

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ТЕХНОЛОГІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ І ПРИЛАДИ

ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»
спеціалізацією «Комп'ютерно-інтегровані сталі хімічні виробництва»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Технологічні вимірювання і прилади. Вимірювання температури [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізації «Комп'ютерно-інтегровані сталі хімічні виробництва» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С. Г. Бондаренко, Д. М. Складанний. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 83 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 10 від 20.06.2019 р.)
за поданням Вченої ради хіміко-технологічного факультету (протокол № 5 від 29.04.2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ТЕХНОЛОГІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ І ПРИЛАДИ

ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Укладачі: Бондаренко Сергій Григорович, канд. техн. наук, доцент
 Складанний Денис Миколайович, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний
редактор Шахновський Аркадій Маркусович, канд. техн. наук, доцент

Рецензенти: Толстопалова Наталія Михайлівна, канд. техн. наук, доцент,
 в.о. зав. кафедри ТНР, В та ЗХТ ХТФ КПІ ім. Ігоря Сікорського

У навчальному посібнику наведено основні дані про прилади вимірювання температури, чутливі елементи, схеми їх підключення, та промислові вторинні прилади. Наведено конструкції основних приладів, описано принцип їх дії та особливості застосування.

Подана будова лабораторних стендів, що використовується для вимірювання температури та для підключення і налаштування термоелектричних перетворювачів, наведені характеристики встановлених приладів, описано методика проведення лабораторних досліджень та оброблення їх результатів.

Видання забезпечує засвоєння студентами теоретичного матеріалу, підготовку до виконання лабораторних робіт та буде корисним для самостійної роботи.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

Зміст

Передмова	5
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ.....	7
3.1 Основні теоретичні відомості	7
3.1.1 Прилади вимірювання температури	8
3.1.2 Термометри розширення.....	8
3.1.3 Манометричні термометри	11
3.1.4 Термометри опору	14
3.1.5 Термоелектричні термометри (термопари).....	19
3.1.6 Пірометри	26
3.2 Опис лабораторних засобів та обладнання	39
3.3 Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи.....	40
3.4. Послідовність виконання роботи	41
3.5. Оброблення та аналіз результатів. Оформлення звіту	43
Контрольні запитання.....	44
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 ВТОРИННІ ПРИЛАДИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	46
4.1 Основні теоретичні відомості	46
4.1.1 Засоби вимірювання, що працюють в комплекті з термометрами опору.....	46
4.1.2 Засоби вимірювання, що працюють в комплекті з термопарами (прилади для вимірювання термо-ЕРС).	55
4.1.3 Промислові універсальні вимірювальні прилади.....	62
4.2 Опис лабораторних засобів та обладнання	65
4.3 Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи.....	66
4.4 Послідовність виконання роботи	67
4.5 Оброблення та аналізування результатів. Оформлення звіту	71

Контрольні запитання.....	72
Список рекомендованої літератури.....	73
Додаток А. Заходи безпеки під час виконання лабораторних робіт.....	74
Додаток Б. Градувальна характеристика термоелектричних термометрів ТХК (L) у діапазоні температур $-20 \div +200^{\circ}\text{C}$	78
Додаток В. Градувальна характеристика термоелектричних термометрів ТХА (К) у діапазоні температур $-20 \div +200^{\circ}\text{C}$	79
Додаток Г. Градувальна характеристика термоперетворювачів опору типу ТСМ 50М в діапазоні температур $- 50 \div +200^{\circ}\text{C}$	80
Додаток Д. Градувальна характеристика термоперетворювачів опору типу ТСМ 10М, ТСМ 100М в діапазоні температур $- 200 \div +200^{\circ}\text{C}$	81
Додаток Е. Градувальна характеристика термоперетворювачів опору типу ТСМ 23 ($R_0 = 53 \text{ Ом}$) в діапазоні температур $- 50 \div +180^{\circ}\text{C}$	83

Передмова

Розвиток науки і промисловості потребує від сучасного фахівця з автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій професійної підготовки з питань метрології, технологічних вимірювань та вимірювальної техніки. Посібник розроблено відповідно до програми підготовки бакалаврів за спеціальністю «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» і є складовою частиною дисципліни «Технологічні вимірювання і прилади». Ця дисципліна є базовою у підготовці бакалаврів вказаної спеціальності.

Відповідно до робочого навчального плану підготовки бакалаврів за вказаною спеціальністю, у першому кредитному модулі передбачено 36 годин лекцій та 36 годин лабораторних занять. Значна частина годин виноситься на самостійну роботу (78 годин), у рамках якої студенти повинні підготуватися до лабораторних занять та виконання розрахункової роботи. Даний посібник є другою частиною методичних матеріалів, що призначені для опанування студентами необхідного матеріалу дисципліни «Технологічні вимірювання і прилади».

У посібнику наведено теоретичні відомості, необхідні для набуття умінь та досвіду роботи з приладами вимірювання температури та вторинними приладами, що працюють з термопарами та термометрами опору. У першій частині було подано теоретичні відомості, необхідні для визначення метрологічних характеристик приладів для вимірювання тиску, перепаду тисків та розрідження. У третій частині заплановано подати теоретичні відомості, необхідні для визначення метрологічних характеристик приладів для вимірювання рівня. В четвертій частині заплановано подати теоретичні відомості, необхідні для визначення метрологічних характеристик приладів для вимірювання витрат. А п'яту частину заплановано присвятити питанням вимірювання складу та властивостей речовин.

У посібнику наведені мета та завдання для лабораторних робіт, викладений необхідний теоретичний матеріал та зазначено літературу для

поглибленого вивчення розділу, подано описи експериментальних установок для виконання лабораторних робіт, надано порядок виконання робіт та обробки результатів експериментів, перелічено вимоги до оформлення звітів, сформульовано контрольні питання для самопідготовки студентів та визначені засоби безпеки, яких слід дотримуватися при виконанні робіт.

Представлений лабораторний практикум має на меті закріплення на практиці знань та досвіду, отриманих в процесі вивчення дисципліни «Технологічні вимірювання і прилади», а також сприятиме засвоєнню матеріалу курсу.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Мета та основні завдання роботи: дослідити особливості застосування чутливих елементів різних типів для вимірювання температури. Ознайомитися з принципом дії та конструкцією основних приладів вимірювання температури. Набути умінь визначати основні метрологічні характеристики засобів вимірювання температури та обробляти результати вимірювань температури.

Вивчити та стисло описати у протоколі лабораторної роботи:

- принцип дії та конструкцію основних приладів вимірювання температури;
- метрологічні характеристики термоперетворювачів;
- склад лабораторної установки;
- методику проведення досліджень;
- форми для запису результатів вимірювань.

3.1 Основні теоретичні відомості

У хімічних виробництвах температура є важливим параметром, що визначає перебіг і кінцеві результати процесу. Температура тіла – це величина, яка характеризує ступінь нагрятості тіла, і визначається внутрішнім енергетичним станом тіла, тобто внутрішньою кінетичною енергією теплового руху молекул. Виміряти температуру якого-небудь тіла безпосередньо, тобто так, як вимірюють інші фізичні величини, наприклад довжину, масу, об'єм або час, не є можливим, оскільки в природі не існує еталона або зразка одиниці цієї величини. Тому вимірювання температури можливо лише методом порівняння нагрятості двох тіл, причому ступінь нагрятості одного з тіл передбачається відомою.

3.1.1 Прилади вимірювання температури

Для вимірювання температури використовують різні первинні перетворювачі, що відрізняються способом перетворення температури в проміжний сигнал. У промисловості найчастіше застосовують наступні первинні перетворювачі:

1. Термометри розширення. Принцип їх дії заснований на зміні об'єму рідини або лінійних розмірів твердих тіл зі зміною температури. Діапазон вимірювань цих приладів від -160 до $+700^{\circ}\text{C}$.
2. Манометричні термометри. Принцип дії приладів цієї групи заснований на зміні тиску газу, пари або рідини, що перебуває в замкненій системі, зі зміною температури. Діапазон вимірювань цих приладів такий самий, як у термометрів розширення.
3. Термометри опору. Робота таких приладів заснована на зміні електричного опору провідників або напівпровідників зі зміною температури. Діапазон вимірювань цих приладів від -260 до $+750^{\circ}\text{C}$. В окремих випадках вони можуть бути використані для вимірювання температур до $+1000^{\circ}\text{C}$.
4. Термоелектричні термометри (термопари). Дія цих приладів заснована на виникненні термічної електрорушійної сили (термо-ЕРС, ТЕРС) під час нагрівання спаю провідників, які виготовлені з різнорідних металів. Діапазон вимірювань цих приладів від -50 до $+2000^{\circ}\text{C}$.
5. Пірометри випромінювання. Ці прилади призначені для безконтактного вимірювання температури по тепловому випромінюванню нагрітих тіл. Призначені для вимірювання температури від 50°C . Верхня межа може сягати 6000°C і більше.

3.1.2 Термометри розширення

Фізична властивість тіл змінювати свій об'єм залежно від нагрівання широко використовується для вимірювання температури. Термометри розширення побудовані за принципом зміни об'ємів рідин (рідинні

термометри) або лінійних розмірів твердих тіл (деформаційні термометри) – біметалічні та дилатометричні.

Рідинні термометри розширення. Ці термометри зазвичай використовують для візуального контролю температури. Рідинні термометри – це скляні прилади, що заповнені робочою рідиною. У якості робочої рідини використовують ртуть, а також різні спирти та етери. Робота рідинних скляних термометрів базується на тому, що зі збільшенням температури робоча рідина розширюється й піднімається вгору по прозорому капіляру. Типові конструкції цих приладів наведені на рисунку 3.1.

Палочні термометри (рисунок 3.1.а) виконані у вигляді товстостінного капіляру. На зовнішній поверхні капіляру нанесена шкала.

Для технічних вимірювань в основному використовують термометри із вкладеною шкалою (рисунок 3.1.б).

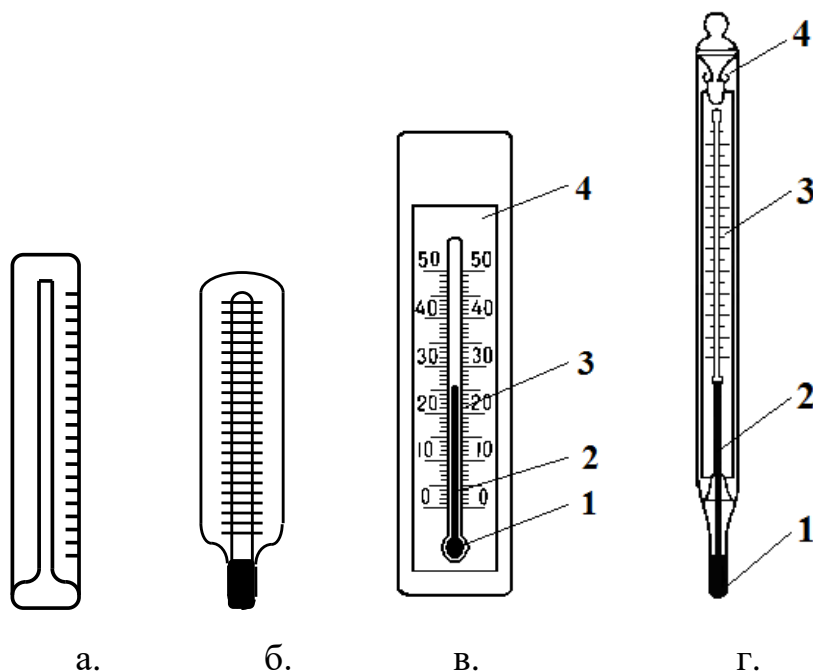


Рисунок 3.1 Термометри розширення:

а) палочні; б) із вкладеною шкалою; в) скляний ртутний термометр із вкладеною зовнішньою шкалою г) лабораторний термометр із вкладеною шкалою. 1 – резервуара; 2 – капілярна трубка; 3 – шкала; 4 – скляна оболонка.

На рисунку 3.1.в,г ображено скляний ртутний термометр із зовнішньою шкалою, що складається з резервуара 1, капілярної трубки 2, шкали 3 і зовнішньої скляної оболонки 4. Температуру визначають по шкалі приладу за

висотою рівня у капілярній трубці. Ртутні термометри мають більший діапазон вимірювання температури у порівнянні з термометрами, що заповнені органічними рідинами. Для розширення діапазону вимірювань ртутних термометрів у капіляр над ртуттю вводять інертний газ під тиском.

Найбільш широке застосування одержали зразкові, лабораторні та технічні ртутні термометри. Технічні термометри виконують тільки із вкладеною шкалою (рисунок 3.1.г). Їх виготовляють прямими і загнутими. Для захисту від ушкоджень технічні термометри монтуються в металевій оправі, а нижня заглибна частина закривається металевою гільзою.

Різновидом рідинних термометрів є електроконтактні ртутні термометри, які застосовують для регулювання температури або сигналізації про порушення заданого температурного режиму в межах від -30 до $+300^{\circ}\text{C}$. Платинові контакти, упаяні в нижню частину капіляра, з'єднані з мідними провідниками, які через реле включені в ланцюг електричного нагрівача або сигналізації. Контактні групи такого термометру замикаються стовпчиком ртуті, що може привести в дію різноманітні пристрої.

Переваги цих термометрів полягають у простоті конструкції та високій точності вимірювань. До недоліків відносять неможливість реєстрації і передачі показань на відстань; інерційність; неможливість ремонту. Загальні недоліки цих приладів – їх обмежене використання у системах керування. В основному їх застосовують для візуального контролю.

Помилки виміру в цих приладах виникають через:

- старіння скла й зсуви нуля шкали;
- вплив температури виступаючого стовпчика рідини. Для усунення цього недоліку термометри повністю занурюють у рідину.

Біметалічні і дилатометричні термометри розширення застосовують для вимірювання та сигналізації температури. В цих вимірювачах для індикації температури використовують різне температурне розширення двох різнорідних матеріалів, що певним чином з'єднані між собою.

3.1.3 Манометричні термометри

Дія манометричних термометрів заснована на залежності тиску рідини, газу або пари з рідиною в замкнутому об'ємі (термосистемі) від температури. Загальний вигляд і схема манометричного термометра приведена на рисунку 3.2. Термосистема приладу, що заповнена робочою речовиною, складається з термобалону 1, який занурюється в зону контролю температури, капіляра 2 і вторинного приладу 3.

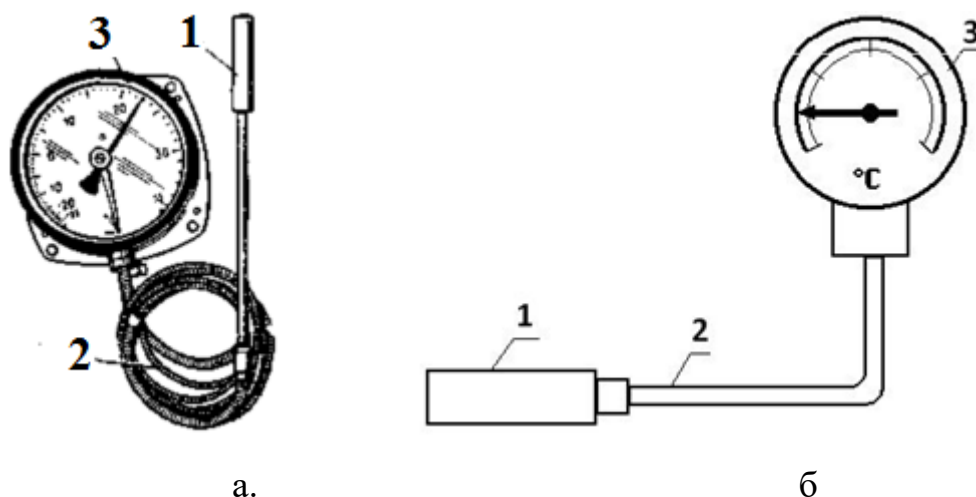


Рисунок 3.2. Загальний вигляд (а) і схема (б) манометричного термометра.

Термобалон являє собою металеву трубку, закриту з одного кінця, а з іншого з'єднану з капіляром. За допомогою знімного штуцера з різьбленням і сальником термобалон установлюється в трубопроводах, баках тощо. Можлива його установка і у захисній гільзі. Під час нагрівання термобалона збільшення тиску робочої речовини передається через капіляр трубчастій пружині і приводить до розкручування останньої доти, поки діюче на неї зусилля, що пропорційне різниці тисків у системі і навколишньому середовищі, не зрівноважиться силою її пружної деформації. При цьому вільний кінець пружини переміщується і переміщує стрілку приладу відносно шкали.

Розглянуті прилади широко використовуються. Вони прості за будовою, надійні в роботі, вибухобезпечні і дозволяють передавати інформацію на відстань до 60 метрів. Для захисту від механічних ушкоджень,

капіляр поміщають у захисну оболонку. Залежно від робочої речовини, яка заповнює термосистему, манометричні термометри розділяються на газові, рідинні і конденсаційні (мають як робочу речовину органічні рідини з низькою температурою кипіння: хлористий метил, ацетон і фреон). Вибір робочої речовини здійснюється виходячи із заданого діапазону показань і умов вимірювання.

У **газових манометричних термометрах** вся система наповнена газом. Найкращий газ для заповнення системи – азот (N_2). Також в якості термометричної речовини можна застосувати гелій або аргон. Термометри призначені для виміру температури від -50 до $600^\circ C$. Принцип роботи газових манометричних термометрів заснований на законі Шарля, згідно якого зміна тиску в системі манометричного газового термометра визначається залежністю:

$$p_t = p_0[1 + \beta(t - t_0)] \quad (3.1)$$

де t_0 і t – початкова й кінцева температури, $^\circ C$; P_0 і P_t – тиск газу за температур t_0 і t відповідно, Па; β – термічний коефіцієнт тиску газу K^{-1} ($\beta = 1/273,15$ або $0,00366 K^{-1}$).

Для реальних систем вимірювання цей лінійний зв'язок температури і тиску строго не виконується, тому що зі зміною температури змінюється об'єм термобалону, а зі зміною тиску – об'єм манометричної пружини, а також відбувається масообмін між термобалоном і капіляром. Але, оскільки ці зміни невеликі, то можна вважати, що шкали газових манометричних термометрів рівномірні. Якщо температура, що оточує капіляр і манометричну пружину, відрізняється від градуювальної температури, то виникає додаткова похибка. Щоб зменшити температурну похибку, прагнуть збільшити відношення об'єму термобалону до об'єму капіляра з манометричною пружиною, збільшуючи розмір термобалона. Тому для газових манометричних термометрів характерний великий розмір термобалона (діаметр $d = 20 \div 30$ мм, а його довжина $L = 250 \div 500$ мм) і як

наслідок цього – їх значна інерційність. Значна теплова інерція також обумовлена низьким коефіцієнтом тепловіддачі від стінки термобалону до газу, який його заповнює, і малою теплопровідністю газу. На роботу газових манометричних термометрів також сильно впливає барометричний тиск.

Зазвичай під час градуювання термобалон і вторинний прилад розташовуються на одному рівні. При технологічних вимірюваннях це розташування може змінюватись. Ця зміна потребує додаткових перерахунків.

Рідинні манометричні термометри. В цих приладах уся система наповнена рідиною (зазвичай ртуттю) під деяким початковим тиском (від 10 до 15 МПа за кімнатної температури). Термометрична рідина повинна мати великий коефіцієнт об'ємного розширення, високу теплопровідність і бути хімічно інертною до матеріалу термометра. В якості термометричної рідини також використовують толуол, ксилол, пропіловий спирт та інші рідини під тиском $P = 0,5 \div 5$ МПа. Рідинні прилади менш інерційні, ніж газові, але мають значно більшу похибку від зміни температури навколишнього середовища. Особливо значні похибки дають коливання температури капіляру. Тому за значної довжини капіляру застосовують температурні компенсатори.

Зміна тиску рідини від температури описує рівняння:

$$\Delta P = \frac{\beta}{\mu} \Delta t \quad (3.2)$$

де ΔP – зміна тиску; β – коефіцієнт об'ємного розширення рідини; μ – коефіцієнт стисливості рідини; Δt – зміна температури. Зокрема, для ртуті $\beta = 18 \cdot 10^{-5}$ 1/град; $\mu = 0,4 \cdot 10^{-5}$ см²/кг.

Як слідує з рівняння (3.2), зміна об'єму рідини під час нагрівання є лінійною функцією температури, тому рідинні термометри, як і газові, мають рівномірну шкалу.

Конденсаційні манометричні термометри. В цих термометрах термобалон частково заповнюється рідиною (приблизно 2/3 об'єму), а весь інший простір – парами рідини. Термометричні рідини, які використовуються в цих термометрах повинна бути легкокиплячою (ацетон, етиловий етер, толуол, пропан, хлористий метил тощо). Принцип роботи конденсаційних манометричних термометрів заснований на існуванні однозначної залежності тиску насиченої пари від температури. Ця залежність має нелінійний характер, тому і шкала цих приладів є нерівномірною. Для одержання рівномірної шкали конденсаційні термометри обладнують спеціальним лінеаризуючим пристроєм.

Тиск у термосистемі залежить тільки від вимірюваної температури t , а зміна температури навколишнього середовища не впливає на показання приладу. Конденсаційні прилади менш інерційні, ніж газові і мають більшу чутливість.

Всі **манометричні термометри** використовуються в системах керування, оскільки з їхньою допомогою можна одержати стандартний сигнал. На рисунку 3.3 наведені зразки манометричних термометрів.

3.1.4 Термометри опору

Дія термометрів опору (ТО) заснована на властивості металів та напівпровідників змінювати свій електричний опір із зміною температури. Для вимірювання температури термометр опору занурюють в середовище, температуру якого необхідно визначити. Знаючи залежність опору термометра від температури, можна по зміні опору термометра судити про температуру середовища, в якому він знаходиться. У порівнянні з термометрами розширення, ці прилади мають ряд переваг: більш висока точність виміру; можливість передачі показань на значну відстань; низька інерційність, можливість централізованого контролю.



Рисунок 3.3. Приклади виконання манометричних приладів для вимірювання температури

Вимірювальний комплект складається з чутливого елемента – термоперетворювача опору, вторинного приладу, з'єднувальних проводів і джерела живлення.

Як матеріали для виготовлення чутливих елементів ТО використовуються чисті метали: платина, мідь, нікель, залізо і напівпровідники. Термометри опору з чистих металів, що набули найбільшого поширення, виготовляють зазвичай у вигляді обмотки з тонкого провідника на спеціальному каркасі із ізоляційного матеріалу (рис. 3.4). Цю обмотку прийнято називати чутливим елементом термометра опору. Каркас це ізолятор різних поперечних перерізів (круглих, плоских, X – подібних). З метою оберігання від можливих механічних пошкоджень і дії середовища, температура якого вимірюється термометром, чутливий елемент термометра вкладають в спеціальну захисну гільзу (чохол). Приладобудівна

промисловість випускає багато модифікацій захисних чохлах, що розраховані на експлуатацію термометрів за різних тисків, різної агресивності вимірюваного середовища, і які мають різну інерційність і глибину занурення. Форма і розмір захисних чохлах (гільз) може бути різною. Зазвичай чохла мають пристрій кріплення на об'єкт вимірювання.

Термометр опору (рис. 3.4) включає: каркас 1, на якому біфілярно намотаний провідник 3 (біфілярна обмотка є подвійно-зустрічною і складається з провідника, складеного вдвоє, що дозволяє усунути індукційну складову опору) та захисної пластинки 2, на якій закріплений каркас. Ця конструкція вкладена в захисну гільзу (трубку) 4 і закріплена вкладишами 5.

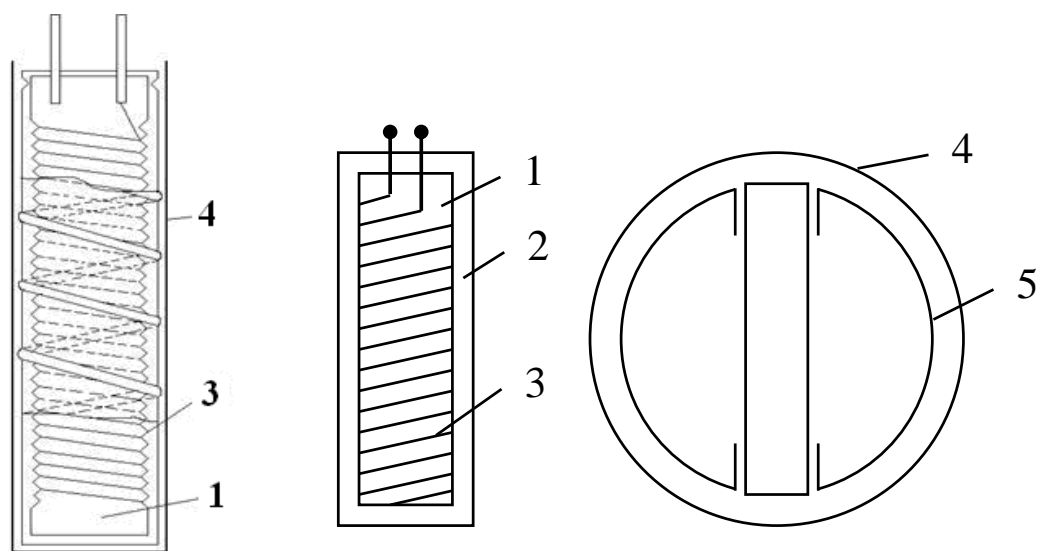


Рисунок 3.4. Термометр опору та його елементи.

Найпоширеніші термометри опору виготовляють із платини – ТОП (термометр опору платиновий) та міді – ТОМ (термометр опору мідний). Для стандартних металевих термометрів опору ТОП і ТОМ розроблені стандартні градувальні таблиці, користуючись якими можна по зміряному значенню опору термометра визначити температуру вимірювального середовища і, навпаки, визначити опір термометра для різних значень температури.

Термометр опору платиновий (рис. 3.5) широко застосовується для вимірювання високих температур. Платина (Pt) має хімічну інертність в окислювальному середовищі і може бути легко отримана в чистому вигляді. Платинові термометри опору залежно від їх призначення розділяються на

наступні три основні групи: еталонні, зразкові (першого і другого розрядів) і робочі. Термометри робочі у свою чергу підрозділяються на термометри підвищеної точності (лабораторні) і технічні.

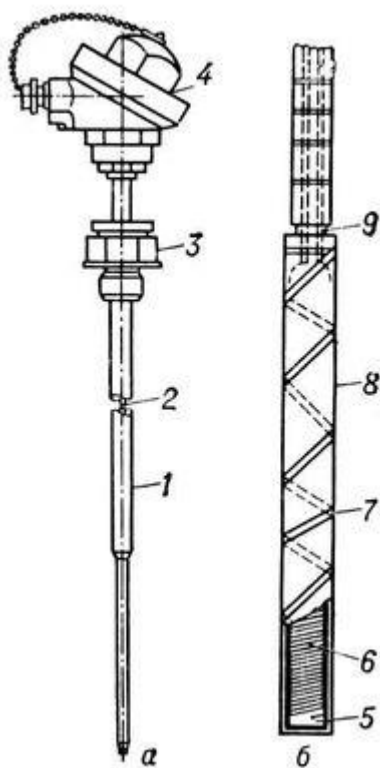


Рисунок 3.5. Термометр опору платиновий (а) та його чутливий елемент (б).

1 – чохол; 2 – чутливий елемент; 3 – штуцер для встановлення термометра; 4 – голівка для приєднання термометра до приладу електровимірювання; 5 – каркас; 6 – біфілярна обмотка платинового дроту; 7 – срібна стрічка; 8 – накладка; 9 – срібні виводи.

Для платинових термоперетворювачів зміна опору платини в інтервалі температур $-40 \div +630$ °С виражається залежністю:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2) \quad (3.3)$$

В інтервалі температур $-190 \div 0$ °С залежність набуває вигляду:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + c \cdot (t - 100)t^3) \quad (3.4)$$

де R_t і R_0 – опори платини за температури t та 0 °С; $\alpha = 3,95 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$; $\beta = 5,85 \cdot 10^{-7}$ град $^{-1}$, $c = 1,01 \cdot 10^{-7}$ град $^{-1}$ (для чистої платини).

Термометр опору мідний. Мідні термометри опору служать для вимірювання температур від -200 до $+200$ °С. Статичні характеристики ТОМ відрізняються від ТОП більш високим температурним коефіцієнтом. Недолік ТОМ – невисокий питомий опір ($\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м) і його окислюваність за

високих температур. До переваг міді, як матеріалу, що використовується для виготовлення чутливих елементів технічних термометрів опору типу ТОМ, слід віднести низьку вартість, простоту отримання тонкого дроту в різній ізоляції і можливість отримання провідникової міді високої чистоти. Температурний коефіцієнт електричного опору провідникової міді лежить в межах від $4,2 \cdot 10^{-3}$ до $4,27 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Для мідних термоперетворювачів залежність градуювальних характеристик в інтервалі температур $-50 \div +200 \text{ } ^\circ\text{C}$ близька до лінійної і може бути представлена як:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (3.5)$$

де $\alpha = 4,25 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ – температурний коефіцієнт опору мідного провідника, який використовується для виготовлення чутливого елемента мідного термометра опору.

Термоперетворювачі опору різних градуювань відрізняються значеннями R_0 . Наприклад, для термометра градуювання 50 М $R_0 = 50 \text{ Ом}$, а для 100 М – 100 Ом . Опір R_0 визначають за температури $0 \text{ } ^\circ\text{C}$. На рисунку 3.6. наведені варіанти виконання мідних термометрів опору і його чутливих елементів.

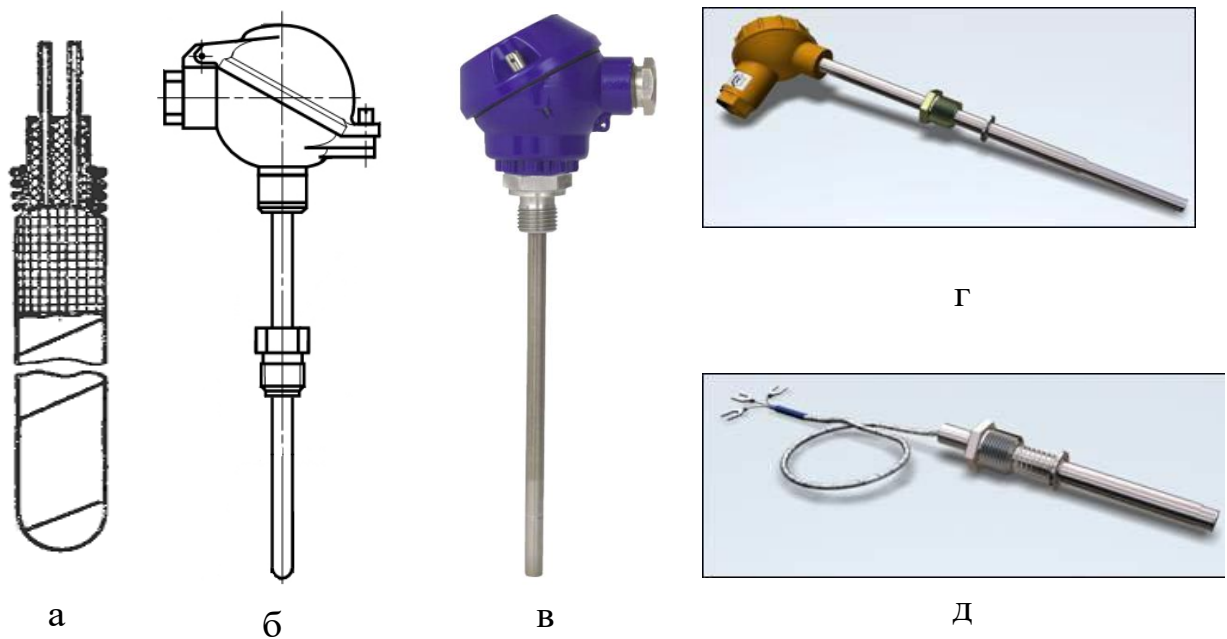


Рисунок 3.6. Термометр опору мідний (б) і безкаркасний варіант виконання його чутливого елемента (а). Промислові варіанти виконання ТОП і ТОМ (в-д).

3.1.5 Термоелектричні термометри (термопари)

Принцип дії термоелектричних термометрів заснований на властивості спаю двох різнорідних металів створювати термоелектрорушійну силу під час нагрівання. Термопара (рис. 3.7) являє собою електричний ланцюг, що утворений двома провідниками, з'єднаними (спаяними) в двох місцях. Ці провідники називають термоелектродами. Згідно з ефектом Зеебека, в замкнутому електричному ланцюзі, що створений двома різнорідними провідниками, виникає термо-ЕРС, яка пропорційна різниці температур спаїв і не залежить від інших параметрів: діаметру (перерізу), довжини і питомого опору цих провідників. Термін «термоелектрика» (явище прямого перетворення теплоти в електрику в твердих або рідких провідниках) охоплює три взаємозв'язані ефекти: термоелектричний ефект Зеебека і електротермічні ефекти Пельтьє і Томсона. Всі вони характеризуються відповідними коефіцієнтами, різними для різних матеріалів. Ці коефіцієнти зв'язані між собою. Вони визначаються як параметрами спаїв, так і властивостями самих матеріалів провідників.

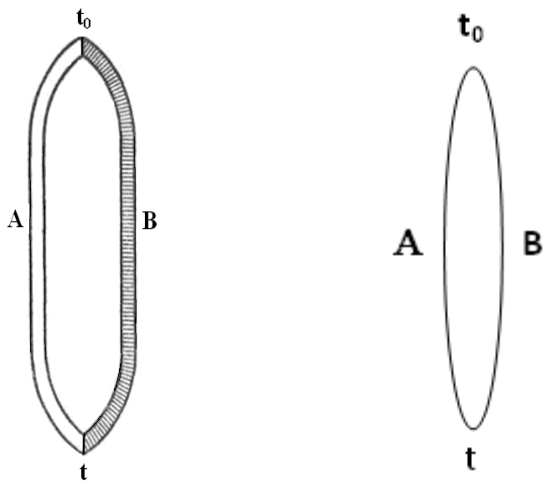


Рисунок 3.7. Термоелектричний ланцюг, що утворений з двох різнорідних провідників А і В.

Термоелектричний ефект пояснюється наявністю в металі вільних електронів, число яких в одиниці об'єму у різних металів різне. У спаї з температурою t електрони з металу А дифундують в метал В у більшій кількості, ніж назад. Тому метал А заряджається позитивно, а метал В – негативно. Той електрод термопари, по якому електричний струм йде від спаю, називається позитивним, а інший, по якому струм йде у бік спаю, – негативним. У назві термопар першим записують позитивний електрод. Точки спаю t_0 і t носять відповідно назву – вільний (або холодний) спай і – гарячий (або робочий) спай. ТЕРС в ланцюзі термопари є функцією, залежною від різниці температур робочого і холодного спаїв:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) \quad (3.6)$$

З рівняння (3.6), яке визначає сумарну ТЕРС, що виникає в ланцюзі з двома різнорідними провідниками А і В при температурах їх спаїв t і t_0 , видно, що ТЕРС являє собою складну функцію температур обох спаїв (t і t_0).

Для використання термопари в якості вимірювача слід стабілізувати температуру холодного спаю ($t_0 = \text{const}$). Якщо температуру холодного спаю стабілізовано, то ТЕРС однозначно визначатиметься температурою робочого спаю.

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - c \quad (3.7)$$

де $c = e_{AB}(t_0) = \text{const}$.

Якщо термоелектричні властивості даної пари провідників відомі і один із спаїв (скажімо, з температурою t_0) підтримується за точно відомої температури (наприклад, 0°C , точці замерзання води), то ТЕРС пропорційна температурі t іншого спаю.

Поправка на температуру вільних кінців термопари. Термопари градуують за постійної температури холодного спаю. Зазвичай температура градуювання становить $t_0 = 0^\circ\text{C}$. В процесі робочих вимірювань температура холодного спаю, зазвичай відрізняється від температури, за якої виконувалося градуювання. Це неспівпадіння температур викликає необхідність внесення поправки. Величину поправки для даної термопари можна отримати з градуювальної таблиці. Поправка на температуру вільного кінця алгебраїчно додається до значеної ТЕРС, яке визначається з градуювальної таблиці відповідної термопари, або з градуювальної характеристичної кривої (номінальна статична характеристика термопари) для температури холодного спаю t'_0 . Тоді істинне значення ТЕРС при температурі t становитиме:

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t'_0) \pm E_{AB}(t'_0, t_0) \quad (3.8)$$

де $E_{AB}(t'_0, t_0)$ – поправка. Таким чином, поправка рівна ТЕРС $- E_{AB}(t'_0, t_0)$, яку розвиває дана термопара при температурі t'_0 і градуювальному значенні температури холодних спаїв $- t_0$. Поправку додають, якщо $t'_0 > t_0$, і віднімають, якщо $t'_0 < t_0$.

У промислових умовах стабілізацію температури холодних спаїв термопари не використовують, виконують автоматичне введення поправки на температуру холодних спаїв.

Включення вимірювального приладу в ланцюг термопари. Для включення вимірювального пристрою ланцюг термопари треба розірвати. Цей розрив можна здійснити за двома варіантними: роз'єднати холодний спай (рис. 3.8.а) або один з термоелектродів (рис. 3.8.б).

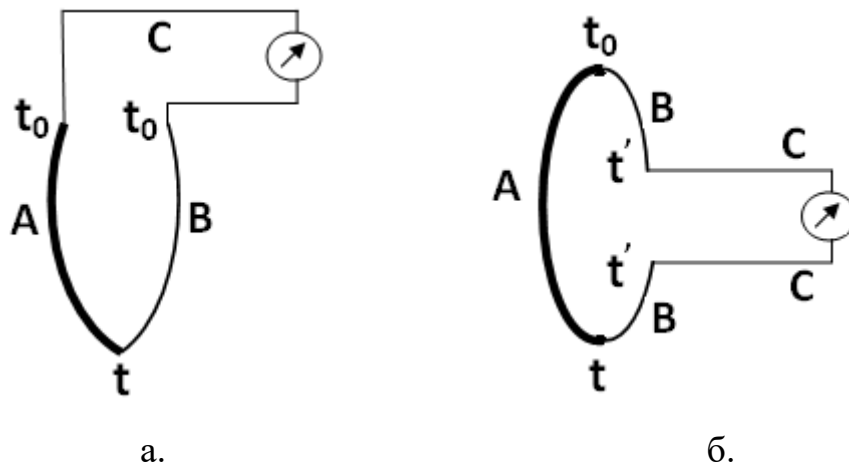


Рисунок 3.8. Варіанти підключення вимірювального пристрою до термопар.

Незалежно від схеми підключення, ТЕРС термопар не змінюються при введенні в ланцюг термопарі третього провідника (С) за умови, що кінці цього провідника мають однакову температуру. За таким принципом в ланцюг термопарі включаються вимірювальні прилади і підгоночні опори. Схема, зображена на рисунку 3.8.а частіше застосовується для включення вимірювальних приладів. Така можливість стосується не лише одного, а й будь-якої кількості провідників (або вимірювальних пристроїв), увімкнених в ланцюг термопарі.

Подовжувальні (компенсаційні) проводи. Подовжувальні термоелектродні дроти служать для передачі електричного сигналу від термоелектричного термометра без зміни ТЕРС, що розвивається ним. Температура вільного кінця термопарі має бути постійною для забезпечення правильних показань вимірювального приладу. Встановлюючи термопарі на нагрітих до високої температури агрегатах, важко добитися постійності цієї температури. Тому вільний кінець відводять якнайдалі від нагрітого агрегату в таке місце, де може бути забезпечена постійна і низька навколишня температура. Для цього термоелектроди подовжують провідниками (F, D) з того ж матеріалу, що і термоелектроди (А, В) але в спеціальній ізоляції (рис. 3.9).

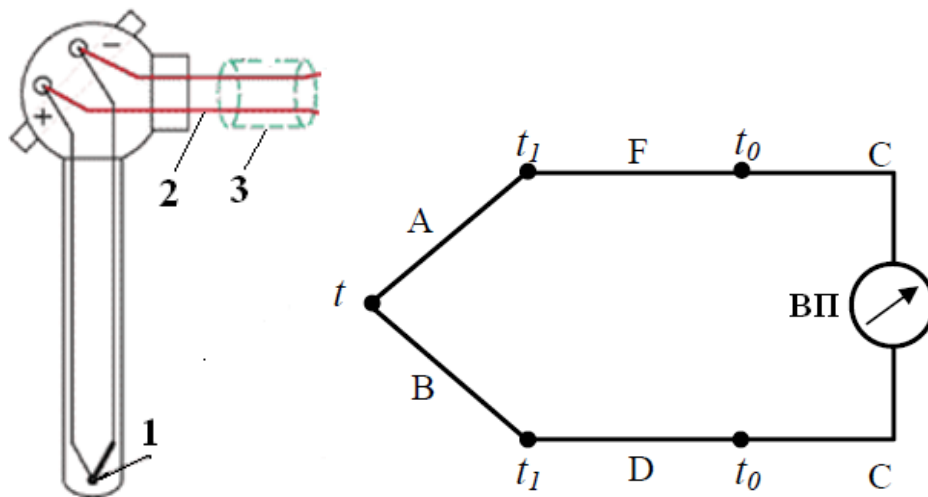


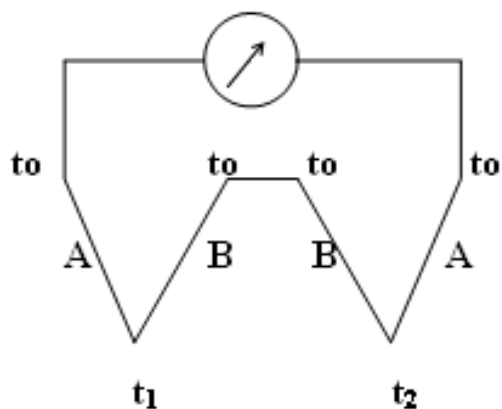
Рисунок 3.9. Підключення вимірювального пристрою до термопарі з використанням компенсаційних проводів.

1 – робочий спай термопарі; 2 – термоелектродні подовжувальні дроти; 3 – захисний екран для усунення впливу перешкод на вимірювальну частину приладу; А, В – термоелектроди; F, D – подовжувальні провідники; ВП – вимірювальний пристрій.

Такі компенсаційні дроти «подовжують» термоелектроди (вони значно тонші за термоелектроди і тому суттєво дешевші). При проведенні з'єднувальної лінії між термопарою та вимірювальним пристроєм вільні кінці термопарі будуть знаходитись в зоні змінної температури біля нагрітих поверхонь t_1 . Перенесення в зону з більш низькою і постійною температурою t_0 здійснюється за допомогою подовжувальних провідників F і D. Якщо термоелектричний термометр подовжений термоелектродними дротами, то вільними кінцями термометра будуть кінці термоелектродних дротів.

Для деяких термопар, електроди яких виготовлені з дорогих матеріалів, подовжувальні дроти роблять з інших металів і сплавів. Дроти в парі між собою розвивають ТЕРС тієї ж величини, що і термопара.

Диференціальні термопарі. У тих випадках, коли потрібно виміряти різницю температур ($t_1 - t_2$) застосовують диференціальну термопару для чого вмикають дві термопарі зустрічно (рис. 3.10).



$$E_{AB}(t_1, t_2) = e_{AB}(t_1) - e_{AB}(t_2) \quad (3.11)$$

Рисунок 3.10. Диференціальна термопара

Термобатарей. При вимірюванні температури t , яка незначно відрізняється від t_0 , а отже дає невелике значення ТЕРС, застосовують термобатарей (рис. 3.11), які складаються з декількох послідовно сполучених термопар. Таке сполучення дозволяє у збільшити ТЕРС у n разів (n – кількість сполучених пристроїв). ТЕРС ланцюга, що вміщує n послідовно сполучених однакових термопар дорівнює: $\Sigma E = n \cdot E(t_1, t_0)$.

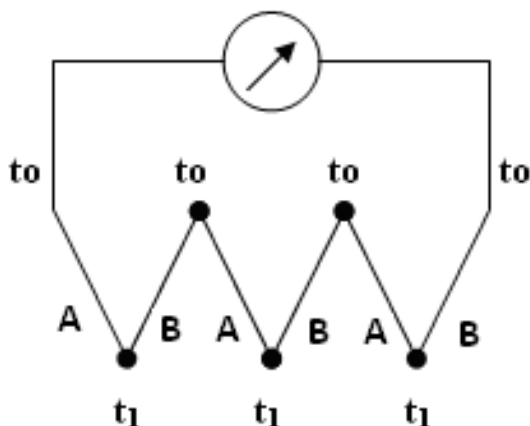


Рис.\унок 3.11. Термобатарея

Зустрічаються випадки, коли потрібно за допомогою термопар вимірювати низькі температури, де ТЕРС однієї термопари не відповідає чутливості вимірювального приладу і вимагає її збільшення у декілька разів. У цих випадках також можливо застосувати схему послідовного включення декількох термопар у вигляді термобатарей.

Конструкція термопар. Термопари, як і термометри опору, встановлюють в захисних чохлах. Для високотемпературних термопар застосовують захисні чохла з теплостійких матеріалів: фарфору, оксиду

алюмінію, карбиду кремнію і тому подібне. Конструктивне виконання термопар визначається умовами їх застосування. За типом виконання термопари можна поділити: на стаціонарні та переносні; поверхневі та ті, що занурюють у вимірювальне середовище; одинарні, подвійні та потрійні; однозонні та багатозонні; звичайні, водозахищені та вибухобезпечні і тому подібні. Можливі різні сполучення цих варіантів.

Конструктивно термоелектричний перетворювач являє два термоелектроди, робочі кінці яких скручуються, а потім їх можна зварювати або паяти, що забезпечує більш надійний контакт між ними. На рисунку 3.12 наведена найпоширеніша конструкція термопари, яка використовується для вимірювання температури в трубопроводах, апаратах, що працюють під тиском тощо.

Термоелектроди 2 з надітими на них ізоляційними бусами 3 розміщені в захисному чохлі 1, який захищає термопару від механічних ушкоджень і впливу вимірюваного середовища. В залежності від конструкції термопари робочий спай може знаходитись у контакті з захисним чохлом, або ізольований від нього. В головці 7, яка має кришку 8 і штуцер для кабелю 9, розміщена розетка, що виготовлена з ізоляційного матеріалу, з клемми підключення 6 для приєднання до вільних кінців термоелектродів подовжувальних дротів. Зовнішній захисний чохол 1 закріплюється на об'єкті за допомогою нерухомого або пересувного штуцера 5. Вільний простір між термоелектродами та захисним чохлом заповнюють порошком оксиду алюмінію (Al_2O_3) для покращення теплопередачі. Довжина робочої частини, яка занурюється у вимірювальне середовище, відрізняється для термопар різних типів.

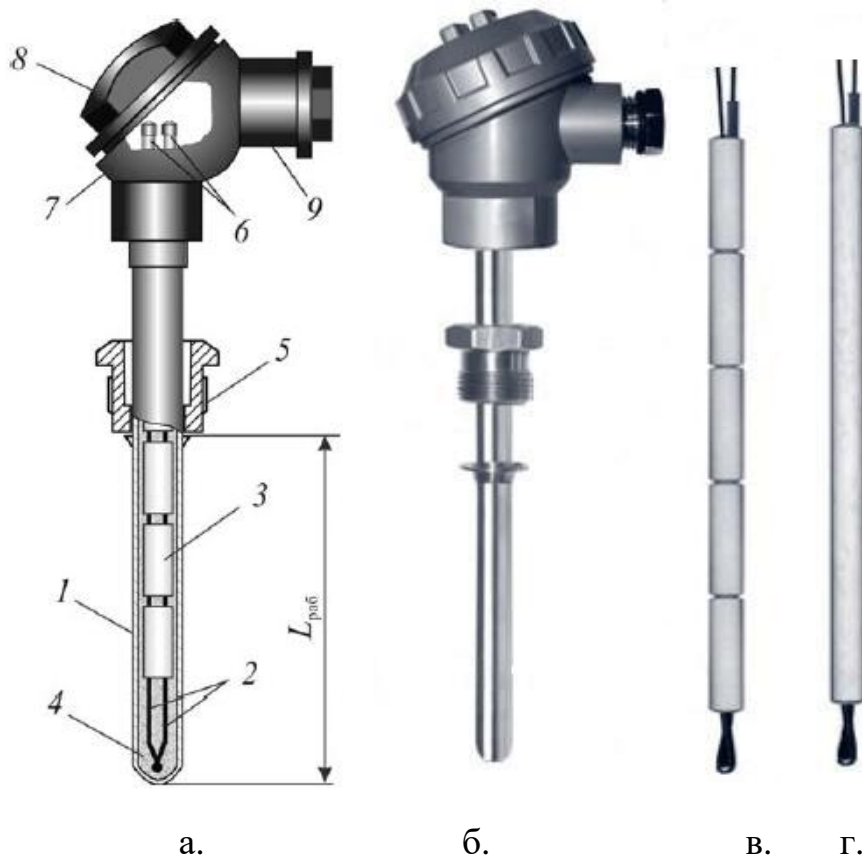


Рисунок 3.12. Конструкція термопарі (а), її загальний вигляд (б) і вигляд армованих термоелектродів (в, г).
 1 – зовнішній захисний чохол; 2 – термоелектроди; 3 – ізоляційні буси; 4 – засипка (порошок наповнювач); 5 – штуцер; 6 – розетка з клемми підключення; 7 – головка; 8 – кришка; 9 – штуцер для кабелю.

3.1.6 Пірометри

Пірометри випромінювання. Будь-яке нагріте тіло випромінює частку теплової енергії у вигляді потоку світлових і теплових променів. Чим вище температура нагрітого тіла, тим більше інтенсивність випромінювання. Тіло, нагріте приблизно до 500 °С, випромінює невидимі для людського ока інфрачервоні теплові промені. Подальше збільшення температури приводить до появи в спектрі випромінювання видимих світлових променів – до інфрачервоного випромінювання додаються світлові хвилі меншої довжини. З підвищенням температури нагрітого тіла його колір змінюється – червоний колір переходить у жовтий і білий. Випромінювання такого нагрітого тіла містить хвилі різної довжини, зокрема і такі, які сприймає око людини.

Одночасно з підвищенням температури нагрітого тіла та зміною його кольору швидко зростає інтенсивність монохроматичного випромінювання,

тобто випромінювання визначеної довжини хвилі – яскравість, а також істотно збільшується інтегральне (повне) випромінювання енергії – радіація.

Перераховані властивості нагрітого тіла дозволяють використовувати їх для вимірювання температури. Пірметри випромінювання діляться на радіаційні (пірметри повного випромінювання), квазімонохроматичні (вимірюють яскравісну температуру) і колірні (базуються на зміні кольору нагрітого тіла).

Здатність до випромінювання різна в різних поверхонь. Найбільшу випромінювальну й променепоглинаючу здатність має так зване «абсолютно чорне тіло» (АЧТ), тобто об'єкт, який повністю поглинає випромінювання, що падає на нього, а також має і найбільшу випромінювальну здатність ($\varepsilon = 1$). Реально існуючі в природі тіла не мають властивостей АЧТ, але можуть мати близькі до нього властивості. Наприклад, випромінювальна здатність порошку графіту становить 95% стосовно випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла. Так, тіло, що вкрите чорною фарбою – нафтовою сажею – поглинає 96 % усієї променевої енергії.

Закони температурного випромінювання абсолютно точно описують лише АЧТ. Залежність інтенсивності монохроматичного випромінювання АЧТ E_λ [Дж·м⁻³·с⁻¹] від температури і довжини хвилі λ описується рівнянням Віна:

$$E_\lambda = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \quad (3.12)$$

де: T – абсолютна температура тіла, K ; C_1, C_2 – константи.

Експериментальні дослідження показали, що результати розрахунків за цим рівнянням недостатньо точно співпадають з результатами експерименту в області довгих хвиль. Також це рівняння дає значну похибку за температур, вищих 2900 К. Цю невідповідність виправляє рівняння Планка.

$$E_{\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (2.13)$$

Планком також були знайдені значення константи C_1 і C_2 : $C_1 = 2\pi h c^2$ ($h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка, $c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі). $C_2 = hc/k$ ($k = 1,380622 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана). Таким чином $C_1 = 3,742 \cdot 10^{-16}$ Дж·с, $C_2 = 1,439 \cdot 10^{-2}$ м·К.

Повна (інтегральна) інтенсивність випромінювання АЧТ визначається законом Стефана-Больцмана:

$$E = \sigma T^4, \quad (3.14)$$

де σ – стала, що дорівнює $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Інтенсивність випромінювання будь-якого реального тіла завжди менша за інтенсивність АЧТ за тієї ж температури. Зменшення спектральної яскравості реального тіла в порівнянні з АЧТ враховують введенням коефіцієнта неповноти випромінювання. Його значення різне для різних фізичних тіл і залежить від їх складу, стану поверхні тіла і інших чинників.

Існуючі прилади для виміру температури за інтенсивністю випромінювання градуують по випромінюванню штучного абсолютно чорного тіла. Тому у практичних вимірах для отримання дійсного значення температури слід враховувати коефіцієнт випромінювання ε_{λ} , який дорівнює відношенню інтенсивності випромінювання сірого тіла E_{λ} до інтенсивності випромінювання АЧТ $E_{0\lambda}$.

$$\varepsilon_{\lambda} = E_{\lambda} / E_{0\lambda} \quad (2.15)$$

Особливістю пірометрів випромінювання є те, що вимір температури виконується без безпосереднього контакту приладу з об'єктом виміру, що дозволяє контролювати температуру сильно нагрітих тіл, а також, об'єктів що рухаються. Тому ці прилади вважають приладами безконтактного вимірювання температури.

Пірометри випромінювання мають наступні **переваги** перед приладами, які вимірюють температуру контактними методами: теоретично необмежена верхня температурна межа; дають можливість вимірювання температури тіл, що знаходяться на далекій відстані від приладу, тіл, які знаходяться під високою напругою, переміщуються з високою швидкістю, знаходяться в місці з підвищеною радіацією, в місці, де неможливо встановити контактний датчик та інше. Крім того пірометри випромінювання не спотворюють температурне поле об'єкту вимірювання внесенням датчика і мають високу швидкодію.

А до **недоліків** пірометрів випромінювання відносять: вплив на точність вимірювань проміжного середовища між об'єктом вимірювання і приладом (це середовище частково поглинає випромінювання); складність урахування усіх зв'язків між істиною температурою тіла і тією, що показує пірометр (закони на яких базується їх робота виведені для АЧТ); вплив особливостей зору людини при використанні оптичних пристроїв у пірометрах.

Радіаційні пірометри (пірометри повного випромінювання). Принцип дії цих приладів базується на законі Стефана-Больцмана. У радіаційних пірометрах використовується теплова дія повного випромінювання нагрітого тіла, включаючи як видиме, так і невидиме випромінювання. У зв'язку із цим радіаційні пірометри називаються також пірометрами повного випромінювання.

Принципову схему радіаційного пірометра показано на рисунку 3.13.

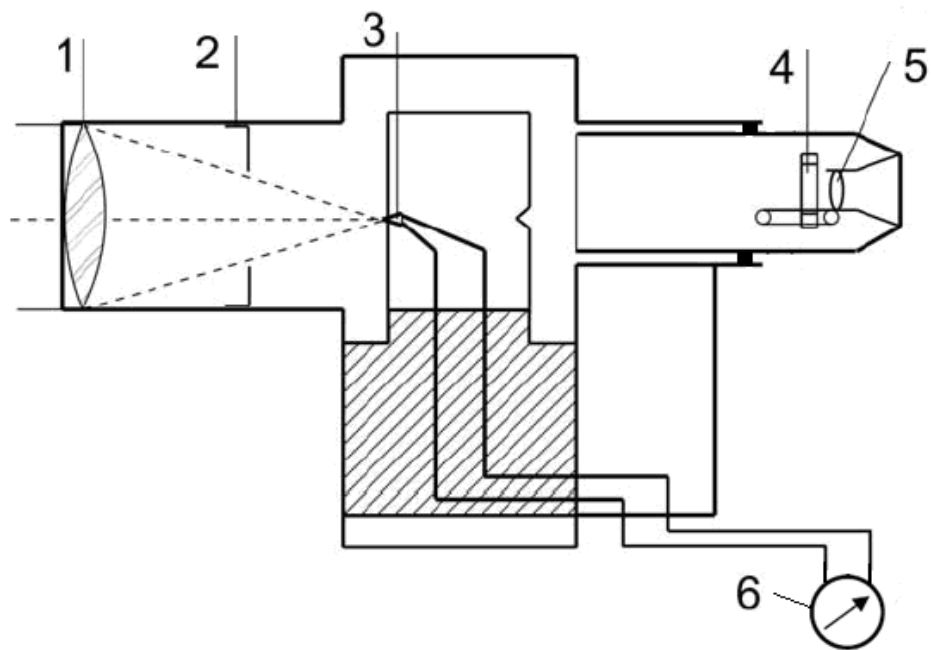


Рисунок 3.13. Принципова схема радіаційного пірометра.

1 – лінза об’єктива; 2 – діафрагма; 3 – термоелектрична батарея; 4 – світлофільтр; 5 – лінза окуляра; 6 – вимірювальний пристрій.

Пірометр має телескоп, до складу якого входять лінза об’єктива 1 та лінза окуляра 5, обмежувальна діафрагма 2 та світлофільтр 4. Червоний світлофільтр призначений для захисту очей людини, яка працює з приладом. Оптична система пірометра збирає промені, які випромінює нагріте тіло, на теплоприймач. В якості теплоприймача використовується термобатарея з декількох мініатюрних послідовно з’єднаних термопар, робочі спаї яких нагріваються випромінюванням об’єкта. Термобатарея знаходиться в фокусі лінзи. ТЕРС, що виникає, вимірюється за допомогою пристрою 6 (мілівольтметра або автоматичного потенціометра, що відградуваний в градусах). Температура робочих кінців термопар не повинна перевищувати задану ($250\text{ }^{\circ}\text{C}$). Обмежувальна діафрагма 2 і слугує для зменшення числа променів, що попадають на термобатарею.

Матеріал, з якого виготовлена лінза об’єктива визначає інтервал температур, що вимірює цей прилад, та його градууювальну характеристику. Залежність дійсної температури нагрітого тіла T_D від радіаційної T_P , яку вимірює пірометр, визначається залежністю:

$$T_D = T_P \left(\frac{1}{\varepsilon_T} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.16)$$

Оскільки $\varepsilon_T < 1$, то дійсна температура більше радіаційної. Для реальних об'єктів вимірювання ε_T може перебувати в межах від 0,95 до 0,01. Тому виправлення, які необхідно вносити в показання радіаційного пірометра для визначення дійсної температури, можуть досягати декількох сотень градусів, якщо об'єкт вимірювання за своїми властивостями значно відрізняється від АЧТ.

Зазвичай радіаційні пірометри застосовуються для вимірювань температур у діапазоні від -40 до $+3500^\circ\text{C}$. Позитивною особливістю радіаційних пірометрів є те, що їх можна застосовувати також і для вимірювання невисоких температур, якщо об'єкт виміру не дає видимого випромінювання. Можливо також здійснювати вимірювання температури тіл, холодніших за навколишнє середовище. В останньому випадку термобатарея не нагрівається, а охолоджується під час радіаційного теплообміну між нею й об'єктом вимірювань.

Радіаційні пірометри придатні для безперервного виміру й реєстрації температури, а також для застосування в системах автоматичного регулювання. Вимірювання температури тіл, близьких по випромінювальній здатності до АЧТ, дає основну похибку, яка не перевищує 1% верхньої межі виміру. Джерелом похибок може бути також недостатня прозорість середовища між телескопом і об'єктом вимірювання або забруднення оптики телескопа. На рисунку 3.14 наведено декілька моделей радіаційних пірометрів, які випускають приладобудівні підприємства .



а.



б.

Рисунок 3.14. Радіаційні пірометри: а – стаціонарні (фірми Raytek), б – переносні цифрові (фірми CONDROL).

Квазімонохроматичні пірометри (пірометри часткового випромінювання). Для вимірювання яскравісної температури нагрітого тіла використовують квазімонохроматичні пірометри, які поділяють на оптичні та фотоелектричні. Принцип дії цих приладів базується на рівнянні Планка.

Принцип дії **оптичного пірометра** базується на порівнянні яскравості нагрітого тіла та еталонного джерела випромінювання з заданою яскравістю. В якості еталонного джерела зазвичай використовують нитку пірометричної лампи розжарювання, яскравість випромінювання якої можна регулювати.

Найбільш поширеним приладом цієї групи є оптичний пірометр зі зникаючою ниткою (рис. 3.15).

Оптична система пірометра являє собою телескоп з об'єктивом 1 і окуляром 8. Перед окуляром поміщений червоний світлофільтр. Телескоп спрямовується на об'єкт випромінювання 1. Всередині телескопу у фокусі лінзи об'єктива 2 знаходиться пірометрична лампа розжарювання 5 з ниткою у вигляді підкови. Нитка лампи живиться струмом батареї 10 через реостат 11, за допомогою якого її розжарення можна регулювати вручну. В ланцюг живлення включено вимірювальний пристрій (мілівольтметр) 9, шкала якого відградується в градусах.

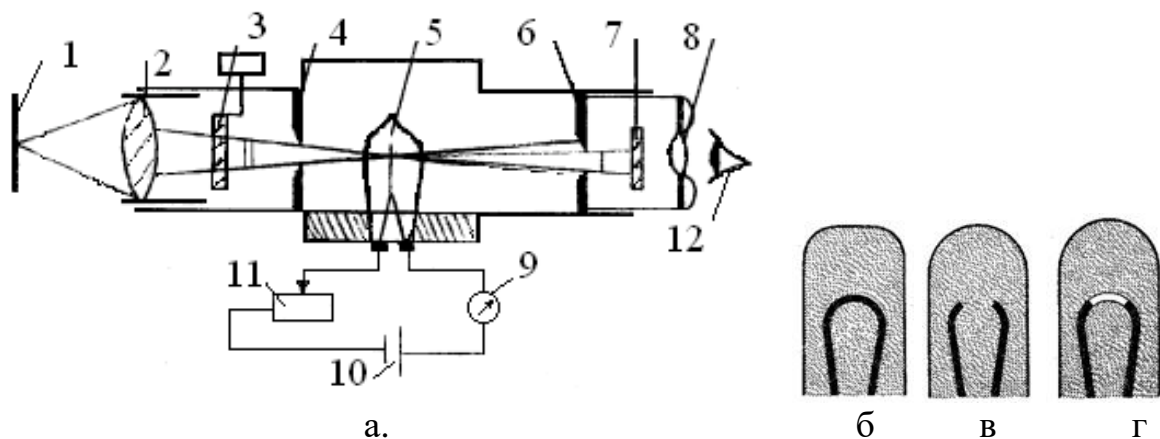


Рисунок 3.15. Принципова схема оптичного пірометра зі зникаючою ниткою (а) та варіанти зображення нитки пірометричної лампи (б, в, г): б. температура нитки занижка; в. температура нитки дорівнює температурі нагрітого тіла (частина нитки зникає); г. температура нитки зависока.

1 – випромінювач; 2 – лінза об’єктива; 3 – поглинальний світлофільтр; 4 – вхідна діафрагма; 5 – пірометрична лампа розжарювання; 6 – вихідна діафрагма; 7 – червоний світлофільтр; 8 – лінза окуляра; 9 – вимірювальний пристрій; 10 – батарея; 11 – реостат; 12 – око людини.

Спектральні яскравості об’єкту випромінювання та нитки лампи порівнюють за довжини хвилі близько $0,65 \text{ мкм}$, що враховує спектральну чутливість ока. Для цього перед лінзою окуляра встановлюють червоний світлофільтр 7. В об’єктиві знаходиться поглинальний світлофільтр 3, який слугує для розширення меж вимірювання приладу. Вхідна 4 і вихідна 6 діафрагми призначені для обмеження вхідного вихідного кутів пірометрів.

Для отримання контрастного зображення об’єкту випромінювання і нитки лампи об’єктив і окуляр можна переміщувати вздовж осі телескопа. Для підготовки приладу до вимірювання телескопічну трубку направляють на об’єкт і переміщують об’єктив до отримання чіткого зображення об’єкту та нитки лампи у вигляді різкої чорної підкови. У телескоп спостерігач бачить ділянку випромінюючої поверхні розжареного тіла (об’єкта вимірювання) і на цьому тлі нитку лампи. Якщо яскравості нитки й нагрітого тіла неоднакові, то нитка лампи буде більш темною або більше освітленою, ніж тіло. Спостерігач за допомогою реостата регулює розжарення нитки доти, поки яскравість нитки не стане рівною яскравості об’єкта вимірювання. Тоді середня частина зображення нитки зіллється з освітленим тілом і вона

стане нерозрізнена (нитка «зникне»). У цей момент температура яскравості нитки дорівнює температурі яскравості об'єкта вимірювання. Показуючий прилад, включений у ланцюг нитки накаливання показує цю температуру. Співвідношення дійсної температури нагрітого тіла та яскравісної, що виміряв пірометр, визначається виразом:

$$T_D = \left(\frac{1}{T_J} - \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda} \right) \quad (3.17)$$

де: T_D і T_J – дійсна температура нагрітого тіла і яскравісна температура, яка виміряна пірометром; λ – довжина хвилі світла, у якому вимірюється яскравісна температура (для оптичних пірометрів зазвичай $\lambda = 0,65$ мкм); C_2 – постійна рівняння Віна; ε_λ – коефіцієнт випромінювальної здатності (коефіцієнт чорності) реального тіла для довжини хвилі.

Для визначення дійсної температури об'єкта на основі показань оптичного пірометра необхідно використовувати формулу (3.17) або таблиці, складені на основі цієї формули.

Щоб уникнути перегріву нитки (для вольфраму ця температура не повинна перевищувати 1500°C , а для забезпечення сталих характеристик нитки та приладу – 1400°C) під час вимірювання більш високих температур перед лампою встановлюється поглинаючий світлофільтр 3, що зменшує видиму яскравість випромінювання об'єкта. Скло світлофільтра обирають з такими оптичними характеристиками, щоб при яскравісній температурі об'єкта вимірювання вище 1400°C нитка лампи розжарювання нагрівалась до яскравісної температури не вище 1400°C . Тому пірометри мають дві шкали верхню – для вимірювання температур до 1400°C (поглинаючий світлофільтр виведений) і нижню – для температур вищих за 1300°C (поглинаючий світлофільтр введений).

Оптичні пірометри призначені для ручного вимірювання температури і непридатні для роботи в системах автоматичного керування, а також їм

притаманна суб'єктивна похибка, що зв'язано з особливостями зору спостерігача.

Фотоелектричні пірометри. Існують також квазімонохроматичні пірометри, у яких порівняння яскравостей нитки лампи й об'єкта обробляється не візуально оком спостерігача, а за допомогою фотоелектричного пристрою. Чутливими елементами, що сприймають променисту енергію, у цих приладах можуть служити фотоелементи, фотомножники, фотоелементи опору і фотодіоди. Вимір температури засновано на залежності спектральної яскравості тіла від його температури. Мірою температури може слугувати фотострум, що створюється фотоелементом. Такі прилади мають нескладну конструкцію, а також і низку точність вимірювання. Більш складні та досконалі пристрої можуть використовувати фотоелемент для порівняння яскравості об'єкта вимірювання та яскравості стандартного регульованого джерела світла, що дозволяє автоматизувати вимірювання і підвищити точність визначення температури яскравості. Однак схема й конструкція приладів при цьому істотно ускладнюються.

Структурну схему фотоелектричного пірометра можна зобразити, як показано на рисунку 3.16.



Рисунок 3.16. Структурна схема фотоелектричного пірометра

Фотоелектричні пірометри часткового випромінювання діляться на дві групи: пірометри, в яких мірою температури об'єкту є безпосередньо величина фотоструму приймача випромінювання та пірометри, які мають стабільне джерело випромінювання, а фотоприймач служить лише індикатором рівності яскравостей даного джерела і об'єкту.

Фотоелектричні пірометри випускають одношкальними для вимірювання температур від +600 до +2000 °С або двошкальними (з

введеним світлофільтром 2, що ослаблює світловий потік від випромінюючого тіла) для визначення вищих температур. У першому випадку похибка вимірювання не перевищує 1%, в другому – 2,5% від діапазону вимірювань. На рисунку 3.17 наведено декілька моделей оптичних пірометрів, які випускають приладобудівні підприємства.



а.



б.

Рисунок 3.17. Оптичні пірометри: а) пірометр «ПІТОН-104», б) пірометр «Термоскоп-10».

Колірні пірометри (пірометри спектрального відношення). Дія цих пірометрів заснована на тому, що зі зміною температури міняється колір нагрітого тіла. У колірних пірометрах вимірювання температури здійснюється за відношенням монохроматичних яскравостей нагрітого тіла для двох довжин хвиль, що відрізняються одна від одної в видимій частині спектра (наприклад, червоного і синього кольорів). За цією обставиною колірні пірометри ще називають пірометрами спектрального відношення. Температурою спектрального відношення (колірна температура) називають температуру АЧТ, за якої відношення інтенсивностей випромінювання на ділянках спектра з ефективними довжинами хвиль λ_1 і λ_2 таке ж саме як і у реального тіла. Таким чином, колірна температура T_K зв'язана з дійсною температурою реального тіла T_D співвідношенням:

$$\frac{E_0(\lambda_1, T_K)}{E_0(\lambda_2, T_K)} = \frac{E(\lambda_1, T_D)}{E(\lambda_2, T_D)} \quad (3.17)$$

Після заміни E і E_0 їх значеннями з рівняння Віна і логарифмування отриманого виразу отримуємо залежність між дійсною температурою і колірною:

$$T_D = \left(\frac{1}{T_K} - \frac{\ln(\varepsilon_{\lambda 1} / \varepsilon_{\lambda 2})}{C_2(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)} \right)^{-1} \quad (3.18)$$

де: T_D і T_K – дійсна температура нагрітого тіла і колірна температура, яка вимірюється пірометром; C_2 – постійна рівняння Віна; $\varepsilon_{\lambda 1}$, $\varepsilon_{\lambda 2}$ – ступінь чорноти реального тіла для променів з довжиною хвиль відповідно λ_1 і λ_2 .

Слід зазначити, що для сірих тіл (до яких відносять значну кількість оксидів і карбідів металів, вогнетривких матеріалів, кераміки тощо) колірна температура дорівнює дійсній. Незалежність показань колірних пірометрів від ступеня чорноти реального тіла під час вимірювання температури сірих тіл, а також значно менші у порівнянні з іншими класами пірометрів значення похибок для тіл, ступені чорноти яких лежать в межах 0,6...0,9 визначили переваги в використанні пірометрів цього класу. Важливими перевагами колірних пірометрів також є незалежність показань від відстані до поверхні випромінювання, її розмірів, а також можливість вимірювань у більш широкому діапазоні кутів візування. Щоб уникнути залежності результатів вимірювання від суб'єктивних особливостей спостерігача (втомлюємість ока та чутливість до кольору) у колірних для пірометрах вимірювання відношення енергетичних яскравостей використовують фотоелементи. Принципова схема колірного пірометра представлена на рисунку 3.19.

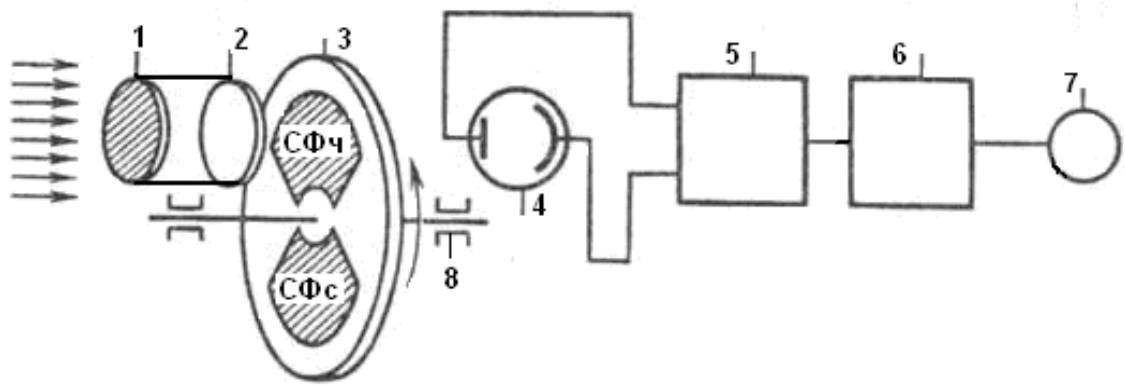


Рисунок 3.19. Схема пірометра спектрального відношення.

1 – захисне скло; 2 – об’єктив; 3 – обтюратор з червоним (СФч) і синім (СФс) світлофільтрами; 4 – фотоелемент; 5 – електронний підсилювач; 6 – логарифмуючий пристрій; 7 – вимірювальний пристрій; 8 – двигун.

Випромінювання об’єкта виміру через захисне скло 1 і об’єктив 2 попадає на фотоелемент 4. Між об’єктивом і фотоелементом установлений обертовий диск (обтюратор) 3, у який вставлені два світлофільтри – червоний (СФч) і синій (СФс). Обтюратор обертається за допомогою двигуна 8. Таким чином на фотоелемент поперемінно попадають випромінювання відповідної спектральної енергетичної яскравості (червоної або синьої спектральної енергетичної яскравості). Отже приймач випромінювань видає по черзі імпульси струму, пропорційні монохроматичним яскравостям червоного й синього випромінювань розжареного тіла. Ці імпульси підсилюються підсилювачем 5 і перетворюються спеціальним електронним логарифмуючим пристроєм 6, у постійний струм, сила якого пропорційна величині логарифму, і залежить від зворотної величини абсолютної температури тіла $(T_D)^{-1}$. Вихідний струм логарифмуючого пристрою, вимірюється показуючим або реєструючим мілівольтметром 7, шкала якого відградує в градусах. Прилад градується по абсолютно чорному тілу, тому його показання відповідають дійсній температурі абсолютно чорного, а також «сірих» тіл.

Діапазон виміру кольорних пірометрів складає від +300 до +2500°C з похибкою вимірювання, яка не перевищує 1% від верхньої границі діапазону вимірювань. У більшості таких пірометрів ширина спектрального діапазону

складає близько 0,2 мкм (0,45...0,65 мкм, 0,65...0,88 мкм, 0,88...1,13 мкм тощо). Найбільше поширення отримали інфрачервоні пірметри із спектральним діапазоном 0,88...1,13 мкм з огляду на те, що в цьому діапазоні багато матеріалів поведуться, як сірі випромінювачі. Цей діапазон розбивають на декілька піддіапазонів. Перехід від одного піддіапазону до іншого здійснюється за допомогою спеціальних додаткових світлофільтрів. Наведення на об'єкт вимірювання здійснюється за допомогою оптичного прицілу, спеціального освітлювача (ліхтарика) або лазерного променя.

3.2 Опис лабораторних засобів та обладнання

Лабораторна установка (рис 3.20) складається з об'єкту вимірювання, приладів вимірювання температури та пристроїв керування. Установка призначена для набуття студентами досвіду роботи із технічними засобами вимірювання температури.

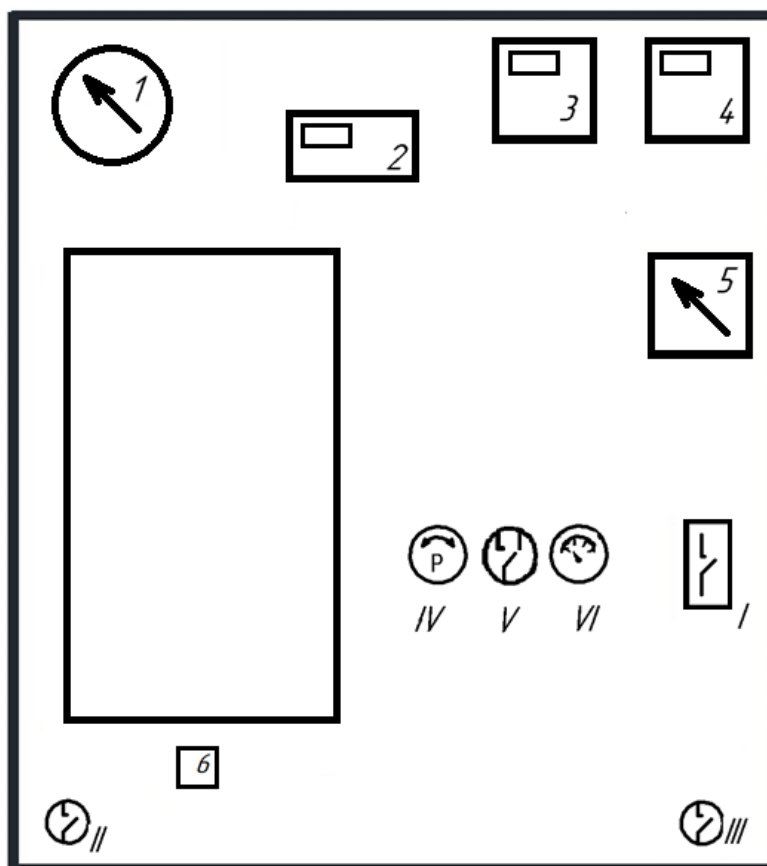


Рисунок 3.20. Схема лабораторної установки

Основою установки є об'єкт вимірювання – металева ємність заповнена теплоносієм та обладнана нагрівальним елементом – спіраллю з опором 56 Ом. З міркувань безпеки об'єкт вимірювання поміщений за захисним склом.

У ємність вмонтовані прилади різних типів для вимірювання температури. Контрольним приладом є ртутний термометр. В середній частині ємності вмонтовано термобалон манометричного термометра ТПП-100 з вторинним приладом 1. Поруч з ним вмонтовано три термоелектричні перетворювачі: термометр опору ТСМ-50, приєднаний за трипроводовою схемою до вторинного приладу ОВЕН ТРМ1 3, термопара типу ТХК, приєднана до вторинного приладу ОВЕН 2ТРМ0 4 та друга термопара типу ТХК, приєднана до вторинного приладу ОВЕН 2ТРМ0, який працює в режимі мілівольтметра 2. Безконтактне вимірювання температури стінки об'єкту виконується пірометром, який вводиться в установку через вікно 6.

Живлення установки забезпечується увімкненням пакетного вимикача *I*. Вимикач *II* вмикає обдування об'єкту вимірювання повітрям для прискорення його охолодження. Вимикач *III* вмикає (вимикає) вторинні цифрові прилади ОВЕН ТРМ.

Установка дає можливість плавного та ступінчатого регулювання напруги на нагрівальному елементі. Перемикання між цими режимами здійснюється перемикачем *V*. Зміна напруги на нагрівачі у плавному режимі здійснюється резистором змінного опору *IV*, у ступінчатому – перемикачем *VI*. Напруга на нагрівачі контролюється за вольтметром 5.

3.3 Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи

Загальні заходи безпеки, яких треба дотримуватись під час виконання лабораторних робіт у лабораторному приміщенні наведені у Додатку А.

Під час виконання роботи «Прилади вимірювання температури» слід враховувати нижченаведені відомості та дотримуватися наступних вимог.

Факторами небезпеки установки «які присутні на установці є:

- напруга 220 вольт;

- температура об'єкту вимірювання до 100 °С.

Під час виконання лабораторних робіт категорично забороняється:

- виконувати на установці операції, які не передбачені ходом роботи;
- працювати на несправній установці та проводити самостійне усунення несправностей установки;
- доводити температуру об'єкту нагрівання вище 80 °С.
- змінювати налаштування вторинних показуючих приладів;
- проводити будь-які роботи на установці без дозволу викладача або відповідального інженерного працівника лабораторії.

***Примітка.** У випадку виділення пари з об'єкту вимірювання роботу припинити, установку знеструмити пакетним вимикачем I та повідомити викладача або відповідального працівника лабораторії.*

3.4. Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитися з лабораторною установкою.
2. Отримати у викладача завдання на роботу.
3. Підготувати установку до роботи: пакетним вимикачем I подати на установку електроживлення. Контроль подачі електроживлення здійснюється за зеленою лампою.
4. Подати живлення на цифрові прилади вимикачем III.
5. Зняти показання приладів 1, 2, 3, 4 і занести до протоколу роботи у відповідні графи таблиць 3.1, 3.2 і 3.3 відповідно.
6. Через спеціальне вікно стенду б провести вимірювання температури поверхні об'єкту вимірювання за допомогою пірометра і занести до протоколу роботи у відповідну графу таблиці 3.3.
7. Перемикач V перевести у ліве положення, а резистор змінної ємності IV перевести в крайнє положення за годинниковою стрілкою. Контроль здійснити за вольтметром 5.
8. При досягненні першої точки вимірювання температури за ртутним термометром, зняти показання приладів 1, 2, 3, 4 і занести до протоколу

роботи; провести вимірювання температури поверхні об'єкту вимірювання за допомогою пірометра і занести до протоколу роботи (таблиці 3.1 – 3.3).

9. Аналогічні вимірювання провести в інших заданих точках (див. п. 8) Результати занести до протоколу роботи.
10. Вимкнути нагрівання об'єкту вимірювання. Для цього резистор змінної ємності *IV* перевести в крайнє положення проти годинникової стрілки, а перемикач *V* перевести у середнє положення. Контроль здійснити за вольтметром 5, який має показати напругу у 0 V.
11. Провести вимірювання температури у тих самих точках в режимі охолодження об'єкту. Для прискорення охолодження увімкнути обдування об'єкту за допомогою тумблера *II*.
12. При досягненні температурою заданих значень за ртутним термометром, зняти показання приладів 1, 2, 3, 4 і занести до протоколу роботи (таблиці 3.1 – 3.2); провести вимірювання температури поверхні об'єкту вимірювання за допомогою пірометра і занести до протоколу роботи (таблиця 3.3).
13. Вимкнути режим охолодження об'єкту за допомогою тумблера *II*.
14. Вимкнути живлення цифрових приладів за допомогою тумблера *III* та вимкнути живлення установки пакетним вимикачем *I*.

Таблиця 3.1

Результати дослідження приладів вимірювання температури

№ досліджу	Показання приладів			Похибки			
	контрольного термометра	перевіряемого термометра, °С		абсолютна, °С		відносна, %	
		°С	Прямий хід	Зворотний хід	Прямий хід	Зворотний хід	Прямий хід
Манометричний термометр ТГП-100							
1							
2							
3							
4							
Термометр опору ТСМ-50							

1							
2							
3							
4							
Термопара ТХК							
1							
2							
3							
4							

Таблиця 3.2

Результати вимірювання термо-ЕРС

Термопара ТХК							
№ досліджу	Показання контрольного термометра, °С	Показання мілівольтметра, mV		Температура холодного спаю, °С	Поправка, mV	ЕРС, mV	Значення температури, °С
		Прямий хід	Зворотний хід				
1							
2							
3							
4							

Таблиця 3.3

Результати дослідження пірометра по вимірюванню температури стінки нагрівача

№ досліджу	Показання приладів		
	Контрольного термометра, °С	пірометра, °С	
		Прямий хід	Зворотний хід
1			
2			
3			
4			

3.5. Оброблення та аналіз результатів. Оформлення звіту

Використовуючи отримані значення температури, що занесені до таблиці 3.1, провести розрахунки абсолютної та відносної похибок приладів, що перевіряються у режимах прямого та зворотного навантаження. Визначити, чи мають прилади варіацію показань при вимірюваннях.

Використовуючи отримані значення термо-ЕРС та значення поправки, яка визначена за температурою холодного спаю термопари, що занесені до таблиці 3.2, визначити загальну термо-ЕРС та за градувальною таблицею (додаток Б) визначити виміряну температуру.

Використовуючи отримані результати вимірювання температури пірометром, що занесені до таблиці 3.3, пояснити причину різниці показань контрольного термометру та пірометру.

У звіт про виконану роботу слід включити:

- тему та мету роботи;
- короткі теоретичні відомості;
- опис лабораторної установки та методику проведення вимірювань;
- таблиці отриманих результатів та їх оброблення;
- аналіз отриманих результатів та основні висновки.

Контрольні запитання

1. Яка фізична сутність поняття «температура»?
2. Які шкали вимірювання температури застосовуються?
3. Як класифікуються прилади вимірювання температури?
4. Які будова та принцип дії рідинних термометрів розширення?
5. Які будова та принцип дії манометричних термометрів?
6. Які типи манометричних термометрів відомі?
7. Які будова та принцип дії термометрів опору?
8. Які основні матеріали застосовуються для виготовлення термометрів опору?
9. На чому засноване вимірювання температури термопарою?
10. Які будова та принцип дії термопари?
11. Яким чином в ланцюг термопари включають вимірювальний прилад?
12. Для чого використовують подовжувальні провідники для підключення термопари?

13. З якою метою у вимірюваннях враховують температуру холодного спаю термопари?
14. Як отримують градувальні таблиці термоелектричних перетворювачів? Як ними користуватися?
15. В чому полягають переваги та недоліки термометру опору у порівнянні з термопарою?
16. Що таке диференціальні термопари? Термобатарей? В чому особливості їх застосування?
17. На чому засновані безконтактні методи вимірювання температури?
18. Які будова та принцип дії радіаційного пірометра?
19. Які будова та принцип дії квазімонохроматичних пірометрів?
20. Які будова та принцип дії фотоелектричного пірометра?
21. Які будова та принцип дії колірних пірометрів?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ВТОРИННІ ПРИЛАДИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Мета та основні завдання роботи. дослідити роботу вторинних приладів для термометрів опору та термоелектричних термометрів. Набути вміння налаштування вторинних приладів, проведення технологічних вимірювань за допомогою них та оброблення результатів цих вимірювань.

Вивчити та стисло описати у протоколі лабораторної роботи:

- будову вторинних приладів для термопар та електричних термометрів опору;
- склад лабораторної установки;
- методика проведення досліджень;
- форми для запису результатів вимірювань.

4.1 Основні теоретичні відомості

4.1.1 Засоби вимірювання, що працюють в комплекті з термометрами опору.

Для вимірювання температури із застосуванням термометрів опору зазвичай використовують нульовий метод або метод відхилення. Вимірювальні прилади, що працюють в комплекті з термометрами опору за принципом дії діляться на такі групи: зрівноважені мости; незрівноважені мости; логометри (або омметри) та нормувальні перетворювачі.

Зрівноважені мости. Зрівноважені мости бувають лабораторні неавтоматичні і автоматичні для промислового застосування. У цих приладах використовується нульовий метод. Зрівноважені мости широко застосовують для вимірювання, реєстрації та регулювання температури.

Принципову схему зрівноваженого моста наведено на рисунку 4.1.

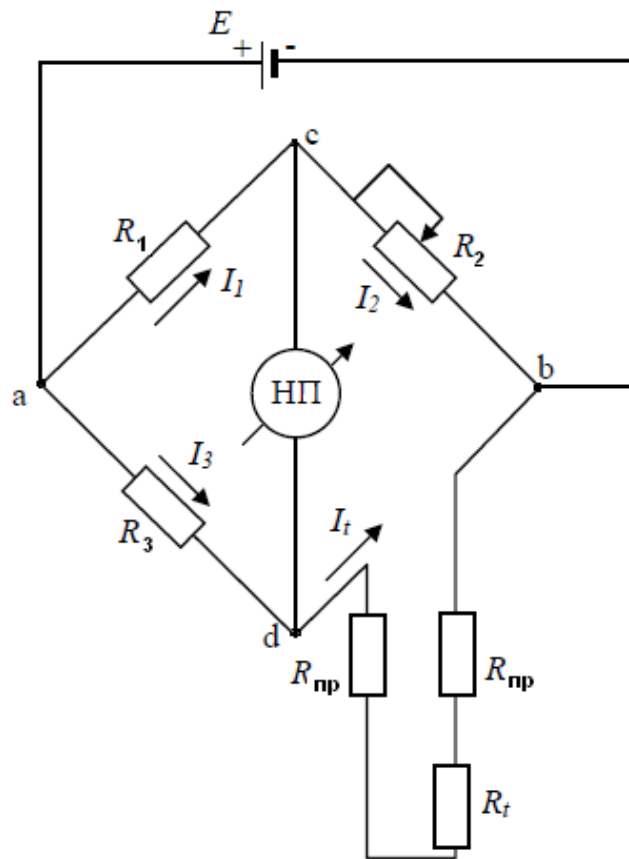


Рисунок 4.1. Принципова схема зрівноваженого моста.

Це мостова схема, одна діагональ якого – ab містить джерело живлення E , а друга діагональ – cd є вимірювальною. У вимірювальну діагональ підключено нуль-прилад (НП) – прилад з позначкою 0 в центрі шкали. За його показаннями фіксується рівновага моста. В плечі моста включені постійні опори R_1 , R_3 і змінний (регулюємий) опір R_2 . Опір R_2 використовується для балансування моста. Резистори R_1 , R_2 , R_3 виготовлено з манганіну і тому їх опори практично не змінюються зі зміною температури. В четверте плече моста включено термометр опору – R_t . До термометру опору R_t додаються опори з'єднувальних проводів, які на схемі позначені R_{np} .

Схема зрівноважена, якщо струм у вимірювальній діагоналі дорівнює нулю ($I_{np} = 0$), оскільки потенціали в точках c і d однакові. Струми у відповідних плечах моста також будуть рівні: $I_1 = I_2$ і $I_3 = I_t$.

При цьому в плечах моста будуть однакові падіння напруги.

$$I_1 R_1 = I_3 R_3 \quad (4.1)$$

$$I_2 R_2 = I_t (R_t + 2R_{np}) \quad (4.2)$$

Розділимо рівняння (4.1) на рівняння (4.2) і отримаємо:

$$\frac{I_1 R_1}{I_2 R_2} = \frac{I_3 R_3}{I_t (R_t + 2R_{np})}$$

За умови, що струм у вимірювальній діагоналі дорівнює нулю $I_{np} = 0$, а: $I_1 = I_2$ і $I_3 = I_t$, отримаємо:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_t + 2R_{np}}$$

Тоді умова рівноваги моста буде:

$$R_1 (R_t + 2R_{np}) = R_2 R_3 \quad (4.3)$$

Для рівноваги моста необхідно, щоб добутки опорів його протилежних пліч були рівні між собою. Тоді з умови рівноваги моста знайдемо шуканий опір термометра:

$$R_t = \frac{R_2 R_3}{R_1} - 2R_{np} \quad (4.4)$$

Це рівняння показує, що опір R_t може бути визначений, якщо відомі опори R_1 , R_2 , R_3 і опір з'єднувальних проводів R_{np} . Як вказувалось раніше, опори R_1 , R_2 , R_3 не змінюються зі зміною температури. Таким чином, зміна опору термометра R_t визначається зміною опору R_2 (оскільки опори R_1 , R_3 постійні) і зміною опорів з'єднувальних проводів R_{np} .

$$\Delta R_t = \Delta R_2 - \Delta R_{np}$$

Отже точність визначення R_t залежатиме від сталості опору з'єднувальних дротів R_{np} . А опір R_{np} може змінюватись внаслідок температурного чинника – температури навколишнього середовища.

Для виключення впливу опору з'єднувальних дротів на процес вимірювання використовується трипровідна схема підключення термометра опору (рис. 4.2). Це зводиться до переносу однієї вершини живлячої діагоналі безпосередньо до термометра опору (ТО).

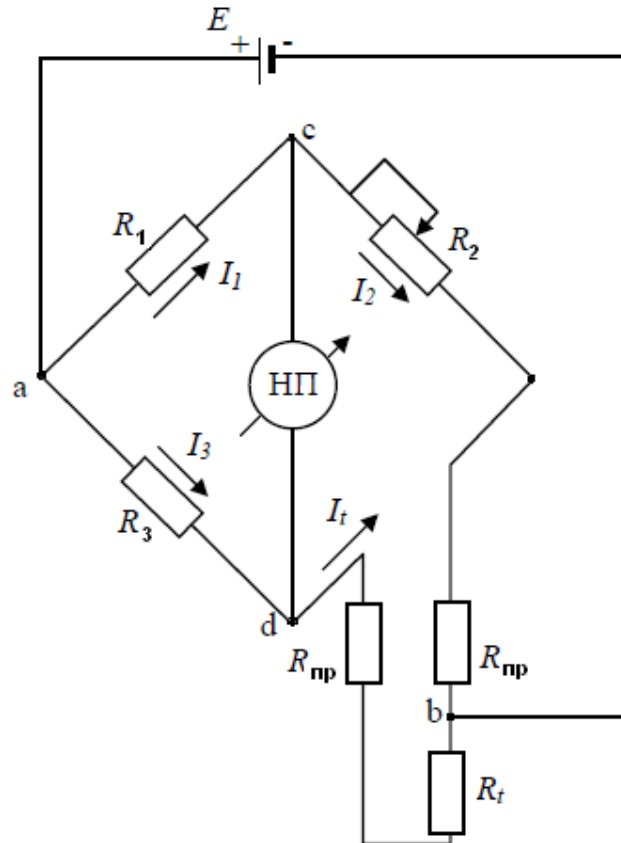


Рисунок 4.2. Трипровідна схема підключення термометра опору до зрівноваженого моста.

Для такого підключення опір одного проводу R_{np} додається до опору R_t , а другого проводу R_{np} до опору R_2 . Тоді умова рівноваги моста виглядатиме наступним чином:

$$R_1(R_t + R_{np}) = R_3(R_2 + R_{np}) \quad (4.5)$$

За умови, що $R_1 = R_3$ і $R_t = R_2$ (тобто міст симетричний) опір з'єднувальних проводів не буде впливати на результат вимірювання і опір термометра R_t буде однозначний визначатися опором R_2 : $\Delta R_t = \Delta R_2$. У інших випадках вплив опору R_{np} незначний.

Недоліком розглянутих зрівноважених мостів є невизначеність у вимірюванні, котру вносить перехідний опір контакту резистора R_2 у регульовальному плечі моста. Для усунення цього недоліку рухомий контакт резистора R_2 розміщують у вимірювальній діагоналі. Тоді регульований опір R_2 опиняється розміщеним у двох плечах. Таким чином, якщо міст урівноважується переміщенням рухомого контакту резистора R_2 , змінюється опір одразу обох плечей, а перехідний опір контакту резистора, що розміщується у вимірювальній діагоналі не впливає на результати вимірювань, бо струму у вимірювальній діагоналі в момент зрівноваження немає.

Зрівноважені мости відносяться до лабораторних приладів, і призначені для ручного вимірювання. В них зрівноваження моста здійснюється вручну за допомогою рухомого контакту реохорда.

Автоматичні мости. Автоматичні мости застосовуються для безперервного вимірювання температури в комплекті з ТО стандартного градування. У цих приладах в порівнянні з лабораторним мостом повзунок реохорда переміщається не в ручну, а автоматично. Живляться ці мости як постійним, так і змінним струмом. Зрівноважені автоматичні мости змінного струму мають ряд переваг – для них непотрібно додаткове джерело живлення, а живляться вони від однієї з обмоток електронного підсилювача, а також непотрібен вібраційний перетворювач у складі електронного підсилювача. Зрівноважені автоматичні мости постійного струму зазвичай застосовують у випадках, коли застосування змінного струму неможливе по нормам пожежної безпеки. Не дивлячись на існування багатьох модифікацій електронних автоматичних зрівноважених мостів принцип їх роботи однаковий. Функціонально ці мости складаються з наступних вузлів (рис. 4.3):

- вимірювальна мостова схема принципово така ж як у лабораторного зрівноваженого моста;

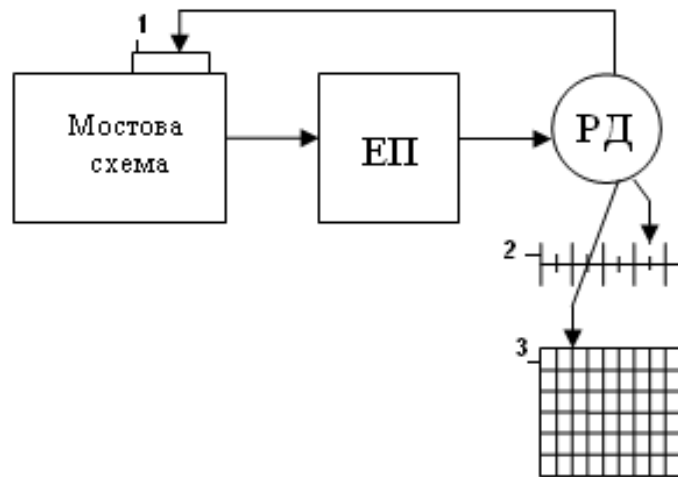


Рисунок 4.3. Структурна схема електронного автоматичного зрівноваженого моста:

1) рухомий повзунок реохорда; 2) шкала відлікового пристрою зі стрілкою; 3) діаграмний папір з пером самописця; ЕП – електронний підсилювач; РД – реверсивний двигун.

- електронний підсилювач (ЕП), призначений для підсилення сигналу, що надходить з мостової схеми, до величини, необхідної для приводу реверсивного двигуна (РД);
- реверсивний двигун призначений для зрівноваження моста, а також для переміщення стрілки показчика, і пера самописця.

Зі зміною опору термометра R_t на виході мостової схеми з'являється напруга розбалансу. Ця напруга поступає на фазочутливий підсилювач потужності ЕП, на виході якого включений реверсивний двигун РД, механічно зв'язаний з движком реохорда 1. Фаза напруги, що живить обмотку двигуна, залежить від збільшення або зменшення опору R_t по відношенню до попереднього положення рівноваги і визначає напрям обертання реверсивного двигуна, який переміщує движок реохорда в такому напрямку, який зменшить напругу розбалансу. Одночасно з обертанням реверсивного двигуна і переміщенням контакту реохорда пересувається вказуюча стрілка приладу і перо записуючого пристрою. Діаграмна стрічка 3 приводиться в рух синхронним електродвигуном. За допомогою редуктора зі змінними шестернями швидкість руху діаграми може бути змінена відповідно до швидкості процесу.

Прилади мають блоково-модульну конструкцію, що забезпечує технологічність їх виготовлення, високу надійність, простоту ремонту, можливість зміни або розширення функцій приладу простою заміною або додаванням відповідного функціонального модуля. Вони також зручні і для вирішення різних задач автоматичного регулювання. Автоматичні зрівноважені мости можуть використовуватися як показуючі, так і реєструючі прилади, а також для автоматичного регулювання температури.

Незрівноважені мости. За принципом роботи незрівноважений міст аналогічний зрівноваженому. Незрівноважений міст (рис. 4.4) відрізняється від зрівноваженого відсутністю змінного опору R_2 . Через відсутність балансування мосту при змінні опорі R_t міст буде розбалансовано.

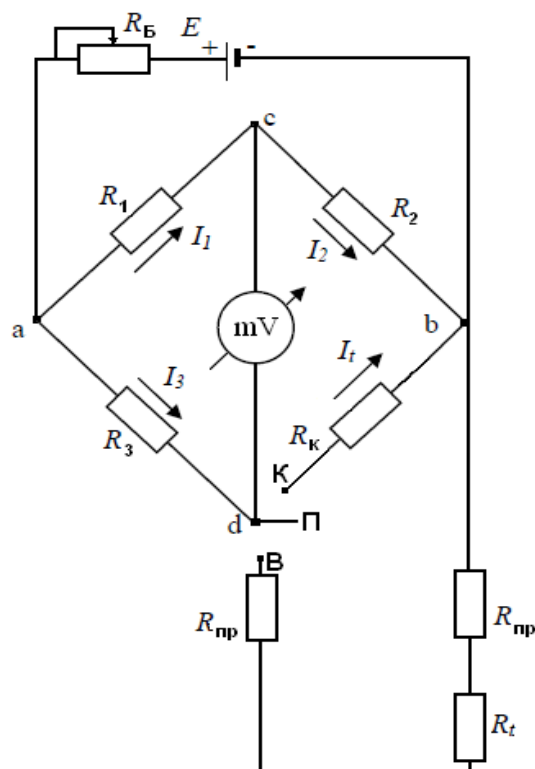


Рисунок 4.4. Принципова схема незрівноваженого моста.

Величина струму розбалансу в діагоналі моста визначатиме зміну опору термометра R_t . Тому у вимірювальну діагональ моста поміщено мілівольтметр. Таким чином, встановлюється безпосередній зв'язок між температурою, зміною опору термометра R_t і відхиленням стрілки мілівольтметра. Можливість безпосереднього відліку температури (без

балансування моста) є перевагою незрівноваженого моста перед зрівноваженим. Але величина потенціалу розбалансу буде також залежати і від живлячого струму. Тому неодмінною вимогою точності вимірювань є сталість напруги джерела E або різниці потенціалів, що підводиться до діагоналі живлення ab . Для підтримання різниці потенціалів сталою в ланцюг джерела живлення введено змінний опір (регулюємий) R_B . Для періодичної перевірки струму і його встановлення використовується опори R_K і R_B . Для цього в схемі передбачений крім режиму «Вимірювання» (В) і режим «Контроль» (К), який включають перемикачем П. Встановлення перемикача в положення К включає в мостову схему замість ТО R_t контрольний опір R_K . Якщо різниця потенціалів відповідає нормі, то стрілка покажчика мілівольтметра має зупинитися на спеціальній відмітці шкали мілівольтметра (червона відмітка). У разі відхилення стрілки від цієї відмітки значення розбалансу підганяється за допомогою опору R_B . Після цього перемикач П ставлять у положення В і по шкалі мілівольтметра виконують відлік температури ТО.

З причини залежності показань незрівноважених мостів від напруги живлення незрівноважені мости не використовуються для промислових вимірювань температури (використовуються для лабораторних вимірювань), але входять до вимірювальних схеми інших приладів (газоаналізатори, солеміри та інші).

Логометри. Логометри (рис. 4.5) є магнітоелектричними приладами, рухома система яких складається з двох жорстко скріплених рамок, розташованих під кутом одна до одної. До загальної осі рамок закріплена стрілка приладу. До рамок підводиться струм від загального джерела живлення.

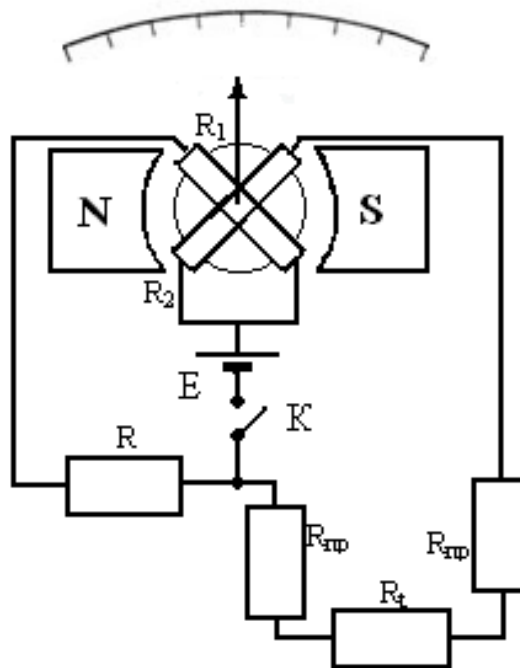


Рисунок 4.5. Принципова схема логометра.

Послідовно з вимірювальними рамками з одного боку включено ТО – R_t (і опори з'єднувальних проводів, які на схемі позначені R_{np}), а з другого боку постійний опір R . Опори рамок R_1 і R_2 рівні ($R_1 = R_2$). Таким чином струм в рамку R_1 поступає через постійний опір R , а в рамку R_2 через ТО – R_t . Кут повороту такої системи є функцією відношення струмів, що протікають в цих рамках: $\phi = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$.

Рухома система логометра перебуває в магнітному полі постійного магніту з полюсними наконечниками проточеними таким чином, що зазор між ними і осердям, яке розташовано між полюсними наконечниками, є нерівномірним. Нерівномірність зазору (в ньому рухаються рамки) зумовлює нерівномірність магнітної індукції. Направлення струмів I_1 і I_2 таке, що обертальні моменти будуть направлені один назустріч другому. Таким чином, зрівноваження моменту, що діє в одній з рамок, відбувається за рахунок моменту другої рамки. Якщо рамки мають однакові опори $R_1 = R_2$ і $R = R_t$, то струми I_1 і I_2 та обертальні моменти рівні, а рухома система не змінює свого положення. Зі зміною температури, а відповідно і опору термометра R_t через одну з рамок потече більший струм, рівність моментів

порушиться та рухома система почне обертання в сторону більшого з моментів.

Оскільки всі опори (R_1, R_2, R) постійні то кут повороту рухомої системи залежить тільки від величини опору термометра R_i : $\phi = f(R_i)$. У такому вигляді логометр має всі недоліки незрівноважених мостів, тобто його показання залежать від струму джерела живлення.

Для зменшення похибки від температурної зміни опору з'єднувальних проводів застосовують високоомні термометри опору і трипроводну схему включення ТО. У такому вигляді логометри поєднують переваги зрівноважених мостів (незалежність від коливань напруги джерела живлення) і переваги незрівноважених мостів (пряме вимірювання). Вживані в промисловості логометри можуть бути використані також для регулювання і сигналізації температури. Шкала логометрів градуйована в градусах Цельсія, що передбачає їх використання з термометрами опору лише певного градуювання.

4.1.2 Засоби вимірювання, що працюють в комплекті з термопарами (прилади для вимірювання термо-ЕРС).

Вимірювальні прилади, що працюють в комплекті з термопарами це мілівольтметри, потенціометри та нормувальні перетворювачі. Промисловість випускає різні типи переносних і стаціонарних потенціометрів і мілівольтметрів.

Мілівольтметри. Мілівольтметри є приладами магнітно-електричної системи, робота яких заснована на взаємодії між провідником із струмом і магнітним полем постійного магніту. У конструкції мілівольтметра (рис. 4.6) можна виділити магнітну та рухому системи. Магнітна система складається з підковоподібного магніту та полюсних наконечників і циліндричного осереддя 2. Присутність циліндричного осереддя, яке виготовлене з м'якої сталі у міжполюсному просторі магніту зменшує магнітний опір та формує радіальний магнітний потік. Рухома система складається з вимірювальної

рамки 1, що виготовлена з мідного провідника, і знаходиться в полі постійного магніту у просторі між полюсними наконечниками та осереддям. Рамка жорстко з'єднана із стрілкою показчика. Рамка являє собою прямокутник довжиною L , шириною $2R$, що створений з n витків тонкого мідного провідника, які з'єднані за допомогою лаку. Під час проходження струму через вимірювальну рамку виникає обертальний момент, який пропорційний струму.

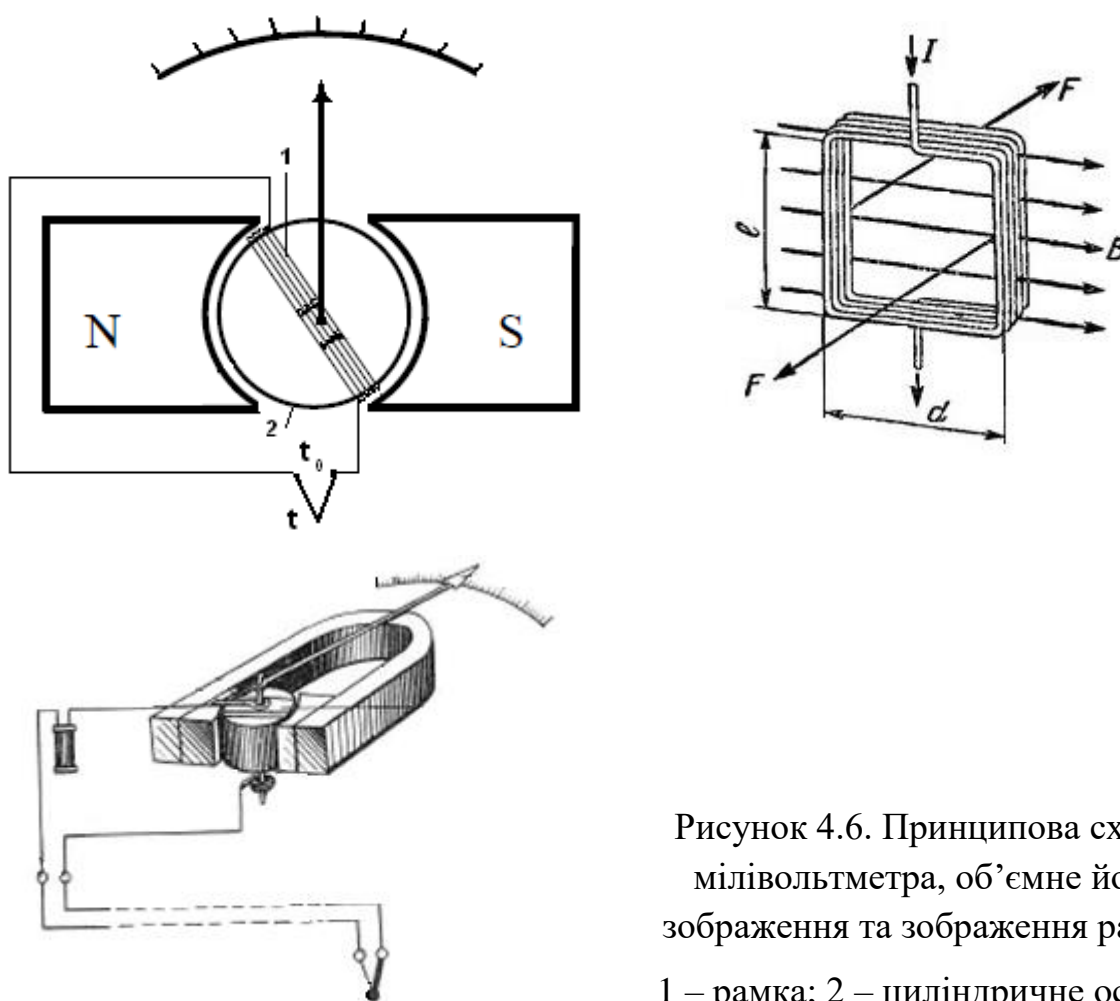


Рисунок 4.6. Принципова схема мілівольтметра, об'ємне його зображення та зображення рамки 1 – рамка; 2 – циліндричне осердя

Струм до рамки підводиться через спіральні пружини або металеві стрічки, що підвішують рамку. Зазвичай рамку закріплено на кернях, або на натягнутих нитках. Компенсаційний зв'язок таких приладів досягається за допомогою пружин, закріплених на осі рамки. Промисловістю випускаються

як показуючі так і самописні мілівольтметри. Шкали приладів можуть бути відградуйовані як у градусах так і в мілівольтах, або ж бути подвійними – на них наносять мілівольти і значення температури, що їм відповідають.

На рисунку 4.7. наведена схема підключення мілівольтметра до термопар. Рамка мілівольтметра, що є мідною, має відносно малий опір. Цей опір збільшують за допомогою додаткового резистора R_d . Включення манганінового резистора R_d послідовно з опором рамки дозволяє суттєво зменшити вплив температури зовнішнього середовища на показання мілівольтметра 1.

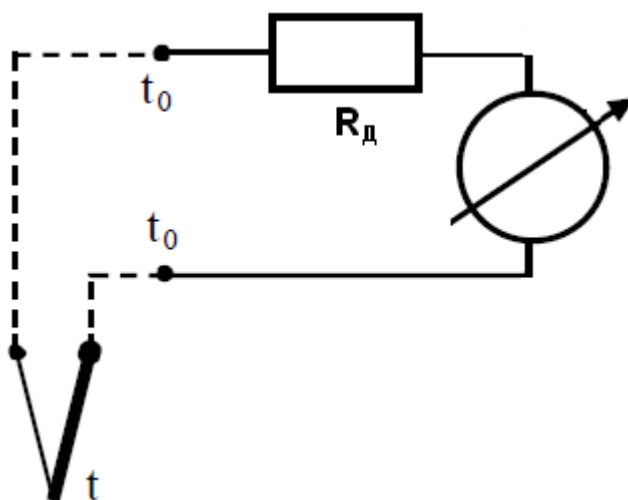


Рисунок 4.7. Схема підключення мілівольтметра до термопар.

Потенціометри. В основу роботи потенціометрів покладено компенсаційний метод вимірювання ТЕРС. Суть компенсаційного методу полягає в наступному: вимірювана ТЕРС компенсується відомою різницею потенціалів, яка створюється сторонніми джерелами струму. Прилади, що працюють за таким принципом називаються потенціометри. Найпростіша схема потенціометру (рис. 4.8) складається з двох електричних ланцюгів: 1 – ланцюг джерела (компенсаційний контур) і 2 – ланцюг термопар (вимірювальний контур).

В електричне коло компенсаційного контуру включено джерело живлення E і реохорд з регульованим опором R_p . Реохорд являє собою

змінний резистор з тонкого каліброваного дроту, що намотаний на циліндричний стрижень. Реохорд має рухомий контакт для зміни його опору.

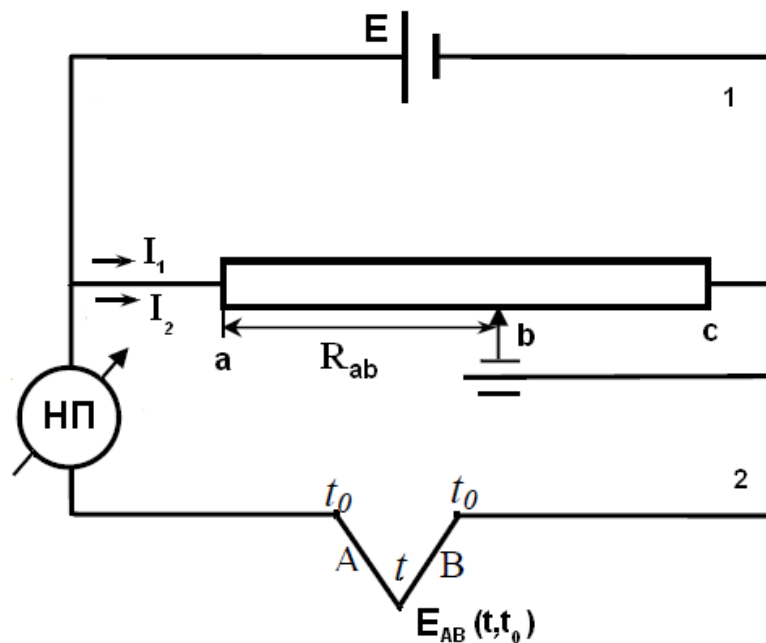


Рисунок 4.8. Принципова схема потенціометра.

Контур термопарі включає в себе термопару, нуль-прилад НП (це прилад з позначкою 0 в центрі шкали) і частину реохорда R_{ab} від точки a до рухомого контакту b повзунка реохорда. Термопара підключається так, щоб її ТЕРС була спрямована назустріч джерелу живлення, тобто щоб їх струми на калібрувальному опорі мали один напрям. Нуль-прилад, що включений в ланцюг термопарі, призначений для визначення розбалансу між першим і другим контурами. Тоді можна записати рівняння другого ланцюга згідно другому закону Кірхгофа:

$$E(t, t_0) = I_2(R_t + R_{НП} + R_{ПР} + R_{ab}) + I_1R_{ab}, \quad (4.6)$$

де I_2 – сила струму в контурі термопарі; I_1 – струм джерела живлення; R_t , $R_{НП}$, $R_{ПР}$, і R_{ab} – опори відповідно термопарі, нуль-приладу, з'єднувальних проводів і робочої ділянки реохорда ab . Звідси

$$I_2 = \frac{E(t, t_0) - I_1R_{ab}}{R_t + R_{НП} + R_{ПР} + R_{ab}} \quad (4.7)$$

Переміщати повзунок реохорда слід доти, доки струм в ланцюзі термопар у момент вимірювання стане рівним нулю ($I_2 = 0$). Це і є умова компенсації ЕРС термопар:

$$E(t, t_0) = I_1 R_{ab} \quad (4.8)$$

Таким чином, вимірювана ТЕРС дорівнює падінню напруги на робочій ділянці реохорда. Реохорд може мати шкалу, що відградує в одиницях напруги (мілівольти) або в градусах. В останньому випадку для кожної термопарі потрібна своя шкала.

Якщо струм джерела живлення I_1 підтримувати постійним, то напруга, що знімається з реохорда залежатиме тільки від опору ділянки реохорда R_{ab} . Звідси витікає важлива вимога до сталості струму джерела живлення. Для його контролю вводиться ланцюг нормального елемента.

Лабораторний потенціометр. Лабораторний потенціометр (рис. 4.9) складається з трьох ланцюгів: ланцюг джерела струму 1, ланцюг термопар 2 і ланцюг нормального елемента 3. Лабораторний потенціометр є високоточним приладом і застосовується для вимірювання ТЕРС в наукових дослідженнях, а також для перевірки термопар.

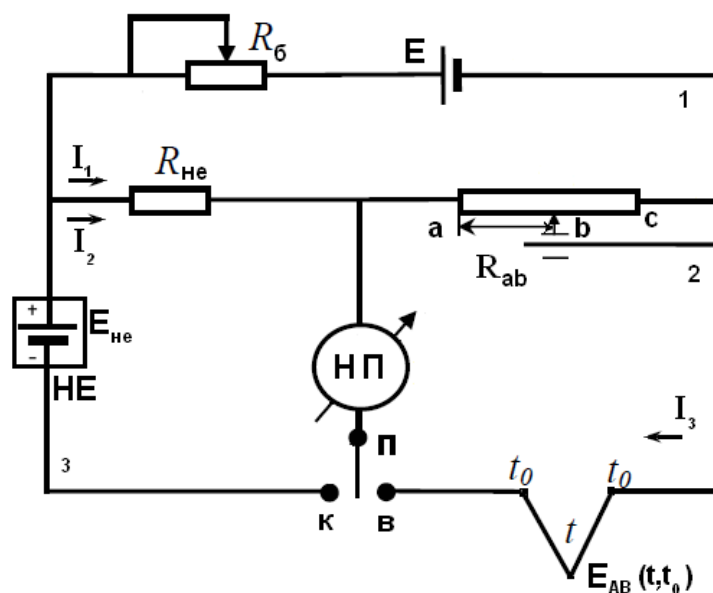


Рисунок 4.9. Принципова схема лабораторного потенціометра.

Ланцюг нормального елемента призначений для періодичного контролю і установки робочого струму в ланцюзі 1. Для цієї мети служить нормальний елемент НЕ і опір навантаження $R_{не}$. Нормальний елемент це гальванічне джерело струму, що характеризується високою стабільністю ЕРС за короткочасного навантаження, зазвичай це елементи Вестона.

Контроль і підтримування робочого струму здійснюється наступним чином. Перемикач П ставиться в положення К (“контроль”) і зіставляють ЕРС нормального елемента з падінням напруги джерела живлення Е на постійному резисторі $R_{не}$. У разі їх відмінності нуль-прилад покаже їх неузгодження (стрілка нуль-приладу не знаходиться на нульовій відмітці). Для усунення неузгодження повзунок реохорда R_B слід переміщати до тих пір поки стрілка нуль-приладу не встановиться на нульовій відмітці. Для вимірювання ТЕРС перемикач П ставлять в положення В «вимірювання» і виконують вимірювання температури відповідно потенціометричного методу.

Автоматичні потенціометри. Автоматичні потенціометри відрізняються від переносних тим, що у них повзунок реохорда переміщається не в ручну, а за допомогою спеціального пристрою – реверсивного двигуна. В якості нуль-приладу використовують електронний підсилювач, який на своєму виході має модулятор для перетворення сигналу неузгодження в змінну напругу. Електронний підсилювач керує роботою реверсивного двигуна, який переміщає повзунок реохорда в ту або іншу сторону в залежності від знаку сигналу розбалансу з підсилювача, що відновлює таким чином рівновагу схеми. Також реверсивний двигун призначений для переміщення стрілки показуючого пристрою та/або пера самописця. Діаграмний папір переміщує додатковий синхронний двигун.

Вимірювальні схеми всіх автоматичних потенціометрів передбачають автоматичне введення поправки на температуру холодного спаю. З цією метою в автоматичних потенціометрах застосовують мостову схему.

Структурна схема автоматичного потенціометра схожа на структурну схему електронного автоматичного моста, що розглянутий вище.

Нормувальні перетворювачі. Нормувальні перетворювачі (нормалізатори) – це пристрої, що перетворюють сигнали від первинних перетворювачів, які не мають уніфікованого виходу, в сигнали уніфікованих діапазонів. Для аналогових сигналів такими діапазонами є, як правило, 0...5 В, 0...10 В, 0...20 мА, 4...20 мА або струмова петля. Для дискретних сигналів – сигнали ТТЛ-рівня (ТТЛ – транзисторно-транзисторна логіка) з діапазоном 0...5 В. ТТЛ-сигнали можуть мати лише два стани: високий – тобто логічна 1, що відповідає +5 В, і низький – тобто логічний 0, що відповідає 0 В.

Струмова петля – спосіб передачі інформації за допомогою вимірюваних значень сили електричного струму. Аналогова струмова петля використовується для передачі аналогового сигналу по парі дротів. Застосовується зміщений діапазон 4...20 мА, тобто найменше значення сигналу (наприклад, 0) відповідає струму 4 мА, а найбільше – 20 мА. Нульове значення струму в ланцюзі означає обрив лінії і дозволяє легко діагностувати таку ситуацію.

Конструктивно нормалізатори виконуються у вигляді окремих модулів, які можуть бути встановлені на панель або на стандартну DIN-рейку, на спеціальну монтажну панель (крос-плату) або безпосередньо в арматуру первинного датчика. Нормалізатори можуть бути як одноканальними, так і багатоканальними. У останньому випадку вони можуть мати декілька незалежних каналів, або можуть бути побудовані по схемі з мультиплексуванням. Нормалізатори можуть мати як фіксовані діапазони вхідних і вихідних сигналів, так і такі, що налаштовуються. Налаштування параметрів нормалізаторів, як правило, проводиться за допомогою комп'ютера і спеціальних програмних засобів.

Нормалізатор є додатковою ланкою вимірювальної системи. Як усякий додатковий елемент він привносить і додаткову похибку в систему, а також збільшує вартість вимірювального каналу.

Нормувальний перетворювач для термопар або термометру опору призначено для перетворення сигналу з термопари в уніфікований сигнал постійного струму 4...20 мА або 0...20 мА. Деякі моделі перетворювачів мають сигнал на виході 0...10 В. Їх найчастіше застосовують для введення інформації в мікропроцесори, комп'ютери чи системи автоматичного керування.

Таким чином, нормувальні перетворювачі реалізують метод вимірювання електричного параметра і посилення слабкого сигналу; здійснюють лінеаризацію нелінійних характеристик термодатчиків; нормують сигнал і приводять його до уніфікованого виду; зменшують вплив електромагнітних перешкод; знижують вимоги до з'єднувальних провідників і скорочують витрати на них. Застосування нормуючих перетворювачів дозволяє спростити номенклатуру вживаних вторинних приладів за рахунок уніфікації сигналів, що використовуються в системі.

4.1.3 Промислові універсальні вимірювальні прилади.

Багатофункціональні вимірювачі, які випускаються сучасною промисловістю це прилади, дозволяють приєднання ряду первинних перетворювачів до вторинного приладу. Такі прилади призначені для вимірювання температури та інших фізичних параметрів (тиску, вологості, витрат, рівня тощо), значення яких зовнішніми датчиками може бути перетворене на сигнали постійного струму або напруги. Пристрої застосовуються для вимірювання параметрів технологічних процесів в різних галузях промисловості, комунального та сільського господарства. Пристрій може застосовуватися в якості звичайного індикатора вимірюваного технологічного параметра.

Універсальні вимірювальні прилади сконструйовані на основі мікропроцесорної схеми і, фактично, являють собою спрощений мікроконтролер. Пристрої конструктивно виконані у корпусі, що призначений для щитового, настінного кріплення або кріплення на DIN-рейку. Всі елементи пристрою розміщені на друкованих платах. На передній панелі розміщені клавіші керування пристроєм, цифрові табло та світлові індикатори.

Пристрої передбачають можливість приєднання до універсальних входів різноманітних датчиків. Перетворення сигналів, одержаних від датчиків, у показання значення технологічного параметру на табло забезпечується внесеними у постійну пам'ять приладу градуювальними таблицями та градуювальними кривими. Номенклатура датчиків, які можливо використовувати з даною моделлю приладу зазначена у його паспорті і визначається наявністю градуювальної таблиці такого датчика у пам'яті приладу. Переважна більшість приладів має градуювальні таблиці усіх основних типів термометрів опору та термопар, які випускаються промисловістю. Окрім того, до універсального входу приладу передбачається можливість подачі сигналів первинних нормувальних перетворювачів.

Зовнішній вигляд деяких промислових універсальних вимірювальних приладів, які випускаються українськими підприємствами, подано на рисунках 4.10 – 4.12.

Вибір типу датчика, який планується застосувати, задається в налаштуваннях приладу. У приладах передбачений режим налаштування, призначений для встановлення і записування до незалежної пам'яті пристрою програмованих параметрів, які необхідні під час експлуатування, зокрема типів датчиків, що використовуються. Для активізації режиму налаштувань на передній панелі приладу передбачена кнопка «ПРОГ», «МЕНЮ» або аналогічна. Послідовність дій по вибору типу датчику не є типовою і залежить від самого приладу, тому слід скористатися інструкцією з

експлуатації. Встановлені значення параметрів зберігаються в пам'яті пристрою при вимиканні живлення.



Рисунок 4.10. Вимірювач двоканальний ОВЕН 2TRM0 (виконання для монтажу на DIN рейку)



Рисунок 4.11. Вимірювач-регулятор технологічних параметрів ПРОМПРИЛАД TRC 02 Універсал (виконання для щитового монтажу)



Рисунок 4.12. Універсальний багатофункціональний двоканальний індикатор-регулятор МІКРОЛ ІТМ-20 (виконання для щитового монтажу)

Для послаблення впливу зовнішніх імпульсних завад на експлуатаційні характеристики їх роботи застосовується цифрова фільтрація результатів вимірювань. Крім того, у деяких випадках у функції приладу також внесена можливість роботи у якості позиційного, пропорційного або ПД регулятора.

4.2 Опис лабораторних засобів та обладнання

Лабораторна установка складається з двох окремо змонтованих модулів. Основним модулем установки є стенд (рис. 4.13.а), який має в своєму складі універсальний вимірювач-регулятор ОВЕН ТРМ 202 1, частина контактної групи якого виведена на передню панель. Другим модулем установки (рис. 4.13.б) є блок нагрівання який має в своєму складі терморегулятор РТУ-16/D та технологічні отвори для встановлення термоелектричних перетворювачів. Нагрівальний елемент модуля термічно ізольований від корпусу.

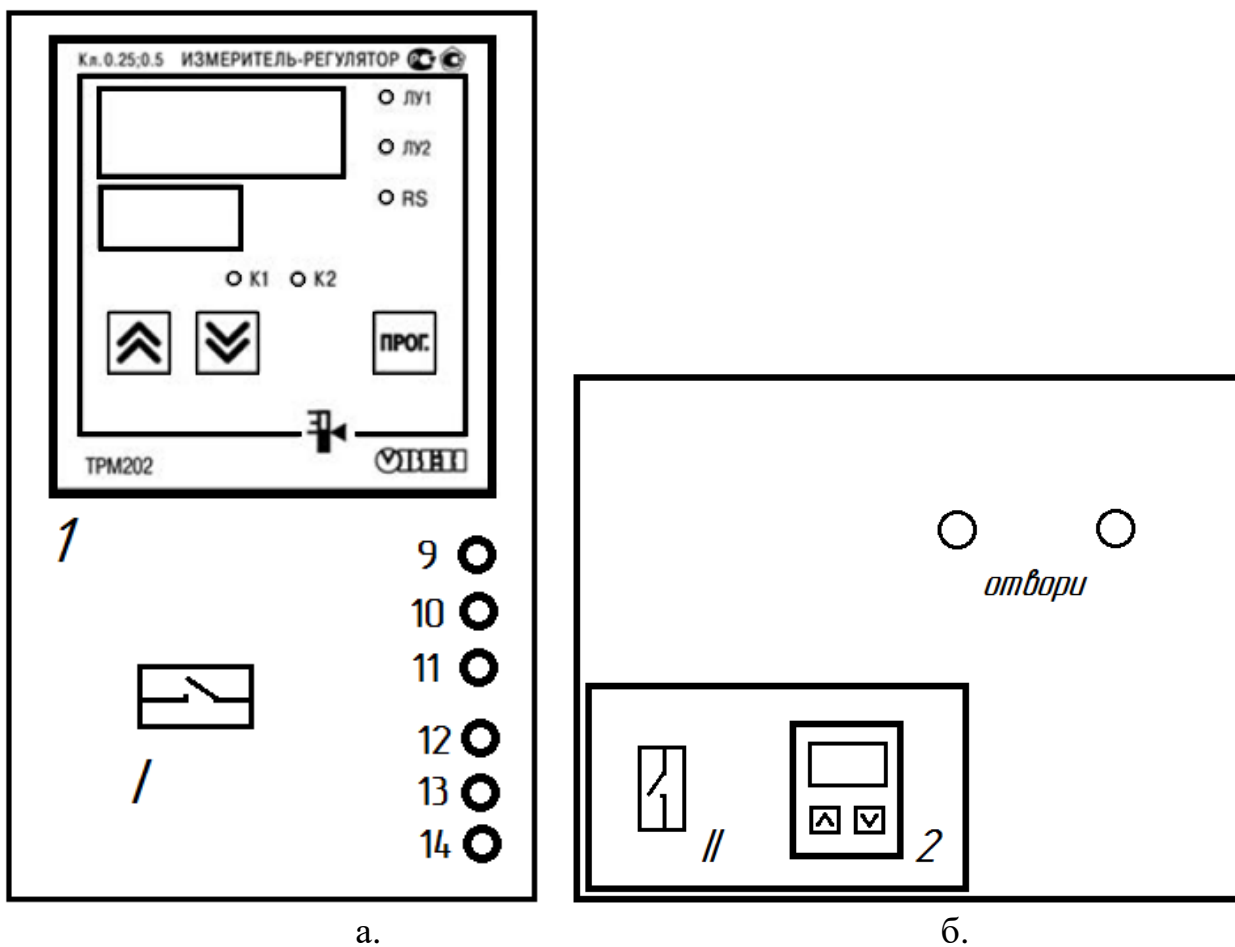


Рисунок 4.13. Схема лабораторної установки
а) модуль вимірювання, б) модуль нагрівання.

Живлення модулю вимірювання забезпечується увімкненням тумблера *I*, модулю нагрівання – увімкненням тумблера *II*. Установка призначена для підключення та налаштування термоелектричних перетворювачів та інших приладів, які формують вихідні сигнали, передбачені державним стандартом приладів. Нумерація клем на передній панелі модуля нагрівання установки відповідає їх нумерації у контактній групі наявного приладу.

Підключення термометрів опору до установки здійснюється за схемою, поданою на рисунку 4.14.а, підключення термопар здійснюється за схемою, поданою на рисунку 4.14.б і в.

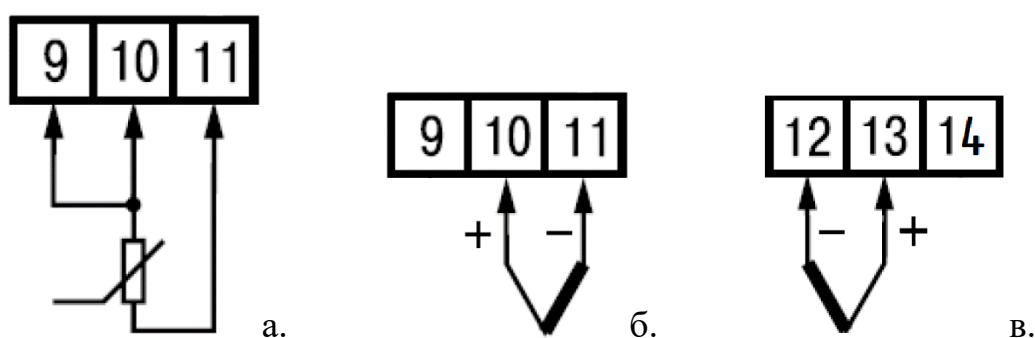


Рисунок 4.14. Схема підключення термоелектричних перетворювачів до лабораторного стенду:

а) підключення термометру опору; б) підключення термопар; в) підключення термопар до приладу, який працює в режимі мілівольтметра.

4.3 Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи

Загальні заходи безпеки, яких треба дотримуватись під час виконання лабораторних робіт у лабораторному приміщенні наведені у Додатку А.

Під час виконання роботи «Вторинні прилади термоелектричних перетворювачів» слід враховувати нижченаведені відомості та дотримуватися наступних вимог.

Факторами небезпеки установки, які присутні на установці є:





- напруга 220 вольт.
- температура до 120 °С



Під час виконання лабораторних робіт категорично забороняється:


- виконувати на установці операції, які не передбачені ходом роботи;

- працювати з установкою в верхньому одязі;
- працювати на несправній установці та проводити самостійне усунення несправностей установки;
- змінювати будь-які інші налаштування на модулі нагрівання;
- змінювати на приладі I будь-які інші налаштування, крім тих, які передбачені ходом роботи;
- вмикати під'єднаний до установки персональний комп'ютер.
- проводити будь-які роботи на установці без дозволу викладача або відповідального інженерного працівника лабораторії.

4.4 Послідовність виконання роботи


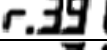
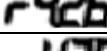

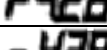
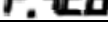
1. Ознайомитися з лабораторною установкою.
2. Увімкнути модуль нагрівання пакетним вимикачем II.
3. Визначити тип і модель одержаного термоперетворювача і занести ці дані до протоколу роботи (таблиці 4.3, 4.4).
4. Якщо термоперетворювачем є термометр опору, то виконати наступні дії:
 - 4.1. Приєднати термометр опору до стенду за трипроводною схемою. Жовтий провід приєднати до клем 11, синій і коричневий проводи приєднати до клем 9 і 10 відповідно.
 - 4.2. Натиснути на приладі кнопку «ПРОГ» та утримувати її протягом 6 секунд. Прилад перейде в режим налаштування.
 - 4.3. Використовуючи стрілки  та  вибрати на нижньому (зеленому) цифровому показуючому пристрої (цифровому індикаторі) режим налаштування датчиків  (Lu.In).
 - 4.4. Послідовно натискаючи кнопку «ПРОГ», вибрати на верхньому (червоному) цифровому показуючому пристрої (цифровому індикаторі) команду встановлення типу першого датчика  (In.t1).

4.5. Використовуючи стрілки  та  вибрати на нижньому цифровому індикаторі позначення, яке відповідає даному термоперетворювачу згідно таблиці 4.1. Дане позначення занести до таблиці 3 протоколу роботи.

Примітка. Символ між знаком  та наступними цифрами має велике значення для ідентифікації термоперетворювача (див. табл. 4.1).

Таблиця 4.1.

Позначення типу вхідного датчика для приладу ОВЕН ТРМ 202 (термометри опору)





Тип термометру опору	Позначення для приладу
Pt 50 ($\alpha=0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	
Pt 100 ($\alpha=0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	
50П ($\alpha=0,00391 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	
100П ($\alpha=0,00391 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	
46П ($\alpha = 0,00428 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	
Cu 100 ($\alpha=0,00426 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	
Cu 50 ($\alpha=0,00426 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	
53М ($\alpha = 0,00426 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	
50М ($\alpha=0,00428 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	
100М ($\alpha=0,00428 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	

4.6. Натиснути кнопку «ПРОГ» один раз для збереження замінених налаштувань.

4.7. Натиснути кнопку «ПРОГ» та утримувати її протягом 6 секунд. Прилад перейде в початок режиму налаштування.

4.8. Використовуючи стрілки  та  вибрати на нижньому табло команду виходу з режиму налаштування  (LuOp).

4.9. Однократно натиснути кнопку «ПРОГ». Прилад з даним перетворювачем готовий до вимірювань.

- 4.10. Встановити термометр опору у вказаний у завданні отвір модуля нагрівання.
- 4.11. Провести вимірювання температури об'єкту нагрівання в точках на приладі 2, які задані викладачем. Результат вимірювання температури занести до протоколу лабораторної роботи (таблиця 4.3).
- 4.12. Провести 3-5 вимірювань температури з досліджуваним термоперетворювачем в заданих точках.
5. Якщо термоперетворювачем є термоелектричний термометр (термопара), то:
- 5.1. Приєднати термопару до стенду з дотриманням полярності. Синій провід приєднати до клеми 11, коричневий провід – до клеми 10.
- 5.2. Натиснути на приладі кнопку «ПРОГ» та утримувати її протягом 6 секунд. Прилад перейде в режим налаштування.
- 5.3. Використовуючи стрілки  та  вибрати на нижньому (зеленому) табло режим налаштування датчиків **LuIn** (Lu.In).
- 5.4. Послідовно натискаючи кнопку «ПРОГ», вибрати на верхньому (червоному) цифровому індикаторі команду встановлення типу термоперетворювача **In.t1** (In.t1).
- 5.5. Використовуючи стрілки  та  вибрати на нижньому цифровому індикаторі позначення, яке відповідає даному термоперетворювачу згідно таблиці 2. Дане позначення занести до таблиці 4 протоколу роботи.

Таблиця 4.2.

**Позначення типу вхідного датчика для приладу ОВЕН ТРМ 202
(термопари)**

Тип термопари	Позначення для приладу
ТВР (А-1)	E_R1
ТВР (А-2)	E_R2
ТВР (А-3)	E_R3
ТПР (В)	E_b

ТЖК (J)	E..J
ТХА (K)	E..P
ТХК (L)	E..L
ТНН (N)	E..n
ТПП (R)	E..r
ТПП (S)	E..S
ТМК (T)	E..t

5.6. Натиснути кнопку «ПРОГ» один раз для збереження заміненних налаштувань.

5.7. Натиснути кнопку «ПРОГ» та утримувати її протягом 6 секунд. Прилад перейде в початок режиму налаштування.

5.8. Використовуючи стрілки  та  вибрати на нижньому табло команду виходу з режиму налаштування $LuOp$ (LuOp).

5.9. Однократно натиснути кнопку «ПРОГ». Прилад з даним перетворювачем готовий до вимірювань.

5.10. Встановити термопару у вказаний у завданні отвір модуля нагрівання.

5.11. Провести вимірювання температури об'єкту нагрівання в точках на приладі 2, які задані викладачем. Результат вимірювання температури занести до протоколу лабораторної роботи (таблиця 4.3).

5.12. Провести 3-5 вимірювань температури з досліджуваним термоперетворювачем в заданих точках.

Таблиця 4.3.

Результати дослідження термометрів опору.

Тип	Дослід 1		Дослід 2		...	Дослід N	
	T, °C	R, Ом	T, °C	R, Ом		T, °C	R, Ом
					...		
					...		
					...		

Результати дослідження термопар.

Тип	Позначення на табло ТРМ 202	Дослід 1				Дослід 2				⋮	Дослід N			
		$T_B, ^\circ\text{C}$	E_B, mV	$T_{X,C}, ^\circ\text{C}$	ΔE	$T_B, ^\circ\text{C}$	E_B, mV	$T_{X,C}, ^\circ\text{C}$	ΔE		$T_B, ^\circ\text{C}$	E_B, mV	$T_{X,C}, ^\circ\text{C}$	ΔE
										⋮				
										⋮				
										⋮				

4.5 Оброблення та аналізування результатів. Оформлення звіту

Для досліджуваних термометрів опору визначити опір термометру за даної температури. Результати обчислень занести до відповідних граф таблиці 4.3. Опір термометру визначити або за градуювальними таблицями (додатки Г, Д, Е.) або за характеристичною кривою (технічні характеристики термометрів наведені у таблиці 4.1).

Для досліджуваних термопар з градуювальної таблиці (додатки Б, В.) визначити термо-ЕРС термопари, поправку за температурою холодного спаю, яка була автоматично додана. Результати обчислень занести до відповідних граф таблиці 4.4.

Звіт з роботи повинен містити:

- тему та мету роботи;
- короткі теоретичні відомості;
- опис лабораторної установки та методик проведення вимірювань;
- таблиці отриманих результатів, зокрема визначені типи термоелектричних перетворювачів та відповідні ним налаштування вторинного приладу, результати вимірювань та розрахунків;
- аналіз отриманих результатів та основні висновки.

Контрольні запитання

1. Наведіть класифікацію вторинних приладів для вимірювання термо-ЕРС та електричних термометрів опору.
2. Які вторинні прилади працюють в комплекті з термометрами опору?
3. Які будова та принцип дії логометра?
4. Які будова та принцип дії зрівноваженого моста.
5. Як підключити термометр опору за трипровідною схемою?
6. Які будова та принцип дії автоматичного моста?
7. Які будова та принцип дії незрівноваженого моста?
8. Що таке нормуючі перетворювачі термометрів опору та навіщо їх використовують?
9. Які вторинні прилади працюють в комплекті з термопарами?
10. Які будова та принцип дії мілівольтметра?
11. В чому полягає потенціометричний метод вимірювання термо-ЕРС?
12. Які будова та принцип дії лабораторного потенціометра?
13. Які будова та принцип дії автоматичного потенціометра?
14. Що таке нормуючі перетворювачі термо-ЕРС та навіщо їх використовують?
15. Які способи зменшення похибок при вимірюванні температури відомі?

Список рекомендованой литературы

1. Чистофорова Н.В. Технические измерения и приборы. Ч.1. Измерение теплоэнергетических параметров: Уч. пособие [Текст] / Н.В. Чистофорова, А.Г. Колмогоров. – Ангарск: АГТА. 2008. – 200 с.
2. Лукінюк М. В. Технологічні вимірювання та прилади: Навч. посіб. [Текст] / М.В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 436 с.
3. Раннев Г.Г. Методы и средства измерений: учебник для вузов [Текст]/ Г.Г. Раннев.- М.: Изд. центр «Академия», 2003.
4. Кузнецов Н.Д. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам: учеб. пособие для вузов [Текст]/ Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 328 с.
5. Промислові засоби автоматизації. Ч.1. Вимірювальні пристрої: навчальний посібник [Текст]/ А.К.Бабіченко, В.І. Тошинський, В.С. Михайлов та ін.; Х.: НТУ"ХП", 2001. – 470с.
6. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств [Текст]/ М.В. Кулаков. – М.: Машиностроение, 1983. – 424 с.
7. Полоцкий Л.М. Автоматизация химических производств. Теория, расчет и проектирование систем автоматизации [Текст]/ Л.М. Полоцкий, Г.И. Лапшенков. – М.: Химия, 1982. – 296 с.
8. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник: Пер. с англ. [Текст]/ Под ред. Е.Л. Свинцова – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
9. Измерения в промышленности: справ. изд. [Текст]/ под ред. П. Профоса. Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1980. – 648 с.
10. Каталог средств измерения: ООО "ИТЦ ПромКомплектИнжиниринг" : [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.pribor-s.ru/index.php>.

Додаток А. Заходи безпеки під час виконання лабораторних робіт

Цикл лабораторних робіт з дисципліни «Технологічні вимірювання і прилади» виконуються у лабораторії технологічних вимірювань та моделювання кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів хіміко-технологічного факультету, де розміщене спеціалізоване лабораторне обладнання. Обладнання живиться електричним струмом напругою 220 В. Тому при виконанні лабораторних робіт слід дотримуватися заходів безпеки наступних інструкцій.

Інструкція

з техніки безпеки під час виконання лабораторних робіт у лабораторії Технологічних вимірювань та моделювання кафедри КХТП

1. Ця інструкція містить основні вимоги з охорони праці і має на меті створення безпечних умов праці та навчання під час експлуатації лабораторних установок у лабораторії Технологічних вимірювань та моделювання кафедри КХТП.
2. Ознайомлення з заходами з техніки безпеки підтверджується підписом студента у контрольному листі (журналі) з техніки безпеки. Особи, які не пройшли інструктажу з техніки безпеки, до роботи в лабораторії не допускаються.
3. Студенти, які починають працювати на лабораторному устаткуванні повинні:
 - ознайомитись з місцем розташування апаратури та приладів лабораторної роботи;
 - ознайомитися з ходом роботи або інструкцією по експлуатації обладнання;

- отримати від викладача необхідний матеріал для виконання лабораторної роботи.
4. Вмикати обладнання дозволяється тільки після отримання дозволу викладача чи особи яка відповідає за проведення лабораторних робіт.
 5. Вмикання та вимикання обладнання здійснювати згідно із порядком, що описаний у ході роботи або інструкції з експлуатації лабораторного устаткування.
 6. Слід пам'ятати що лабораторне устаткування знаходиться під напругою, яка може бути небезпечною для життя людини.
 7. Категорично забороняється:
 - виконання на обладнанні операції, які не передбачені планом роботи;
 - виконання робіт на установках, які мають будь-які несправності;
 - самостійні дії студентів по усуненню несправностей обладнання;
 - доступ студентів до монтажної зони лабораторних стендів;
 - залишення увімкненого обладнання без нагляду.
 8. Після виконання роботи студенти зобов'язані:
 - навести порядок на робочому місці;
 - здати викладачу додатковий матеріал, що було отримано для проведення лабораторної роботи;
 - відзвітуватись про виконану роботу викладачу.

ІНСТРУКЦІЯ

про заходи пожежної безпеки у лабораторіях, учбових та робочих приміщеннях кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів хіміко-технологічного факультету

1. Всі студенти повинні знати та ретельно виконувати «Загальні правила пожежної безпеки в КПІ ім. Ігоря Сікорського».
2. Завідуючий кафедрою та завідуючий лабораторією відповідають за забезпечення пожежної безпеки всіх приміщень кафедри та за справність протипожежного обладнання та сигналізації.
3. Все електричне обладнання, яке знаходиться в лабораторіях та приміщеннях кафедри, повинно мати заземлення.
4. В усіх приміщеннях повинно дотримуватись чистоти, не займати приміщення непотрібними меблями, обладнанням та матеріалами.
5. Всі двері основних та додаткових виходів утримувати у стані швидкого відкривання.
6. Зберігання та використання горючих та легкозаймистих рідин у приміщеннях кафедри забороняється.
7. Ремонт електричного обладнання проводити у строгій відповідності з правилами пожежної безпеки.
8. Всі електрозахисти повинні знаходитися у закритому положенні, не захарашені сторонніми предметами.
9. Коридори, проходи, тамбури, евакуаційні виходи та підходи до першочергових засобів пожежогасіння, а також комунікаційні ніші повинні бути постійно вільними, чистими та нічим не зайнятими.
10. Відповідальні особи перед закриттям приміщень повинні ретельно оглянути їх, забезпечити прибирання виробничих відходів, перевірити якість перекриття води, газу, відключити напругу електромережі, перевірити стан пожежної сигналізації та засобів пожежогасіння.

11. Від усіх приміщень мати два комплекти ключів. Один комплект здавати черговому, а інший – зберігати в певному місці, яке відомо обслуговуючому персоналу.
12. Студенти повинні знати та ретельно виконувати «Загальні правила техніки безпеки в КПІ ім. Ігоря Сікорського», про що вони ставлять свій підпис у відповідному контрольному листі з техніки безпеки перед початком проведення циклу лабораторних робіт. Студенти, які не пройшли інструктаж і не поставили підпис у контрольному листі, до роботи не допускаються.

**Додаток Б. Градувальна характеристика термоелектричних
термометрів ТХК (L) у діапазоні температур $-20 \div +200^{\circ}\text{C}$**

$T, ^{\circ}\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Термо-ЕРС, мВ									
-20	-1,27	-1,35	-1,39	-1,46	-1,52	-1,58	-1,64	-1,70	-1,77	-1,83
-10	-0,64	-0,70	-0,77	-0,83	-0,89	-0,96	-1,02	-1,08	-1,14	-1,21
-0	0	-0,06	-0,13	-0,19	0,26	-0,32	-0,38	0,45	-0,51	-0,58
+0	0	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14
90	6,21	6,29	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87
100	6,95	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62
110	7,69	7,77	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,35
120	8,43	8,50	8,58	8,65	8,73	8,80	8,88	8,95	9,03	9,10
130	9,18	9,25	9,33	9,40	9,48	9,55	9,63	9,70	9,78	9,85
140	9,93	10,00	10,08	10,16	10,23	10,31	10,38	10,46	10,54	10,61
150	10,69	10,77	10,85	10,92	11,00	11,08	11,15	11,23	11,31	11,38
160	11,46	11,54	11,62	11,69	11,77	11,85	11,93	12,00	12,08	12,16
170	12,24	12,32	12,40	12,48	12,55	12,63	12,71	12,79	12,87	12,93
180	13,03	13,11	13,19	13,27	13,36	13,44	13,52	13,60	13,68	13,76
190	13,84	13,92	14,00	14,08	14,16	14,23	14,33	14,42	14,50	14,58
200	14,66	14,74	14,82	14,90	14,98	15,06	15,14	15,22	15,30	15,38

**Додаток В. Градувальна характеристика термоелектричних
термометрів ТХА (К) у діапазоні температур $-20 \div +200^{\circ}\text{C}$**

$T, ^{\circ}\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Термо-ЕРС, мВ									
-20	-0,78	-0,82	-0,85	-0,89	-0,93	-0,97	-1,01	-1,04	-1,08	-1,12
-10	-0,39	-0,43	-0,47	-0,51	-0,55	-0,59	-0,62	-0,66	-0,70	-0,74
-0	0,00	-0,04	-0,08	-0,12	-0,16	-0,20	-0,24	-0,28	-0,31	-0,35
+0	0,00	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36
10	0,40	0,44	0,48	0,52	0,56	0,60	0,64	0,68	0,72	0,76
20	0,80	0,84	0,88	0,92	0,96	1,00	1,04	1,08	1,12	1,16
30	1,20	1,24	1,29	1,33	1,37	1,41	1,45	1,49	1,53	1,57
40	1,61	1,65	1,69	1,74	1,78	1,82	1,86	1,90	1,94	1,98
50	2,02	2,06	2,11	2,15	2,19	2,23	2,27	2,31	2,35	2,40
60	2,44	2,48	2,52	2,56	2,60	2,64	2,69	2,73	2,77	2,81
70	2,85	2,89	2,93	2,98	3,02	3,06	3,10	3,14	3,18	3,23
80	3,27	3,31	3,35	3,39	3,43	3,47	3,52	3,56	3,60	3,64
90	3,68	3,72	3,77	3,81	3,85	3,89	3,93	3,97	4,01	4,06
100	4,10	4,14	4,18	4,22	4,26	4,30	4,34	4,39	4,43	4,47
110	4,51	4,55	4,59	4,63	4,67	4,72	4,76	4,80	4,84	4,88
120	4,92	4,96	5,00	5,04	5,08	5,12	5,17	5,21	5,25	5,29
130	5,33	5,37	5,41	5,45	5,49	5,53	5,57	5,61	5,65	5,69
140	5,74	5,78	5,82	5,86	5,90	5,94	5,98	6,02	6,06	6,10
150	6,14	6,18	6,22	6,26	6,30	6,34	6,38	6,42	6,46	6,50
160	6,54	6,58	6,62	6,66	6,70	6,74	6,78	6,82	6,86	6,90
170	6,94	6,98	7,02	7,06	7,10	7,14	7,18	7,22	7,26	7,30
180	7,34	7,38	7,42	7,46	7,50	7,54	7,58	7,62	7,66	7,70
190	7,74	7,78	7,82	7,86	7,90	7,94	7,98	8,02	8,06	8,10
200	8,14	8,18	8,22	8,26	8,30	8,34	8,38	8,42	8,46	8,50

**Додаток Г. Градувальна характеристика
термоперетворювачів опору типу ТСМ 50М в діапазоні
температур – 50 ÷ +200°C**

T, °C	Опір термоперетворювача, Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-50	39,240									
-40	41,405	41,190	40,975	40,755	40,540	40,325	40,110	39,890	39,675	39,460
-30	43,560	43,345	43,130	42,915	42,700	42,485	42,270	42,050	41,835	41,620
-20	45,710	45,495	45,280	45,065	44,850	44,635	44,420	44,205	43,990	43,775
-10	47,860	47,645	47,430	47,215	47,000	46,785	46,570	46,355	46,140	45,925
0	50,000	49,786	49,572	49,358	49,144	48,930	48,716	48,502	48,288	48,074
0	50,000	50,214	50,428	50,642	50,856	51,070	51,284	51,498	51,712	51,926
10	52,140	52,354	52,569	52,783	52,997	53,211	53,425	53,639	53,853	54,067
20	54,281	54,495	54,709	54,923	55,137	55,351	55,565	55,780	55,994	56,208
30	56,422	56,636	56,850	57,064	57,278	57,492	57,706	57,920	58,134	58,348
40	58,562	58,776	58,990	59,204	59,418	59,632	59,846	60,060	60,274	60,488
50	60,702	60,916	61,130	61,344	61,558	61,772	61,986	62,200	62,414	62,628
60	62,842	63,056	63,270	63,484	63,698	63,912	64,126	64,340	64,553	64,767
70	64,981	65,195	65,409	65,623	65,837	66,051	66,265	66,479	66,693	66,907
80	67,121	67,335	67,549	67,763	67,977	68,191	68,405	68,619	68,833	69,047
90	69,261	69,474	69,688	69,902	70,116	70,330	70,544	70,758	70,972	71,186
100	71,400	71,614	71,828	72,042	72,256	72,470	72,684	72,898	73,112	73,326
110	73,539	73,753	73,967	74,181	74,395	74,609	74,823	75,037	75,251	75,465
120	75,678	75,892	76,106	76,320	76,534	76,748	76,962	77,176	77,390	77,604
130	77,817	78,031	78,245	78,459	78,673	78,887	79,101	79,315	79,529	79,743
140	79,956	80,170	80,384	80,598	80,812	81,026	81,240	81,454	81,668	81,882
150	82,096	82,310	82,524	82,738	82,952	83,165	83,379	83,593	83,807	84,021
160	84,235	84,449	84,663	84,877	85,091	85,305	85,518	85,732	85,946	86,160
170	86,374	86,588	86,802	87,016	87,230	87,444	87,658	87,871	88,085	88,299
180	88,513	88,727	88,941	89,155	89,369	89,583	89,797	90,010	90,225	90,438
190	90,653	90,866	91,080	91,294	91,508	91,722	91,936	92,149	92,363	92,577
200	92,791									

**Додаток Д. Градувальна характеристика
термоперетворювачів опору типу ТСМ 10М*, ТСМ 100М в
діапазоні температур – 200 ÷ +200°C**

T, °C	Опір термоперетворювача, Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200	12,160									
-190	16,270	15,800	15,420	15,000	14,590	14,190	13,780	13,380	12,970	12,560
-180	20,610	20,170	19,730	19,290	18,850	18,420	17,980	17,550	17,120	16,700
-170	25,080	24,620	24,170	23,720	23,270	22,830	22,380	21,940	21,490	21,050
-160	29,620	29,170	28,710	28,260	27,800	27,350	26,890	26,440	25,990	25,530
-150	34,180	33,720	33,270	32,810	32,360	31,900	31,450	30,990	30,530	30,080
-140	38,730	38,280	37,820	37,370	36,920	36,460	36,000	35,550	35,090	34,640
-130	43,210	42,760	42,320	41,870	41,430	40,980	40,530	40,090	39,640	39,190
-120	47,690	47,250	46,800	46,350	45,900	45,450	45,000	44,550	44,100	43,650
-110	52,160	51,710	51,260	50,820	50,370	49,930	49,480	49,030	48,590	48,140
-100	56,610	56,170	55,720	55,280	54,830	54,390	53,940	53,500	53,050	52,600
-90	61,030	60,590	60,150	59,710	59,270	58,820	58,380	57,940	57,490	57,050
-80	65,420	64,980	64,540	64,100	63,660	63,220	62,790	62,350	61,910	61,470
-70	69,790	69,360	68,920	68,490	68,050	67,610	67,170	66,730	66,300	65,860
-60	74,150	73,710	73,280	72,850	72,410	71,970	71,540	71,100	70,670	70,230
-50	78,480	78,050	77,620	77,190	76,750	76,320	75,880	75,450	75,020	74,580
-40	82,810	82,380	81,950	81,510	81,080	80,650	80,220	79,780	79,350	78,920
-30	87,120	86,690	86,260	85,830	85,400	84,970	84,540	84,100	83,670	83,240
-20	91,420	90,990	90,560	90,130	89,700	89,270	88,840	88,410	87,980	87,550
-10	95,720	95,290	94,860	94,430	94,000	93,570	93,140	92,710	92,280	91,850
0	100,000	99,572	99,144	98,716	98,288	97,860	97,432	97,004	96,576	96,148
0	100,000	100,428	100,856	101,284	101,712	102,140	102,568	102,996	103,424	103,852
10	104,281	104,709	105,138	105,566	105,994	106,422	106,850	107,279	107,707	108,135
20	108,563	108,991	109,419	109,847	110,275	110,703	111,131	111,560	111,988	112,416
30	112,844	113,272	113,700	114,128	114,556	114,984	115,412	115,840	116,268	116,696
40	117,124	117,552	117,980	118,408	118,836	119,264	119,692	120,120	120,548	120,976
50	121,404	121,832	122,260	122,688	123,116	123,544	123,972	124,400	124,828	125,257
60	125,684	126,112	126,540	126,968	127,396	127,824	128,252	128,680	129,107	129,535
70	129,963	130,391	130,819	131,247	131,675	132,103	132,531	132,959	133,386	133,814
80	134,242	134,670	135,098	135,526	135,954	136,382	136,810	137,238	137,666	138,094
90	138,522	138,949	139,377	139,805	140,233	140,661	141,088	141,517	141,945	142,373
100	142,800	143,228	143,656	144,084	144,512	144,940	145,368	145,796	146,224	146,652
110	147,079	147,507	147,935	148,363	148,790	149,218	149,646	150,074	150,502	150,930
120	151,357	151,785	152,213	152,641	153,069	153,497	153,924	154,352	154,780	155,208
130	155,635	156,063	156,491	156,919	157,346	157,774	158,202	158,630	159,058	159,486
140	159,913	160,341	160,769	161,197	161,625	162,053	162,481	162,908	163,336	163,764
150	164,192	164,620	165,048	165,476	165,904	166,331	166,759	167,180	167,615	168,042
160	168,470	168,898	169,326	169,754	170,182	170,610	171,037	171,465	171,893	172,321
170	172,748	173,176	173,604	174,032	174,460	174,888	175,316	175,743	176,171	176,599

$T, ^\circ\text{C}$	Опір термоперетворювача, Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
180	177,026	177,454	177,882	178,310	178,738	179,166	179,594	180,021	180,449	180,877
190	181,305	181,733	182,160	182,588	183,016	183,444	183,872	184,299	184,727	185,155
200	185,583									

* Значення ділити на 10

**Додаток Е. Градувальна характеристика
термоперетворювачів опору типу ТСМ 23 ($R_0 = 53 \text{ Ом}$) в
діапазоні температур – $50 \div +180^\circ\text{C}$**

$T, ^\circ\text{C}$	Опір термоперетворювача, Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-50	41,71									
-40	43,97	43,74	43,52	43,29	43,07	42,84	42,61	42,39	42,16	41,94
-30	46,23	46,00	45,78	45,55	45,32	45,10	44,87	44,65	44,42	44,19
-20	48,48	48,26	48,03	47,81	47,58	47,36	47,13	46,90	46,68	46,45
-10	50,74	50,52	50,29	50,06	49,84	49,61	49,39	49,16	48,94	48,71
0	53,00	52,77	52,55	52,32	52,10	51,87	51,65	51,42	51,19	50,97
0	53,00	53,23	53,45	53,68	53,90	54,13	54,35	54,58	54,81	55,03
10	55,26	55,48	55,71	55,94	56,16	56,39	56,61	56,84	57,06	57,29
20	57,52	57,74	57,97	58,19	58,42	58,64	58,87	59,10	59,32	59,55
30	59,77	60,00	60,22	60,45	60,68	60,90	61,13	61,35	61,58	61,81
40	62,03	62,26	62,48	62,71	62,93	63,16	63,39	63,61	63,84	64,06
50	64,29	64,51	64,74	64,97	65,19	65,42	65,64	65,87	66,10	66,32
60	66,55	66,77	67,00	67,22	67,45	67,68	67,90	68,13	68,35	68,58
70	68,80	69,03	69,26	69,48	69,71	69,93	70,16	70,39	70,61	70,84
80	71,06	71,29	71,51	71,74	71,97	72,19	72,42	72,64	72,87	73,09
90	73,32	73,55	73,77	74,00	74,22	74,45	74,67	74,90	75,13	75,35
100	75,58	75,80	76,03	76,26	76,48	76,71	76,93	77,16	77,38	77,61
110	77,84	78,06	78,29	78,51	78,74	78,96	79,19	79,42	79,64	79,87
120	80,09	80,32	80,55	80,77	81,00	81,22	81,45	81,67	81,90	82,13
130	82,35	82,58	82,80	83,03	83,25	83,48	83,71	83,93	84,16	84,38
140	84,61	84,83	85,06	85,29	85,51	85,74	85,96	86,19	86,42	86,64
150	86,87	87,09	87,32	87,54	87,77	88,00	88,22	88,45	88,67	88,90
160	89,12	89,35	89,58	89,80	90,03	90,25	90,48	90,71	90,93	91,16
170	91,38	91,61	91,83	92,06	92,29	92,51	92,74	92,96	93,19	93,41
180	93,64									