

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

**Вимірювання неелектричних величин
електричними методами
Вимірювання переміщення та температури**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Кропивницький
2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

**Вимірювання неелектричних величин
електричними методами**
Вимірювання переміщення та температури

*Рекомендовано Вченою радою ЦНТУ
в якості навчального посібника для студентів,
які навчаються за спеціальністю
151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»*

Кропивницький
2022

Каліч В. М., Жесан Р. В., Мірошніченко М. С.

Вимірювання неелектричних величин електричними методами.
Вимірювання переміщення та температури : навч. посіб. Кропивницький :
ЦНТУ, 2022. 60 с.

*Рекомендовано Вченою радою Центральноукраїнського національного
технічного університету в якості навчального посібника для студентів, які
навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології» (протокол № 2 від 03.11.2022 р.)*

Рецензент: Сербул О. М., к. т. н., доцент.

Навчальний посібник розроблено відповідно до програми підготовки бакалаврів за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

У навчальному посібнику розглянуто основні відомості про вимірювання неелектричних величин електричними методами, наведено конструкції основних перетворювачів неелектричних величин в електричний сигнал, описано принцип їх дії та особливості застосування.

Подана будова лабораторних стендів, що використовуються для вимірювання переміщення та температури, наведені основні технічні характеристики використовуваних приладів, описана методика проведення лабораторних досліджень та обробки їх результатів.

Видання забезпечує засвоєння здобувачами вищої освіти теоретичного матеріалу, підготовку і виконання лабораторних робіт, може бути використане для самостійної роботи.

© В. М. Каліч, Р. В. Жесан, М. С. Мірошніченко, 2022
© ЦНТУ, 2022

ЗМІСТ

1. ВСТУП	7
2. ВИМІРЮВАЛЬНІ ГЕНЕРАТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ	10
2.1 Термоперетворювачі	10
2.2 П'єзоелектричні перетворювачі	10
2.3 Магнітоелектричні датчики Холла	12
2.4 Перетворювачі Віганда	14
2.5 Фотоелектричні перетворювачі	15
3. ПАРАМЕТРИЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ	17
3.1 Реостатні перетворювачі	17
3.2 Тензочутливі перетворювачі	18
3.3 Індуктивні перетворювачі	20
3.4 Магнітопружні перетворювачі	20
3.5 Індукційні перетворювачі	21
3.6 Ємнісні перетворювачі	23
3.7 Оптичні перетворювачі	25
4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА «ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДУКТИВНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ»	28
4.1 Мета роботи	28
4.2 Короткі теоретичні відомості	28
4.3 Опис лабораторної установки	35
4.4 Порядок виконання роботи	35
4.5 Обробка результатів і побудова графіків	39
4.6 Зміст звіту	40

4.7 Контрольні питання	40
5. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА «ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕМПЕРАТУРИ»	41
5.1 Мета роботи	41
5.2 Короткі теоретичні відомості	41
5.3 Прилади для вимірювання температури	49
5.4 Опис лабораторної установки	53
5.5 Порядок виконання роботи	55
5.6 Зміст звіту	56
5.7 Контрольні питання	57
6. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	58

1. ВСТУП

Велика частина фізичних величин відноситься до *неелектричних* (температура, вологість, освітленість, швидкість, прискорення, переміщення тощо). При вимірах таких величин часто виникають завдання дистанційного вимірювання, передачі, реєстрації та обробки вимірювальної інформації. Найкраще ці завдання вирішуються шляхом перетворення вимірюваної неелектричної величини $X_{н.е.}$ у електричний сигнал $X_{е.}$, пов'язаний з вимірюваною величиною однозначною функціональною залежністю $X_{е.} = f(X_{н.е.})$. Отриманий електричний сигнал вимірюється засобами електричних вимірювань або може бути переданий по лінії зв'язку на значну відстань.

Перетворення неелектричної величини у електричну здійснюється за допомогою *вимірювальних перетворювачів* (ВП) – датчиків.

Структурна схема будь-якого засобу вимірювання неелектричних величин електричними методами містить ВП.

На *Рис. 1.1* наведена структурна схема вимірювання тиску за допомогою ВП [6].

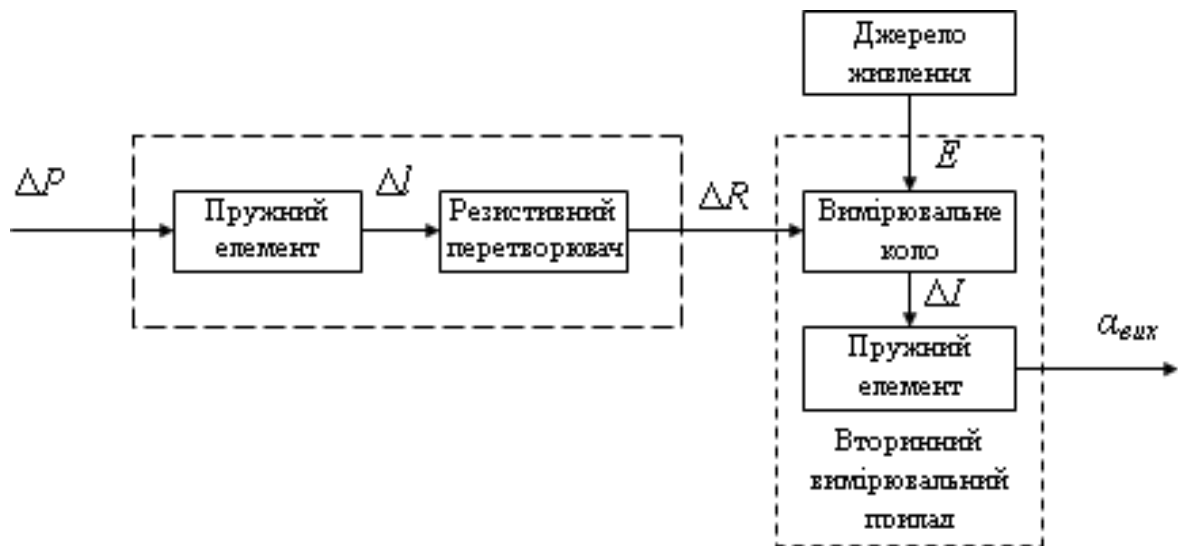


Рисунок 1.1 – Структурна схема вимірювання тиску

Деформація пружного елемента (мембрани) під дією вхідної величини (тиску) перетворюється в переміщення повзуна потенціометра. Резистивний потенціометр перетворює лінійне переміщення Δl у відповідну зміну опору ΔR , яка змінює струм на ΔI у лінії зв'язку, що фіксується вторинним

вимірювальним приладом. Послідовність вимірювальних перетворювань у структурній схемі буде мати вигляд:

$$\Delta P \rightarrow \Delta I \rightarrow \Delta R \rightarrow \Delta I \rightarrow \Delta a_{\text{вих}}.$$

ВП класифікують за родом вимірюваної величини (температури, тиску, вологості та ін.) та за принципом дії (генераторні, параметричні).

Найважливішими метрологічними характеристиками ВП є номінальна статична характеристика перетворення, чутливість, основна та додаткові похибки, динамічні характеристики та ін.

Промисловістю випускаються як окремі ВП неелектричних величин, так і прилади вимірювання неелектричних величин, невід'ємною частиною яких є відповідний ВП або датчик (англ. *sensor*).

Неелектрична величина, що вимірюється, може неодноразово перетворюватися для узгодження меж її змін з ВП, отримання більш зручного для ВП виду вхідного впливу тощо. Для виконання подібних перетворень в прилад вводять попередні перетворювачі одних неелектричних величин в інші неелектричні величини (наприклад, мембрани, анероїдні трубки, пружини і т. п.).

При великій кількості проміжних перетворень у приладах прямого перетворення значно зростає сумарна похибка. Для зниження похибки застосовують диференціальні ВП, які мають меншу адитивну похибку, меншу нелінійність функції перетворення та підвищену чутливість, порівняно з аналогічними недиференціальними перетворювачами. В диференціальних перетворювачах є два чутливих елементи, в одному з яких, під дією вхідної величини, вихідна величина зростає, а в іншому – зменшується. При цьому на виході вимірювальної схеми діє різниця вихідних сигналів чутливих елементів, що призводить до збільшення сумарного вихідного сигналу, підвищення чутливості перетворювача і зменшення впливу зовнішніх факторів.

Оскільки засоби електричних вимірювань, що застосовуються при вимірювання неелектричних величин, мають, як правило, незрівнянно кращі метрологічні характеристики, порівняно з датчиками неелектричних величин, то основний внесок у похибку результату вимірювання вносить складова, обумовлена похибкою датчика. Це необхідно мати на увазі при виборі неелектричних датчиків величин при вирішенні конкретної вимірювальної задачі.

Переваги широкого застосування електровимірювальних приладів для вимірювання неелектричних величин полягають у тому, що вони:

- 1) дозволяють здійснювати дистанційні вимірювання, при яких їх результат може бути отриманий на значній відстані від об'єкта дослідження;
- 2) надають можливість автоматичних перетворень як інформативних параметрів сигналів, так і результатів вимірювань, з метою, наприклад, запровадження поправок;
- 3) зручніші, ніж неелектричні, при вирішенні завдань автоматичного керування;
- 4) дають можливість реєструвати величини, що змінюються (наприклад, за допомогою електронного осцилографа), мають широкий діапазон вимірювань.

2. ВИМІРЮВАЛЬНІ ГЕНЕРАТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Вихідними сигналами генераторних перетворювачів є *електрорушійна сила* (ЕРС), *напруга*, *струм* або *електричний заряд*, функціонально пов'язані з впливом на перетворювач фізичної величини, що вимірюється. Основна відмінність генераторних датчиків у тому, що вони самі є *джерелами енергії*.

2.1 Термоперетворювачі

Принцип дії і конструкції вимірювальних перетворювачів для вимірювання температури (термоперетворювачів) [8] наводяться у розділі 5. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА «ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕМПЕРАТУРИ» у коротких теоретичних відомостях.

2.2 П'єзоелектричні перетворювачі

Такі перетворювачі ґрунтуються на використанні *прямого п'єзоелектричного ефекту* (від грецьк. *piezo* – тиск), що полягає у появі електричних зарядів на поверхні деяких кристалів (кварцу, турмаліну, сегнетової солі та ін.) під впливом механічних напруг. З кристалу кварцу вирізається пластинка, грані якої повинні бути перпендикулярні до оптичної осі O_z , механічної осі O_y та електричної осі O_x кристалу (*Рис. 2.1*).

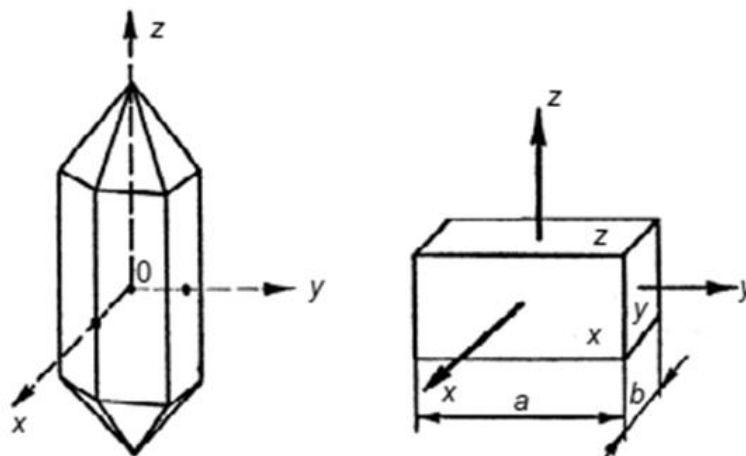


Рисунок 2.1 – П'єзочутливий елемент

При дії на пластину зусилля F_x вздовж електричної осі на гранях x з'являються заряди, які пропорційні величині зусилля F_x та

п'єзоелектричному коефіцієнтові (модулю).

При дії на пластину зусилля F_y вздовж механічної осі на тих же гранях x виникають заряди

$$Q_y = k \cdot F_y \cdot \frac{a}{b}, \quad (2.1)$$

де a і b – розміри граней пластини.

Механічний вплив на пластину вздовж оптичної осі не викликає появи зарядів.

Розглянемо будову п'єзоелектричного перетворювача для вимірювання змінного тиску газу (*Рис. 2.2*).

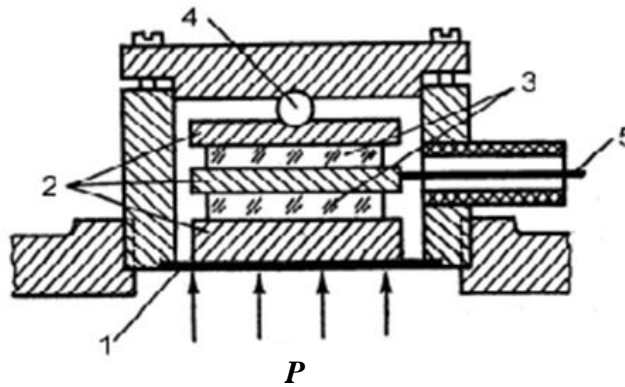


Рисунок 2.2 – П'єзоелектричний перетворювач для вимірювання змінного тиску газу

Тиск P через металеву мембрану 1 передається на затиснуті між металевими прокладками 2 кварцові пластинки 3. Кулька 4 сприяє рівномірному розподілу тиску поверхнею кварцових пластинок. Середня прокладка з'єднана з виводом 5, що проходить крізь втулку з ізоляційного матеріалу. При дії тиску P між виводом 5 і корпусом перетворювача виникає різниця потенціалів U :

$$U = \frac{Q}{C_{\text{п}} + C_{\text{о}}} = \frac{2 \cdot k \cdot s \cdot P}{C_{\text{п}} + C_{\text{о}}}, \quad (2.2)$$

де Q – заряд, що виникає на пластинці кварцу; $C_{\text{п}}$ – ємність перетворювача; $C_{\text{о}}$ – ємність провідів та вхідного кола приладу, що вимірює різницю потенціалів; k – п'єзоелектричний модуль кварцу; s – площа поверхні мембрани, на яку діє тиск P .

За різницею потенціалів U судять про значення тиску P .

У п'єзоелектричних перетворювачах переважно застосовують кварц, у якого п'єзоелектричні властивості поєднуються з високою механічною міцністю та високими ізоляційними якостями, а також з незалежністю п'єзоелектричної характеристики від температури у широких межах. Використовують також поляризовану кераміку з титанату барію, титанату і цирконату свинцю.

Через «стікання» заряду з п'єзоелектричного перетворювача, з ізоляції та вхідного кола вимірювального приладу, опір такого електричного кола має бути не менше $10^{12} \dots 10^{15}$ Ом. Проблема «стікання» заряду призводить до того, що п'єзоелектричні перетворювачі використовують для вимірювання тільки швидкозмінних величин (змінних зусиль, тиску, параметрів вібрації, прискорення тощо).

Прикладами використання таких датчиків можуть бути електронні ваги, датчик детонації двигуна автомобіля, високочутливий спрямований мікрофон та ін. *Зворотний п'єзо ефект* знаходить застосування при конструюванні ультразвукових випромінювачів, сканерів, що широко використовуються в медицині.

У *п'єзорезонаторах* використовуються одночасно прямий та зворотний п'єзо ефекти. Останній полягає в тому, що, якщо на електроди перетворювача подати змінну напругу, то у п'єзочутливій пластині виникнуть механічні коливання, частота яких f_p (резонансна частота) залежить від товщини пластини h , модуля пружності E і густини ρ її матеріалу. При вмиканні такого перетворювача в резонансний контур генератора, частота генерованих електричних коливань визначається частотою f_p .

Значення п'єзорезонаторів для сучасної електронної техніки важко переоцінити. Як приклади їх використання можна назвати генератори тактових синхроімпульсів для мікропроцесорних систем і комп'ютерів, електронні кварцові годинники і т. п. При зміні значень h , E або під впливом механічних чи температурних впливів частота f_p зміниться і, відповідно, зміниться частота генерованих коливань. Цей принцип використовують для перетворення тиску, зусилля, температури та інших величин у частоту.

2.3 Магнітоелектричні датчики Холла

Коли провідник із струмом, що протікає по ньому, поміщається у магнітне поле таким чином, що напрямок струму виявляється перпендикулярним до магнітних силових ліній, то утворюється поперечне

електричне поле, пропорційне добутку щільності магнітного потоку та сили електричного струму. Цей ефект виникає у провідниках, проте найбільш істотний він у напівпровідниках, де відомий під назвою *ефекту Холла*.

На *Рис. 2.3* зображена напівпровідникова пластина, до якої прикладене магнітне поле з індукцією B , перпендикулярне струмові I , що протікає крізь пластину, при цьому виникає електрорушійна сила (ЕРС) на гранях пластини E .

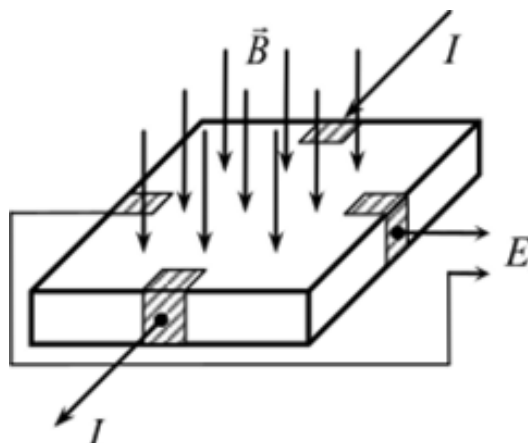


Рисунок 2.3 – Виникнення ефекту Холла у напівпровіднику

Відношення між магнітною індукцією B , струмом I та ЕРС на гранях E можна виразити таким чином:

$$E = -R_H \cdot I \cdot B , \quad (2.3)$$

де R_H – коефіцієнт Холла ($R_H = \frac{1}{n \cdot e}$); n – кількість зарядів, що протікають через одиницю об'єму та утворюють електричний струм у провіднику чи напівпровіднику; e – заряд носія зарядів.

Таким чином, величина ЕРС Холла, що виникає на гранях напівпровідника, визначається векторним добутком струму і магнітної індукції.

Магнітоелектричний *датчик Холла* отримав свою назву за ім'ям Едвіна Холла, американського фізика, який відкрив у 1879 р. це важливе гальваноманітне явище. Безконтактні клавішні перемикачі на основі ефекту Холла застосовувалися за кордоном досить широко з початку 70-х рр. ХХ ст. До переваг таких перемикачів відносяться висока надійність і довговічність, малі габарити. А до недоліків – постійне споживання енергії та досить висока вартість, у порівнянні з іншими безконтактними перемикачами –

герметизованими контактами (герконами). У якості напівпровідникових матеріалів датчиків Холла найчастіше використовують кремній (*Si*), арсенід індію (*InAs*) та антимонід індію (*InSb*).

Ефект Холла використовується в багатьох типах перетворювачів, призначених для вимірювання магнітного поля, а також у безконтактних перемикаючих приладах. В даний час перетворювачі на основі ефекту Холла знаходять надзвичайно широке застосування при вирішенні різноманітних завдань, серед яких – визначення положення різних рухомих частин механізмів та пристроїв, вимірювання їх швидкостей та прискорень. Наприклад, два датчики Холла, закріплені на вилці та рамі та збуджувані магнітами, встановленими відповідно на спиці колеса та «зірочці» педалей, є компонентом велокомп'ютерів. Іонний двигун – різновид електричного ракетного двигуна – також ґрунтується на ефекті Холла.

Датчики Холла широко використовуються у сучасній автомобільній електроніці. Розглянемо керування системою запалювання двигуна автомобіля. Звичайною конструкцією датчика Холла є щілинна. З одного боку щілини розташований напівпровідник із струмом, що протікає по ньому, з іншого – нерухомий постійний магніт. У щілину датчика входить сталевий циліндричний екран із прорізами, механічно пов'язаний із колінчастим валом. При обертанні екрану, коли його прорізи з'являються в щілини датчика, магнітний потік впливає на напівпровідник із струмом, що протікає по ньому, і утворювані керуючі імпульси датчика Холла подаються у комутатор, в якому вони перетворюються на імпульси струму в первинній обмотці котушки запалювання. У системах розподіленого впорскування палива (інжекторних) імпульси датчика насамперед подаються у контролер (бортовий комп'ютер), який керує електронним блоком запалювання за відповідним алгоритмом.

2.4 Перетворювачі Віганда

Однією з останніх розробок серед перетворювачів магнітного поля є *датчик Віганда*. За конструкцією він схожий на датчик Холла – в ньому також є магніт, проте замість напівпровідникової пластини використовується котушка зі спеціального магнітобістабільного дроту. Цей дріт із магнітотвердого сплаву – вікаллою (54 % *Co*, 14 % *V*, 32 % *Fe*) діаметром $\approx 0,3$ мм, попередньо оброблений механічно і намотаний у вигляді котушки довжиною 15 мм, яка має близько 1300 витків. Якщо котушку помістити у магнітне поле (наприклад, постійного магніту), то, при перевищенні певної

величини напруженості поля, напрямок намагнічування спонтанно зміниться. В результаті цієї зміни, виникає імпульс напруги тривалістю 20 мкс і амплітудою 2,5 В.

Перевагами датчика Віганда є відсутність необхідності у джерелі живлення, велика величина сигналу (кілька вольт), широкий температурний діапазон застосування ($-96\dots+175\text{ }^{\circ}\text{C}$), конструктивна захищеність від коротких замикань, іскробезпека.

Амплітуда та тривалість імпульсів, що виникають у магнітобістабільному дроті датчика Віганда, не залежать від швидкості зміни магнітного поля, так що датчики зазначеного типу можуть застосовуватися навіть при швидкостях, близьких до нуля. Тому параметричні індуктивні перетворювачі поступаються у таких випадках даному способу вимірювання. Датчики Віганда найчастіше використовуються для вимірювання частоти обертання.

2.5 Фотоелектричні перетворювачі

До генераторних перетворювачів відносять також сонячні елементи. Вони являють собою *фотоелектричні перетворювачі* (ФЕП), які перетворюють випромінювану електромагнітну енергію в електричну, тобто зміна вимірюваного значення випромінювання перетворюється у зміну вихідної напруги.

У даному випадку ми маємо справу з вентильним *фотоелектом* – збудженням світлом ЕРС на межі між металом та напівпровідником або між різнорідними напівпровідниками.

Явище такого фотоелекту вперше спостерігав французький фізик Олександр Едмон Беккерель у 1839 р. Це випадкове відкриття залишалося непоміченим аж до 1873 р., коли англійський інженер-електротехнік Віллоубі Сміт виявив подібний ефект при опроміненні світлом селенової пластини.

Конструкція вентильного фотоперетворювача наведена на **Рис. 2.4**. Нижній електрод 1, являє собою суцільну міцну металеву пластину. На ній вирощуються напівпровідникові матеріали: спочатку, *p*-типу 2, а, потім, *n*-типу 3. Метою цього є створення на кордоні двох напівпровідників *p-n*-переходу (позначений пунктиром). На зовнішню поверхню напівпровідника *n*-типу наноситься верхній металевий електрод 4, виконаний або у вигляді гребінки (решітки), або настільки тонким шаром, що він володіє властивістю пропускати світло до фоточутливого *p-n*-переходу. Під дією фотонів світла, між електродами генерується фото-ЕРС (напруга).

Для збереження фоточутливої поверхні перетворювача від шкідливих впливів навколишнього середовища, її вкривають плівкою прозорого лакового покриття 5, а всі елементи конструкції фотоперетворювача поміщають у пластиковий корпус 6 з віконцем для світла.

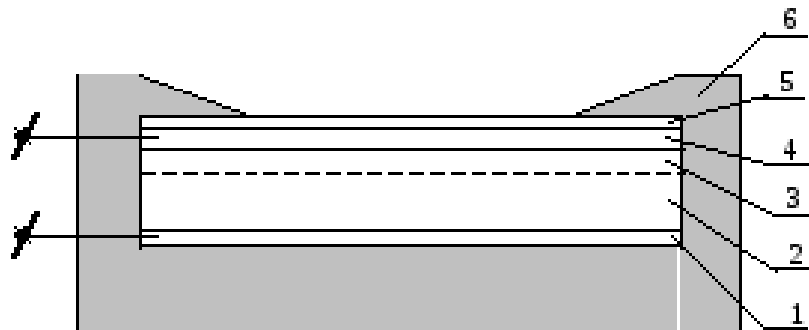


Рисунок 2.4 – Конструкція вентиляльного фотоперетворювача

При повному освітленні один елемент виробляє вихідну напругу між електродами близько 0,5 В. Струм елемента залежить від інтенсивності світла та площі поверхні елемента. ККД звичайного сонячного елемента на основі Si або $GaAs$ у даний час коливається в межах 10...20 %, а максимальний ККД для структур на основі $AlGaSb/GaSb$ становить 28%. Це означає, що елемент розміром 100×100 мм за стандартних умов може генерувати 1,0...1,6 Вт потужності.

ФЕП використовуються в системах енергозабезпечення космічних апаратів та орбітальних станцій, автономного електроживлення споживачів, у пристроях автоматики, переносних радіостанціях та радіоприймачах, системах підзарядки стільникових телефонів тощо.

3. ПАРАМЕТРИЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

У параметричних перетворювачах вихідною величиною є зміна параметра електричного кола – опору, індуктивності або ємності. Зміна контрольованої величини викликає відповідну зміну параметра кола датчика. Параметричні датчики ще називають датчиками-модуляторами.

3.1 Реостатні перетворювачі

Реостатні (резистивні) датчики є одними з найпростіших, за принципом дії, серед параметричних перетворювачів. Найчастіше вони являють собою змінні резистори (*Рис. 3.1*). Будучи ввімкненими до кола джерела живлення, вони змінюють свій опір, залежно від величини переміщення рухомого контакту, і, відповідно, змінюють силу струму, що реєструється в колі, яка є вихідним сигналом такого перетворювача.

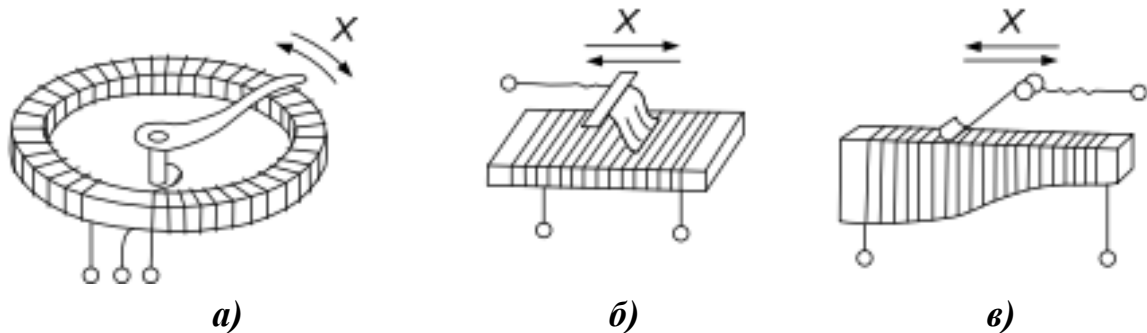


Рисунок 3.1 – Реостатні перетворювачі для:
а) кутових переміщень; б) лінійних переміщень;
в) функціонального перетворення лінійних переміщень

Змінний резистор може бути у реостатному вмиканні (рухомий контакт з'єднаний з одним із кінців резистивного елемента), у цьому випадку він регулює струм кола. Також використовується і *потенціометричне вмикання*: до кінців резистивного елемента прикладається вхідна напруга, а з загального виводу та рухомого контакту знімається частина вхідної напруги, що відповідає положенню рухомого контакту (*Рис. 3.2*).

Реостатні перетворювачі вмикають у вимірювальні кола у вигляді урівноважених та неуврівноважених мостів, ділянок напруги тощо.

Вони застосовуються для перетворення порівняно великих переміщень та кутів повороту, а також інших неелектричних величин (зусилля, тиску

та ін.), які можуть бути перетворені у переміщення. Типовий приклад використання резистивних датчиків кута повороту – промисловий робот-маніпулятор з кількома ступенями рухливості «руки».

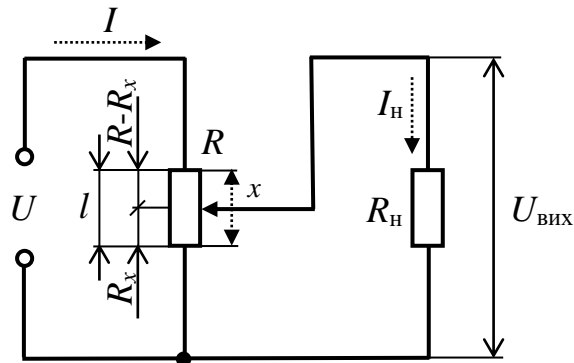


Рисунок 3.2 – Потенціометричне вмикання реостатного перетворювача

Недоліком всіх резистивних перетворювачів є їх *невисока надійність*, пов’язана зі зносом ковзного контакту, для якого потрібні відносно великі переміщення. До *переваг* слід віднести *високу точність перетворення*, *значний рівень вихідного сигналу*, *простоту конструкції* та *достатньо невисоку вартість*.

3.2 Тензочутливі перетворювачі

У *тензочутливих перетворювачах* використовується *тензорезистивний ефект* – зміна активного опору провідника (напівпровідника) внаслідок його деформації. Основним елементом конструкції перетворювача є *тензорезистор*.

Тензорезистор (від лат. *tensus* – напружений і резистор) – резистор, який змінює свій опір при деформації (стисненні або розтягуванні), що викликається механічними напруженнями. Ця зміна носить назву *тензорезистивного ефекту*.

Датчики на основі тензорезистивного ефекту використовуються для вимірювання зсувів або деформацій механізмів, конструкцій, споруд.

Якщо дріт піддати механічному впливові, наприклад, розтягуванню, то його опір зміниться. Відносна зміна опору дроту:

$$\frac{\Delta R}{R} = S \cdot \frac{\Delta L}{L}, \quad (3.1)$$

де S – коефіцієнт тензочутливості; $\Delta L/L$ – відносна деформація дроту.

Зміна опору дроту, при механічному впливі на нього, пояснюється зміною його геометричних розмірів (довжини, діаметра) та питомого опору матеріалу.

Тензочутливі дротяні перетворювачі, що широко застосовуються в даний час (Рис. 3.3), являють собою зигзагоподібно прокладений і наклеєний на смужку паперу (підкладку) 1 тонкий дріт (дротяну решітку) 2. Перетворювач під'єднують до електричного кола за допомогою виводів 3, що приварюються або припаюються. Перетворювач наклеюють на поверхню досліджуваної деталі так, щоб напрямок очікуваної деформації збігався з поздовжньою віссю дротяної решітки.

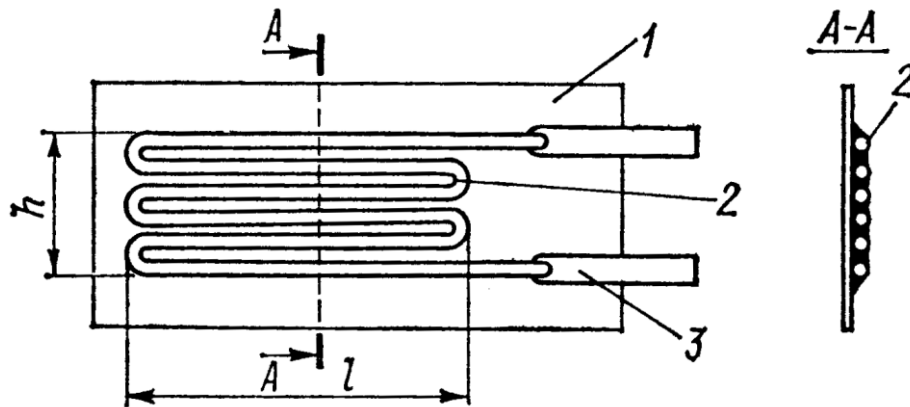


Рисунок 3.3 – Тензочутливий дротяний перетворювач

Для виготовлення перетворювачів застосовують, головним чином, константовий (58,5 % Cu , 40 % Ni , 1,5 % Mn) дріт діаметром 0,02...0,05 мм. Константан володіє малим температурним коефіцієнтом електричного опору, що дуже важливо, оскільки зміна опору перетворювачів при деформаціях, наприклад, сталевих деталей можна порівняти зі зміною опору перетворювача при зміні температури. У якості підкладки використовують тонкий (товщиною 0,03...0,05 мм) папір, а також плівку лаку або клею, а при високих температурах – шар спеціального жаростійкого цементу.

Застосовують також тензочутливі фольгові перетворювачі (Рис. 3.4), у яких замість дроту використовується фольга, і плівкові тензорезистори, одержувані шляхом сублимації тензочутливого матеріалу з подальшим осадженням його на підкладку. Фольгові та плівкові решітки зверху покривають лаком. Такі тензорезистори нечутливі до поперечної деформації,

внаслідок малого опору перемичок, що з'єднують тензочутливі елементи.

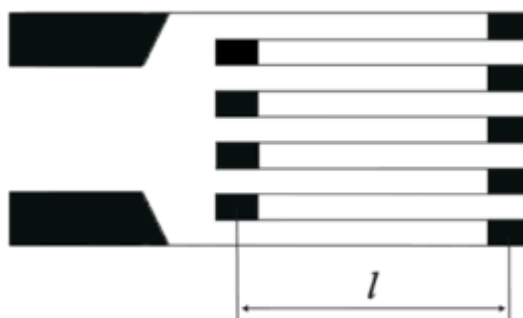


Рисунок 3.4 – Тензочутливий фольговий перетворювач

В даний час серійно випускають *інтегральні напівпровідникові тензорезистори*, що утворюють міст або напівміст з елементами термокомпенсації.

У якості вимірювальних кіл для тензорезисторів використовують урівноважені й неуврівноважені мости. Тензорезистори застосовують для вимірювання деформацій та інших неелектричних величин: зусиль, тисків, моментів тощо.

3.3 Індуктивні перетворювачі

Принцип дії *індуктивних перетворювачів* заснований на залежності індуктивності або взаємної індуктивності обмоток на магнітопроводі від положення, геометричних розмірів і магнітного стану елементів їх магнітного кола. Основні відомості стосовно індуктивних перетворювачів [8] наводяться у розділі 4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА «ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДУКТИВНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ» у коротких теоретичних відомостях.

Розглянемо інші перетворювачі, принцип дії яких подібний принципу дії індуктивних перетворювачів.

3.4 Магнітопружні перетворювачі

Якщо феромагнітне осердя перетворювача піддавати механічному впливу сили F , то, внаслідок зміни магнітної проникності матеріалу осердя μ , зміниться магнітний опір кола, що спричинить зміну індуктивності L та взаємної індуктивності M обмоток. На цьому принципі базується дія *магнітопружних перетворювачів* (**Рис. 3.5**). Фізичною основою тут є *ефект Віллари* (магнітопружний ефект) – зміна намагніченості тіла при його деформації, який отримав свою назву у 1865 р. на честь італійського

фізика Еміліо Віллари, що його відкрив.

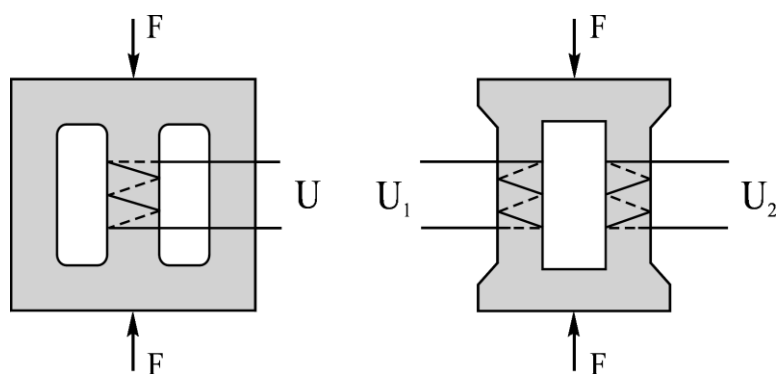


Рисунок 3.5 – Магнітопружний перетворювач

Ефект Віллари обумовлений зміною, під дією механічних напруг, доменної структури феромагнетика, що визначає його намагніченість. Цей ефект зворотний до явища магнітострикції – зміни розмірів і форми кристалічного тіла при намагнічуванні. Тому іноді такі датчики називають *індуктивними магнітострикційними*.

3.5 Індукційні перетворювачі

Принцип дії *індукційних перетворювачів* заснований на *явищі електромагнітної індукції* та виникненні ЕРС індукції у замкнутому контурі.

Індукційні перетворювачі застосовуються для вимірювання швидкості лінійних та кутових переміщень. Вихідний сигнал індукційних перетворювачів може бути проінтегрований чи продиференційований у часі, за допомогою інтегруючих або диференціюючих електричних (електронних) пристроїв. Після цих перетворень сигнал стає пропорційним, відповідно до переміщення чи прискорення. Тому індукційні перетворювачі використовуються також для вимірювання лінійних і кутових переміщень.

На *Рис. 3.6, а)* наведено конструкцію індукційного перетворювача, призначеного для вимірювання швидкості лінійного переміщення, а також амплітуди переміщення та прискорення. Перетворювач має кільцевий магніт 1, вставлений у сталеве ярмо 2. Магнітний потік від постійного магніту проходить по центральному циліндричному осердю крізь повітряний зазор і кільцевий полюсний наконечник 3. У циліндричному повітряному зазорі перебуває намотана на каркас котушка 4. Вона може переміщатися в повітряному зазорі уздовж осі перетворювача.

Котушку умовно можна розділити на три частини *I-III* (див.

Рис. 3.6, а)): *I* – перебуває поза магнітопроводом, і магнітний потік у неї не заходить, *II* – перебуває в повітряному зазорі, утвореному полюсними наконечниками й циліндричним осердям. Магнітний потік, що пронизує витки цієї частини котушки, не міняється в часі, кількість витків також залишається постійною. У цій частині котушки ЕРС не наводиться.

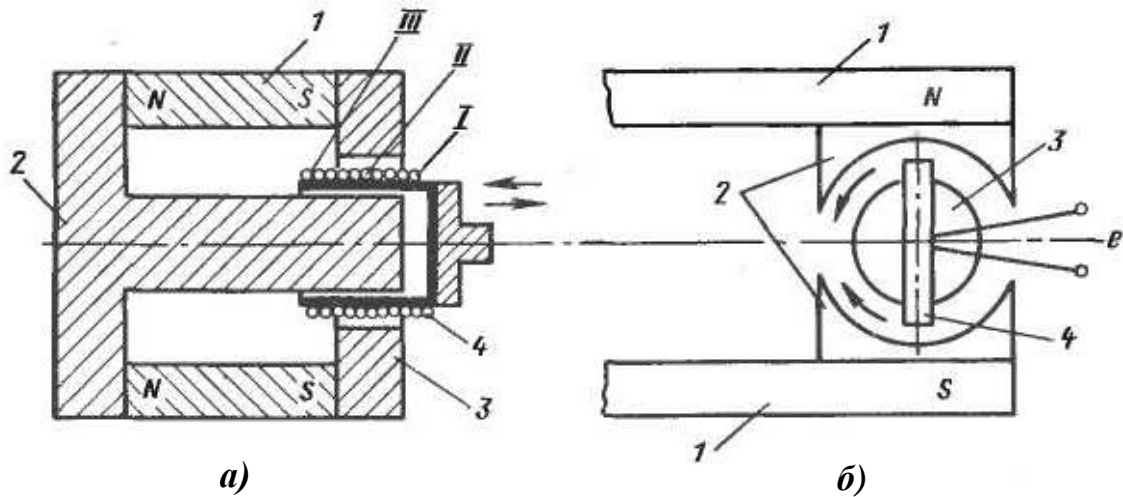


Рисунок 3.6 – Конструкції індукційних перетворювачів:
а) для вимірювання швидкості лінійного переміщення, амплітуди переміщення та прискорення; б) для вимірювання кутової швидкості (віброшвидкості)

Частина *III* котушки перебуває поза повітряним зазором, але усередині магнітної системи. Магнітний потік, що проходить через витки цієї котушки, також постійний, але при вібрації котушки змінюється кількість витків. Зміна кількості витків призводить до зміни потокозчеплення й наводить ЕРС. Витки котушки звичайно намотуються рівномірно. При цьому ЕРС перетворювача пропорційна швидкості переміщення (вібрації).

Індукційні перетворювачі можуть застосовуватися й для вимірювання кутової швидкості (віброшвидкості). Схема такого перетворювача показана на **Рис. 3.6, б)**. Він складається з постійного магніту *1*, полюсних наконечників *2*, циліндричного сталевго осердя *3* і котушки *4*. Конструкція перетворювача аналогічна конструкції магнітоелектричного вимірювального механізму: при повороті котушки навколо вісі осердя, її потокозчеплення змінюється, й у ній індукується ЕРС, пропорційна кутовій швидкості.

Найбільшого застосування індукційні перетворювачі набули у приладах для вимірювання частоти обертання (тахометрах) і в приладах для

вимірювання параметрів вібрацій, тобто в приладах для виміру лінійних і кутових переміщень і прискорень (у віброметрах та акселерометрах).

Індукційні перетворювачі для тахометрів являють собою невеликі (1...100 Вт) генератори постійного або змінного струму, зазвичай із незалежним збудженням від постійного магніту, ротор яких механічно пов'язаний з випробувальним валом. При використанні генератора постійного струму, швидкість обертання валу визначають за ЕРС генератора, а, у разі застосування генератора змінного струму, швидкість можна визначити як за самою ЕРС, так і за її частотою.

Похибки індукційних перетворювачів визначаються, головним чином, зміною магнітного поля з плином часу і при зміні температури, а також температурними змінами опору. Значення похибок знаходяться в межах 0,2...0,5 %. Переваги перетворювачів полягають у порівняній простоті конструкції та високій чутливості.

3.6 Ємнісні перетворювачі

Принцип дії *ємнісних перетворювачів* заснований на залежності електричної ємності конденсатора від розмірів, взаємного розташування обкладок та від діелектричної проникності середовища між ними.

Для двообкладного плоского конденсатора його електрична ємність C визначається за формулою:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot s}{\delta}, \quad (3.2)$$

де ε_0 – електрична стала; ε – відносна діелектрична проникність середовища між обкладками; s – активна площа обкладок; δ – відстань між обкладками.

З виразу (3.2) видно, що перетворювач може бути побудований із використанням залежностей:

- $C = f_1(\varepsilon)$;
- $C = f_2(s)$;
- $C = f_3(\delta)$.

На **Рис. 3.7** схематично показано будову різних ємнісних перетворювачів.

Перетворювач, зображений на **Рис. 3.7, а)**, являє собою конденсатор,

одна пластина якого переміщається під дією вимірюваної величини x щодо нерухомої пластини. Статична характеристика перетворення $C = f(x) = f_3(\delta)$ є нелінійною. Чутливість перетворювача зростає, із зменшенням відстані δ .

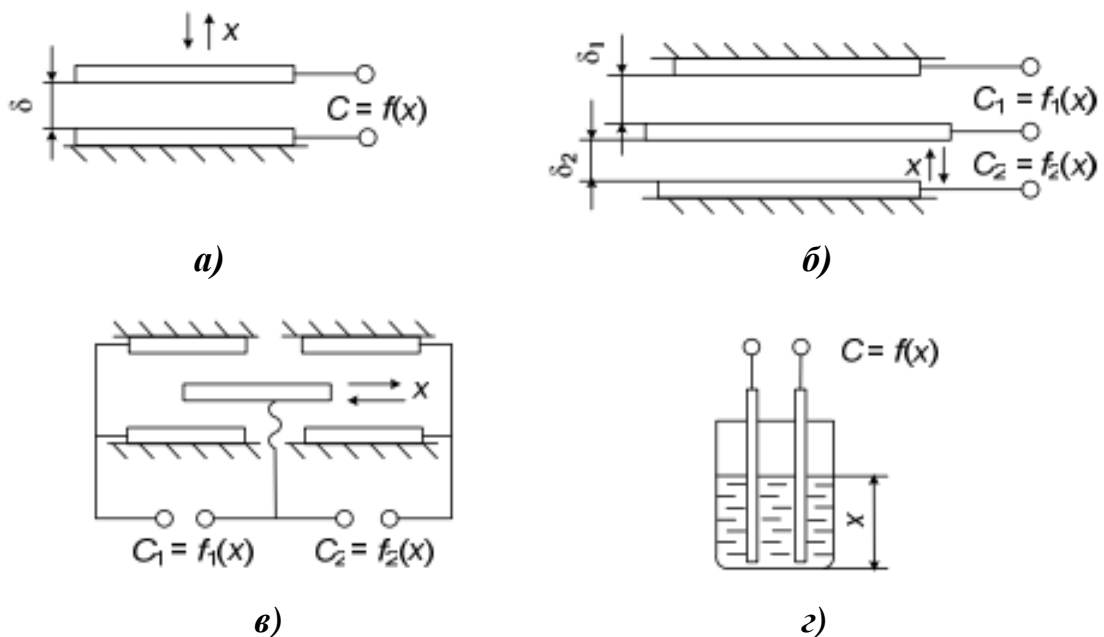


Рисунок 3.7 – Ємнісні перетворювачі:

- а) із змінною відстанню між пластинами; б) диференціальний;**
в) диференціальний із змінною активною площею пластин;
г) із змінною діелектричною проникністю середовища між пластинами

Такі перетворювачі використовують для вимірювання малих переміщень (менше 1 мм).

Мале робоче переміщення пластин призводить до *похибки*, через зміну відстані між пластинами при коливаннях температури. Вибором розмірів деталей перетворювача та матеріалів домагаються зниження цієї похибки. У ємнісних перетворювачах може виникати зусилля (небажане) тяжіння між пластинами.

Застосовують також *диференціальні ємнісні перетворювачі* (Рис. 3.7, б), у яких є одна рухома і дві нерухомі пластини. При впливі вимірюваної величини x , у цих перетворювачів одночасно змінюються ємності C_1 і C_2 . На Рис. 3.7, в) показаний диференціальний ємнісний перетворювач із змінною активною площею пластин. Такий перетворювач використовують для вимірювання порівняно великих лінійних (більше 1 мм) та кутових переміщень. У цьому перетворювачі легко отримати необхідну характеристику перетворення, шляхом профілювання пластин.

Перетворювачі з використанням залежності $C = f_1(\varepsilon)$ застосовують для вимірювання рівня рідин, вологості речовин, товщини виробів з діелектриків тощо. У якості прикладу, на *Рис. 3.7, з)* показано будову ємнісного перетворювача-рівнеміра. Ємність між електродами, опущеними у посудину, залежить від рівня рідини, оскільки зміна рівня веде до зміни середньої діелектричної проникності середовища між електродами. Зміною конфігурації пластин можна отримати бажаний характер залежності показань приладу від об'єму (маси) рідини.

Відома також конструкція датчика, при якій діелектрик, залишаючись нерухомим, змінює свої характеристики. На цьому принципі засновано дію ємнісного датчика наближення та ємнісного вимикача наближення, здатних виявляти об'єкт на деякій відстані від приладу. Вони використовуються в охоронних системах та системах безпеки на виробництві. Ємнісні прилади *дорожчі за індуктивні*, проте вони можуть сприймати наближення тіл, виготовлених з різних матеріалів, у ширшому діапазон відстаней.

Для вимірювання вихідного параметра ємнісних перетворювачів застосовують мостові схеми та схеми із використанням резонансних контурів. Останні дозволяють створювати прилади з *високою чутливістю*, здатні реагувати на переміщення близько 10^{-7} мм.

Кола з ємнісними перетворювачами зазвичай живлять струмом *підвищеної частоти* (до десятків мегагерц), що викликане бажанням збільшити сигнал, який потрапляє у вимірювальний прилад, і необхідністю зменшити дію шунтуючого опору ізоляції.

Перевагами ємнісних перетворювачів є *простота конструкцій, висока чутливість та можливість отримання малої інерційності перетворювача. Недоліками* – вплив зовнішніх електричних полів, паразитних ємностей, температури, вологості; відносна складність схем вмикання; потреба у спеціальних джерелах живлення підвищеної частоти.

3.7 Оптичні перетворювачі

Оптичні перетворювачі використовуються для вимірювання багатьох неелектричних величин, серед яких вимірювання переміщення, наближення, освітленості, температури та ін. Подібні перетворювачі складаються з базового чутливого елемента, яким зазвичай є фоторезистор або фотодіод, і його схеми сполучення з вимірювальною схемою.

У *ретрорефлективних датчиках* джерело світла і чутливий елемент розміщуються разом, а світло, що випромінюється, відбивається і проходить

вздовж того ж шляху, що і падаючий промінь. Типовим прикладом таких приладів є датчик блокування закриття автоматичних воріт, у разі знаходження перешкоди в їх отворі. Промінь світла відбивається від світловідбивача.

У *дзеркальних датчиках* промінь від джерела і відбитий промінь світла знаходяться під деяким кутом один до одного і відбиваються від поверхні тіла або від дзеркала. Це дозволяє створювати системи, що стежать за кутовим рухом поверхні або наближенням об'єкту.

У *дифузних датчиках* використовується проходження світла крізь матову поверхню. Такі прилади призначені для вимірювання, наприклад, світлового потоку, рівня освітленості.

Пірометрами називають прилади для вимірювання температури, робота яких ґрунтується на використанні енергії випромінювання нагрітих тіл. *Перевага* цих приладів полягає в тому, що вони *не створюють температурного поля об'єкту* (вимір здійснюється безконтактним способом) і *не мають обмеження* для розширення межі вимірювань у бік високих температур. Принцип дії пірометрів випромінювання заснований на залежності енергії випромінювання нагрітих тіл від їхньої температури. Температурне випромінювання характеризується енергією, що переноситься ним.

В оптичному пірометрі інтенсивність випромінювання нагрітого тіла вимірюють шляхом порівняння у монохроматичному світлі яскравості досліджуваного тіла із яскравістю нитки лампи розжарювання. Пірометр попередньо градуують із випромінюванням абсолютно чорного тіла. Під яскравістю розуміють відношення сили світла в даному напрямку до проекції поверхні, що світиться на площину, перпендикулярну тому ж напрямку. Два тіла, що мають однакову яскравість в одному напрямку, мають однакову інтенсивність випромінювання.

На **Рис. 3.8** схематично показано будову оптичного пірометра.

В оптичному пірометрі яскравість досліджуваного тіла 1 порівнюється з яскравістю нитки фотометричної лампи 4. Яскравість нитки лампи, що розжарюється від блока живлення Б, регулюють реостатом R. Фотометрична лампа вбудована у телескоп, що має об'єктив 2 і окуляр 5.

При вимірюванні температури телескоп направляють на досліджуване тіло 1 і, пересуванням об'єктиву і окуляра, домагаються отримання чіткого зображення тіла та нитки фотометричної лампи в одній площині. Змінюючи струм у фотометричній лампі, досягають збігу яскравості нитки та

досліджуваного тіла. Відлік показань у момент збігу яскравості роблять за шкалою вольтметра, який градуують у градусах температури абсолютно чорного тіла. Іноді, для підвищення точності вимірювання струму чи падіння напруги на нитці лампи, застосовують компенсатор постійного струму. Нитку фотометричної лампи припустимо розжарювати лише до певної температури (1400 °С), тому для збільшення верхньої межі вимірюваних температур в пірометрі є послаблюючий світлофільтр 3, що зменшує яскравість досліджуваного тіла в декілька разів. Для того, щоб інтенсивності випромінювання порівнювалися у спектрі монохроматичних променів із довжиною хвилі, помітної людському оку, передбачений червоний світлофільтр 6, що пропускає промені у вузькому спектрі 0,62...0,73 мкм.

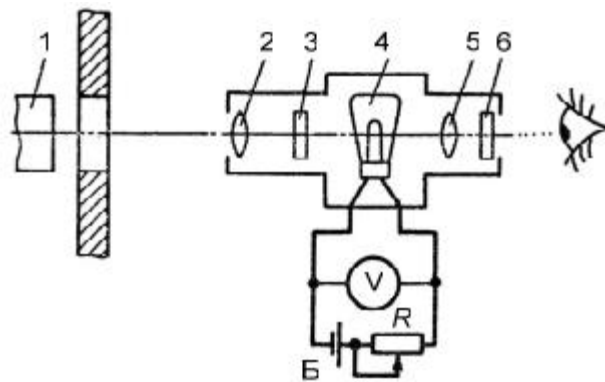


Рисунок 3.8 – Оптичний пірометр

Промисловістю випускаються пірометри для вимірювання температури в діапазоні 800...10000 °С. Основна похибка пірометра обумовлена неповнотою випромінювання реальних фізичних тіл.

4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА «ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДУКТИВНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ»

4.1 Мета роботи:

- 1) вивчити принцип дії та конструкції індуктивних перетворювачів;
- 2) провести дослідження індуктивних перетворювачів переміщення;
- 3) провести дослідження компенсаційних методів вимірювання переміщення;
- 4) визначити похибки вимірювань, побудувати графічні залежності.

4.2 Короткі теоретичні відомості

Принцип дії індуктивних перетворювачів базується на перетворюванні вхідної величини у відповідну зміну індуктивності, за рахунок зміни параметрів магнітного кола. Вимірювальні кола з індуктивними перетворювачами повинні мати джерело живлення. Конструкції найбільш розповсюджених індуктивних перетворювачів наведено на *Рис. 4.1* [8].

У перетворювачі, показаному на *Рис. 4.1, а)*, малий повітряний зазор δ_3 змінюється, внаслідок переміщення частини магнітопроводу під дією вимірюваної величини. В реальних перетворювачах такого типу переміщення рухомої частини зазвичай не перевищує 10 мм. У перетворювачі з розімкнутим магнітопроводом, який являє собою котушку із сталевим осердям (*Рис. 4.1, б)*), робоче переміщення може досягати 100 мм. В перетворювачі, показаному на *Рис. 4.1, в)*, індуктивність залежить від магнітного опору повітряного зазору, що змінюється рухомим немагнітним осердям. Вибором форми осердя можна отримати будь-яку залежність індуктивності від переміщення осердя. Такі перетворювачі застосовують для вимірювання кутів до 180°.

Процеси, що проходять в індуктивному перетворювачі при дії вимірюваної величини X , можуть бути представлені у вигляді зв'язку:

$$X \downarrow \rightarrow \delta_3 \downarrow \rightarrow R_m \downarrow \rightarrow \mu \uparrow \rightarrow L \uparrow \rightarrow Z \uparrow .$$

Зміна зазору (або положення осердя) магнітного кола δ_3 впливає на магнітний опір R_m , який зв'язує значення повітряного зазору (що входить у довжину магнітопроводу l) і магнітну проникність μ , залежністю:

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu \cdot S}, \quad (4.1)$$

де μ_0 – магнітна проникність повітря; S – площа поперечного перерізу магнітопроводу.

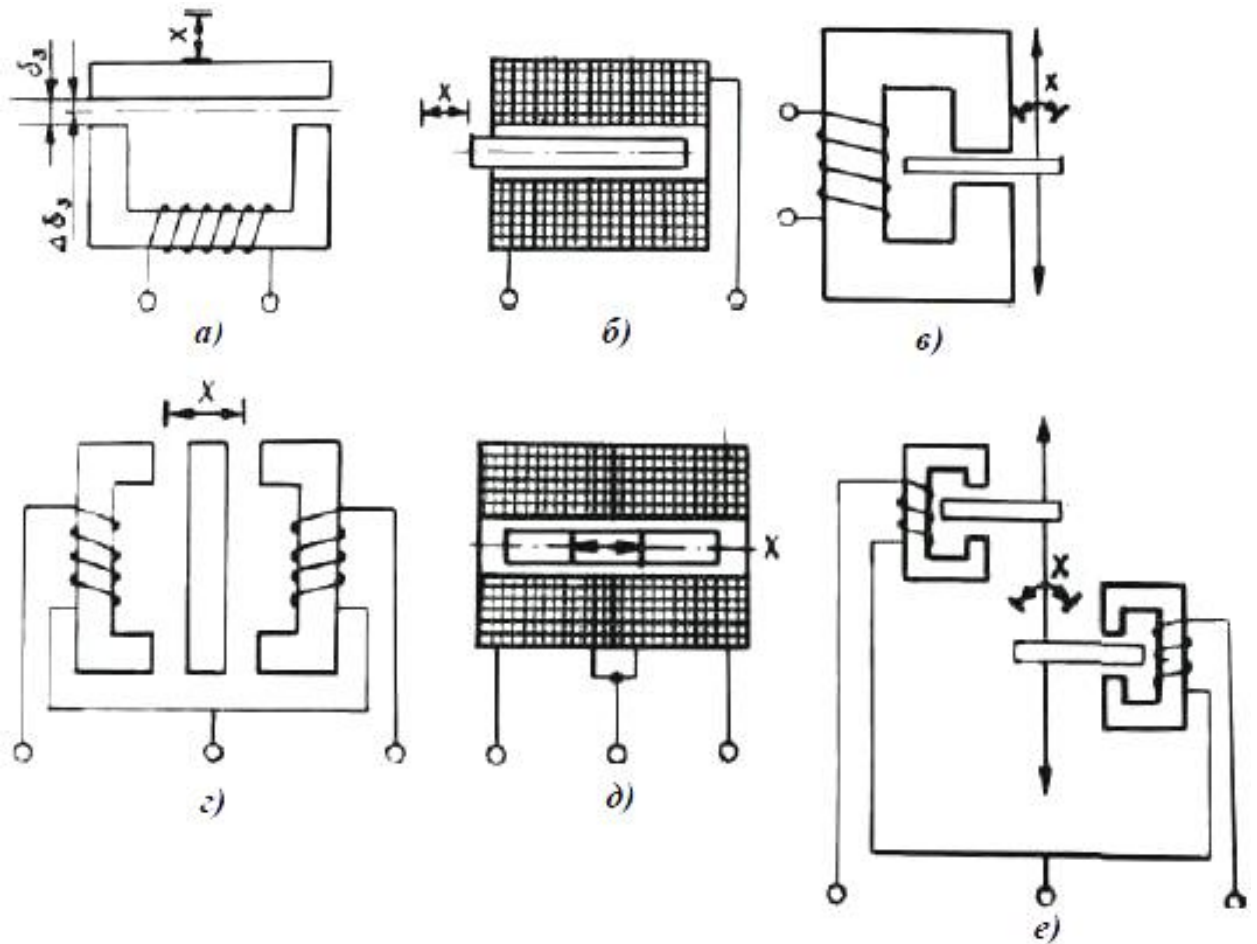


Рисунок 4.1 – Конструкції індуктивних перетворювачів

Індуктивність перетворювача визначається відношенням повного потокозчеплення до сили струму в котушці:

$$L = \frac{W \cdot \Phi}{I}.$$

Але

$$\Phi = \frac{I \cdot W}{R_m}.$$

Тоді

$$L = \frac{W^2}{R_M} \quad \text{і} \quad L = \frac{\mu \cdot S \cdot W^2}{l}, \quad (4.2)$$

де W – кількість витків котушки в перетворювачі.

Повністю *опір перетворювача*, при нескінченно малому повітряному зазорі, визначається за формулою:

$$Z = R + J \cdot \frac{\omega \cdot W^2}{R_M + J \cdot X_M}, \quad (4.3)$$

де R – активна складова опору котушки;

$J \cdot X_M$ – реактивна складова магнітного опору.

Залежність повного опору перетворювача від повітряного зазору наведена на **Рис. 4.2**. Це – характеристика індуктивного перетворювача.

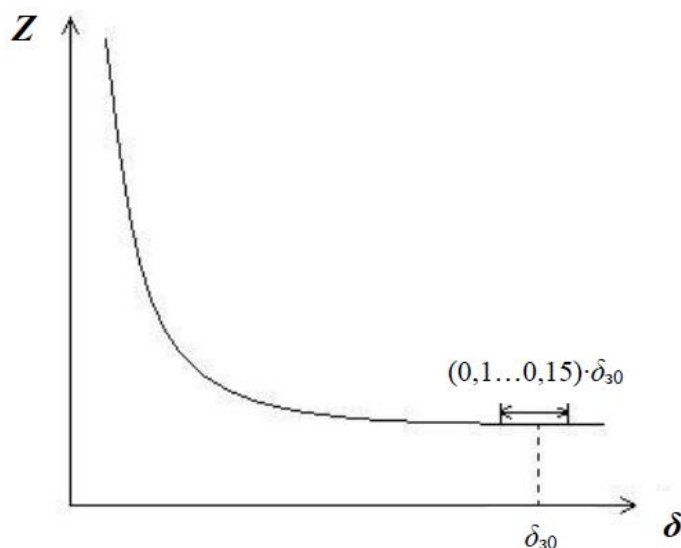


Рисунок 4.2 – Залежність повного опору індуктивного перетворювача від повітряного зазору

Одна з особливостей цієї залежності – *велика нелінійність*. Практично при використанні таких перетворювачів лінійна ділянка характеристики обмежується діапазоном

$$\delta_3 = (0,1...0,15) \cdot \delta_{30},$$

де δ_{30} – значення початкового зазору.

Нелінійність характеристики і температурний вплив на параметри перетворювача – його основні недоліки.

Значно кращі властивості мають перетворювачі, конструкції яких наведені на *Рис. 4.1, з), Рис. 4.1, д), Рис. 4.1, е)*. Вони отримали назву *диференціальних*. Характеристика перетворювача є лінійною у більшому, ніж звичайно, діапазоні зміни і досягає 0,3...0,4 початкової величини (*Рис. 4.3*). На їх параметри *менше впливає зміна температури*.

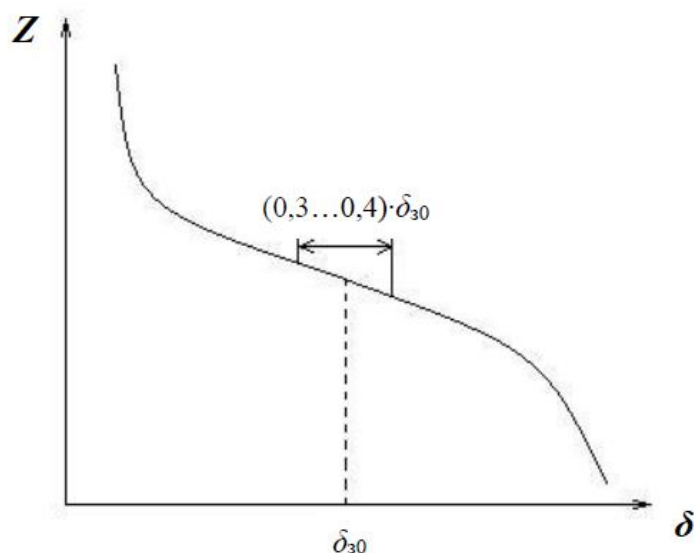


Рисунок 4.3 – Характеристика диференціального індуктивного перетворювача

Широкого розповсюдження для вимірювання неелектричних параметрів, які можуть бути перетворені у переміщення, набули *диференціально-трансформаторні датчики (ДТД)*.

До *позитивних якостей* цих датчиків відносяться:

- висока чутливість, яка забезпечується за рахунок можливості виконання вторинної обмотки датчика з більшою кількістю витків;
- можливість вимірювання досить малих переміщень, за рахунок високого вихідного опору датчика, який добре узгоджується із вхідним опором електричного підсилювача;
- значна лінійна ділянка характеристики.

Виділяють декілька різновидів ДТД, що відрізняються один від одного конструкцією магнітної системою:

- плоскі ДТД (з магнітопроводом плоскої форми);
- циліндричні ДТД (з магнітопроводом із круглий перерізом).

На *Рис. 4.4, а)* зображено конструкцію циліндричного ДТД.

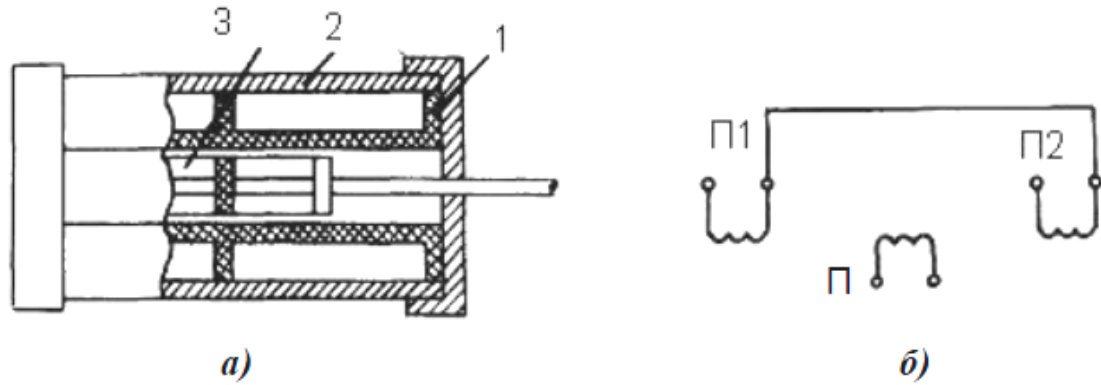


Рисунок 4.4 – Диференціально-трансформаторний датчик:

а) конструкція; б) схема електрична принципова;

1 – каркас; 2 – плунжер з магнітного матеріалу; 3 – сталевий плунжер;

П – первинна котушка; П1, П2 – вторинні котушки

Датчик складається з каркасу 1, на який намотуються обмотки, плунжера 2, виконаного з магнітного матеріалу, та сталевий плунжер 3. Каркас котушки виготовляється з прес-порошку або нержавіючої сталі.

Магнітний екран котушки значно зменшує вплив зовнішніх електромагнітних полів, ліквідує викривлення форми магнітного потоку, що виникає під дією мас матеріалу, розміщених поблизу. Щоб уникнути утворення короткозамкненого витка, екран котушки виконується розрізним.

Розмір і матеріал плунжера обумовлюється отриманням максимального вихідного сигналу, володіючого потрібною лінійністю та мінімальним зсувом фази. Плунжер може бути виконаний у вигляді порожнистого чи суцільного циліндра з м'якої сталі або нікелевого сплаву з високою магнітною проникністю. Плунжер з'єднується із переміщуваним об'єктом за допомогою стержня, виготовленого з немагнітного матеріалу.

На каркас котушки (див. **Рис. 4.4, б**) намотується одна первинна котушка П та дві вторинні – П1 і П2.

Первинна обмотка живиться змінним синусоїдальним струмом. Напруга на вторинних обмотках датчика змінюється, завдяки зміні коефіцієнта зв'язку, при дії вимірюваного переміщення, й виражається залежностями:

$$E_1 = E_0 \cdot \left(1 - \frac{K}{a} \cdot \Delta X\right); \quad (4.4)$$

$$E_2 = E_0 \cdot \left(1 - \frac{K}{a} \cdot \Delta X\right), \quad (4.5)$$

де E_0 – ЕРС на затискачах однієї з вторинних обмоток, при розташуванні осердя в електричній нейтралі; K – коефіцієнт пропорційності, що визначає зміну ЕРС вторинної обмотки на одиницю переміщення осердя; a – параметр, рівний відношенню E_0 до ЕРС джерела живлення первинної обмотки; ΔX – переміщення осердя відносно електричної нейтралі.

Згідно виразів (4.4) і (4.5), переміщення плунжера можна виміряти за напругою на одній з обмоток датчика.

З виразів (4.4) і (4.5) випливає, що фаза вхідного сигналу ДТД визначається вибраною вторинною обмоткою і залежить від напрямку переміщення плунжера.

Недолік схеми: *порівняно низка чутливість*. Більш широко використовується датчик із двома вторинними обмотками, які вмикаються по диференційній схемі. Вхідний сигнал датчика при цьому:

$$U_{\text{вих}} = 2 \cdot K \cdot \Delta X \cdot E_g = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot I \cdot W_1 \cdot W_2 \cdot K \cdot \Delta X, \quad (4.6)$$

де f – частота напруги збудження; I – струм, що протікає у первинній обмотці; W_1 – кількість витків первинної обмотки; W_2 – кількість витків однієї з вторинних обмоток.

Як видно, чутливість датчика при зустрічному вмиканні вторинних обмоток збільшується удвічі, а фаза вихідного сигналу залежить від напрямку переміщення плунжера.

Для забезпечення найбільшої точності вимірювання неелектричних параметрів електричними методами, в автоматичному контролі широко використовуються *компенсаційні схеми*. Компенсаційні схеми принципово можуть мати потенціометричні, феродинамічні, ємнісні та інші датчики. Компенсаційна схема вимірювання з диференціально-трансформаторними датчиками наведена на **Рис. 4.5**. Схема має диференціально-трансформаторний датчик (ДТД) неелектричної величини, яка може бути перетворена в переміщення, та ідентичний йому за всіма параметрам *диференціально-трансформаторний компенсатор* (ДТК).

Первинні обмотки ДТК та ДТД вмикаються послідовно, а їх вторинні обмотки – зустрічно. Сигнал різниці вторинних обмоток ДТД і ДТК подається на вхід електронного підсилювача. З виходу електронного підсилювача сигнал надходить до обмотки керування реверсивного двигуна

(РД), ротор якого зв'язаний механічно із плунжером ДТК, а також із стрілкою вторинного приладу. Якщо різниця $\Delta U_{\text{вих}}$ між вихідною напругою датчика $E_{\text{д}}$ і компенсатора $E_{\text{к}}$ дорівнює нулю

$$\Delta U_{\text{вих}} = E_{\text{д}} - E_{\text{к}} = 0 ,$$

то напруга на виході підсилювача $U_{\text{вих}} = 0$, струм в обмотці керування двигуна відсутній і двигун знаходиться в нерухомому стані.

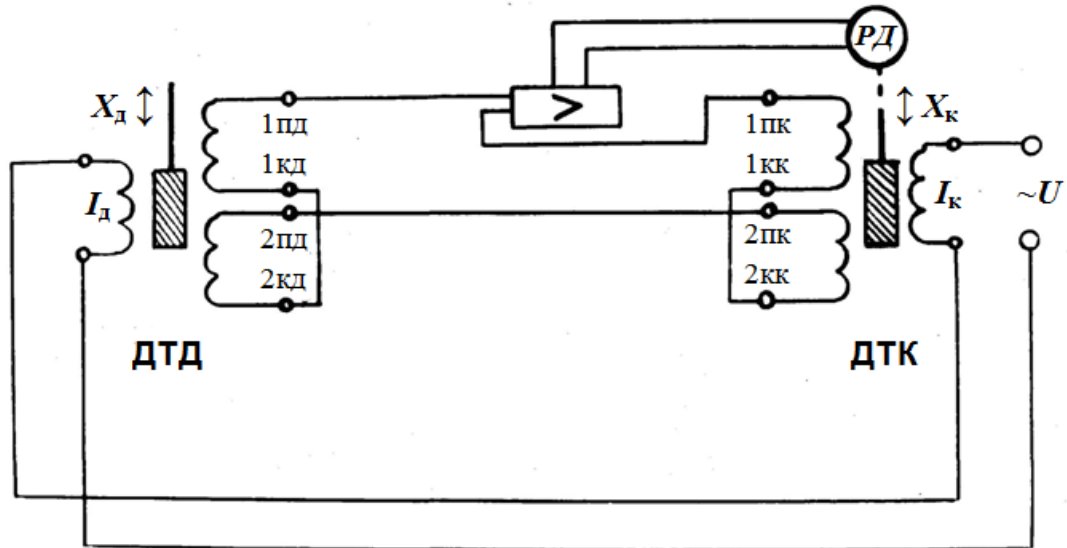


Рисунок 4.5 – Компенсаційна схема вмикання диференціально-трансформаторного датчика (ДТД) та диференціально-трансформаторного компенсатора (ДТК)

При зміні вихідної напруги датчика:

$$\Delta U_{\text{вих}} = E_{\text{д}} - E_{\text{к}} \neq 0 \quad \text{і} \quad U_{\text{вих}} = K_{\text{п}} \cdot \Delta U_{\text{вих}} \neq 0 ,$$

де $K_{\text{п}}$ – коефіцієнт підсилення електронного підсилювача.

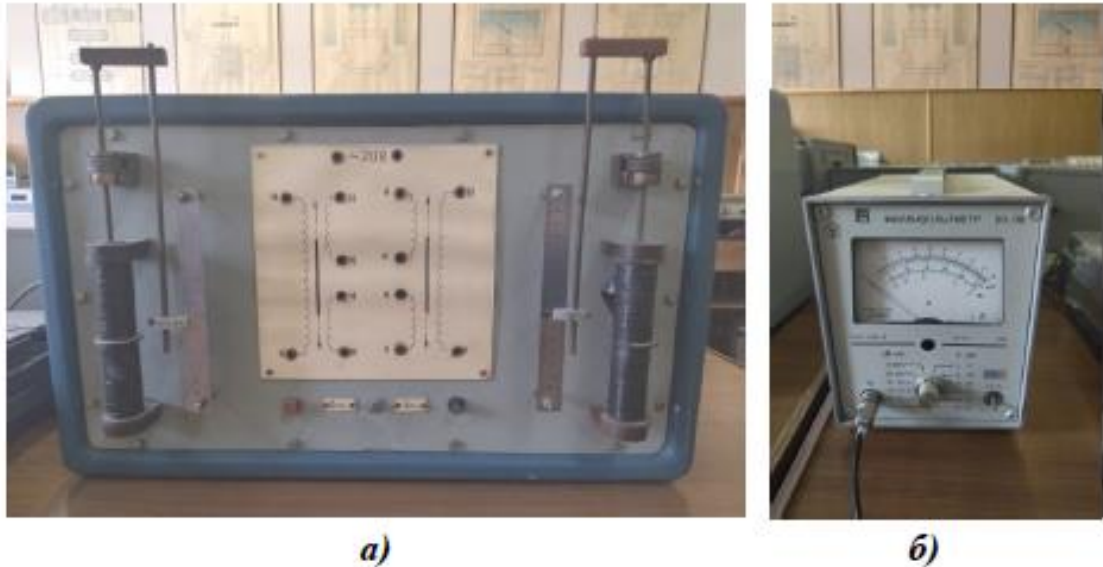
Двигун починає переміщувати плунжер ДТК до тих пір, поки не компенсує величину $\Delta U_{\text{вих}}$, тобто не приведе її до значення, рівного нулю:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{вих}} &= E_{\text{д}} - E_{\text{к}} = \\ &= \sqrt{2} \cdot \omega \cdot I \cdot W_{1\text{д}} \cdot W_{2\text{д}} \cdot K_{\text{д}} \cdot \Delta X_{\text{д}} - \sqrt{2} \cdot \omega \cdot I \cdot W_{1\text{к}} \cdot W_{2\text{к}} \cdot K_{\text{к}} \cdot \Delta X_{\text{к}} . \end{aligned} \quad (4.7)$$

З формули (4.7) випливає, що при цілком ідентичних параметрах ДТД і ДТК $\Delta U_{\text{вих}} = 0$ при $\Delta X_{\text{д}} = \Delta X_{\text{к}}$, тобто про переміщення плунжера датчика можна судити за переміщенням плунжера компенсатора, або за положенням валу реверсивного двигуна РД.

4.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка (*Рис. 4.6*) [8] складається з компоувального пульта, на якому розміщені диференціально-трансформаторний датчик (ДТД) і диференціально-трансформаторний компенсатор (ДТК) типу ДПЭС-Т, і мілівольтметра змінного струму ВЗ-38.



**Рисунок 4.6 – Лабораторна установка:
а) компоувальний пульт; б) мілівольтметр ВЗ-38**

Дані датчика ДПЭС-Т:

- кількість витків первинної обмотки – 3100;
- кількість витків вторинних обмоток – 2550;
- напруга живлення первинної обмотки – 10 В;
- струм первинної обмотки – 0,12 А;
- хід плунжера – 30 мм.

4.4 Порядок виконання роботи

4.4.1 Вмикання лабораторної установки

4.4.1.1 Ввімкнути тумблер «Сеть» («Мережа») мілівольтметра змінного струму ВЗ-38.

4.4.1.2 Тумблер «Сеть» («Мережа») компоувального пульта вмикати тільки (!!!) після збирання схеми і її перевірки викладачем!

4.4.2 Зняття статичної характеристики диференціально-трансформаторного датчика

4.4.2.1 Зібрати схему, зображену на *Рис. 4.7, а*).

4.4.2.2 Обертаючи плунжер ДТД, перевести його в положення, при якому показання вольтметра дорівнюють нулю.

4.4.2.3 Переміщуючи плунжер вгору (в прямому напрямку) і вниз (в зворотному напрямку) із кроком $\Delta X = 5$ мм (за мірною лінійкою), зняти залежність $E_{\text{вих}} = f(\Delta X)$.

4.4.2.4 Результати занести до *Табл. 4.1*.

4.4.2.5 Зняття характеристик проводити для 6-8 точок в прямому та зворотному напрямках (повторюючи п. 4.4.2.3 та п. 4.4.2.4), до тих пір, поки покази вольтметра, при переміщенні плунжера, не перестануть змінюватись.

4.4.3 Зняття характеристик трансформаторного індуктивного датчика

4.4.3.1 Зібрати схему, зображену на *Рис. 4.7, б*).

4.4.3.2 Під'єднувати вольтметр по чергово до першої і другої вторинних обмоток датчика і, переміщуючи плунжер із кроком $\Delta X_{\text{д}} = 5$ мм в прямому та зворотному напрямках, зняти залежності $E_1 = f(\Delta X_{\text{д}})$ і $E_2 = f(\Delta X_{\text{д}})$.

4.4.3.3 Результати занести до *Табл. 4.2*.

4.4.4 Вивчення компенсаційного методу вимірювання переміщення

4.4.4.1 Зібрати схему, зображену на *Рис. 4.7, в*).

4.4.4.2 Встановити плунжери ДТД і ДТК в положення, коли показання вольтметра дорівнюють нулю

4.4.4.3 Переміщуючи плунжер датчика вгору із кроком $\Delta X_{\text{д}} = 5$ мм, досягнути компенсації показань вольтметра, за допомогою плунжера компенсатора.

4.4.4.4 Аналогічні вимірювання провести, при переміщенні плунжера датчика вниз.

4.4.4.5 Результати занести до *Табл. 4.3*.

4.4.4.6 Зняття характеристик проводити для 6-8 точок (повторюючи п. 4.4.4.3 та п. 4.4.4.4).

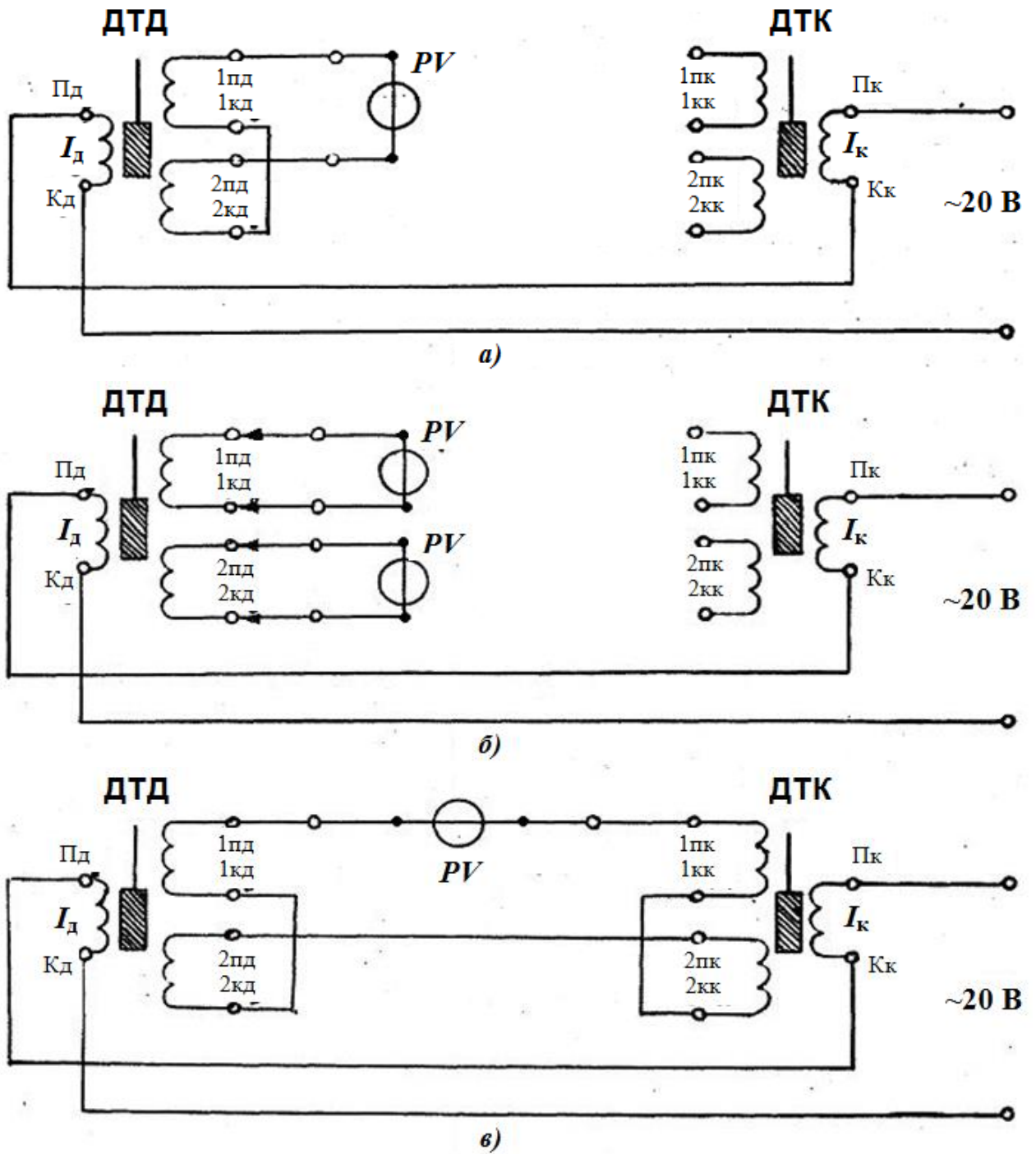


Рисунок 4.7 – Схеми вмикання ДТ-датчика і ДТ-компенсатора у лабораторній установці

Таблиця 4.1

**Результати зняття статичної характеристики
диференціально-трансформаторного датчика**

Переміщення плунжера датчика ΔX_d , мм		0	5	10	15	20	25	30	-5	-10	-15	-20	-25	-30
$E_{\text{вих}}$, мВ у напрямку	прямому													
	зворотному													
Середнє значення $E_{\text{вих сер}}$, мВ														
Абсолютна похибка ΔE , мВ														

Таблиця 4.2

**Результати зняття статичної характеристики
індуктивного датчика**

Переміщення плунжера датчика ΔX_d , мм		0	5	10	15	20	25	30	-5	-10	-15	-20	-25	-30
E_1 , мВ у напрямку	прямому													
	зворотному													
Середнє значення $E_{1 \text{ сер}}$, мВ														
Абсолютна похибка ΔE_1 , мВ														
E_2 , мВ у напрямку	прямому													
	зворотному													
Середнє значення $E_{2 \text{ сер}}$, мВ														
Абсолютна похибка ΔE_2 , мВ														

Таблиця 4.3

**Результати зняття статичної характеристики
компенсаційного методу вимірювання**

Переміщення плунжера датчика ΔX_d , мм		0	5	10	15	20	25	30	-5	-10	-15	-20	-25	-30
Переміщення плунжера компенсатора ΔX_k , мм	прямому													
	зворотному													
Середнє значення $\Delta X_{k\text{сер}}$, мм														
Абсолютна похибка ΔX_k , мм														

4.5 Обробка результатів і побудова графіків

4.5.1 За даними таблиць **Табл. 4.1 – Табл. 4.3** визначити:

– абсолютну похибку в кожній точці:

$$\Delta E = \frac{E_{\text{пр.}} - E_{\text{звор.}}}{2}; \quad \Delta \bar{X}_k = \frac{X_{\text{к.пр.}} - X_{\text{к.звор.}}}{2};$$

– середнє значення (математичне сподівання) абсолютної похибки:

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta i,$$

де n – кількість вимірюваних точок; Δi – абсолютна похибка у i -й точці;

– середню квадратичну похибку:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta i^2}{n-1}}.$$

4.5.2 За даними таблиць **Табл. 4.1 – Табл. 4.3** побудувати графіки отриманих залежностей.

4.5.3 Для схем, зображених на **Рис. 4.7, а)** та **Рис. 4.7, б)**, визначити

чутливість датчика на лінійній ділянці характеристики:

$$S = \frac{dE}{dX_d} \approx \frac{\Delta E}{\Delta X_d}$$

і зробити висновок про переваги тієї чи іншої схеми.

4.6 Зміст звіту

За результатами виконання лабораторної роботи складається письмовий звіт, який містить:

1. Назву роботи та її мету.
2. Схеми вмикання ДТД і ДТК (*Рис. 4.7*).
3. Формули для обчислень.
4. Таблиці з результатами вимірювань та обчислень.
5. Графічні залежності: $E_d = f(\Delta X_d)$; $E_{d1} = f(\Delta X_d)$, $E_{d2} = f(\Delta X_d)$, $X_k = f(\Delta X_d)$.
6. Висновок про переваги тієї чи іншої схеми, зображеної на *Рис. 4.7*.
7. Короткі загальні висновки по роботі.

4.7 Контрольні питання

1. Принцип дії індуктивних перетворювачів (датчиків).
2. Принцип дії ДТД переміщення.
3. Які існують конструкції індуктивних перетворювачів?
4. В чому суть процесів, які відбуваються в індуктивному датчику при дії вимірюваної величини?
5. Як залежить повний опір індуктивного перетворювача від повітряного зазору?
6. Основні недоліки індуктивних перетворювачів.
7. Основні переваги ДТД.
8. Конструкція циліндричного ДТД.
9. Як змінюється чутливість ДТД при зустрічному вмиканні вторинних обмоток?
10. Поясніть статичну характеристику ДТД.
11. В чому суть компенсаційного методу вимірювання переміщення?

5. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА «ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕМПЕРАТУРИ»

5.1 Мета роботи:

- 1) вивчити різновиди та галузі використання перетворювачів температури;
- 2) вивчити принцип дії та конструкції електричних термометрів;
- 3) дослідити напівпровідникові терморезистори.

5.2 Короткі теоретичні відомості

Температуру нагрітого тіла, рідини, газу визначають, вимірюючи фізичні параметри або самого контрольованого середовища, або спеціального елемента, який сприймає зміну температури і знаходиться у тепловому контакті з цим середовищем.

На практиці в якості термосприймаючих елементів (перетворювачів температури) застосовуються термочутливі перетворювачі (терморезистори) та термоелектричні перетворювачі (термопари) [8].

5.2.1 Термочутливі перетворювачі

Принцип дії *термочутливих перетворювачів (терморезисторів)* оснований на залежності електричного опору провідників чи напівпровідників від їх температури, тобто від температури середовища, в яке поміщено терморезистор.

Для вимірювання температури найбільшого розповсюдження набули терморезистори, виконані з платинового або мідного дроту. Стандартні платинові терморезистори застосовуються для вимірювання температури в діапазоні $-260...+1100$ °С, а мідні – в діапазоні $-200...+200$ °С (ГОСТ 6651-78). Крім платини та міді іноді застосовують нікель.

На *Рис. 5.1, а)* показано конструкцію платинового терморезистора.

В каналах керамічної трубки 1 розміщені дві (або чотири) секції спіралі 2 з платинового дроту, з'єднані між собою послідовно. До кінців спіралі припаяні виводи 3, які використовуються для під'єднання терморезистора до вимірювального кола. Кріплення виводів та герметизацію керамічної трубки виконують за допомогою глазури 4. Канали трубки засипають порошком безводного оксиду алюмінію, що виконує роль

ізолятора та фіксатора спіралі. Порошок безводного окису алюмінію, який має високу теплопровідність та малу теплоємність, забезпечує добру передачу теплоти й малу інертність терморезистора. Для захисту терморезистора від механічного і хімічного впливу зовнішнього середовища його поміщають до захисної арматури з нержавіючої сталі (*Рис. 8.1, б*).

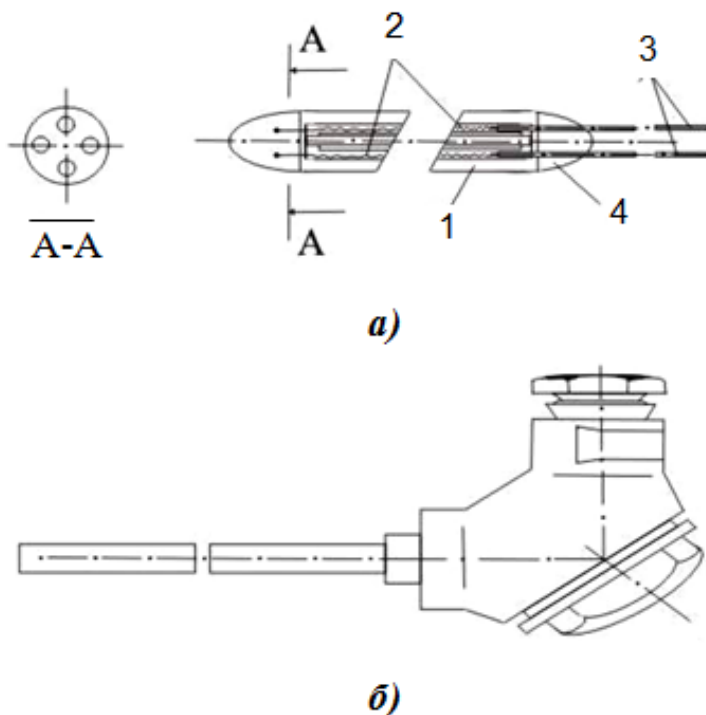


Рисунок 5.1 – Платиновий терморезистор:
а) конструкція; б) зовнішній вигляд арматури;
1 – керамічна трубка; 2 – спіралі; 3 – виводи; 4 – герметизуюча
глазур

Опір провідника R_t електричному струмові залежить від температури провідника t і визначається за співвідношенням:

$$R_t = R_0 \cdot [1 + \alpha_0 \cdot (t - t_0)] , \quad (5.1)$$

де R_0 – опір провідника при температурі t_0 ; α_0 – температурний коефіцієнт електричного опору (ТКО), який показує відносну зміну опору провідника, при зміні його температури на 1°C (або на 1°K).

Чутливість металевого (дротяного) терморезистора визначається з виразу:

$$K = \frac{\Delta R}{\Delta t} = R_0 \cdot \alpha_0 . \quad (5.2)$$

Чутливість може бути збільшена, шляхом вибору матеріалу із більшим ТКО й опором (із меншим діаметром та більшою довжиною дроту). Датчики з металевими терморезисторами використовуються для вимірювання температур газового середовища та рідини.

Основні похибки дротяних температурних датчиків обумовлюються *нестабільністю електричних властивостей матеріалу резистора та умовами використання*. Точність цього типу датчиків (разом з індикаторним приладом) складає 1,0...1,5 %. Важливим недоліком таких датчиків є їх *інерційність*. Стала часу τ , в залежності від діаметру дроту та конструкції датчика, може бути 0,05...5,00 с і більше.

Напівпровідникові (НП) терморезистори володіють значно більшою чутливістю, ніж металеві. Серійно випускаються дві групи НП-терморезисторів:

- з негативним ТКО – *термістори*;
- з позитивним ТКО – *позистори*;

У термісторів сприймаючий орган виготовлено з мідномарганцевих або кобальтомарганцевих напівпровідникових дротів із спеціальними добавками. В залежності від матеріалу, термістори діляться на *мідномарганцеві ММТ* та *кобальтомарганцеві КМТ*, які можуть працювати в колах як змінного, так і постійного струму.

На **Рис. 5.2** [8] показано конструктивне виконання термісторів.

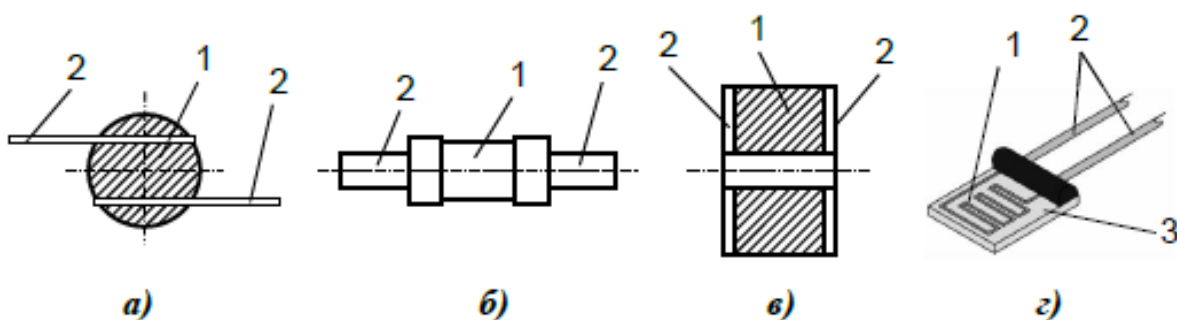


Рисунок 5.2 – Конструктивні форми виконання напівпровідникових терморезисторів (термісторів):

- а) намистинкові; б) трубчасті; в) дискові; з) плівкові;**
1 – напівпровідниковий матеріал; 2 – виводи; 3 – підкладка

Найбільш розповсюджені конструкції термісторів являють собою кульку (намистинку) (**Рис. 5.2, а**), трубку (**Рис. 5.2, б**) чи диск (**Рис. 5.2, в**) з напівпровідникового матеріалу 1 із металевими виводами 2. Останнім часом, із розвитком мікроелектронних технологій, набувають поширення

плівкові термістори (Рис. 5.2, з), в яких напівпровідниковий матеріал вирощується тонким шаром (плівкою) на підкладці З. Для захисту від дії вологи, термістори покривають лаком чи склом, а інколи навіть розміщують в закритих скляних балонах.

Залежність опору термістора від температури ілюструє графік (Рис. 5.3, а). Ця залежність описується рівнянням:

$$R_t = A \cdot e^{-\frac{B}{T}}, \quad (5.3)$$

де R_t – величина опору терморезистора при температурі T °К; A – стала, що залежить від фізичних властивостей матеріалу і габаритів терморезистора; B – стала, що залежить від фізичних властивостей матеріалу і характеризує *термочутливість* терморезистора.

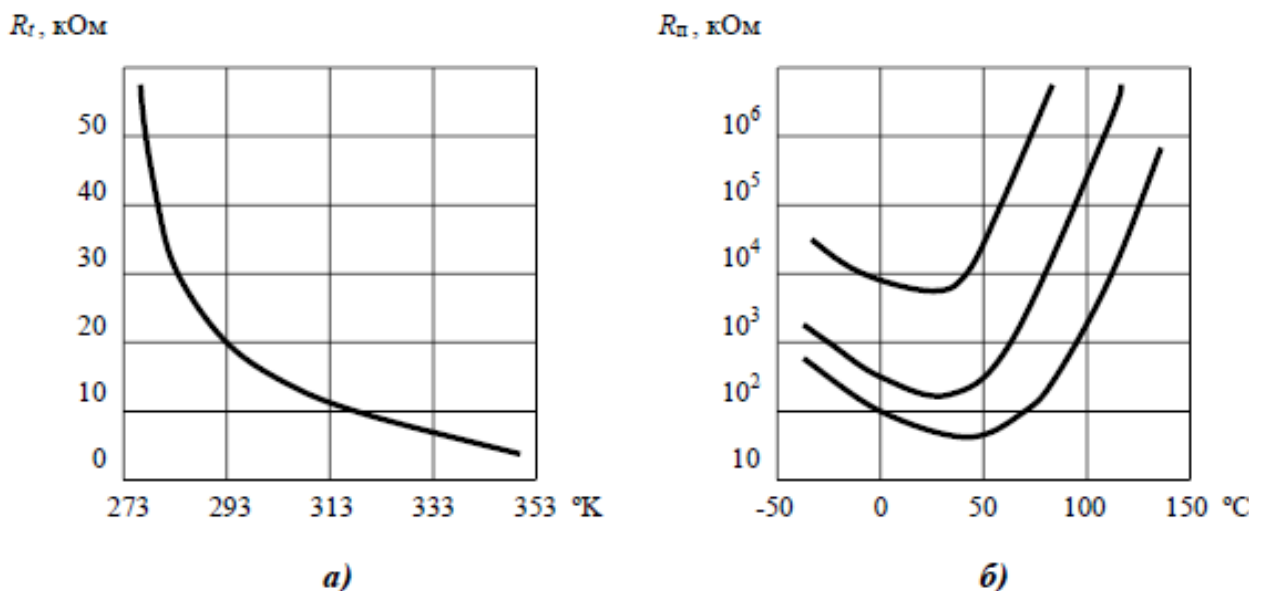


Рисунок 5.3 – Температурні характеристики НП-терморезисторів:
а) термістора; б) позистора

Чутливість термістора визначається за співвідношенням:

$$K_{Д} = \frac{dR_t}{dt} = \alpha \cdot R_t, \quad (5.4)$$

де α – ТКО термістора ($\alpha = -\frac{B}{T^2}$).

ТКО термістора в 6-10 разів більший, ніж у дротяного терморезистора.

Позистор – терморезистор з більшим позитивним ТКО. Позистори

виготовляють з титаніту барію із спеціально підібраними домішками, які надають йому властивості напівпровідника, з різкою залежністю опору від температури. Позитивний ТКО позисторів у 3-4 рази більше, ніж у термісторів, а їх стала часу в 5-6 разів менша.

Температурна характеристика позисторів наведена на **Рис. 5.3, б**).

Температурна характеристика розподіляється на дві ділянки:

- перша ділянка від 0 °С до температури точки Кюрі (T_K), при якій спостерігається різке зростання опору позистора;
- друга – від температури T_K до 120 °С.

Перша ділянка описується рівнянням:

$$R_{\Pi} = A \cdot e^{B \cdot (T - T_{\text{поч}})} + R_{\text{поч}} , \quad (5.5)$$

а друга ділянка описується рівнянням:

$$R_{\Pi} = \alpha \cdot (T - T_K)^{\beta} + R_K , \quad (5.6)$$

де A , B , α , β – сталі коефіцієнти, що визначаються за експериментальними точками; $R_{\text{поч}}$ і R_K – опір позистора, відповідно, при початковій температурі $T_{\text{поч}}$ та температурі точки Кюрі T_K .

Основними параметрами НП-терморезисторів є:

- α – величина ТКО, 1/°С;
- τ – стала часу, що характеризує теплову інертність терморезистора, с (вона дорівнює часу, протягом якого температура терморезистора змінюється на 63 % від різниці температур зразка та оточуючого середовища; частіше різницю температур беруть рівною 100 °С);
- P_{max} – максимально допустима потужність розсіювання, Вт (мВт);
- H – коефіцієнт розсіювання, Вт/°С;
- C – теплоємність, Дж/°С.

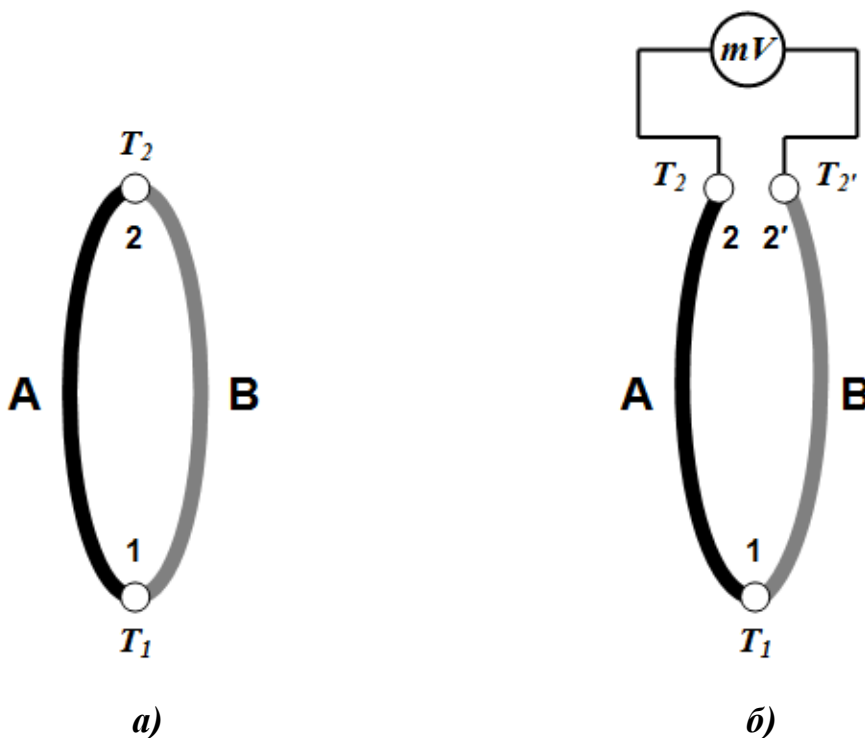
Параметри τ , H і C пов'язані між собою співвідношенням:

$$\tau = \frac{C}{H} . \quad (5.7)$$

5.2.2 Термоелектричні перетворювачі

Робота *термоелектричних перетворювачів (термопар)* базується на залежності термо-ЕРС в колі, що складається з двох різних провідників або напівпровідників A та B від різниці температур в спаях 1 та 2 (**Рис. 5.4, а**) [8]. Якщо підтримувати температуру холодного спаю T_2

постійною, то ЕРС термопари буде функцією температури робочого (гарячого) спаю 1, тобто температури об'єкту вимірювання.



**Рисунок 5.4 – Термоелектричний перетворювач (термопара):
а) будова; б) під'єднання вимірювального приладу;**

А та В – різні провідники або напівпровідники; 1 – робочий (гарячий) спай із температурою T_1 ; 2 – холодний спай (або кінець) із температурою T_2 ; 2' – холодний кінець із температурою T_2

Отже, вимірювання температури зводиться до вимірювань ЕРС термопар. В якості вимірювачів служать мілівольтметри постійного струму, котрі включаються в розрив холодного спаю 2 (кінці 2 та 2'), як показано на **Рис. 5.4, б)** [8]. Величина ЕРС залежить від матеріалу обох провідників. Точку з'єднання провідників (електродів) 1 називають робочим спаєм термопар, точки 2 і 2' – вільними кінцями.

Значення термо-ЕРС різних матеріалів визначається в парі з яким-небудь еталонним матеріалом (зазвичай таким матеріалом є платина). Нижче наводиться **Табл. 5.1** із переліком деяких матеріалів, що застосовується в термопарах, і значеннями їх термо-ЕРС в парі з платиною при $T_1 = 100\text{ }^\circ\text{C}$ і $T_2 = 0\text{ }^\circ\text{C}$. Термо-ЕРС термопар, виготовленої з двох матеріалів, підраховується, як різниця термо-ЕРС цих матеріалів, визначених у парі з платиною. Наприклад, термо-ЕРС пари хромель-алюмель на $100\text{ }^\circ\text{C}$ при

$t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ буде дорівнювати:

$$E = E_{\text{хромель}} - E_{\text{алюмель}} = 2,95 - (-1,15) = 4,1\text{ мВ.}$$

Таблиця 5.1

Деякі матеріали, використовувані в термопарах, і значення їх термо-ЕРС в парі з платиною при $T_1 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $T_2 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Матеріал	Термо-ЕРС, мВ
Платина	0,0
Телур	40,0
Сурма	4,8
Хромель (90 % Ni + 10 % Cr)	2,95
Ніхром	2,2
Залізо	1,8
Мідь-золото	0,75
Платинородій	0,84
Іридій	0,65
Алюмель (94,83 % Ni + 2 % Al + 2 % Mn + 1 % Si + 0,17 % Fe)	-1,15
Константан	-3,5
Копель (156 % Cu + 7,44 % Ni)	-4,0

При практичному використанні термоелектричних термометрів температура вільних кінців термопари звичайно не дорівнює $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, і тому необхідно вводити поправку. Це здійснюється за допомогою спеціальних схем температурної компенсації.

Для вимірювання температури зараз використовують термопари, виготовлені зі спеціальних сплавів. У **Табл. 5.2** приведені характеристики сучасних термопар.

В теперішній час у промисловості використовується досить велика кількість різноманітних термопар, побудованих з різних пар матеріалів. При виборі термопари, для використання у тих чи інших умовах вимірювань, до термоелектронних матеріалів ставиться ряд вимог:

- механічна міцність та жаростійкість;
- хімічна стійкість;
- стабільність та лінійність характеристики;
- висока чутливість.

Наприклад, із зростанням температури зменшується механічна міцність термоелектронів і збільшується хімічна активність електродів, що

контактують із матеріалами та середовищем.

Таблиця 5.2

Характеристики сучасних термопар

Тип термопар	Матеріал електродів термопар	Термо-ЕРС при $T_1 = 100\text{ }^\circ\text{C}$ $T_2 = 0\text{ }^\circ\text{C}$	Верхня межа вимірюваної температури, $^\circ\text{C}$	
			довгочасно	короткочасно
ТПП	Платинородій (10 % родію) - платина	0,64	1300	1600
ТПР	Платинородій (30 % родію) - платинородій (6 % родію)	13,18 (при $T = 1800\text{ }^\circ\text{C}$)	1600	1800
ТХА	Хромель-алюмель	4,1	1000	1300
ТХК	Хромель-копель	6,9	600	800
ТВР	Вольфрамрений (5 % ренію) - вольфрамрений (20 % ренію)	1,33	2200	2500

Термопары платинової групи добре працюють у нейтральних та окислювальних середовищах, але швидко руйнуються у відновних середовищах (за присутності водню) при температурах понад $500\text{ }^\circ\text{C}$. Термопары ж на основі молібдену, вольфраму, ренію та їх сплавів, навпаки, добре працюють у відновних середовищах і швидко виходять з ладу у окислювальних середовищах.

Для вимірювання високих температур використовують термопары з неблагородних матеріалів – типів ТХА, ТХК і ТВР. Термопары з благородних матеріалів (ТПП і ТПР) використовують при вимірюваннях із підвищеною точністю.

Для захисту від зовнішніх впливів (тиску, агресивних газів тощо) електроди термопар поміщають в захисну арматуру, конструктивно подібну до арматури терморезистора (**Рис. 5.5**).

Термопары володіють високою інерційністю. Термопары в звичайній арматурі мають показник теплової інерції порядку кількох хвилин. Все більшого поширення набувають *малоінерційні термопары*, у яких показник теплової інерції менше 40 с.



Рисунок 5.5 – Приклади арматур сучасних термопар

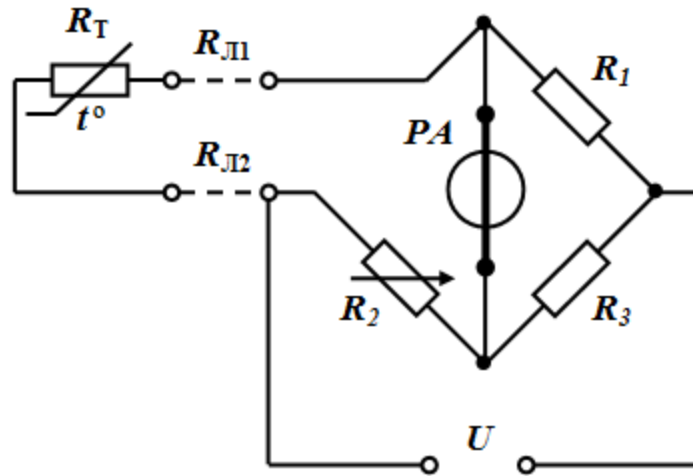
5.3 Прилади для вимірювання температури

Електричні прилади, що призначені для вимірювання температури, називають *електричними термометрами*.

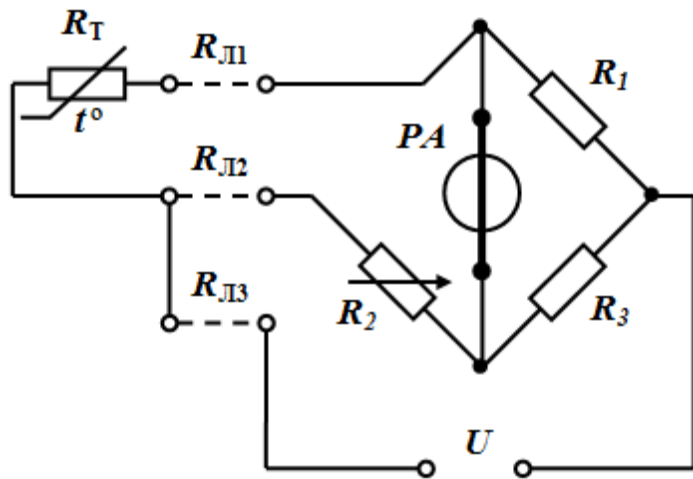
Електричний термометр являє собою сполучення (комплект) перетворювачів температури (терморезистора, термопари тощо) із електричним вимірювальним приладом. В залежності від типу використовуваного перетворювача, прилади називають *термометрами опору* або *термоелектричними термометрами*.

Електричні термометри опору складаються з перетворювача, вимірювальної схеми та вимірювача. Перетворювачами служать провідникові терморезистори (мідь, платина) або напівпровідникові терморезистори (термістори). Вимірювальна схема – мостове коло у врівноваженому або у невраїноваженому режимі. В якості вимірювача використовують магнітоелектричний однорамковий прилад або логометр. У сучасних приладах часто використовують також автоматичні самоврівноважувальні мости. Деякі вимірювальні схеми термометрів опору показані на *Рис.5.6*.

Терморезистор може бути під'єднаний до вимірювального мосту за *двопровідною* або *трипровідною* схемою.



а)



б)

**Рисунок 5.6 – Мостові вимірювальні схеми вмикання термометрів опору:
а) двопровідна; б) трипровідна**

Якщо терморезистор ввімкнений в одне з плечей мосту за допомогою двох проводів (Рис. 5.6, а), то, за рахунок зміни опору проводів, при коливанні оточуючої температури виникає похибка:

$$\Delta T = \frac{\Delta R_{\text{л}}}{R_{\text{пер}} \cdot \alpha_{\text{пер}}}, \quad (5.8)$$

де $\Delta R_{\text{л}} = \Delta R_{\text{Л1}} + \Delta R_{\text{Л2}}$ – зміна опору з'єднувальних проводів (ліній);
 $R_{\text{пер}}$ – початковий (при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) опір перетворювача (терморезистора);

$\alpha_{\text{пер}}$ – ТКО перетворювача (терморезистора).

Щоб зменшити похибку ΔT , застосовують не два, а три з'єднувальних проводи (*Рис. 5.6, б*). В такій схемі два проводи ввімкнені у сусідні плечі мосту, а третій – у діагональ живлення. При роботі схеми у зрівноваженому режимі та виконанні умов:

$$R_1 = R_3 \text{ та } R_{Л1} = R_{Л2},$$

похибка від зміни опору проводів *відсутня*.

Термоелектричні термометри призначені для вимірювання температури в діапазоні 650...1800 °С і складаються з термоелектричного перетворювача, у вигляді мілівольтметра або потенціометра (компенсатора). Мілівольтметри термоелектричних термометрів майже завжди градууються в градусах температурної шкали під обумовлену термопару для зовнішнього опору.

Тому вимірювач потрібно приєднати до термопари спеціальними з'єднувальними і подовжувальними проводами.

На *Рис. 5.7* наведена схема термоелектричного термометра із мілівольтметром.

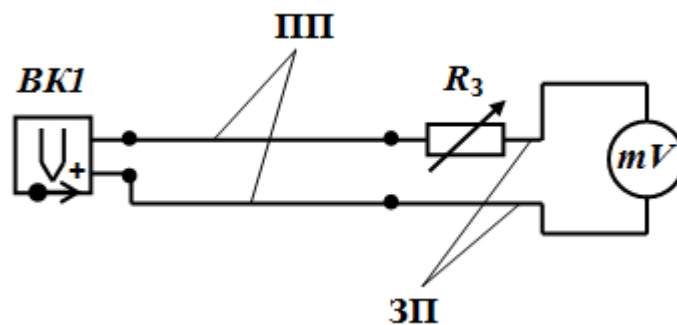


Рисунок 5.7 – Термоелектричний термометр на основі термопари. Схема електрична принципова:

BK1 – датчик-вимірювач температури (термопара);

R₃ – зрівноважувальний резистор; ПП – подовжувальні проводи;

ЗП – з'єднувальні проводи

Покази мілівольтметра:

$$U = \frac{E_{\text{ТП}} \cdot R_{mV}}{R_{\text{ЗОВН}} + R_{mV}}, \quad (5.9)$$

де $E_{\text{ТП}}$ – ЕРС термопари; $R_{\text{ЗОВН}}$ – зовнішній опір ($R_{\text{ЗОВН}} = R_{\text{ТП}} + R_{\text{ПР}} + R_3$); $R_{\text{ТП}}$ – опір термопари; $R_{\text{ПР}}$ – опір проводів; R_3 – опір зрівноважувального

резистора); R_{mV} – опір мілівольтметра.

Як видно з (5.9), покази мілівольтметра при постійних $R_{зовн}$ та R_{mV} визначаються значенням ЕРС термопар, отже, і вимірюваною температурою. В цьому випадку шкала приладу може бути градуйована у градусах із зазначенням типу термопарі і обраного значення зовнішнього опору. Для підгонки зовнішнього опору до значення, при якому проводилося градуювання (0,6 Ом; 5 Ом; 15 Ом та 25 Ом), використовують зрівноважувальний резистор.

Щоб зменшити можливі похибки вимірювання від впливу зміни опору термопарі і проводів, доцільно застосовувати мілівольтметри із великим опором, тобто з малим споживанням. При роботі з термопарами *необхідно вводити поправки* на зміну температури вільних кінців.

На **Рис. 5.8** наведена схема термометра з автоматичним введенням поправки. Для цього послідовно в коло термопарі і мілівольтметра вмикають неврівноважений міст, у якому резистор R_1 виконано з міді і який знаходиться в зоні, що має температуру вільних кінців термопарі $BK1$; резистори R_2 , R_3 та R_4 виконані з манганіну – термостабільного сплаву на основі міді (близько 85 %) з додаванням марганцю (11,5...13,5 %) та нікелю (2,5...3,5 %).

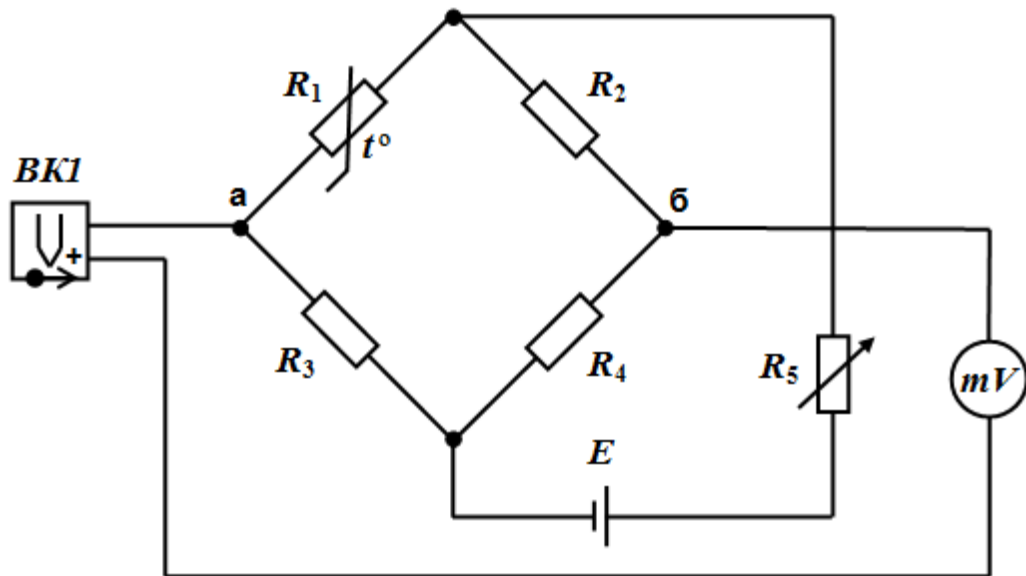


Рисунок 5.8 – Термоелектричний термометр з автоматичним введенням поправки на зміну температури вільних кінців термопарі. Схема електрична принципова

При градуюванні термометру міст знаходиться у врівноваженому стані. В процесі, при відхиленні температури вільних кінців термопар від значення температури, при якій здійснювалось градуювання, на діагоналі мосту аб з'являється різниця потенціалів, яка додається до термо-ЕРС термопар. Параметри мосту підібрані так, що зміна термо-ЕРС від коливання температури вільних кінців практично повністю компенсується напругою, яка знімається з мосту. Чутливість мосту регулюється за допомогою резистора R_5 .

5.4 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка для дослідження параметрів терморезистора (*Рис. 5.9*) [8] складається з посудини 1, яка заповнена водою, електронагрівального елемента 2, терморезисторів 3, ртутного термометра 4, цифрового приладу (типу В 7-20) 5 та компонувального пульта 6, манометричного термометра 7.

Ртутний термометр використовується для вимірювання дійсної температури середовища, в яке поміщено терморезистори (тобто для вимірювання температури термісторів). Компонувальний пульт служить для монтажу на ньому манометричного термометра 7, а також з'єднувальної та комутуючої електроарматури.

В установці використовують термістори типу ММТ-8 (R_{T1}), ММТ-4 (R_{T2}), КМТ-14 (R_{T3}), основні параметри яких приведено у *Табл. 5.3*. ММТ-4 та КМТ-14 використовують для вимірювання і регулювання температури, а ММТ-8 – для температурної компенсації.

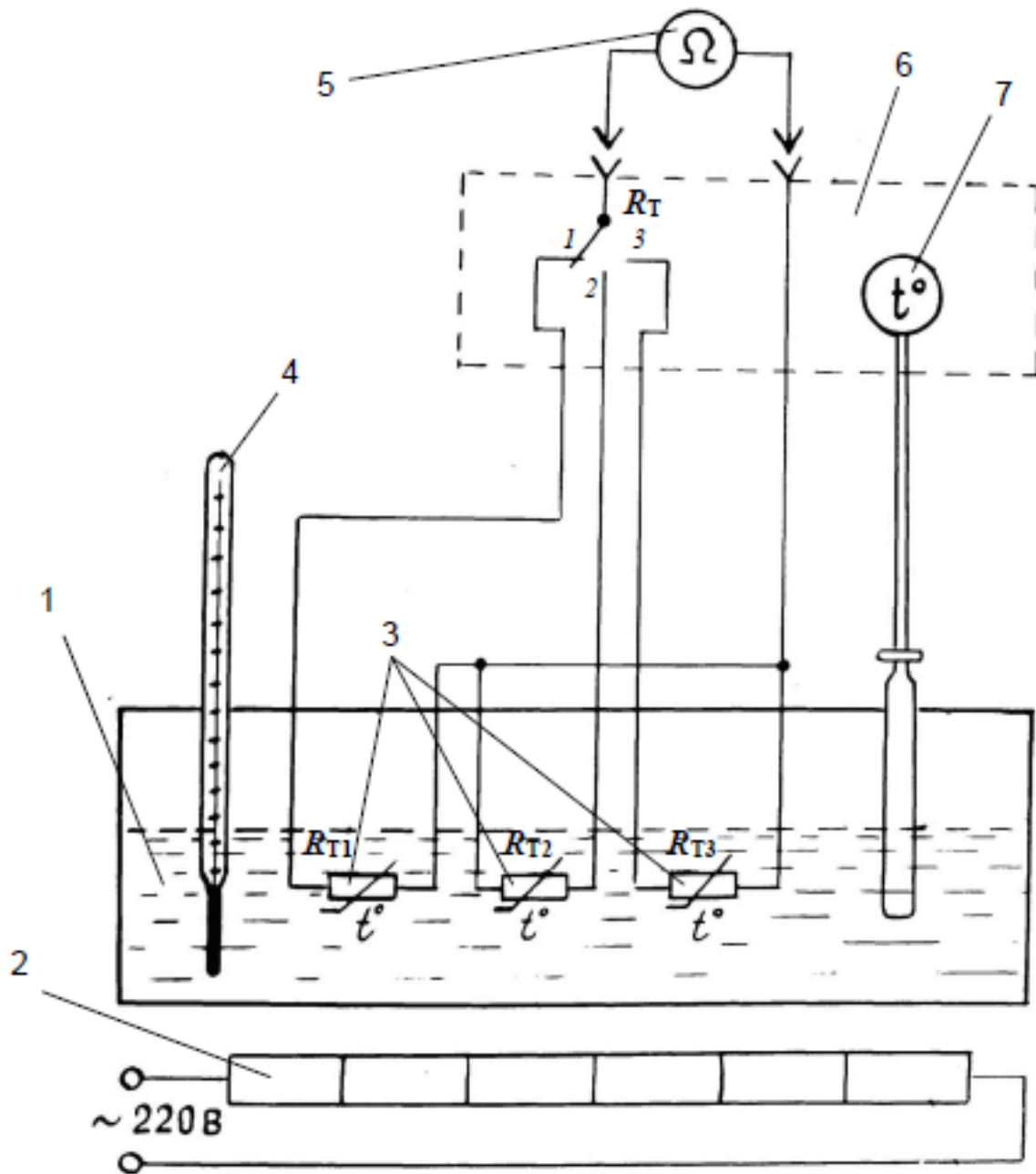


Рисунок 5.9 – Схема лабораторної установки:
1 – посудина з водою; 2 – електронагрівальний елемент;
3 – терморезистори; 4 – ртутний термометр; 5 – цифровий
прилад; 6 – компонувальний пульт; 7 – манометричний термометр

Таблиця 5.3

**Основні характеристики терморезисторів,
використаних у лабораторній установці**

Терморезистори		$R_{\text{ном}}$, кОм (при 20 °С)	Стала B , °К	α_T , %/°С (при 20 °С)	Діапазон робочих температур, °С	P_{max} , мВт (не більше)		H , мВт/°С	τ , с (не більше)
Познач.	Тип					при $T_{\text{ном}}$	при T_{max}		
R_{T1}	ММТ-8	0,001 - 1	2060 - 3430	2,4 - 4	-60...70	600	2	13	900
R_{T2}	ММТ-4	1 - 220	2060 - 4300	2,4 - 5	-60...125	550	0,5	6	115
R_{T3}	КМТ-14	0,51; 0,91; 160; 200; 330; 4300; 7500 при 150 °С	4100 - 7000	2,3 - 3,9 при 150 °С	-10...300	100	0,03	0,8	10 у режимі нагрі- вання

5.5 Порядок виконання роботи

5.5.1 Підготовка до роботи

5.5.1.1 Заповнити водою посудину 1 (див. *Рис. 5.9*).

5.5.1.2 На приладі В7-20:

- приєднати кабель живлення до мережі;
- встановити перемикач «Род работы» («Рід роботи») в положення «кΩ»;
- під'єднати до клем «0» та «R» вимірювальні проводи;
- ввімкнути вмикач «Сеть» («Мережа»).

5.5.1.3 На компонувавальному пульті:

- встановити перемикач « R_T » в положення «1»;
- під'єднати вимірювальні проводи до гнізд «Выход R_T » («Вихід R_T »).

5.5.2 Вимірювання опорів термісторів

5.5.2.1 Приєднати кабель живлення нагрівального елемента до мережі

та ввімкнути елемент.

5.5.2.2 Підвищуючи температуру в посудині (за показами ртутного термометра), починаючи від 20 °С, через 10 °С проводити вимірювання величин опору термісторів. Почергове під'єднання термісторів до вимірювального приладу виконувати за допомогою перемикача « R_T ».

5.5.2.3 Результати вимірювань занести до **Табл. 5.4**.

5.5.2.4 Користуючись виразом (5.4) і значеннями α_T з **Табл. 5.3**:

– визначити чутливість терморезисторів $K_D = f(T)$;

– результати обчислень занести до **Табл. 5.4**.

5.5.2.5 За даними **Табл. 5.4** побудувати графічні залежності для термісторів $R_{Ti} = f(T)$ та $K_{Di} = f(T)$.

Таблиця 5.4

Результати вимірювань та обчислень

Параметри терморезисторів	$T, ^\circ\text{K}$								
	293	303	313	323	333	343	353	363	373
$R_{T1}, \text{кОм}$									
$R_{T2}, \text{кОм}$									
$R_{T3}, \text{кОм}$									
$K_{D1}, \text{кОм}/^\circ\text{C}$									
$K_{D2}, \text{кОм}/^\circ\text{C}$									
$K_{D3}, \text{кОм}/^\circ\text{C}$									

5.6 Зміст звіту

За результатами виконання лабораторної роботи складається письмовий звіт, який містить:

1. Назву роботи та її мету.
2. Схему лабораторної установки для дослідження термісторів (див. **Рис. 5.9**) та короткий опис принципу її роботи.
3. Таблицю результатів вимірювань та обчислень (**Табл. 5.4**).
4. Графічні залежності для термісторів $R_{Ti} = f(T)$ та $K_{Di} = f(T)$.
5. Короткі висновки по роботі.

5.7 Контрольні питання

1. Будова, принцип дії та сфера використання металевих терморезисторів.
2. ТКО і чутливість металевих терморезисторів; їх переваги та недоліки.
3. Будова, принцип дії та сфера використання термісторів.
4. Основні параметри термісторів.
5. ТКО і чутливість термісторів.
6. Залежність опору термісторів від температури; вплив якостей термісторів на значення сталих A та B .
7. Позистори; залежність опору позистора від температури.
8. Будова, принцип дії та сфера використання
9. Термоелектричні перетворювачі; будова і принцип дії.
10. Типи термопар, що застосовуються для вимірювання температури; сфера їх використання.
11. Схема електрична принципова електричних термометрів опору; похибки вимірювання і способи їх зменшення.

6. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дорожовець М. М. Опрацювання результатів вимірювань : навч. посіб. Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2007. 624 с.
2. Дорожовець М., Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А. Основи метрології та вимірювальної техніки : підруч. У 2 т. / за ред.: Б. Стадника. Т. 1: Основи метрології. Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2005. 532 с.
3. Дорожовець М., Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А. Основи метрології та вимірювальної техніки : підруч. У 2 т. / за ред.: Б. Стадника. Т. 2: Вимірювальна техніка. Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2005. 656 с.
4. Кованько В. В., Древецький В. В., Христюк А. О. Загальнотехнічні вимірювання і прилади : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2013. 189 с.
5. Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В. Основи метрології та електричних вимірювань : підруч. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2013. 538 с.
6. Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Долгополов В. П., Грумінська Л. В. Метрологія та вимірювальна техніка : навч. посіб. Вінниця : УНИВЕРСУМ, 2004. 252 с.
7. Лавренова Д. Л., Хлистов В. М. Основи метрології та електричних вимірювань [Електронне видання] : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 123 с.
8. Метрологія та вимірювання. Частина III. Вимірювання неелектричних величин : метод. вказівки до виконання лабораторних робіт з контрольнo-вимірювальних приладів та електричних вимірювань : для студент. спец. 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форм навчання / [уклад.: В. М. Каліч, Р. В. Жесан, М. С. Мірошніченко] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. автоматизації виробничих процесів. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 33 с.
9. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Методи і засоби

- вимірювань електричних та неелектричних величин : навч. посіб. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 206 с.
10. Обозовський С. С. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальної техніки (Загальні питання і теорія похибок) : навч. посіб. Київ : НМК ВО, 1991. 223 с.
 11. Поліщук Є. С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин : підруч. Львів : Вид-во Держ. ун-ту «Львівська політехніка», 2000. 360 с.
 12. Поліщук Є. С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин : підруч. Львів : Бескид-Біт, 2008. 618 с.
 13. Сусліков Л. М., Студеняк І. П. Первинні вимірювальні перетворювачі фізичних величин : навч. посіб. Ужгород : Вид-во УжНУ, 2018. 311 с.
 14. Шаповаленко О. Г., Бондар В. М. Основи електричних вимірювань : підруч. Київ : Либідь, 2002. 320 с.
 15. Шикалов В. С. Технологічні вимірювання: навч. посіб. Київ : КНУБА, 2005. 198 с.

Навчальний посібник

**ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН
ЕЛЕКТРИЧНИМИ МЕТОДАМИ
ВИМІРЮВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ТА ТЕМПЕРАТУРИ**

Укладачі: Каліч Віктор Михайлович,
Жесан Роман Володимирович,
Мірошніченко Марія Сергіївна.

Тиражування: _____

Здано до набору __. __. ____. Підписано до друку __. __. ____. Формат __х__ 1/8. Папір білий. Умов.
друк. арк. _____. Тираж ____ прим. Зам № ____ / ____.

©РВЛ ЦНТУ, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

Тел. (0522) 390-541, 559-245.