) похибка складає $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ або $\pm 0,4\text{ }\%$ від вимірюваної температури (береться більше значення). Слід розуміти, що з часом, внаслідок дифузії домішок та окислення, термо-ЕРС змінюється, тому термопари потребують періодичної заміни або перевірки.

Завдяки своїй універсальності термопари застосовуються всюди: від вимірювання температури розпавленої сталі в конвертерах і контролю активної зони ядерних реакторів до моніторингу температури вихлопних газів в автомобілях і температури чіпів у комп'ютерах та іншій комп'ютерній і мікропроцесорній техніці. Також при проведенні різних досліджень.

Таблиця 4.1 – Стандартизовані типи термопар

Тип	Матеріали електродів	Номинальний діапазон, °C	Чутливість (прибл.), мкВ/°C	Клас точності 1, °C (допуски)	Основні переваги
K	Хромель (+) / Алюмель (-)	-200 до +1200	~41	± 1.5 або $\pm 0.4 \% t$	Універсальність, лінійність, широкий діапазон.
J	Залізо (+) / Константан (-)	0 до +750	~55	± 1.5 або $\pm 0.4 \% t$	Висока чутливість, низька вартість.
T	Мідь (+) / Константан (-)	-200 до +350	~40	± 0.5 або $\pm 0.4 \% t$	Висока точність у низькотемпературному діапазоні.
N	Ніхросіл (+) / Нісіл (-)	-270 до +1300	~39	± 1.5 або $\pm 0.4 \% t$	Стабільність, стійкість до окислення (краще, ніж K).
S	Pt-10%Rh (+) / Платина (-)	0 до +1600	~10	± 1.0 або $\pm 0.15 \% t$	Еталонна точність, стійкість до високих температур.
B	Pt-30%Rh (+) / Pt-6%Rh (-)	+600 до +1800	~7	± 4.0 або $\pm 0.25 \% t$	Найвищий діапазон, не вимагає компенсації холодного спаю (вище 50°C).

4.6 Компенсаційний метод виміру термо-ЕРС термопар

Отримання точного значення температури за допомогою термопари зводиться до завдання прецизійного вимірювання малих значень напруги (термо-ЕРС), які часто становлять мілівольти або навіть мікрівольти. Підключення звичайного вольтметра безпосередньо до термопары є проблематичним. Будь-який вольтметр має скінченний внутрішній опір і для відхилення стрілки споживає певний струм I . Протікання цього струму через коло термопары, яке має власний опір (опір довгих дротів, перехідний опір контактів), викликає падіння напруги $U_{drop} = I \cdot R_{circuit}$. В результаті прилад покаже напругу $U = E_{thermo} - I \cdot R_{circuit}$, що менше за істинну ЕРС [6].

Для усунення цієї методичної похибки застосовується компенсаційний метод (метод Поггендорфа). Його ідея геніально проста: вимірювану ЕРС невідомого джерела врівноважують (компенсують) рівною їй за величиною і протилежною за знаком напругою від допоміжного джерела. У момент повної компенсації результуюча напруга в колі дорівнює нулю, і струм через термопару не протікає ($I = 0$). А якщо немає струму, то немає і падіння напруги на проводах. Таким чином, вимірюється істинне значення ЕРС, незалежно від опору лінії зв'язку.

Класична схема лабораторного потенціометра постійного струму включає два контури:

1) робочий контур. Складається зі стабільного джерела живлення (суха батарея або акумулятор) і каліброваного змінного резистора - реохорда (довгий дріт з високим питомим опором, вздовж якого переміщується ковзний контакт). Сила струму в цьому контурі встановлюється строго фіксованою;

2) вимірювальний контур. Сюди підключається термопара, високочутливий нуль-індикатор (гальванометр) і частина реохорда. Термопара вмикається так, щоб її ЕРС була направлена назустріч падінню напруги на ділянці реохорда.

Процедура вимірювання відбувається у два етапи. Спочатку проводиться калібрування робочого струму. Для цього замість термопары вмикається "нормальний елемент" (еталонне електрохімічне джерело, наприклад, елемент Вестона) з відомою з високою точністю ЕРС ($E_N = 1,0186$ В). Регулювальним резистором добиваються відсутності струму в гальванометрі. Це гарантує, що на шкалі реохорда

напруга відповідає розмітці. На другому етапі підключають термопару. Переміщуючи повзунок реохорда, знаходять таку точку, де падіння напруги на ділянці дроту точно дорівнює термо-ЕРС (гальванометр знову показує нуль). Значення ЕРС зчитують по лінійці реохорда.

Як зазначалося, термопара генерує ЕРС пропорційно різниці температур між гарячим і холодним спаями: $E = f(T_{hot} - T_{cold})$. Всі градувальні таблиці складені за умови, що температура холодного спаю (місця підключення до приладу) становить рівно 0 °С. Однак у реальних виробничих умовах клеми приладу знаходяться при кімнатній температурі, яка може коливатися (наприклад, +20... +30 °С). Якщо це не врахувати, похибка вимірювання складе десятки градусів.

Існує кілька методів вирішення цієї проблеми [6]:

- термостатування. Класичний лабораторний метод, коли вільні кінці термопари поміщають у скляні пробірки з маслом, які занурюють у посудину Дьюара, заповнену сумішшю танучого льоду та води. Це фізично забезпечує $T_{cold} = 0$ °С;

- електронна компенсація (автоматична корекція). Сучасні вторинні прилади вимірюють температуру своїх вхідних клем за допомогою вбудованого сенсора (термістора або транзистора). Мікропроцесор обчислює поправку (яка ЕРС виникла б, якби холодний спай був при 0 °С) і додає її до виміряного сигналу. Це дозволяє програмно емулювати наявність крижаної ванни.

Потенційні джерела похибок при вимірюванні термо-ЕРС включають паразитні термоелектричні ефекти. Якщо мідні дроти підключаються до клем приладу, і між цими клемами є різниця температур (наприклад, одна сторона приладу нагріта сонцем), виникає додаткова термо-ЕРС, яка спотворює результат. Для боротьби з цим клеми розміщують на масивному ізотермічному блоці з високою теплопровідністю, який вирівнює температуру. Також важливою проблемою є електромагнітні наводки. Оскільки корисний сигнал термопари дуже слабкий, довгі дроти діють як антена, ловлячи завади від силових мереж (50 Гц). Для мінімізації цього використовують екрановані кабелі, скручування жил у виту пару та цифрову фільтрацію сигналу.

Хоча в масовій промисловості ручні компенсатори витіснені цифровими вольтметрами з високим вхідним опором (які фактично реалізують той самий принцип відсутності споживання струму, але на

базі операційних підсилювачів), лабораторні потенціометри (типу ПП-63, Р4833) залишаються "золотим стандартом" при повірці. Вони дозволяють вимірювати напругу з точністю до 0,005%, що необхідно для калібрування інших приладів та проведення точних наукових експериментів.

4.7 Метрологічні характеристики контактних термометрів

У техніці прийнято нормувати точність приладів через поняття класу точності. Це узагальнена характеристика, що визначає межі допустимої основної та додаткових похибок. Для манометричних та біметалевих термометрів клас точності (наприклад, 1.0; 1.5; 2.5) вказує на допустиму зведену похибку у відсотках від діапазону шкали. Тобто, якщо прилад зі шкалою 0-100 °C має клас 1.5, максимальна похибка в будь-якій точці шкали не перевищить ± 1.5 °C. Для термопар ситуація дещо складніша: стандарти визначають класи допуску (1, 2, 3), які задають формулу допустимого відхилення. Наприклад, для термопари типу К класу 1 допуск становить ± 1.5 °C в діапазоні до 375 °C, а вище - $\pm 0.4\%$ від температури t .

Похибки вимірювання поділяються на кілька категорій. Інструментальна похибка притаманна самому засобу вимірювання. Вона обумовлена недосконалістю виготовлення, тертям у механізмах, нелінійністю характеристик сенсорів, шумами електроніки. Методична похибка є найбільш підступною, оскільки вона виникає через неправильне застосування приладу. Типовий приклад - вимірювання температури газу в трубі з холодними стінками. Термометр буде показувати температуру, нижчу за реальну, через радіаційний теплообмін зі стінками. Інший приклад - недостатня глибина занурення термометра, коли тепло відводиться від чутливого елемента назовні по захисній арматурі ("тепловий місток"). Динамічна похибка виникає при вимірюванні змінних температур через теплову інерцію датчика. Датчик завжди "запізнюється", показуючи температуру, яка була у середовищі певний час тому.

Для підтвердження метрологічних характеристик термометри підлягають періодичному калібруванню або повірці. Ця процедура полягає у порівнянні показів робочого приладу з показами еталонного термометра більш високого класу точності. Калібрування проводять у

термостатах (рідинних ваннах з інтенсивним перемішуванням) або в сухоблочних калібраторах (металевих блоках з нагрівачем та прецизійним контролером). В якості еталонів зазвичай використовують платинові термометри опору. Результатом калібрування є сертифікат, де вказані реальні відхилення приладу в контрольних точках. В таблиці 4.2 представлено порівняння основних контактних термометрів.

Таблиця 4.2 – Порівняння основних контактних термометрів

Параметр	Рідинні (Ртуть)	Біметалеві	Манометричні (Рідина/Газ)	Термопари (Тип К)
Фізичний принцип	Об'ємне розширення рідини	Різниця лінійного розширення металів	Зміна тиску в замкнутому об'ємі	Ефект Зеебека (Термо-EPC)
Діапазон, °C	-35 до +600	-70 до +600	-200 до +600	-200 до +1200+
Клас точності (прибл.)	0.01 – 1.0	1.5 – 2.5	1.0 – 2.5	1.0 – 2.0
Інерційність	Висока (десятки сек)	Середня	Середня (залежить від балона)	Низька (одиниці сек)
Дистанційна передача	Відсутня (тільки візуально)	Відсутня (тільки візуально)	Механічна (до 60 м)	Електрична (необмежена)
Потреба у живленні	Ні	Ні	Ні	Ні (потрібен вторинний прилад)
Стійкість до вібрації	Низька (скло)	Висока	Висока	Висока

Підсумовуючи метрологічні аспекти, можна провести порівняльний аналіз.

Рідинні скляні термометри – забезпечують найвищу точність (до 0.01 °C і вище) у вузькому діапазоні середніх температур. Є еталонами стабільності.

Термопари – лідери за шириною діапазону (особливо високі температури >1000 °C), мають добру динаміку, але середню точність (зазвичай 0.5-1%).

Манометричні та біметалеві – мають посередню точність (1-2.5%), але незамінні як надійні польові індикатори, що не потребують живлення.

Термометри опору (для довідки) – займають нішу прецизійних промислових вимірювань (похибка 0.1-0.3%) у діапазоні до 600 °С.

4.8 Практичні аспекти використання контактних термометрів

Інженерний підхід до вибору термометра базується на аналізі умов завдання. Якщо необхідно просто візуально контролювати температуру води в опалювальному котлі, ідеальним вибором буде біметалевий або рідинний термометр: дешево, надійно, не потребує проводів. Для автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУ ТП) необхідні датчики з електричним вихідним сигналом - термопари (або термометри опору). При цьому для температур вище 1000 °С безальтернативним вибором є термопари. У вибухонебезпечних зонах нафтопереробки часто віддають перевагу манометричним термометрам або спеціальним вибухозахищеним виконання електричних датчиків. Для вимірювання температури об'єктів під високою напругою або в сильних електромагнітних полях краще підходять манометричні або спеціальні волоконно-оптичні (хоча вони і не розглядаються тут) системи [6].

Коректний монтаж - запорука точного вимірювання. Основне правило: чутливий елемент повинен знаходитися в зоні репрезентативної температури, де потік середовища добре перемішується (наприклад, після повороту труби). Для мінімізації похибки від тепловідведення глибина занурення гільзи термометра повинна становити не менше 5-10 її діаметрів (для металевих гільз). При встановленні на трубах малого діаметра кінець термометра повинен досягати осі труби. Часто датчик встановлюють похило під кутом 45° назустріч потоку або в спеціальному розширенні трубопроводу. Для зменшення теплового опору між внутрішньою стінкою захисної гільзи та чутливим елементом датчика простір заповнюють теплопровідним мастилом (до 200 °С) або мідною/алюмінієвою стружкою (при високих температурах). Важливо також забезпечити зручний доступ до приладу для зчитування показів та технічного обслуговування.

5 БЕЗКОНТАКТНІ ТЕРМОМЕТРИ

Безконтактні методи дають можливість вимірювати температуру на відстані без безпосереднього контакту з об'єктом вимірювання і засновані на вимірюванні температури поверхні об'єкта за допомогою приладів інфрачервоного випромінювання: пірометрів. Пірометри використовують для вимірювання температури локальної точки об'єкта. До того ж, контактне вимірювання температури не завжди ефективне та доцільне, тому, що контактні прилади не придатні для вимірювання температури у небезпечних середовищах, деталей пристроїв, що рухаються або знаходяться під високою напругою, чи у важкодоступних місцях [4].

Проте, слід зазначити, що безконтактні методи вимірювання стосуються тільки поверхневих температур, а для вимірювання температури всередині тіл, газів і рідин застосовуються контактні методи вимірювання температури.

Пірометр — це пристрій, який вимірює температуру за допомогою інфрачервоного (ІЧ) випромінювання, яке випромінює гарячий об'єкт, і перетворює його на температурну шкалу Цельсія ($^{\circ}\text{C}$) або Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$). Вони часто використовуються в промислових цілях для вимірювання температури занадто гарячих об'єктів, таких як розплавлений метал або предмети нагріті в печах.

Пірометри працюють, виявляючи ІЧ-випромінювання, яке випромінює об'єкт, і використовують цю інформацію для обчислення його температури. Вони мають високу точність і можуть безпосередньо вимірювати температуру всіх типів матеріалів і газів у широкому діапазоні температур.

Вони бувають різноманітних форм і розмірів і використовуються в багатьох галузях промисловості, включаючи нафтову промисловість, аерокосмічну промисловість і навіть у медичній галузі, де точне безконтактне вимірювання температури є важливим для правильної термічної обробки матеріалів і оптимізації енергоефективності.

Існує чотири основних типи пірометрів. У межах кожного типу існує широкий вибір моделей, оптимізованих для того, щоб зробити їх найкращими для певних застосувань.

1. Одноколірний пірометри.
2. Двоколірний пірометри.

3. Волоконно-оптичні пірометри.
4. Стандартні пірометри.

5.1 Одноколірний пірометр

Одноколірний пірометр вимірює лише одну довжину хвилі. Вони можуть поставлятися з певною довжиною хвилі відповідно до об'єкта та температурного діапазону об'єкта, який вимірюється, наприклад, довжина хвилі 4,8...5,2 мкм використовується для вимірювання температури поверхні скла. При правильному виборі для певних застосувань вони забезпечать найкращу точність вимірювань [4].

На рисунку 5.1 зображено одноколірний інфрачервоний пірометр PM60S16 виробництва канадської компанії Logika Technologies.

Пірометр моделі PM60S16 з довжиною хвилі 1,0 мкм та діапазоном температур від $+600^{\circ}$ до $+1600^{\circ}\text{C}$ розроблений для застосування в металургійній промисловості, для вимірювання температури сталі, заготовок, плит, гарячекатаної сталі, вогнетривів тощо. Пірометр може «заглядати» в процес і вимірювати цільову температуру на відстані (рис. 5.2), забезпечуючи точні показання, усуваючи проблеми, пов'язані з контактними вимірювальними пристроями. Ці пірометри використовуються для вимірювання відносно рівних ділянок з установкою між 45° і 90° . Для вимірювання правильної температури слід повністю заповнити пляму розпеченим металом, слід вжити заходів, щоб уникнути пилу, води та водяної пари в точці вимірювання. Технічні дані інфрачервоного пірометра моделі PM60S16 представлені в таблиці 5.1 [4].



Рисунок 5.1 – Одноколірний пірометр моделі PM60S16 Logika Technologies

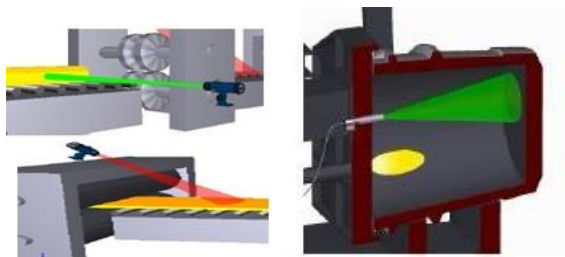


Рисунок 5.2 – Приклад вимірювання температури

Таблиця 5.1 – Технічні дані інфрачервоного пірометра моделі PM60S16 (+600° ...+1600 °C)

Робоча температура	від -20°C до +55°C. З охолоджувальною водою: +120°C
Точність	0,5%
Повторюваність	0,1% ($\pm 2^\circ\text{C}$)
Час відгуку	Регульований – найшвидший час відгуку 20 мс
Режим відображення	4 розрядні світлодіоди. Відображення параметрів піку, спаду, середнього або реального часу
Аналоговий вихід	Лінійний 4-20 мА (або 0-20 мА) пропорційно до температури Лінійний 0-10 В постійного струму, пропорційний температурі
Вихід тривоги	Сигналізація високої або низької температури процесу, номінальний 0,2 А при 220 В змінного струму, 0,5 А при 30 В постійного струму, MOS релейний вихід. Сигналізація високої або низької температури навколишнього середовища
Корпус / клас захисту	Герметичний корпус із нержавіючої сталі з класом захисту IP66 включає підключення для продувки повітря та охолоджувальної води. Додатковий вузол волоконно-оптичних лінз включає фітинг для продувки повітрям
Розмір	Корпус: 370 мм Д х 100 мм Ш х 190 мм В (14,5 дюйма Д х 4 дюйма Ш х 7,5 дюйма В), 4 кг
Лазерне прицілювання	Лазер видимого прицілювання, довжина хвилі 630 нм $\pm 10\%$, потужність ≤ 3 мВт. Лазер 2 класу
Самоперевірка	Самотестування активується, коли тестовий штифт підключено до 0 В постійного струму.

Особливості моделі PM60S16:

- розроблений для жорстких умов із захистом IP66;
- інтегроване підключення для продувки повітрям і охолоджувальної води;
- регулювання задньої панелі;
- має лазерну указку для вирівнювання;
- легко встановити;
- швидкий час відгуку.

Застосування:

- вимірювання температури продукту всередині печі повторного нагріву;
- заготівля / Плита / Профілі / ТМТ Бар;
- вимірювання температури слябів, заготовок, блюмів, прутків, рідкої сталі

Додаткові параметри:

- розподільна коробка – містить перетворювач змінного/постійного струму та клемні з'єднання;
- кожух - захисний кожух з листового металу;
- опорна підставка - сталева конструкція – регулюється для монтажу датчиків;
- дистанційний блок відображення температури (UTD-1).

5.2 Двоколірний інфрачервоний пірометр

Двоколірний інфрачервоний пірометр PM-616 з діапазоном температур $+600^{\circ} \dots +1600^{\circ} \text{C}$ (рис. 5.3), розроблений компанією Logika Technologies у 2019 році, в основному використовується в металургійній промисловості для вимірювання температури сталі або розплавленого чавуну, катанки, гарячекатаної сталі, а також цементних печей. Так само, як і пірометр моделі PM60S16, він може «заглядати» в процес і вимірювати цільову температуру на відстані (рис. 5.2.), забезпечуючи точні показники, усуваючи проблеми, пов'язані з контактними вимірювальними пристроями та має такі самі технічні дані як і модель PM60S16 (таблиця 5.1) [4].

Проте, на відміну від одноколірного пірометра моделі PM60S16, вхідні сигнали з подвійною інфрачервоною довжиною хвилі ($\lambda_1 = 0,9 \sim 1,7$ мкм; $\lambda_2 = 1,7$ мкм) у цієї моделі долають проблеми застосування, такі як змінний коефіцієнт випромінювання, пил, водяна пара або інші середовища, що заважають між ціллю та пірометром. Точні температурні данні можна отримувати навіть тоді, коли ціль закрита на 95%.



Рисунок 5.3 – Двоколірний пірометр моделі PM-616 Logika Technologies

Ще одна відмінність між цими двома моделями полягає в мірі, в якій зміна розміру та відстані до об'єкту вимірювання вплине на показання температури. При вимірі в одному діапазоні довжин хвиль для отримання точних результатів необхідно точно витримувати фокусну відстань. У разі використання моделі PM60S16, при виборі положення установки, слід дотримуватися точної відстані фокусування для точного вимірювання показників температури. У разі використання PM-616 помилки, спричинені такими факторами, як різна відстань чи розмір або неправильне фокусування, будуть незначними.

Отже, одноколірний інфрачервоний пірометр моделі PM60S16 дає хороші результати, коли залишаються незмінними розмір об'єкта вимірювання, фокусна відстань, властивості матеріалу та поверхні, а

двоколірний інфрачервоний пірометр моделі PM-616 (рисунок 5.4) може працювати в різних колірних спектрах, його можна встановлювати в забруднених місцях, так як наявність сторонніх компонентів (пару, пилу, диму та інших) на його роботу не впливають. Але, з точки зору економічних міркувань, модель PM-616 коштує дорожче, ніж PM60S16.

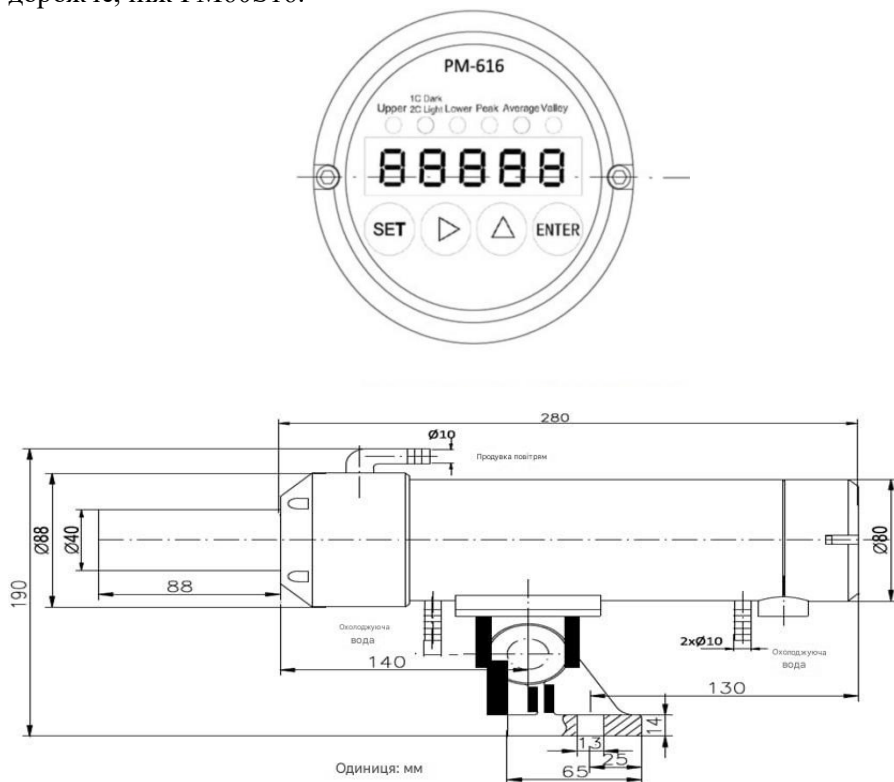


Рисунок 5.4 – Схема двоколірного пірометра PM-616 Logika Technologies

5.3 Волоконно-оптичні пірометри

Волоконно-оптичний пірометр передає випромінювання від оптичної головки через оптичне волокно до вимірювального

перетворювача, який включає детектор і всю електроніку обробки. Перевагою цього є те, що електроніка зберігається подалі від сильного тепла, що робить пристрої придатними для суворих умов або зон із високим електромагнітним випромінюванням.

На рисунку 5.5. зображено цифровий інфрачервоний волоконно-оптичний пірометр MAURER KTRD 4400 (100-2500°C) виробництва німецької компанії Dr.Georg Maurer GmbH – OPTOELEKTRONIK. Цей пірометр маленький, як сигаретна коробка, але дуже потужний.



Рисунок 5.5 – Цифровий інфрачервоний волоконно-оптичний пірометр MAURER KTRD 4400 [6]

Особливості моделі MAURER KTRD 4400:

- світлове прицілювання з зеленим світлодіодом для маркування цілі;
- коефіцієнт випромінювання регулюється на пристрої;
- аналоговий і цифровий вихід;
- 1 регульований граничний вихід (відкритий колектор);
- програмне забезпечення IR-LOG.

Технічні характеристики представлені в таблиці 5.2. Через послідовний інтерфейс можливі додаткові функції параметрів:

- аналоговий вихід: 0 – 20 / 4 – 20 мА перемикається діапазон збільшення в межах діапазону вимірювання Коефіцієнт випромінювання: 100,00 – 10,00 %;

- середнє: арифметичне або ковзне;

- зберігання максимального значення: режими збереження та функції стирання, наприклад. автоматично з наступним об'єктом вимірювання.

Таблиця 5.2 – Технічні дані цифрового інфрачервоного волоконно-оптичного пірометра MAURER KTRD 4400

Спектральний відгук	0,85 – 1,1 мкм
Час відгуку	1 мс
Точність	0,5 % +/- 1°C
Відтворюваність	1 %
Коефіцієнт випромінювання	100 - 10 %
Робоча температура	0 - 60°C
Температура зберігання	- 10°C - + 70°C
Температурна чутливість	0,01 % / °C
Вологостійкість	35 - 85 % RF
Лінійна температура аналогового виходу	0 – 20 мА або 4 – 20 мА
1 Обмежити вихід (відкритий зб.)	24 В 100 мА
Цифровий вихід	RS 232 ± 50 В ізольований або RS 485 ± 70 В ізольований
Робоча напруга	DC 24 V ± 10 %
Струм живлення	< 100 мА
Підключення агрегату	8-контактний роз'єм
Розміри В/Ш/Г	65 x 30 x 80 мм
Вага	0,15 кг
Клас захисту	IP 65

Оптоволокну: Тип GM-L, довжина 500 мм в метало рукаві, температура навколишнього середовища макс. 150°C, радіус вигину мін. 100 мм. Наглядний приклад представлений на рисунках 5.6-5.7, опис функцій представлений в таблиці 5.3

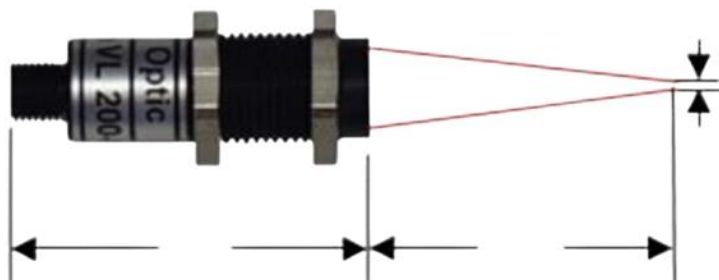


Рисунок 5.6 – Об'єктив оптичного типу VL 200-M12



Рисунок 5.7 – Схема підключення MAURER KTRD 4400z
прямою розеткою кабелю

Таблиця 5.3 – Опис функцій 8-контактного штепсельного роз'єму

8- полюсний PIN	колір	функція
1	2	3
1	білий	⊥ 24 В постійного струму / ⊥ - вихід 0-20 мА / 4-20 мА ** скидання пам'яті або пристрій прицілювання (кнопка), граничне значення
2	коричневий	+ 24 В постійного струму
3	зелений	+ вихід 0-20мА
4	жовтий	зовнішній керуючий вхід вибіркового для скидання пам'яті або пристрою прицілювання (кнопка)

Продовження таблиці 5.3

1	2	3
5	сірий	граничне значення (відкритий колектор) відп. хв. інтенсивність
6	рожевий	RS 232 TXD (від ПК 9-контактний SUB-D PIN 2)
7	блакитний	RS 232 RXD (від ПК 9-контактний SUB-D PIN 3)
8	червоний	RS 232 GND (від ПК 9-контактний SUB-D PIN 5)
	чорний (екран)	PE (земля)
		**┐ центральна земля

5.4 Стандартні пірометри

Стандартні пірометри для передачі даних мають надзвичайно високі характеристики точності та використовуються для перевірки для передачі даних про температуру від основного інфрачервоного джерела до інших джерел калібрування. Вони мають роздільну здатність $0,01^{\circ}\text{C}$ із надзвичайною точністю та довгостроковою стабільністю та забезпечені сертифікатами калібрування з можливістю відстеження.

На рисунку 5.8 зображено трансферний стандартний пірометр (TSP) DIADEM DS09, вироблений німецькою компанією Sensortherm GmbH. Він використовується для порівняльних вимірювань між пірометром TS і пірометром або джерелом калібрування чорного тіла, яке потрібно перевірити. Далі показання температури TSP передаються на досліджуваний пірометр.



Рисунок 5.8 – Трансферний стандартний пірометр DIADEM DS09

Пірометр DIADEM DS09 відстежується за міжнародною температурною шкалою ITS 90. Він відкалібрований за допомогою еталонних приладів і налагоджений. Легко транспортується та перевіряється на відміну від калібрувальних джерел.

Також пірометр DIADEM DS09 можна використовувати для звичайних завдань вимірювання, які вимагають дуже низької невизначеності вимірювання та високої відтворюваності.

Пірометр DIADEM DS09, технічні характеристики якого представлені в таблиці 5.4, зв'язується з іншими цифровими пристроями, такими як ПЛК, комп'ютер із безкоштовним програмним забезпеченням SensorTools або самостійно написаною програмою для зв'язку через послідовний інтерфейс. Виміряні значення можна записувати, а параметри пристрою можна встановлювати безпосередньо на пристрої за допомогою програмного забезпечення SensorTools або послідовного інтерфейсу RS485. Можуть бути реалізовані лінії передачі на великі відстані з високою швидкістю передачі даних, і пристрої можуть адресуватися та використовуватися в роботі шини. Перетворювач інтерфейсу RS485 в USB (аксесуар) дозволяє легко підключати його до ПК.

16-бітний аналоговий вихід з високою роздільною здатністю подає напругу 0-10 В для оцінки зовнішньої температури; прикладом може бути підключення дисплея температури.

Таблиця 5.4 – Технічні дані трансферного стандартного пірометра (TSP) DIADEM DS09

Температурні діапазони	600 – 1500°C 700 – 1800°C 1000 – 2500°C
темпер. піддіапазони	Будь-який температурний піддіапазон регулюється в межах температурного діапазону (мінімальний діапазон 50°C)
Спектральний діапазон	0,7–1,1 мкм
Детектор	Кремній
Час відгуку t_{90}	5 мс (з динамічною адаптацією при низьких рівнях сигналу), регулюється до 10 с
Невизначеність ($\varepsilon = 1$, $t_{90} = 1$ с, $T_A = 20\text{--}26^\circ\text{C}$)	До 1500°C: 0,15% від виміряного значення в °C + 1K До 2500°C: 0,2% від виміряного значення в °C
Температурний коефіцієнт	32 ppm/°C зміна температури навколишнього середовища в діапазоні від 10 до 40°C
Повторюваність ($\varepsilon = 1$, $t_{90} = 1$ с, $T_A = 20\text{--}26^\circ\text{C}$)	0,06% від виміряного значення
Параметри	Регульовані: піддіапазони температури, час відгуку, вибір піків, коефіцієнт випромінювання, адреса пристрою, затримка інтерфейсу, швидкість передачі даних. Читається: температура пристрою
Коефіцієнт випромінювання ε	0,050–1,000 (відповідає 5–100% з кроком 0,1%)
Аналоговий вихід	–10 В постійного струму, навантаження > 100 кОм Роздільна здатність: 16 біт, відповідає < 0,007% діапазону температур

Продовження таблиці 5.4

Послідовний інтерфейс	RS485, напівдуплекс від 4,8 до 115,2 кБод, роздільна здатність через інтерфейс: 0,01°C або 0,01°F
Підбирач піків	Автоматичний режим утримання або налаштування часу вручну для очищення (скидання) або зовнішнє очищення через настроюваний вхід
Дисплей	10-значний світлодіодний дисплей (5 мм заввишки) для температури в °C або °F, температура вище кінцевої температури. діапазон або нижче початку темп. дальність, час розігріву або активне націлювання. Роздільна здатність 0,01°C або 0,01°F
Вимоги до потужності	24 В постійного струму (18–30 В постійного струму), максимум 20 ВА
Ізоляція	Схема вимірювання та аналоговий вихід (ланцюг 1) гальванічно ізольовані від джерела живлення. Послідовний інтерфейс (ланцюг 2) гальванічно ізольований від джерела живлення. Контур 1 і контур 2 гальванічно ізольовані один від одного.
Спостереження	Візування через лінзу з регульованим фільтром послаблення для захисту очей від яскравих цілей > 1800°C Лазерне націлювання (червоне, $\lambda = 650$ нм, $P < 1$ мВт, клас II згідно з ІЕС 60825-1)
Температура навколишнього середовища	0–50°C
Температура зберігання	-20–70°C

Продовження таблиці 5.4

Відносна вологість	Без умов конденсації
Корпус / клас захисту	Алюміній, IP65 відповідно до DIN 40 050 з роз'ємом
Вага	1300 г
Маркування CE	Відповідно до директив ЄС

Безперервна температурна компенсація зберігає вимірювання незалежно від коливань температури навколишнього середовища.

Видошукач забезпечує зображення у вертикальному положенні, щоб об'єкт вимірювання можна було побачити візуально. Кругла сітка показує точку вимірювання. Це рекомендовано для вимірювальних об'єктів, що світяться, оскільки червоний лазер важко читати.

Лазерне націлювання використовує червону лазерну точку, яка показує центр вимірювального поля. У точці фокусування лазерна точка є найменшою та забезпечує найчіткіше зображення, тому можна легко визначити відстань вимірювання для найменшого розміру плями.

Оптика DIADEM DS09 з фіксованим фокусом налаштована на заводі на певну відстань вимірювання для досягнення найменшого розміру плями. Дані представлені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Оптика DIADEM DS09 (FSC = температура повної шкали)

Оптика	Відстань вимірювання [мм]	Діаметр плями М [мм]	Ø отвору D [мм]
OD09-A0	600 мм	1,1 мм	15 мм (FSC≤1400°C)
OD09-B0	800 мм	1,5 мм	8 мм (FSC>1400°C)
OD09-C0	1200 мм	2,4 мм	15 мм (FSC≤1400°C)

Щоб правильно визначити температуру, пірометр має бути правильно налаштований на об'єкт вимірювання (рисунок 5.9). У точці фокусування лінзи (фокусній відстані) діаметр плями є найменшим. Заміри позафокусної відстані також можливі (перед або позаду фокусної відстані), щоб визначити середню температуру більшої плями.

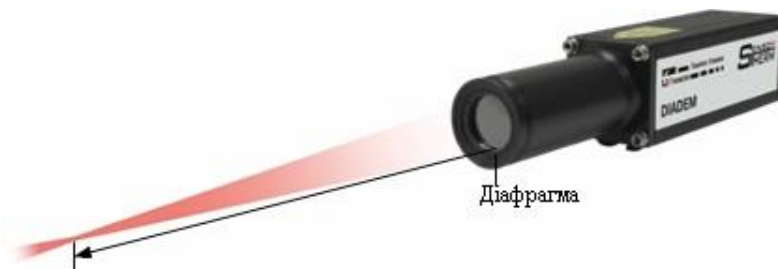


Рисунок 5.9 – Приклад правильного налаштування пірометра на об'єкт

Одноколірний пірометр вимірює температуру за допомогою інтенсивності світла на одній довжині хвилі. Він є економічно ефективними, простими в експлуатації та ідеально підходить для середовища із стабільною випромінювальною здатністю та іншими умовами.

Двоколірний пірометр вимірює випромінювання двох різних діапазонів довжин хвиль. Цей метод мінімізує помилки через відстань або зміни коефіцієнта випромінювання та дає точніші результати.

Значною перевагою волоконно-оптичного пірометру є стійкість до електромагнітних перешкод, що робить його ідеальними в середовищах із важким електричним обладнанням. Однак на нього можуть впливати екстремальні умови, які впливають на оптичні волокна. Він може бути більш чутливими до фізичних впливів і екстремальних умов навколишнього середовища. Така чутливість може призвести до збільшення потреби в обслуговуванні та догляду під час використання.

Трансферний стандартний пірометр має надзвичайно високі характеристики точності. Він корисний лише для вимірювання дуже високої температури, не підходить для отримання безперервних значень температури. Має вищу вартість порівняно зі звичайним пірометром.

В таблиці 5.6 представлена інформація про різні типи пірометрів з метою порівняння їх.

Отже, для того щоб підібрати оптимальну модель пірометра, яка буде відповідати поставленим задачам, необхідно знати: в якому температурному діапазоні потрібно буде працювати і з якими об'єктами; відстань, з якої буде проводитись вимірювання та розміри досліджуваного об'єкта; в яких умовах буде експлуатуватись пірометр.

Також, потрібно визначитися з технічними вимогами до точності отриманих результатів та можливої похибки, тому що є багато моментів, що можуть впливати на точність отриманих результатів.

Таблиця 5.6 – Порівняльна таблиця різних типів пірометрів

	Одноколірний пірометр	Двоколірний пірометр	Волоконно-оптичний пірометр	Трансферний стандартний пірометр
Назва приладу	PM60S16	PM-616	MAURER KTRD 4400	DIADEM DS09
Діапазон вимірювання температури	600-1600°C	600-1600°C	100-2500°C	600 – 1500°C 700 – 1800°C 1000 – 2500°C
Точність	0,5%	0,5%	0,5 %	До 1500°C: 0,15% До 2500°C: 0,2%
Час відгуку	Регульований найшвидший час відгуку 20 мс	Регульований найшвидший час відгуку 20 мс	1 мс	5 мс регулюється до 10 мс
Довжина хвилі	1,0 мкм	$\lambda_1 = 0,9 \sim 1,7$ мкм; $\lambda_2 = 1,7$ мкм	0,85 – 1,1 мкм	0,7–1,1 мкм
Лазерне націлювання	$\lambda = 630$ нм $\pm 10\%$, потужність ≤ 3 мВт. Лазер 2 класу	$\lambda = 630$ нм $\pm 10\%$, потужність ≤ 3 мВт. Лазер 2 класу	-	червоне, $\lambda = 650$ нм, $P < 1$ мВт, лазер клас II згідно з ІЕС 60825-1
Робоча температура	-20°C +55°C. З охолоджувальною водою: +120°C	-20°C +55°C. З охолоджувальною водою: +120°C	0 - 60°C	0–50°C
Розміри	370 мм x 100 мм x 190 мм	370 мм x 100 мм x 190 мм	65 x 30 x 80 мм	270 x 66 x 62,5 мм
Вага	4000 г	4000 г	150 г	1300 г

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

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