

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФІЗИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

СУСЛІКОВ Л. М., СТУДЕНЯК І.П.

**ПЕРВИННІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ  
ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН**

навчальний посібник  
для студентів фізико-технічних спеціальностей

УЖГОРОД – 2018

УДК 621.317.39  
ББК 32.96-04

Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Первинні вимірювальні перетворювачі фізичних величин: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2018. - 311 с.

У навчальному посібнику розглянуто методи та засоби, що використовуються для вимірювання неелектричних фізичних величин, фізичні основи та способи перетворення неелектричних величин в електричні сигнали. Викладені основні поняття про первинні перетворювачі неелектричних величин різної природи. Основна увага приділяється принципам дії, характеристикам, особливостям побудови, похибкам, перевагам та недолікам вимірювальних перетворювачів. Наведено метрологічні характеристики вимірювальних перетворювачів та їх типові структурні схеми.

Посібник призначений для студентів фізико–технічних спеціальностей, може бути корисним аспірантам, науковим працівникам, інженерам і технікам, що займаються питаннями вимірювання неелектричних величин.

Рецензенти:

Пуга П.П. – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри твердотіЛЬНОЇ електроніки УжНУ

Небола І.І. – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри прикладної фізики УжНУ

Рекомендовано редакційно–видавничою Радою Ужгородського національного університету (протокол № 3 від вересня 2018 р. )

© Ужгородський національний університет, 2018

© Сусліков Л.М., Студеняк І.П., 2018

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП .....</b>	<b>6</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН...9</b>	
1.1. Основні поняття про вимірювання та засоби вимірювань .....	9
1.2. Сутність процесу вимірювань .....	13
<b>РОЗДІЛ 2. ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ .....</b>	<b>18</b>
2.1. Електричні вимірювання неелектричних величин.....	18
2.2. Переваги та недоліки електричних вимірювань неелектричних величин .....	22
2.3. Вимірювальне перетворення фізичних величин: сутність та призначення .....	23
2.4. Основні поняття та визначення.....	29
2.5. Загальні відомості про вимірювальні перетворювачі.....	35
2.6. Класифікація первинних вимірювальних перетворювачів.....	42
2.7. Датчики.....	50
2.8. Зовнішні умови .....	56
2.9. Области застосування первинних вимірювальних перетворювачів .....	58
2.10. Системи дистанційної передачі сигналів вимірювальної інформації та первинні вимірювальні перетворювачі .....	61
<b>РОЗДІЛ 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРВИННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ .....</b>	<b>64</b>
3.1. Загальні відомості про характеристики вимірювальних перетворювачів .....	64
3.2. Основні характеристики вимірювальних перетворювачів .....	67
3.3. Статичні характеристики перетворювачів .....	70
3.4. Динамічні характеристики перетворювачів. Динамічний режим роботи перетворювача .....	85
3.5. Похибки вимірювальних перетворювачів .....	89

## **РОЗДІЛ 4. ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН .....104**

4.1. Методи вимірювань неелектричних величин .....	104
4.2. Принципи перетворення вимірюваних фізичних параметрів .....	105
4.3. Принцип дії, вимірювальне коло і види схем вимірювальних перетворювачів .....	128
4.4. Структурні схеми вимірювальних перетворювачів .....	129
4.5. Спряження первинних перетворювачів з електричними засобами вимірювань .....	139

## **РОЗДІЛ 5. ПАРАМЕТРИЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ .....143**

5.1. Загальні поняття про параметричні перетворювачі .....	143
5.2. Резистивні перетворювачі .....	144
5.2.1. Реостатні перетворювачі.....	144
5.2.2. Тензометричні перетворювачі (тензорезистори) .....	151
5.3. Фотоелектричні перетворювачі .....	160
5.3.1. Фотоелектричні перетворювачі з зовнішнім фотоефектом .....	165
5.3.2. Фоторезисторні перетворювачі .....	171
5.3.3. Фотогальванічні перетворювачі .....	175
5.4. Типи фотоелектричних перетворювачів та особливості їх застосування для вимірювання несвітлових величин .....	180
5.5. Теплоелектричні перетворювачі .....	184
5.6. Терморезисторні перетворювачі (терморезистори).....	186
5.7. Вимірювальні перетворення температури в електричний сигнал на основі використання напівпровідникового р -n переходу .....	199
5.8. Основні області застосування терморезисторних перетворювачів .....	201
5.9. Електрохімічні перетворювачі .....	203
5.9.1. Резистивні електролітичні перетворювачі.....	206
5.9.2. Гальванічні перетворювачі.....	208
5.9.3. Кулонометричні перетворювачі.....	211
5.9.4. Хімотронні перетворювачі.....	214

5.10. Ємнісні вимірювальні перетворювачі. Принцип дії та характеристики.....	215
5.11. Класифікація ємнісних вимірювальних перетворювачів.....	224
5.12. Переваги та недоліки ємнісних вимірювальних перетворювачів.....	225
5.13. Електромагнітні перетворювачі .....	226
5.13.1. Індуктивні вимірювальні перетворювачі .....	227
5.13.2. Диференціальні індуктивні перетворювачі ...	239
5.13.3. Взаємоіндуктивні (трансформаторні) перетворювачі.....	243
5.12. Магнітопружні перетворювачі.....	251

## **РОЗДІЛ 6. ГЕНЕРАТОРНІ ДАТЧИКИ .....258**

6.1. Термоелектричні перетворювачі .....	258
6.2. П'єзоелектричні перетворювачі .....	271
6.3. Індукційні перетворювачі .....	280
6.4. Магнітомодуляційні перетворювачі .....	289
6.5. Гальваноманітні перетворювачі .....	290
6.6. Магніторезистивні перетворювачі .....	298
6.7. Інтелектуальні датчики .....	300
6.8. Тенденції розвитку датчикобудування .....	304

## **ЛІТЕРАТУРА .....307**

## ВСТУП

Розвиток науки нерозривно пов'язаний з розвитком вимірювальної техніки. Вимірювання, як процес пізнання шляхом дослідження якісної і кількісної сторони будь-якого явища, будь-якої закономірності, своїми можливостями (щодо точності, чутливості, діапазону вимірюваної величини) визначають в значній мірі і розвиток науки. Чим більш високого рівня досягає вимірювальна техніка, тим ширше і глибше виявляються досягнення науки. З іншого боку, розвиток науки створює нові передумови, нові шляхи і можливості для розвитку вимірювальної техніки.

Абсолютно аналогічний взаємозв'язок спостерігається між розвитком виробництва і вимірювальної техніки. Сучасне виробництво характеризується найсуворішим дотриманням технології і широким впровадженням автоматичного управління виробничими процесами. І те й інше може бути забезпечено лише за допомогою вимірювальної техніки, шляхом вимірювання тих параметрів, які характеризують кожен ділянку, кожен вузол того чи іншого технологічного процесу.

З іншого боку, досягнення виробництва забезпечують отримання нових матеріалів і більш точне виготовлення деталей приладів, що відкриває все більш широкі можливості для розвитку вимірювальної техніки.

Вимірювання того чи іншого параметра, що характеризує той чи інший виробничий процес, зводиться до вимірювання обмеженого числа фізичних величин: температури, механічних величин (сила, тиск, переміщення, швидкість, прискорення тощо), концентрації компонент рідкого або газового середовища, часу, різних електричних величин (струму, напруги, частоти, електричної потужності і т. п.).

Характерним для сучасного розвитку вимірювальної техніки є широке застосування електровимірювальної апаратури для вимірювання практично всіх фізичних величин, в тому числі і неелектричних (температури, механічних величин тощо), що слугують для оцінки різноманітних фізичних і хімічних явищ і виробничих процесів. Пояснюється ця обставина рядом загальновідомих переваг, властивих електровимірювальній апаратурі: можливістю безперервного в часі вимірювання і запису вимірюваної величини, можливістю здійснення дистанційного вимірювання і

зв'язку з виконавчим механізмом системи управління виробничим процесом, високою точністю і чутливістю вимірювання, широким діапазоном меж вимірювання як в сторону дуже великих значень, так і в бік вельми малих значень вимірюваної величини.

Велика кількість вимірюваних неелектричних величин, розкиданість досліджуваних об'єктів у просторі, необхідність автоматизації управління при централізованому отриманні вимірювальної інформації, обробка останньої та вироблення сигналів для зворотної дії на об'єкт дослідження, можливості вимірювання швидкозмінних величин за допомогою мало інерційних електричних засобів вимірювальної техніки, можливість забезпечення високої чутливості та потрібної точності, можливість комп'ютеризації вимірювань зумовлюють використання переважно електричних методів вимірювань неелектричних величин, оскільки електричні сигнали найпридатніші як для вимірювань, так і для обробки та передачі на відстань.

При використанні електричної апаратури для вимірювання неелектричних величин з'являється ряд специфічних завдань, властивих цій галузі вимірювальної техніки. До таких завдань слід, перш за все, віднести задачу перетворення вимірюваної неелектричної величини в електричну. Елемент вимірювального пристрою, виконуючий функцію такого перетворення, називається вимірювальним перетворювачем.

Подібні перетворювачі використовують залежність того чи іншого електричного параметра твердого, рідкого або газоподібного тіла від вимірюваної величини, наприклад, залежність електричного опору від температури.

Швидкий розвиток автоматизованих систем контролю різних технологічних процесів, машин і механізмів, впровадження електронно-обчислювальних машин вусі технологічні процеси, впровадження гнучких автоматизованих виробництв поставили невідкладне завдання - забезпечити такі системи перетворювачами неелектричних величин.

В зв'язку з цими обставинами нагальною є потреба у вивченні методів та засобів електричних вимірювань електричних, магнітних та неелектричних величин, з'ясуванні фізичних основ побудови вимірювальних перетворювачів, їх класифікації, принципів дії різних типів перетворювачів, їх робочих характеристик, особливостей

побудови, конструктивного оформлення та практичного застосування.

У навчальному посібнику викладено основні відомості про первинні перетворювачі неелектричних величин, аналого-цифрові вимірювальні перетворювачі, розглянуті методи вимірювання технологічних параметрів, наведені такі принципово нові типи перетворювачів, як магнітострикційні перетворювачі лінійних та кутових переміщень, швидкості, температури, які мають значну перспективу у їх використанні. Проведено аналіз похибок перетворювачів і розглянуті методи їх зменшення.



## РОЗДІЛ 1. ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

### 1.1. Основні поняття про вимірювання та засоби вимірювань

**Вимірювання** – це пізнавальний процес отримання кількісної інформації про об'єкт, яким може служити предмет, фізична система, явище тощо. Очевидно, що об'єкт вимірювання повинен володіти однією або сукупністю притаманних йому властивостей, що представляють інтерес для отримувача саме кількісної інформації.

Одна з таких властивостей об'єкта (надалі мова буде йти виключно про фізичні об'єкти), загальна в якісному відношенні для багатьох фізичних об'єктів, але в кількісному відношенні індивідуальна для кожного з них, називається **фізичною величиною** (або просто величиною). Фізична величина, що підлягає вимірюванню, або виміряна відповідно до поставленого завдання, називається **вимірюваною фізичною величиною** (або просто вимірюваною величиною). Зауважимо, що поняття фізичної величини є одним з фундаментальних понять вимірювань і, звичайно, метрології як науки про вимірювання.

Процес знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів називається **вимірюванням**.

В процесі виконання вимірювань отримують **результат вимірювання**.

**Результат вимірювання** – це значення фізичної величини, знайдене шляхом її вимірювання.

При цьому особливо важливо відзначити, що кількість механічних, теплових, оптичних, акустичних та інших так званих **неелектричних величин**, що підлягають вимірюванню, вже на початку 60-х років минулого століття у багато разів перевищувала число всіх можливих електричних і магнітних величин.

Всі вимірювані фізичні величини можна поділити на дві групи:

- безпосередньо вимірювані фізичні величини, які в процесі вимірювання порівнюються з однорідною мірою, що відтворює необхідний розмір. Наприклад, вимірювання довжини об'єкта метром, часу – годинником;
- величини, які при вимірюванні перетворюються із заданою точністю в безпосередньо вимірювані величини, наприклад температура, густина. У цьому випадку значення вимірюваної

фізичної величини знаходять після перетворення її роду або за відомою залежністю між нею та фізичною величиною, що вимірюється безпосередньо і яка однозначно пов'язана з першою величиною, але зручніша для вимірювання. Такі перетворення здійснюються за допомогою операції вимірювального перетворення. Наприклад, вимірювання температури за допомогою термометра опору шляхом визначення його електричного опору.

Суть найпростішого прямого вимірювання полягає в порівнянні розміру фізичної величини  $Q$  з розмірами вихідної величини, що регулюється багатозначною мірою  $q[Q]$  (рис.1.1). Умовою реалізації процедури прямого вимірювання є виконання наступних елементарних операцій:

- вимірювального перетворення вимірюваної фізичної величини  $X$  в іншу фізичну величину  $Q$ , однорідну або неоднорідну з нею;
- відтворення фізичної величини  $Q_m$  заданого розміру  $N \cdot [Q]$  ( $Q_m = N \cdot [Q]$ ) однорідною перетвореною величиною  $Q$ ;
- порівняння однорідних фізичних величин: перетвореної  $Q$  і відтвореної мірою  $Q_m = N \cdot [Q]$ .

Структурна схема вимірювання показана на рис. 1.1. Для отримання результату вимірювання необхідно забезпечити виконання умови:

$$\Delta = Q - q[Q] = F(X) - q[Q] = \min(F[X] - N[Q]),$$

тобто похибка порівняння величин  $Q$  і  $Q_m$  повинна бути мінімальною. В цьому випадку результат вимірювань знаходиться як

$$X = F^{-1}\{q[Q]\},$$

де  $F^{-1}$  операція, зворотна операції  $F$ , здійснюваній при вимірювальному перетворенні.

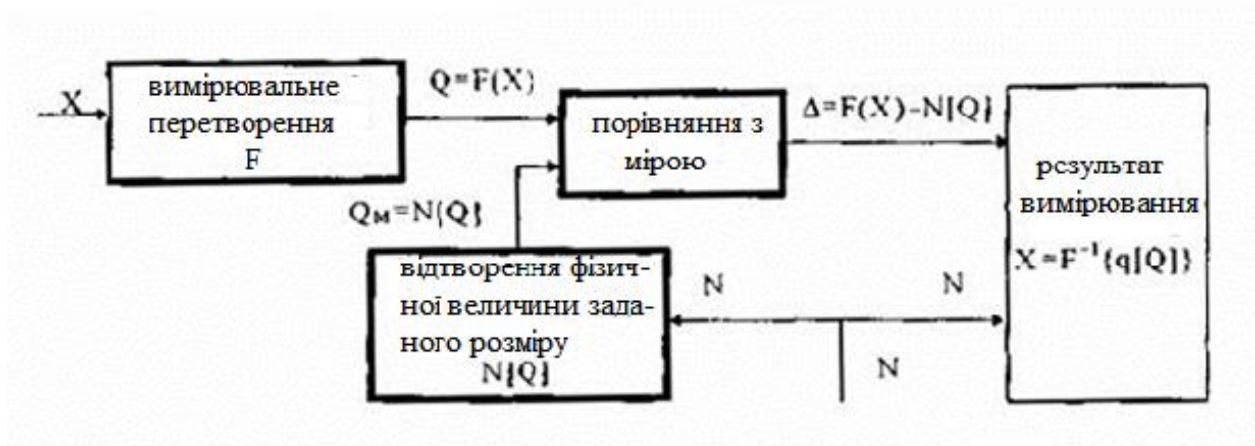


Рис. 1.1. Структурна схема вимірювання

Вимірювання здійснюються за допомогою спеціальних технічних засобів вимірювань, які називаються **засобами вимірювальної техніки**.

Засоби вимірювань, що використовуються при вимірюваннях, мають **нормовані метрологічні характеристики (параметри)**. Під **нормованими метрологічними характеристиками** мають на увазі встановлені нормативно-технічними документами властивості засобу вимірювань, що впливають на одержуваний результат та його достовірність. Ці ж властивості, але які визначаються експериментально, називаються **дійсними метрологічними характеристиками**.

**Засоби вимірювань** поділяються на міри, вимірювальні перетворювачі, вимірювальні прилади, вимірювальні установки та вимірювальні системи.

**Міра** - засіб вимірювань, призначений для відтворення фізичної величини заданого розміру (наприклад, одиниці вимірювання, її дольного або кратного значення).

**Вимірювальний перетворювач** - засіб вимірювань для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення, обробки і (або) зберігання, але яка не піддається безпосередньому сприйняттю спостерігачем.

Крім терміну "первинний вимірювальний перетворювач" використовується близький до нього термін - "датчик".

**Електричний датчик** - це один або декілька вимірювальних перетворювачів, які слугують для перетворення вимірюваної

неелектричної величини в електричну і об'єднаних в єдину конструкцію.

Термін датчик зазвичай застосовують в поєднанні з фізичною величиною, для первинного перетворення якої він призначений: датчик тиску, температури, потужності тощо.

**Вимірювальний прилад** - це засіб вимірювань, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, доступній для безпосереднього сприйняття спостерігачем.

**Вимірювальна установка** - це сукупність функціонально об'єднаних засобів вимірювань, призначена для вироблення сигналів вимірювальної інформації у формі, зручній для безпосереднього сприйняття спостерігачем і розташована в одному місці. Вимірювальна установка може містити в своєму складі міри, вимірювальні прилади, а також різні допоміжні пристрої.

У зв'язку з ускладненням технологічних процесів в сучасній промисловості для їх ефективного контролю і оптимального управління ними потрібне отримання інформації про велику кількість параметрів об'єктів, а також оперативна обробка цієї інформації. Це призвело до появи і розвитку складних систем, призначених для автоматичного збору і переробки інформації. Такі системи отримали назву вимірювальних систем.

**Вимірювальна система** - це сукупність засобів вимірювань (мір, вимірювальних приладів, вимірювальних перетворювачів) і допоміжних пристроїв, сполучених (об'єднаних) між собою каналами зв'язку, призначена для вироблення сигналів вимірювальної інформації у формі, зручній для автоматичної обробки, передачі та (або) використання в автоматичних системах управління.

**Вимірювальна інформація** - це кількісна оцінка стану матеріального об'єкта, одержувана експериментально, шляхом порівняння параметрів об'єкта з мірою (упредметненою одиницею вимірювання). Без отримання вимірювальної інформації, тобто кількісних відомостей про значення різноманітних фізичних величин, неможливі здійснення технологічних процесів, вироблення і розподіл електроенергії, видобуток і транспортування твердого, рідкого і газоподібного палива, руди, розвідка надр, управління транспортом, дослідження космосу і багато інших областей активної діяльності людини.

## 1.2. Сутність процесу вимірювань

Процес вимірювання полягає в тому, що вимірювальний прилад тим чи іншим способом **сприймає** вимірювану величину, і в результаті ми отримуємо відображене в доступній нам формі (відлік за шкалою, цифри на дисплеї, діаграма на стрічці самопишущого приладу тощо) **значення вимірюваної величини**. Виникає очевидне запитання: що ж відбувається всередині цього засобу вимірювань, завдяки чому сигнал на вході (**вхідна вимірювана величина**) перетворюється в сигнал на виході, тобто **вихідну величину**? Очевидно, що мають місце одне або декілька перетворень, які називаються **вимірювальними перетвореннями**.

Вимірювання фізичних величин здійснюються, як правило, шляхом перетворення вимірюваних величин з метою приведення їх до вигляду, зручного для зчитування, обробки та представлення одержуваної вимірювальної інформації. Вимірювані величини при цьому часто перетворюються в величини іншої фізичної природи.

Наприклад, при вимірюванні температури ртутним термометром вимірювана температура перетворюється в довжину стовпчика ртуті. Більше температура - і більше довжина стовпчика ртуті. Більше температура – і більше довжина стовпчика ртуті, менше температура - і стовпчик ртуті менше. Таким чином, про значення температури судять по довжині стовпчика ртуті.

Тут вимірювана величина однієї фізичної природи («температура») для визначення її шуканого значення перетворюється в фізичну величину іншої природи («довжину» стовпчика ртуті). Можна навести й інші приклади.

Так, вимірювання тиску газу за допомогою трубчастого манометра здійснюється за рахунок деформації (скручування або розкручування) трубчастої пружини під впливом вимірюваного тиску газу. Скручування (або розкручування) трубчастої пружини передається вказівній стрілці, що переміщається уздовж оцифрованої шкали манометра, з якої і здійснюється відлік показів. Таким чином, для вимірювання тиску газу здійснюється цілий ряд послідовних перетворень, що і дозволяє в підсумку оцінити значення шуканої величини.

Вимірювання витрати рідини можна провести, наприклад, оцінюючи перепад тиску на спеціальному звужуючому пристрої,

тобто в цьому випадку витрата рідини перетворюється в перепад тиску, вимірювання якого і дає значення шуканої величини.

При цьому важливо відзначити, що в міру нашого просування зі входу до виходу вимірювального приладу перетворення однієї фізичної величини в іншу супроводжуються відповідними перетвореннями енергії, які визначають принцип дії даного засобу вимірювань. Однак енергетичні перетворення - це неминуча данина, яку доводиться платити за отримання кількісної інформації про об'єкт вимірювання. Потік енергії крізь вимірювальний прилад - це лише переносник **вимірювального сигналу**, що містить кількісну інформацію про вимірювану фізичну величину. Очевидно, що при взаємодії засобу вимірювань з об'єктом вимірювань слід дотримуватися принципу «не нашкодь чистоті експерименту». Це означає, що вхідна частина нашого вимірювального приладу повинна мінімально впливати на вимірюваний об'єкт. В ідеальному випадку це означало б відсутність відбору енергії від об'єкта, але це фізично неможливо реалізувати. Тому треба намагатися по можливості запобігти впливу вхідної частини засобу вимірювань на об'єкт вимірювання.

Таким чином, можна констатувати наступне: для отримання кількісної інформації про об'єкт вимірювання потрібно вибрати відповідну (найбільш зручну) фізичну величину, яка нас цікавить, визначитися з необхідним засобом вимірювань і потурбуватися про «стикування» вхідної частини приладу з об'єктом вимірювань з урахуванням вищезазначеного принципу. При дотриманні цих умов ми набуваємо впевненості у тому, що фізична величина шляхом одного або декількох вимірювальних перетворень за допомогою вимірювального сигналу, що передається із входу на вихід, відобразиться у вигляді результату вимірювань, який називається **значенням фізичної величини**.

В даний час все більшого поширення для вимірювання неелектричних величин отримують електричні засоби вимірювань. В першу чергу - це первинні вимірювальні перетворювачі (ПВП) неелектричних величин, що перетворюють неелектричні вимірювання величини в електричні вихідні сигнали. Ці ПВП є складовою частиною датчиків або засобів вимірювань неелектричних величин.

При виконанні технічних вимірювань неелектричних величин (температури, тиску, витрати тощо) ці величини перетворюють в

електричні величини, які і піддаються подальшим перетворенням і вимірюванням (рис. 1.2).

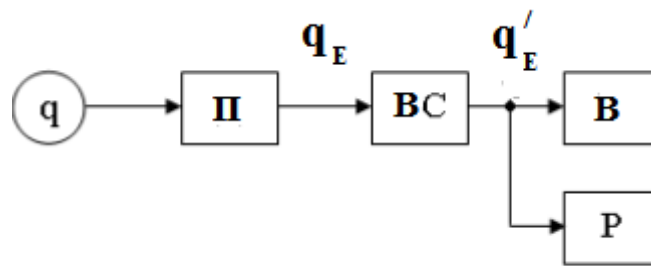


Рис. 1.2. Структура пристрою при електричних вимірюваннях неелектричних величин:  $q$  - вимірювана неелектрична величина;  $q_E$ ,  $q'_E$  - електричні величини; П - перетворювач; ВС - вимірювальна схема; В - вимірювач (засіб вимірювання електричної величини); Р - реєстратор (реєстратор електричної величини)

Датчик Д перетворює вимірювану неелектричну величину  $q$  в електричну  $q_E$ . Ця величина в загальному випадку може бути перетворена у вимірювальному колі (ВС) в іншу електричну величину  $q'_E = f(q_E)$ . При цьому величина  $q$  може бути підсилена або ослаблена, перетворена з аналогової величини в дискретну або з дискретної в аналогову тощо. Отримана величина  $q'_E$  піддається вимірюванню або реєстрації за допомогою електричних засобів, а також може бути передана по лінії зв'язку на значну відстань для подальшої обробки та використання. Обробка величин  $q'_E$  може проводитися з використанням універсальних ЕОМ або спеціалізованих обчислювальних пристроїв.

Вимірювання неелектричних величин електричними методами мають ряд переваг, до яких можна віднести:

- 1) можливість вимірювати малі значення шуканих величин;
- 2) можливість використовувати електронні підсилювачі, що дає можливість вимірювати такі сигнали, які неможливо виміряти іншими методами;
- 3) можливість дистанційно вимірювати параметри потрібних величин;
- 4) можливість дистанційно керувати як виробничими, так і іншими процесами;

5) можливість використовувати високоточну і малоінерційну електровимірвальну апаратуру;

6) можливість комплектувати різні вимірвальні установки однотипними електричними блоками;

7) можливість широко використовувати сучасну обчислювальну техніку у вимірвальних системах.

Наведемо наступні визначення:

1. технічний засіб з нормованими метрологічними характеристиками, що служить для перетворення вимірюваної величини в іншу величину або вимірвальний сигнал, зручний для обробки, зберігання, подальших перетворень, індикації або передачі, називається **вимірвальним перетворювачем (ВП)**;

2. вимірвальний перетворювач, на який безпосередньо впливає, вимірювана фізична величина, тобто перший перетворювач у вимірвальному ланцюгу (каналі) засобу вимірювань, називається **первинним вимірвальним перетворювачем** або просто **первинним перетворювачем (ПП)**.

Надалі, коли ми будемо більш докладно знайомитися з ВП, нам зустрінуться різні фізичні ефекти і явища, що пояснюють принципи дії, а також варіанти конструктивного виконання ВП. Зокрема, ВП можуть бути вбудовані у вимірвальний прилад або вимірвальний пристрій, а також конструктивно відокремлені. В останньому випадку такий ВП рекомендується називати **датчиком** (оскільки від нього нібито надходять вимірвальні сигнали, тобто він «надає» інформацію).

Датчики отримали широке поширення не тільки в засобах вимірювань, але і в пристроях управління, сигналізації, охорони, виявлення різних об'єктів. Однак в даному посібнику ми розглядаємо лише датчики як елементи вимірвальної техніки, які мають гарантовані, що зберігаються протягом певного часу, метрологічні характеристики.

Слід звернути увагу на те, що датчик як первинний вимірвальний перетворювач не тільки «надає» інформацію, а й що ще важливіше, сприймає вимірювану (вхідну) фізичну величину від об'єкта вимірювання, відіграючи при цьому роль своєрідного «приймача-передавача».

Отже, в датчику реалізуються три процеси:

1. сприйняття вхідної фізичної величини,



2. її перетворення в проміжну (або ж відразу ж у вихідну) величину тієї ж або іншої фізичної природи,

3. формування вимірювального сигналу, що передається уздовж вимірювального ланцюга, спряженого (узгодженого) з датчиком.

Однак не варто забувати, що вимірювальний ланцюг складається також і з ряду **вторинних ВП**, які вже не є датчиками, оскільки лише передають один одному вимірювальні сигнали, перетворюючи їх, але не стикаючись при цьому безпосередньо з об'єктом вимірювання. Тим не менше метрологічні характеристики ідентичні як для первинних, так і для вторинних ВП.

Зазначимо, що саме сприйняття вхідної величини від об'єкта вимірювань часто є найбільш «делікатною» операцією при реалізації вимірювального процесу, що вимагає витонченого мистецтва як при конструюванні сучасного мініатюрного датчика з унікальними метрологічними характеристиками, так і при його стикуванні з об'єктом вимірювання, що забезпечує необхідну «недоторканність» останнього.

## РОЗДІЛ 2. ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

### 2.1. Електричні вимірювання неелектричних величин

Електричні вимірювання неелектричних величин представляють собою значну область вимірювальної техніки, що охоплює вимірювання практично всіх величин, призначених для оцінки різних фізичних і хімічних явищ і виробничих процесів.

Вимірювання того чи іншого параметра, що характеризує той чи інший виробничий процес, зводиться до вимірювання обмеженого числа фізичних величин: температури, механічних величин (сила, тиск, переміщення, швидкість, прискорення тощо), концентрації компонент рідкого або газового середовища, часу, різних електричних величин (струму, напруги, частоти, електричної потужності тощо).

Характерним для сучасного розвитку вимірювальної техніки є широке застосування електровимірювальної апаратури для вимірювання практично всіх фізичних величин, в тому числі і неелектричних (температури, механічних величин тощо). Пояснюється ця обставина рядом загальновідомих переваг, властивих електровимірювальній апаратурі: можливістю неперервного в часі вимірювання і запису вимірюваної величини, можливістю здійснення дистанційного вимірювання і зв'язку (через реле) з виконавчим механізмом системи управління виробничим процесом, високою точністю і чутливістю вимірювання, широким діапазоном меж вимірювання як в бік дуже великих значень, так і в бік дуже малих значень вимірюваної величини.

При використанні електричної апаратури для вимірювання неелектричних величин з'являється ряд специфічних завдань, властивих цій галузі вимірювальної техніки. До подібних завдань слід, перш за все, віднести задачу перетворення вимірюваної неелектричної величини в електричну. Елемент вимірювального пристрою, що виконує функцію такого перетворення, називається **вимірювальним перетворювачем**.

Подібні перетворювачі використовують залежність того чи іншого електричного параметра твердого, рідкого або газоподібного тіла від вимірюваної величини, наприклад, залежність електричного опору від температури.

Електричні прилади для вимірювання неелектричних величин складаються з трьох основних частин:

1. перетворювача (датчика),
2. вимірювального пристрою і
3. вказівника (показчика).

Структура більшості електричних приладів для вимірювання неелектричних величин може бути представлена схемою, зображеною на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Структурна схема електричного приладу для вимірювання неелектричних величин

Призначення кожного з вузлів чітко визначено його найменуванням.

**Перетворювач (датчик)** – пристрій, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, зручній для її передачі, подальшого перетворення, обробки і зберігання.

Основною характеристикою перетворювача називається функціональна залежність  $Y=f(X)$  вихідної величини  $Y$  від вхідної  $X$ , виведена аналітичним або графічним шляхом, яка називається функцією перетворення.

До перетворювачів як основних елементів приладів для вимірювання неелектричних величин пред'являється ряд специфічних вимог: сталість у часі функції перетворення (зазвичай лінійної); висока чутливість; мала похибка; високі динамічні властивості (можливість вимірювання перехідних процесів).

**Вимірювальні пристрої** слугують для перетворення отриманого на виході перетворювача електричного параметра в зручну для вимірювання електричну величину. Вони виконуються у вигляді окремого самостійного конструктивного вузла і містять вимірювальні ланцюги, підсилювачі, джерела живлення,

стабілізатори та інші елементи.

**Показчик** виконує роль реєструючого приладу, проградуйованого в одиницях вимірювання неелектричної величини. Як показчик використовуються різні електричні прилади, що вимірюють той чи інший електричний параметр, пов'язаний з вимірюваною неелектричною величиною.

За способом зняття відліку показчики поділяються на:

**візуальні**, в якості яких використовуються магнітно-електричні механізми, електронно-променеві трубки, автоматичні показуючі мости і потенціометри, а також цифрові прилади;

**реєстратори**, призначення яких полягає в запису вимірюваної величини в тому чи іншому вигляді (самописні прилади, світлопроменеві осцилографи тощо).

Основні вимоги до показчиків такі ж, як і до приладів для вимірювання електричних величин.

Часто між першою і другою ланкою (перетворювачем і вимірювальним пристроєм) є додаткові елементи (проводи, кабелі, атенюатори і узгоджуючі пристрої), а вимірювальний пристрій у свою чергу включає в себе ряд блоків: підсилувальний пристрій, вимірювальний або реєструючий прилад і блок живлення.

Перший з них - **перетворювач** - є пристроєм, що забезпечує сприйняття вимірюваної вхідної величини (швидкості, тиску тощо) і перетворення її в сигнал, зручний для передачі по лініях зв'язку, підсилення, вимірювання або реєстрації електричними засобами.

Поряд з терміном «вимірювальний перетворювач» в технічній літературі часто зустрічається інший термін - «**датчик**», що має однакове з першим значення. У цьому посібнику під «датчиком» розуміється конструктивно закінчений перетворювач, призначений для виконання певної функції (наприклад, датчик тиску, датчик швидкості) безвідносно до закладеного в ньому принципу перетворення. Коли необхідно одночасно охарактеризувати і принцип перетворення, в назву датчика включається відповідне визначення, наприклад п'єзоелектричний датчик тиску тощо.

Підсилувач, так само як і джерело живлення, не є невід'ємною частиною вимірювального пристрою. У ряді випадків ці пристрої можуть бути відсутніми (наприклад, при вимірюванні швидкості обертання за допомогою індукційного тахогенератора і чутливого гальванометра). В інших випадках підсилувач розділяється на два блоки: попередній підсилувач (катодний або емітерний повторювач)

і основний підсилювач. Такий поділ має місце, зокрема, при застосуванні п'єзоелектричних перетворювачів, які встановлюються далеко від вимірювального пристрою (блоку), коли довгі кабелі можуть виявитися джерелом перешкод. У цьому випадку катодний повторювач з великим вхідним і малим вихідним опорами розташовується поблизу перетворювача, а довгий кабель підключається до низькоомного навантаження повторювача, не здійснюючи помітного впливу на передачу сигналу до основного підсилювача.

Джерело електричної енергії в загальному випадку живить всі три основних елементи приладу. В окремому випадку може виявитися достатнім жити від джерела електричної енергії тільки підсилювач, а в ряді випадків перетворювач сам є джерелом електричної енергії для підсилювача і вимірювального пристрою (наприклад термопара в термоелектричних пірометрах); в останньому випадку потреба в окремому (допоміжному) джерелі струму відсутня.

Неелектричні величини, перетворені в електричні (напруга або струм), вимірюються або реєструються відповідним пристроєм. В якості такого пристрою в більшості випадків використовують показуючі стрілочні та цифрові прилади, а в якості реєструючих пристроїв - різні самописці, осцилографи і магнітографи.

Перевагою показуючих приладів є те, що вони видають результат безпосередньо в момент вимірювання, в той час як реєструючі прилади вимагають додаткової ручної або машинної обробки. У той же час застосування показуючих приладів має і суттєве обмеження, оскільки практично воно припустиме лише для статичних або повільно змінюючихся процесів. Природно, при необхідності в пристрої можуть бути одночасно використані як показуючий, так і реєструючий прилади.

Структурні схеми реальних вимірювальних приладів в більшості випадків значно складніше схеми, наведеної на рис. 2.1, і нерідко включають пристрої для передачі інформації про вимірювану величину через радіо, комутатор для проведення багатоточкових вимірювань тощо.

## 2.2. Переваги та недоліки електричних вимірювань неелектричних величин

Сучасна інформаційна техніка дає можливість вимірювати найрізноманітніші величини (електричні, магнітні та неелектричні – теплові, механічні, світлові тощо). У переважній більшості неелектричні величини вимірюються електричними вимірювальними приладами після попереднього перетворення неелектричних величин в електричні як найзручніші для передачі, підсилення, порівняння, точного вимірювання.

До **основних переваг** електричних вимірювань належать наступні:

- універсальність, яка полягає в можливості вимірювань декількох чи навіть великої кількості неелектричних величин (при використанні відповідних первинних вимірювальних перетворювачів та комутатора) за допомогою одного електричного вимірювального засобу;

- дистанційність, що полягає в можливості вимірювань параметрів досліджуваних об'єктів практично на будь-якій від них відстані завдяки можливості передачі електричних сигналів через проводи лінії зв'язку чи через випромінювання електромагнітних хвиль;

- простота автоматизації вимірювань внаслідок того, що в електричних колах можуть виконуватися логічні та цифрові операції;

- можливість забезпечення високої чутливості, необхідної точності та швидкодії, обумовлена гнучкістю їх структур та простотою підсилення електричних сигналів;

- можливість вимірювань швидкозмінних величин за допомогою малоінерційних електронних засобів вимірювальної техніки;

- можливість комп'ютеризації вимірювань.

Особливості вимірювань неелектричних величин електричними засобами зумовлюють не лише переваги таких вимірювань. Їм властиві також певні **недоліки**.

Основні з них наступні:

1. Похибки вимірювальних перетворювачів, пов'язані з проблемами перетворення одного виду енергії (неелектричної) в інший (електричну). Серед них, насамперед, похибки невідтворюваності та нестабільності функції перетворення

первинного перетворювача, її нелінійність. Треба мати на увазі, що серед всіх решти похибок вимірювального тракту похибки первинних перетворювачів домінують.

2. Реалізація такої переваги електричних засобів як дистанційність, тобто віддаленість первинного перетворювача від вторинної вимірювальної апаратури, супроводжується похибками лінії зв'язку, головною з яких є вплив опору лінії та його зміна під впливом зовнішніх чинників, що впливає на передачу вихідних сигналів первинного перетворювача як прямо, змінюючи сумарний опір вимірювального кола, так і непрямо, зменшуючи завадостійкість тракту перетворення. Остання обставина особливо ускладнює перетворення сигналів низького рівня, якими є переважна більшість вихідних сигналів генераторних первинних перетворювачів неелектричних величин в електричні.

3. Точність перетворення електричних сигналів низького рівня обмежується також наявністю внутрішніх завад, що виникають у вимірювальних колах внаслідок різноманітних паразитних контактних термо-ЕРС та шумів (зокрема, інфра-низькочастотних) підсилювальних пристроїв, необхідних для збільшення рівня вихідних сигналів первинних перетворювачів до значень, достатніх для забезпечення необхідної точності вимірювання. Під час роботи з параметричними перетворювачами, які вимагають для отримання вимірювальної інформації додаткових джерел електричної енергії, можна, використовуючи ці джерела енергії, суттєво збільшити вихідні електричні сигнали первинних перетворювачів і послабити вплив зовнішніх чинників на результати вимірювань.

### **2.3. Вимірювальне перетворення фізичних величин: сутність та призначення**

**Вимірювання** – єдиний спосіб одержання кількісної інформації про фізичні величини, які характеризують ті чи інші фізичні явища та процеси.

**Вимірювання** - це процес визначення числового значення вимірюваної величини, а також дія, спрямована на знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом, порівнюючи її з одиницею вимірювання за допомогою засобів вимірювальної техніки. Числове значення вимірюваної величини - це число, яке виражає відношення між двома величинами однакової природи -

вимірюваною й умовною одиницею вимірювання. Вимірювати можна властивості реально існуючих об'єктів пізнання - фізичні величини. Будь-яке вимірювання здійснюється за допомогою обов'язкового виконання фізичного експерименту, в якому взаємодіють об'єкт вимірювання і засоби вимірювальної техніки, що мають нормовані метрологічні характеристики. Результатом вимірювання є **значення вимірюваної фізичної величини**.

В метрології інформацію про величину називають **вимірювальною інформацією**, а величини, які є носіями вимірювальної інформації, - **вимірювальними сигналами**.

**Вимірювальний сигнал** - сигнал, що містить інформацію про вимірювану величину.

Первинним носієм вимірювальної інформації, тобто первинним вимірювальним сигналом, є вимірювана величина. Для отримання результату вимірювання, забезпечення зручності зберігання, передачі, відображення тощо вимірювальний сигнал можуть піддавати перетворенням, при яких змінюють параметри і вид сигналу (наприклад, з аналогового сигналу в дискретний сигнал і навпаки) або проводять заміну величини, носія вимірювальної інформації, на величину, що має іншу природу. Наприклад, силу замінюють переміщенням або деформацією, температуру - зміною висоти стовпчика рідини або електрорушійної сили і т.д. Ця процедура називається **вимірювальним перетворенням**.

Вимірювальне перетворення являє собою відображення розміру однієї фізичної величини розміром іншої фізичної величини, функціонально з нею пов'язаної.

Будь-який вимірювальний пристрій використовує ті чи інші функціональні зв'язки (різного ступеня складності). Тому застосування вимірювальних перетворень є єдиним методом практичного створення будь-яких вимірювальних пристроїв.

Будь-яке вимірювання можна розглядати як ланцюжок перетворення вимірювальної величини до тих пір, поки результат вимірювань не буде представлений в тому вигляді, який необхідно отримати. В такому випадку процес вимірювання характеризується передачею інформації про значення вимірюваної величини від одного її носія до другого, тобто відбувається перетворення інформації про значення вимірюваної величини в результат вимірювання. Це означає, що в інформаційному аспекті процес вимірювання можна розглядати як процес прийому і перетворення інформації від



вимірюваної величини з метою отримання кількісного результату шляхом порівняння з прийнятою шкалою або одиницею вимірювання у формі найбільш зручній для нормального використання її людиною або машиною.

Найпростіше вимірювальне перетворення - це зміна масштабу сигналу вимірювальної інформації, що знаходить застосування в переважній більшості вимірювальних приладів. Воно дозволяє підвищити чутливість засобу вимірювань і покращити його метрологічні характеристики, розширити або змінити діапазон вимірювань.

Перетворення, що зустрічається найбільш часто, - це представлення сигналу вимірювальної інформації у вигляді переміщення покажчика (стрілки, світлової плями, самописця тощо) вимірювального приладу або в цифровій формі.

Отже, **вимірювальне перетворення фізичних величин** – це вимірювальна операція, під час якої одна фізична величина перетворюється в іншу, функціонально з нею пов'язану, зручну для передачі, зберігання і подальшого перетворення або індикації. Фізичний ефект, на якому ґрунтується вимірювальне перетворення, називають **принципом вимірювального перетворення**. Вимірювальне перетворення завжди пов'язане з перетворенням або використанням певного виду енергії (електричної, механічної, світлової, теплової, хімічної, атомної).

На шляху від об'єкта вимірювання до показуючого або реєструючого пристрою засобу вимірювання вимірювальний сигнал може піддаватися декільком послідовним перетворенням, які поділяють на первинні і вторинні. (Первинне перетворення - це перетворення, при якому вхідним сигналом є вимірювана величина). Особливу роль відіграють первинні перетворення, в межах яких вирішується завдання заміни вимірюваної величини на представницьку величину. Під представницькою величиною тут розуміється величина:

- яка може бути виміряна,
- зручна для подальшого перетворення,
- засоби вимірювань якої дозволяють отримати результат вимірювання із заданою точністю і в необхідній формі тощо.,
- і, обов'язково, для якої в межах використовуваного фізичного явища або ефекту забезпечується її однозначне відповідність вимірюваній величині.

У зв'язку з цим відзначимо, що не всі величини можуть бути виміряні безпосередньо. Так, наприклад, про температуру, тиск, силу, електричний струм ми судимо по ефектах, які спостерігаються при їх дії на об'єкти. Вплив температури супроводжується тепловим розширенням матеріалів. Дія сили або тиску призводить до деформації тіл. Взаємодія провідника, через який йде струм, з магнітним полем породжує силу, що діє на провідник.

Величина, що підлягає перетворенню, називається **вхідною**, а результат перетворення - **вихідною** величиною. Функціональна залежність  $y = f(x)$  між інформативними параметрами вихідного і вхідного сигналів засобу вимірювання у вигляді аналітичної залежності, графіку або таблиці, отримана в статичному режимі, називається **функцією перетворення**. Множина розмірів вхідної величини, що піддається перетворенню, називається **діапазоном перетворення**.

Вимірювальні перетворення поділяють на перетворення без зміни роду та зі зміною роду вихідної фізичної величини. Наприклад, механічна сила, діючи на пружний елемент, деформує його. Разом з пружним елементом розтягується /стискається тензорезистор, змінюються його довжина і площа поперечного перерізу і, як наслідок, електричний опір. Зміна опору в електричному ланцюзі дозволяє отримати сигнал вимірювальної інформації у вигляді зміни падіння напруги або сили струму. Однак на шляху до відображення вимірювальної інформації отриманий сигнал підлягає подальшим перетворенням.

За видом функціональної залежності  $Y = f(X)$  (лінійна чи нелінійна) між початковою величиною й тією величиною, що одержують після перетворення вимірювальні перетворення поділяють також на лінійні та нелінійні. Одним з поширених видів лінійного перетворення фізичної величини є масштабне вимірювальне перетворення, під яким розуміють лінійне вимірювальне перетворення фізичної величини без зміни її роду.

**Вимірювальне перетворення** - операція, при якій встановлюється взаємно - однозначна відповідність між розмірами в загальному випадку неоднорідних фізичних величин: тієї, що перетворюється, і перетвореної. Вимірювальне перетворення описується рівнянням виду  $Y = F(X)$ , де  $F$  - деяка функція. По можливості прагнуть зробити перетворення лінійним:  $Y = kX$ , де  $k$  - постійна величина.

При вимірювальному перетворенні відбувається приведення інформативного параметра вихідного сигналу у відповідність інформативному параметру вхідного сигналу. Цю процедуру називають **модуляцією**, сигнал на вході перетворювача називають **модулюючим сигналом**, а на виході з перетворювача - модульованим сигналом. Модульований сигнал отримують перенесенням вимірювальної інформації на будь-який стаціонарний сигнал, який називають модульованим або несучим. У вузькому сенсі під модуляцією розуміють накладення низькочастотного сигналу на високочастотний сигнал. Стаціонарні високочастотні сигнали відтворюють вимірювальні генератори.

Необхідність модуляції сигналів зумовлюється потребами: передачі вимірювальної інформації на великі відстані без спотворень; одночасної передачі декількох сигналів по одному каналу; представлення сигналу у вигляді, що дозволяє виконувати його автоматичну обробку.

Умовно всі фізичні величини можна розділити на два класи: електричні і неелектричні.

Способам перетворення, перетворювачам і методам вимірювання електричних величин присвячені значні частини навчальних курсів «Електротехніка» та «Загальна фізика». Проте, як показує практика, більше 90% видів вимірювань параметрів виробничих процесів і продукції пов'язане з вимірюванням неелектричних величин.

У більшості випадків доцільно вимірювати неелектричні величини електричними приладами. Це викликано наступними причинами:

1. електричні величини легше, ніж неелектричні, передавати на великі відстані;
2. над електричними величинами можна проводити різні математичні операції, що дозволяє автоматично вводити поправки, інтегрувати і диференціювати результати тощо;
3. електричні величини легко реєструвати;
4. широкий динамічний діапазон вимірювання електричних величин Використання електроніки дозволяє в тисячі разів підсилювати електричні сигнали, і, отже, в стільки ж разів збільшувати чутливість апаратури;
5. мала інерційність електричної апаратури, тобто широкий частотний діапазон.

Електричні прилади для вимірювання неелектричних величин обов'язково містять вимірювальний перетворювач неелектричної величини в електричну. Вимірювальний перетворювач встановлює однозначну функціональну залежність вихідної електричної величини від вимірюваної вхідної неелектричної величини (температури, переміщення, сили, тиску та ін.).

Перетворення неелектричних величин в електричні може здійснюватися двома способами:

1. активним перетворенням енергії одного виду в енергію іншого виду, в результаті чого виробляються електричні величини: напруга, струм, заряд;

2. впливом на електричні величини (пасивне перетворення), що вимагає допоміжної енергії:

а) на основі безпосереднього застосування фізичних залежностей (зокрема, можуть бути використані залежності від вимірюваної величини таких фізичних величин, як опір, провідність, магнітна і діелектрична проникності, індуктивність, електрична ємність, інтенсивність зарядів і випромінювань);

б) шляхом механічних впливів (ці дії дозволяють змінювати такі величини, як опір, індуктивність, ємність);

в) методом компенсації (компенсацію можна здійснювати вручну або автоматично).

Неелектричні фізичні величини можна також перетворювати в інші, не тільки електричні величини.

Основне призначення вимірювального перетворення — отримання і, якщо це необхідно, перетворення інформації про вимірювану величину. Його виконання здійснюються на підставі вибраних фізичних закономірностей. У вимірювальне перетворення в загальному випадку можуть входити такі операції.

- зміна фізичного роду перетворюваної величини;
- масштабне лінійне перетворення;
- масштабно-часове перетворення;
- нелінійне або функціональне перетворення;
- модуляція сигналу;
- дискретизація неперервного сигналу;
- квантування.

Головне завдання вимірювальних перетворень полягає в отриманні вихідних фізичних величин (ФВ) і залежностей між ними, зручних для порівняння і відтворення. До вимірювальних

перетворень фізичних величин в загальному випадку відносяться: лінійне (масштабне) і нелінійне перетворення ФВ без зміни його роду; лінійне і нелінійне перетворення ФВ зі зміною її роду.

**Вимірювальне перетворення** — єдиний спосіб побудови будь-яких вимірювальних пристроїв, тому що кожний вимірювальний засіб використовує ті чи інші функціональні зв'язки між вхідною та вихідною величинами.

## 2.4. Основні поняття та визначення

Перш ніж приступити до вивчення перетворювачів, необхідно з'ясувати деякі базові поняття.

**Вимірювана величина** – це фізична величина, яка підлягає вимірюванню. Наприклад, прискорення, переміщення, витрати, рівень, положення, температура, тиск, механічна напруга, швидкість тощо.

В деяких випадках вимірюваною величиною може бути і електрична величина, (така, як струм, напруга або частота), яка перетворюється в електричний сигнал, придатний для використання в інших частинах системи. При цьому вимірювальний перетворювач є електричним перетворюючим елементом.

**Вхідний перетворювач**, що перетворює вимірювану величину в електричний сигнал, - це прилад (пристрій), придатний для використання в інших частинах системи. Зазначимо, що хоча вхідні перетворювачі генерують електричний сигнал на виході, існують і такі перетворювачі, які мають іншу природу вихідного сигналу, наприклад, тиск повітря. Але таких перетворювачів небагато і ми їх розглядати не будемо. Перетворювачі з неелектричним виходом застосовуються як чутливі елементи вимірювальних перетворювачів або як пристрої для перетворення неелектричного сигналу на електричний.

Всі функції перетворювачів є **аналоговими**, тому в загальному випадку (за деякими виключеннями) їх сигнали також є аналоговими.

Вихідний сигнал первинного перетворювача передається до вторинного перетворювача (вимірювального пристрою) за допомогою лінії зв'язку.

**Лінії зв'язку** – це лінії між вхідним перетворювачем та іншою частиною системи. Таких ліній може інколи і не бути, якщо, скажімо,

вхідний перетворювач розташований в декількох сантиметрах від іншої частини системи. Якщо ж він розташований на значній відстані від системи, то повинні бути прийняті заходи для того, щоб лінії зв'язку не впливали або слабо впливали на ефективність роботи системи.

Там, де в системі є істотні лінії зв'язку, необхідний один або більше каскадів спряження сигналів, для того, щоб малий вихідний сигнал вхідного перетворювача підсилити, піддати аналого-цифровому перетворенню, фільтрації, модуляції тощо. Це необхідно для того, щоб інформація, що видається первинним перетворювачем, не втрачалася при передачі її до інших частин системи. Такі каскади можуть включати до себе і схеми обробки сигналу, в яких дані, що містяться у сигналі вхідного перетворювача піддаються цифровій обробці, а результуючий сигнал або результати обчислень можуть бути відображені на дисплеї, запам'ятовані або використані з метою управління. Спряження сигналів може здійснюватися в декількох точках системи.

**Відображаючі або запам'ятовуючі прилади** – це прилади, які показують поточне значення вимірюваної величини для зручності роботи оператора системи або запам'ятовують відповідну інформацію для її наступного використання.

Іноді той факт що вхідний перетворювач має звідкись отримувати енергію, щоб здійснювати процес перетворення (або безпосередньо від самої вимірюваної величини, або від зовнішнього джерела), допомагає визначити тип приладу. Наприклад, **вхідний перетворювач**, що отримує енергію від вимірюваної величини, називають **пасивним перетворювачем**, хоча, строго кажучи він мав би називатися **чутливим елементом** (датчиком). Слід зазначити, що термін «датчик» частот вживається як синонім більш загального терміну «перетворювач». За цим принципом **активний перетворювач** – це перетворювач, який отримує енергію від зовнішнього джерела.

Розрізняють ще **перетворювач зворотного зв'язку**, який використовується у ланцюгу зворотного зв'язку управляючої системи для вимірювання сигналу протилежного за знаком вхідному сигналу. Цей перетворювач використовується для **збалансування** управляючої системи, а не для безпосереднього вимірювання фізичної величини.

В конкретних дисциплінах перетворювачі мають і інші назви. Наприклад, трансмітер, датчик, детектор, вимірювач, чутливий елемент, зонд, а також слова, що мають закінчення «метр» (мір): акселерометр, витратомір, тахометр тощо. В подальшому під перетворювачем будемо розуміти **вхідний перетворювач**, а інший тип приладу будемо називати вихідним перетворювачем.

Точність вимірювань, що характеризує близькість виміряного значення фізичної величини до її дійсного значення, зазвичай оцінюється **похибкою**, тобто максимально можливою різницею між виміряним і дійсним значеннями. В спеціальних випадках похибка виражається у відсотках до **повної шкали приладу**, тобто у відсотках максимально можливого відліку. Похибка залежить від властивостей перетворювача і типу використовуваного обладнання. Джерелом похибок є також оператор. Точність вимірювання визначається багатьма причинами, основні з яких будуть розглянуті нижче.

Пов'язаною з точністю є **роздільна здатність** системи, що характеризує найбільшу точність, з якою здійснюються вимірювання.

**Чутливість**, яку називають іноді **масштабним коефіцієнтом** перетворювача – це відношення зміни його вихідного сигналу до зміни на вході. Для лінійного перетворювача вхідного перетворювача, напруга на виході якого змінюється за лінійним законом від температури, чутливість може бути просто визначена діленням загального діапазону вихідної напруги на загальний вхідний діапазон. Наприклад, припустимо, що діапазон зміни вихідної напруги перетворювача складає від 0 до 10 В, а діапазон зміни температури на вході – від 0 до 100<sup>0</sup>С. Тоді чутливість дорівнює

$$\frac{10 \text{ В}}{100 \text{ } ^0\text{С}} = 0,1 \text{ В} \cdot ^0\text{С}^{-1}.$$

Одним з найважливіших параметрів перетворювача є **лінійність його характеристики**, яка може впливати на точність вимірювання. Рекомендується використовувати перетворювачі з лінійною характеристикою (рис.2.2,а), оскільки з'єднані з перетворювачем схеми формування сигналу також є лінійними і, отже, вельми дешевими при проектуванні та виготовленні. Якщо ж перетворювач є суттєво нелінійним (рис.2.2,б), то можна застосувати лініаризуючу схему формування сигналу. Однак така схема досить дорога. Зазначимо, що нелінійний перетворювач часто використовується на

обмеженій частині (на обмеженій ділянці) загального діапазону, щоб отримати приблизно лінійну характеристику. На щастя, використання лише частини загальної характеристики нелінійного перетворювача дозволяє гарантувати лінійність відношення вимірюваної і вихідної величин.

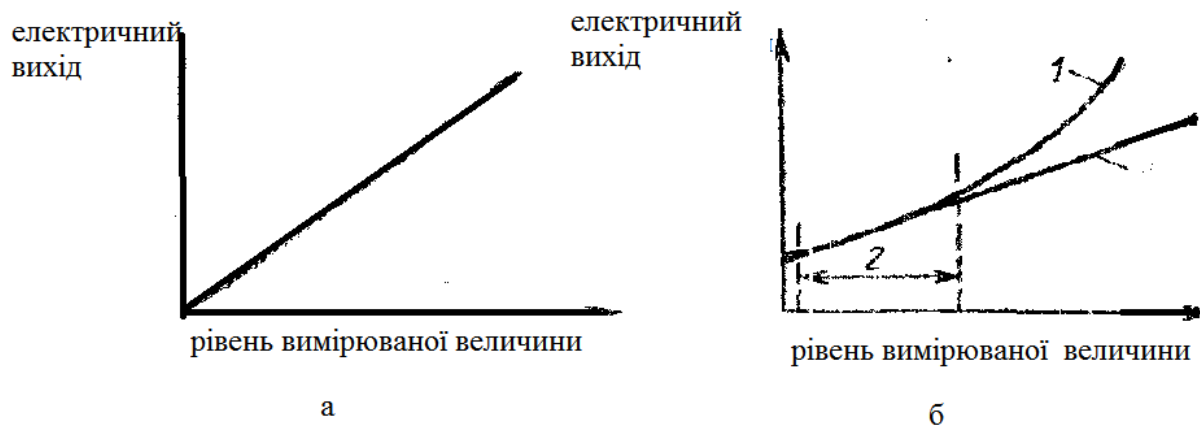


Рис. 2.2. Лінійні та нелінійні характеристики перетворювачів:  
 а – лінійний перетворювач; б – нелінійний перетворювач:  
 1 – реальна характеристика нелінійного перетворювача; 2 – лінійна область вихідного сигналу; 3 – лінійна характеристика, що апроксимує дійсну реакцію перетворювача за рахунок використання обмеженої частини діапазону.

З іншого боку, лінійний перетворювач не рекомендується використовувати, коли вимірювана величина змінюється нелінійним чином. В такому випадку лінійний перетворювач буде лише відображати нелінійну зміну вимірюваної величини у своєму вихідному сигналі.

Лінійний перетворювач може працювати і поза свого звичайного діапазону, але він має **границю**, по досягненні якої вихідний сигнал різко падає або досягає насичення, коли вимірювана величина виходить за межі повної шкали значень. Це також призводить до виникнення нелінійності.

В деяких випадках надають перевагу високій нелінійності характеристики. Наприклад, в перетворювачі, що використовується для контролю вихлопних газів автомобіля, бажано мати один вихідний сигнал, що відповідає допустимому складу вихлопних газів, і зовсім інший, коли склад вихлопних газів незадовільний. Як



правило, один сигнал відповідає рівню логічного 0, а інший – логічній 1. В цьому випадку перетворювач функціонує як перемикач сигналів, що мають два рівні.

Розглянемо ще одну характеристику перетворювача – **гістерезис**. Повертаючись до перетворювача для контролю вихлопних газів автомобіля, зазначимо, що точне положення точки, в якій вихідний сигнал переходить з одного стану до іншого, може змінюватися в залежності від того, збільшується чи зменшується вихлоп газів. На рис. 2.3 показана можлива характеристика перетворювача з гістерезисом.



Рис.2.3. Гістерезис у вимірювальному перетворювачі:

- 1 – точка зміни стану перетворювача при зменшенні відсотка продуктів неповного згорання;
- 2 – точка зміни стану перетворювача при збільшенні відсотка продуктів неповного згорання

При збільшенні концентрації продуктів неповного згорання у вихлопних газах перетворювач не змінює свого виходу, доки ця концентрація не перевищить 2%. Коли ж концентрація продуктів неповного згорання у вихлопних газах зменшується, перетворювач не змінює свого виходу, доки ця концентрація не знизиться до 1%. В загальному випадку намагаються, щоб ефект гістерезису був якнайменший.

Проаналізуємо ще одну характеристику перетворювача – **відтворюваність** (повторюваність) значень його вихідного сигналу. Вихідний сигнал в ідеальному випадку має бути постійним, коли

вимірювана величина не змінюється. В деяких випадках, зазвичай, якщо перетворювач має значний гістерезис, вихідний сигнал може бути різним в залежності від напрямку зміни вимірюваної величини.

Другим фактором, пов'язаним з точністю перетворювача, є **час відгуку**, який дорівнює часу встановлення вихідного сигналу у відповідь на зміну вимірюваної величини. Миттєва або ступінчата зміна вимірюваної величини може не викликати одночасної відповідної зміни вихідного сигналу, якщо реакція перетворювача на зміну вимірюваної величини відбувається з великим запізненням.

В той же час такий перетворювач може мати достатньо малу похибку, якщо зміна вимірюваної величини відбувається повільно або не відбувається взагалі. Притаманна перетворювачу інертність (інерційність) означає, що його не можна використовувати для вимірювання вхідної величини, флуктуація якої швидко змінюється. Однак звідси не випливає, що кожний перетворювач повинен мати час відгуку менший, ніж тривалість змін вимірюваної величини.

У випадку, наприклад, перетворювача, призначеного для вимірювання рівня палива в автомобілі, швидка реакція перетворювача є скоріше його недоліком, оскільки водію небажано бачити коливання стрілки вказівника палива від однієї крайньої позначки до іншої (від пустого до повного баку), коли автомобіль рухається по нерівній дорозі і паливо плескається у баку. Існують і інші параметри перетворювачів, які повинні мати і не дуже швидко і не дуже повільну реакцію, а саме таку, яка в умовах конкретного застосування забезпечує найкращу точність вимірювань.

**Смуга перетворювача** – це характеристика, на пряму пов'язана з часом відгуку. Зміну вимірюваної величини можна описати сукупністю частотних складових: у відповідності з перетворенням Фур'є будь-який сигнал можна представити сукупністю синусоїдальних складових, що мають різні частоти і амплітуди. Чим скоріше змінюється вимірювана величина, тим більша частота у складових і ширше спектр частот вихідного сигналу. Якщо смуга частот перетворювача відносно мала, то присутні у вимірюваній величині високі частотні складові у вихідному сигналі зникають і реакція перетворювача стає повільною, а час відгуку більшим.

## 2.5. Загальні відомості про вимірювальні перетворювачі

Вимірювання неелектричних величин електричними вимірювальними засобами стає можливим внаслідок попереднього перетворення досліджуваних неелектричних величин у функціонально зв'язані з ними електричні величини за допомогою відповідних вимірювальних перетворювачів.

В точному розумінні цього слова, визначеному Оксфордським словником, **вимірювальний перетворювач** – це прилад (пристрій), який перетворює зміну однієї величини в зміну іншої. В термінах електроніки вимірювальний перетворювач визначається як прилад, що перетворює неелектричну фізичну величину (яка називається вимірюваною фізичною величиною) в електричний сигнал, або навпаки.

Отже, **вимірювальний перетворювач (ВП)** – це засіб вимірювальної техніки з нормованими метрологічними характеристиками, що реалізує вимірювальне перетворення, тобто це засіб вимірювальної техніки, призначений для перетворення вхідного вимірювального сигналу у вихідний, зручний для подальшого перетворення, обробки, зберігання, але непридатний для безпосереднього сприймання спостерігачем. Тобто вимірювальний перетворювач може не мати жодного індикатора або мати примітивний індикатор. Це технічний пристрій, який побудований на **певному фізичному принципі дії** і виконує одне часткове вимірювальне перетворення. На відміну від вимірювального приладу, сигнал на виході ВП (вихідна величина) не піддається безпосередньому сприйняттю спостерігача. Обов'язкова умова вимірювального перетворення — збереження у вихідній величині ВП інформації про кількісне значення вимірюваної величини.

На тому ж фізичному принципі дії можуть бути створені не тільки вимірювальні, а й енергетичні перетворювачі, призначені для перетворення потоків енергії. На відміну від вимірювальних такі перетворювачі зазвичай називаються силовими (силовий трансформатор, силовий випрямляч тощо). Головна вимога до енергетичних перетворювачів - високе значення енергетичного коефіцієнта корисної дії (ККД), тобто малі втрати при передачі енергії. Основна вимога до вимірювальних перетворювачів - точна передача інформації, інакше кажучи, мінімальні похибки.

Поняття "вимірювальний перетворювач" значно вужче, конкретніше, ніж поняття "вимірювальне перетворення", тому що одне і те ж вимірювальне перетворення може бути виконано цілою низкою різних за принципом дії вимірювальних перетворювачів.

Приклад: перетворення температури в механічну величину:

- температура → рідинний термометр → переміщення,
- температура → термopара → ЕРС → магнітоелектричний прилад → переміщення.

Схематично первинний перетворювач складається з двох нерозривно пов'язаних частин: **чутливого елемента (сенсора)**, що сприймає (відчуває) інформацію про вимірювану фізичну величину, та власне самого **перетворювача**, що перетворює вимірювану величину в іншу фізичну величину, функціонально пов'язану з вимірюваною, без зміни її роду або із зміною її роду (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Структурна схема первинного вимірювального перетворювача

Вимірювана неелектрична величина  $X$  подається на вхід вимірювального перетворювача. Вихідна електрична величина  $Y$  перетворювача вимірюється електричним реєструючим приладом. Зазвичай шкала приладу градується в одиницях неелектричної величини.

Широко застосовуються електричні прилади, в яких вимірювана неелектрична величина піддається декільком послідовним перетворенням. В якості попередніх перетворювачів часто використовують неелектричні вимірювальні механізми, що перетворюють вимірювану неелектричну величину в переміщення рухомої частини цих механізмів. Переміщення рухомої частини

перетворюється вимірювальним перетворювачем в електричну величину.

Поряд з терміном «первинний вимірювальний перетворювач» в технічній літературі дуже часто використовують терміни «датчик», «сенсор», «приймач», «вимірювальна головка», «детектор», «зонд», а також слова, що мають закінчення «метр» (мір): акселерометр, витратомір, тахометр тощо.

Датчиком приладу для вимірювання тієї чи іншої фізичної величини називається конструктивна сукупність ряду вимірювальних перетворювачів, розміщених безпосередньо біля об'єкту вимірювання.

Дуже часто чутливий елемент перетворює технологічний параметр в аналоговий електричний сигнал, а наступний перетворювач перетворює цей аналоговий сигнал у цифровий код. У деяких випадках у датчиках використовуються більш складні перетворення. Наприклад, чутливий елемент перетворює контрольовану величину в механічне переміщення, що у наступних перетворювачах перетворюється в електричний сигнал.

Вимірювальний перетворювач призначений для виконання одного вимірювального перетворення. Він або входить до складу будь-якого вимірювального приладу (вимірювальної установки, вимірювальної системи тощо), або застосовується разом з будь-яким засобом вимірювання.

Приклади:

1. Термопара в термоелектричному термометрі.
2. Вимірювальний трансформатор струму.
3. Електропневматичний перетворювач.

Робота вимірювального перетворювача протікає в умовах, коли крім основного сигналу  $X$ , пов'язаного з вимірюваною величиною, на нього впливає безліч інших сигналів  $Z_i$ , що розглядаються в даному випадку як перешкоди. Найважливішою характеристикою ВП є функція (рівняння) перетворення, яка описує статичні властивості перетворювача і в загальному випадку записується у вигляді  $Y = F(X, Z_i)$ .

У переважній більшості випадків прагнуть мати лінійну функцію перетворення. Функція  $Y(X)$  ідеального ВП при відсутності перешкод описується рівнянням  $Y = kX$ . Вона лінійна, стабільна і проходить через початок координат.

Будь-яка вимірювальна система, призначена для знаходження числових значень вимірюваної фізичної величини, складається з ряду послідовно з'єднаних перетворювачів. Кожний з них виконує певну функцію: зміна роду фізичної величини, підсилення вимірювального сигналу, модуляція, дискретизація, кодування, відображення тощо.

За розташуванням у вимірювальному ланцюгу вимірювальні перетворювачі поділяються на **первинні** і **проміжні**.

**Первинний вимірювальний перетворювач** (або первинний перетворювач) – це вимірювальний перетворювач, який перший взаємодіє із об'єктом вимірювання, сприймає інформацію про вимірюваний параметр і є перетворювачем роду фізичної величини. До нього безпосередньо підводиться вимірювана величина (зокрема технологічний параметр).

В одному засобі вимірювань може бути кілька первинних перетворювачів.

Приклади:

1. Термопара в ланцюгу термоелектричного термометра.
2. Ряд первинних перетворювачів вимірювальної контролюючої системи, розташованих в різних точках контрольованого середовища.

Вимірювальні перетворювачі можуть бути вбудовані у вимірювальний прилад або вимірювальний пристрій, а також конструктивно відокремлені. Конструктивно відокремлений первинний ВП, від якого надходять сигнали вимірювальної інформації, називається **датчиком** („сенсором”, чутливим елементом). Наприклад, датчики запущеного метеорологічного радіозонда передають інформацію про температуру, тиск, вологість та інші параметри атмосфери.

**Електричний датчик** - це один або декілька вимірювальних перетворювачів, які слугують для перетворення вимірюваної неелектричної величини в електричну і об'єднаних в єдину конструкцію.

Термін датчик зазвичай застосовують в поєднанні з фізичною величиною, для первинного перетворення якої він призначений: датчик тиску, температури, потужності тощо.

При автоматизації технологічних процесів датчики відіграють важливу роль, тому що вони надають інформацію про протікання технологічного процесу.

**Проміжний перетворювач** – це перетворювач, призначений для здійснення всіх необхідних перетворень сигналу: підсилення,

лінеаризації, формування уніфікованого вихідного сигналу. **Проміжні вимірювальні перетворювачі** розташовуються у вимірювальному колі після первинного перетворювача.

Виділяють також **передавальні** та **вторинні** перетворювачі.

**Передавальний вимірювальний перетворювач** (передавальний перетворювач) – це перетворювач, призначений для дистанційної передачі сигналу вимірювальної інформації.

**Вторинний вимірювальний перетворювач** – вимірювальний перетворювач, що перетворює інформацію, яка отримана первинним перетворювачем (сенсором) відповідно до вибраного алгоритму вимірювання. Вторинні вимірювальні перетворювачі вже не є датчиками, оскільки лише передають один одному вимірювальні сигнали, перетворюючи їх, але не стикаючись при цьому безпосередньо з об'єктом вимірювання. Тим не менше метрологічні характеристики для первинних і вторинних вимірювальних перетворювачів ідентичні.

За **характером перетворення вхідної величини** вимірювального сигналу вимірювальні перетворювачі поділяються на **лінійні і нелінійні**.

**Лінійний перетворювач** - це вимірювальний перетворювач, який має лінійний зв'язок між вхідною і вихідною величинами. Їх важливим різновидом є **масштабний ВП**, призначений для зміни розміру величини або вимірювального сигналу в задане число разів.

У **нелінійних ВП** зв'язок між вхідними і вихідними величинами нелінійний.

За **видом вхідних і вихідних величин** вимірювальні перетворювачі поділяються на:

- аналогові (АП), що перетворюють одну аналогову величину в іншу аналогову величину;
- аналого-цифрові (АЦП), призначені для перетворення аналогового вимірювального сигналу в цифровий код;
- цифро-аналогові (ЦАП), призначені для перетворення цифрового коду в аналогову величину.

Якщо перетворювачі не входять до вимірювального ланцюга і їх метрологічні властивості не нормовані, то вони не відносяться до вимірювальних. Такі, наприклад, силовий трансформатор в радіоапаратурі, термopара в термоелектричному холодильнику.

Доцільно звернути увагу на відмінність у поняттях „вимірювальний перетворювач” та „перетворювальний елемент”.

**Вимірювальний перетворювач** як засіб вимірювань має нормовані метрологічні характеристики і виконується звичайно у вигляді окремого засобу певного класу точності.

**Перетворювальний елемент** як частина засобу вимірювань не має окремо нормованих метрологічних характеристик, однак його похибки лімітуються допустимими похибками тих засобів вимірювань, до складу яких він входить.

Відмінність ВП від інших видів перетворювачів — здатність здійснювати перетворення зі встановленою точністю. Поняття “вимірювальний перетворювач” значно більш вузьке, більш конкретне, ніж поняття “вимірювальне перетворення”, тому що одне й теж вимірювальне перетворення може виконуватися цілою низкою різних за принципом дії вимірювальних перетворювачів. Так, вимірювальне перетворення одного і того ж вигляду, наприклад, температури в механічне переміщення, може здійснюватися різними ВП (ртутним термометром, біметалічним елементом, термопарою з мілівольтметром і т. п.), вимірювання кутової швидкості повороту основи може бути здійснене механічними гіроскопами, хвильовими та лазерними пристроями, тощо.

При розгляді вимірювального перетворювача виділяються три основні частини:

а) **об'єкт вимірювання** - це складний процес, що характеризується безліччю окремих параметрів, кожен з яких може бути виміряний окремо, але в реальних умовах діє на ВП спільно з усіма іншими параметрами;

б) **вимірювана величина** - це єдиний параметр, який нас цікавить з усієї множини параметрів об'єкта вимірювання;

в) **результат вимірювання** - це вихідний параметр вимірювального перетворювача.

У фізичних методах аналізу засоби вимірювання представляють собою технічні пристрої, що містять іноді безліч електричних та електронних блоків. Для таких засобів вимірювання вимірювальний сигнал поділяють на три - **вхідний, проміжний і вихідний сигнали**.

**Вхідний сигнал** формується в первинному вимірювальному перетворювачі засобу вимірювання. Наприклад, в атомно-емісійному спектрометрі первинний вимірювальний перетворювач являє собою атомізатор - пристрій, в якому речовина, що аналізується, переходить при температурі вище 3000°C в стан атомної пари, що випромінює світло певних довжин хвиль і інтенсивності. Інтенсивність



випромінювання для конкретних довжин хвиль пропорційна числу конкретних атомів (пряме первинне перетворення).

**Проміжний сигнал** формується в проміжних вимірювальних перетворювачах засобу вимірювання. Наприклад, в атомно-емісійному спектрометрі проміжні перетворювачі перетворюють світловий сигнал в електричний сигнал в залежності від конструкції приладу за допомогою фотоелемента або фотодіода або приладу з зарядовим зв'язком.

**Вихідний сигнал** формується в вихідному вимірювальному перетворювачі засобу вимірювання. Завдання вихідного вимірювального перетворювача – візуалізувати вимірювальний сигнал. Вихідний сигнал компонента, що визначається, може бути зареєстрований:

- візуально;
- як показ цифрового табло;
- як показ стрілки на шкалі з поділками;
- як ряд числових даних, роздрукованих на бланку;
- як зображення на екрані осцилографа;
- як зображення у формі піку залежності інтенсивності вимірюваної фізичної властивості від часу (хроматограма, вольтамперограма) або частоти (спектрограма) на діаграмній стрічці самописця або на екрані комп'ютера.

Таким чином, для вимірювання неелектричних величин електричними методами передбачається наявність первинного вимірювального перетворювача неелектричної величини в електричну, вторинного електричного вимірювального приладу, а також пристроїв їх спряження (ліній зв'язку, вимірювальних підсилювачів, пристроїв гальванічної розв'язки вимірювальних кіл, пристроїв корекції похибок) тощо.

Звідси випливає, що вимірювальні перетворювачі використовуються в електронних системах, тобто в технічних пристроях з електричним сигналом, що відбиває результат вимірювання або спостереження. З іншого боку, вимірювальний перетворювач може бути використаний на виході системи, щоб скажімо, генерувати механічний рух в залежності від електричного керуючого сигналу. Прикладом реалізації перетворювача є система, в якій мікрофон (вхідний перетворювач) перетворює звук (вимірювану фізичну величину) в електричний сигнал. Останній підсилюється, а

потім поступає на гучномовець (вихідний перетворювач), який відтворює звук значно більш гучний, ніж той, що сприймає мікрофон.

## **2.6. Класифікація первинних вимірювальних перетворювачів**

Сьогодні існує величезна кількість різноманітних за принципом дії та за призначенням вимірювальних перетворювачів різних фізичних величин. Безперервний розвиток науки і технології призводить до появи все нових перетворювачів. Розроблені класифікації допомагають розібратися в цьому різноманітті. Створити універсальну класифікацію, яка б задовольняла потреби всіх можливих користувачів конкретної предметної області, задача практично неможлива.

Так, розробника систем управління, ймовірно, більш за все влаштовує класифікація перетворювачів за родом вимірюваної величини, коли в довіднику він може знайти необхідний пристрій і ознайомитися з його основними характеристиками.

Для розробника вимірювальних перетворювачів, що вивчає конструкції і технології виготовлення ВП, більш доцільна класифікація перетворювачів за принципом їх дії.

Тому зазвичай будь-яка класифікація є багатовимірною, тобто предмет класифікації розглядається за рядом ознак. При цьому чим більше ознак, тим більш глибоке уявлення можна отримати про предмет.

В якості класифікаційних ознак вимірювальних перетворювачів можна прийняти більшість характеристик перетворювачів: вид функції перетворення, рід вхідної і вихідної величин, принцип дії, конструктивне виконання тощо.

Перетворювачі зазвичай класифікуються за принципом їх роботи або практичним застосуванням.

Найбільш поширена класифікація вимірювальних перетворювачів здійснюється за наступними ознаками.

**1. За призначенням** вимірювальні перетворювачі поділяють на первинні перетворювачі (датчики), уніфіковані і проміжні перетворювачі.

**Первинний перетворювач** є першим у вимірювальному колі і включає в себе чутливий елемент (зонд, мембрану) та інші необхідні елементи для перетворення вхідної неелектричної величини у вихідну

електричну величину. Датчик може складатися з одного або декількох вимірювальних перетворювачів, об'єднаних в єдину конструкцію. На датчик безпосередньо впливає вимірювана неелектрична величина (сила, тиск, рівень, температура тощо).

**Уніфікований перетворювач** складається з датчика і схеми узгодження, вимірювана фізична величина перетворюється з використанням джерела енергії в нормовану вихідну величину. Нормовані сигнали постійного струму знаходяться в діапазоні  $0 \dots \pm 5$  мА або  $0 \dots \pm 20$  мА. Для пристроїв зі зміщеним нулем діапазон струму звужений:  $\pm 1 \dots \pm 5$  мА або  $\pm 4 \dots \pm 20$  мА.

При необхідності регулювання границі діапазону струмових сигналів знаходяться в межах: нижня  $0 \dots 5$  мА, верхня  $12 \dots 25$  мА. У пристроях з нормованими струмовими сигналами допускається застосування різних вимірювальних приладів з внутрішнім опором не більше 1 кОм.

Нормовані значення діапазонів сигналів напруги складають  $0 \dots \pm 1$  В і  $0 \dots \pm 10$  В, причому внутрішній опір вимірювальних приладів не повинно бути менше 1 кОм. При використанні в якості вихідної величини частоти рекомендований діапазон її зміни становить  $5 \dots 25$  Гц. У пневматичних системах унормовано тиск газу. Він повинен знаходитися в діапазоні  $0,02 \dots 0,1$  МПа.

**Проміжний перетворювач** отримує сигнал вимірювальної Інформації від попереднього перетворювача і передає після перетворення цей сигнал наступному перетворювачу.

2. **За характером перетворення вхідної величини** вимірювальні перетворювачі поділяють на **лінійні** і **нелінійні**. У лінійних перетворювачів функціональна залежність між вхідною і вихідною величинами лінійна; у нелінійних перетворювачів - нелінійна.

3. **За видом перетворюваних фізичних величин** перетворювачі поділяються на:

**а. Перетворювачі електричних величин в електричні** – це резистивні подільники напруги, вимірювальні трансформатори, вимірювальні підсилювачі струму і напруги, додаткові опори, шунти тощо;

**б. Перетворювачі неелектричних величин в електричні** – це потенціометри, термопари, терморезистори, тензорезистори, фотоелементи, реостатні, ємнісні, індуктивні, гальваноманітні

вимірювальні перетворювачі, тощо – найбільш багаточисельна і поширена група перетворювачів, якій буде приділено основну увагу;

**в. Перетворювачі неелектричних величин у неелектричні** – це перетворювачі розміру тієї чи іншої неелектричної величини (ричаги, редуктори (зубчасті передачі)) або перетворювачі виду вхідної величини (мембрани, сільфони, пружини, оптичні системи тощо);

**г. Перетворювачі електричних величин у неелектричні** – це в основному вимірювальні механізми електровимірювальних приладів, що перетворюють величину сили струму чи напруги у відхилення стрілки чи світлового променя, датчики ультразвукових витратомірів, електромотори, світильники, двигуни, електричні нагрівники, холодильники тощо;

**4. За видом фізичної величини на вході вимірювального перетворювача та фізичної величини на виході вимірювального перетворювача** вони поділяються на:

**а. аналогові** – вхідні і вихідні величини є аналоговими сигналами, можуть змінюватися неперервно і без скачків. Аналоговий вимірювальний перетворювач — вимірювальний перетворювач, що перетворює одну аналогову величину (аналоговий вимірювальний сигнал) в іншу аналогову величину (вимірювальний сигнал). Вихідним сигналом аналогового датчика є неперервна фізична величина.

**б. цифрові або дискретні** – вхідні і вихідні величини змінюються дискретно;

**в. аналого-цифрові (АЦП)** – вхідний сигнал є аналоговий, вихідний – дискретний. Аналого-цифровий вимірювальний перетворювач — вимірювальний перетворювач, призначений для перетворення аналогового вимірювального сигналу у цифровий код;

**г. цифро-аналогові (ЦАП)** – вхідний сигнал є цифровий, вихідний – аналоговий. Цифро-аналоговий вимірювальний перетворювач — вимірювальний перетворювач, призначений для перетворення числового коду вимірюваного сигналу в аналогову величину.

**5. За принципом дії** перетворювачі поділяються на **генераторні (активні)** і **параметричні (пасивні)**.

Генераторні перетворювачі під впливом вимірюваного фізичного параметра виробляють електричну енергію. У генераторних перетворювачах відбувається безпосереднє

перетворення вимірюваної величини (температури, світлового потоку, швидкості руху рідини й інших фізичних величин) в електричний або інший сигнал вимірювальної інформації. Вихідним сигналом генераторних перетворювачів є електрорушійна сила (ЕРС), напруга, струм або електричний заряд, функціонально пов'язані з вимірюваною величиною, наприклад ЕРС термопари. Генераторні перетворювачі не потребують енергії додаткових джерел живлення, оскільки використовують енергію вхідного сигналу.

Параметричними називають перетворювачі, які під впливом вимірюваної величини змінюють будь-які електричні параметри. У параметричних перетворювачах вимірювана величина (температура, рівень, тиск та ін.) викликає пропорційну їй зміну деякого параметра електричного кола (електричного опору  $R$ , індуктивності  $L$ , ємності  $C$  тощо), що потім перетворюється в сигнал вимірювальної інформації. Тому параметричні перетворювачі складаються з трьох і більшого числа перетворюючих елементів. Для використання параметричного перетворювача необхідне додаткове джерело живлення, що забезпечує утворення вихідного сигналу перетворювача.

**За принципом дії** перетворювачі також поділяють на наступні типи:

1. резистивні перетворювачі, в яких вимірювана величина перетворюється в зміну електричного опору. При цьому вимірювана механічна величина попередньо перетворюється в переміщення (деформацію). В групі резистивних датчиків зазвичай виділяють реостатні, тензометричні і контактні.

2. електромагнітні перетворювачі, в яких вимірювана величина перетворюється в зміну індуктивності або взаєміндуктивності. До цієї групи належать датчики, які використовують взаємодію магнітних потоків, що створюються електричним струмом, який протікає по контурах. Електромагнітні датчики, в свою чергу, поділяються на індуктивні, взаємноіндуктивні, магнітопружні та індукційні.

3. ємнісні перетворювачі, в яких вимірювана величина перетворюється в зміну ємності. Вони дозволяють реєструвати різні механічні зусилля, рівень рідини, склад речовин тощо.

4. п'єзоелектричні, в яких динамічне зусилля перетворюється в електричний заряд. Ці датчики засновані на використанні п'єзоефекту, при якому здійснюється перетворення динамічного

зусилля в електричний заряд. Існують датчики, які використовують зворотний п'єзо ефект. П'єзоелектричні датчики за фізичним принципом дії іноді відносять до електростатичних, так як інформаційним параметром є електростатичний заряд.

5. гальваномагнітні перетворювачі, засновані на гальваномагнітному ефекті, сутність якого полягає в зміні електричних параметрів перетворювачів під дією магнітного поля або появи ЕРС. Такі датчики бувають магніторезистивного типу або засновані на ефекті Холла.

6. електрохімічні перетворювачі, принцип дії яких заснований на залежності параметрів електролітичного перетворювача від складу і концентрації, температури та інших властивостей розчину, а також залежності електричної різниці потенціалів на межі поділу твердої і рідкої фаз від швидкості переміщення розчину. До цієї групи належать електрохімічні резистивні перетворювачі, гальванічні, полярографічні, електрокінетичні і хімотронні перетворювачі.

7. теплові перетворювачі, в яких вимірювана температура перетворюється в ЕРС або у зміну опору терморезистора. Принцип роботи цих датчиків заснований на використанні фізичних закономірностей, які визначаються тепловими процесами. До цих датчиків належать датчики термохімічного, терморезистивного і термоелектричного типів.

8. оптоелектронні перетворювачі, принцип дії яких заснований на перетворенні оптичних випромінювань в електричний сигнал. Залежно від довжини хвилі і інтенсивності оптичних променів, що сприймаються, ці датчики дозволяють реєструвати яскравість світла, температуру речовин, спектральний склад оптичних випромінювань, склад речовин та ін.

#### **6. За фізичною природою вихідного сигналу:**

електричні перетворювачі;  
 механічні перетворювачі;  
 пневматичні перетворювачі;  
 гідравлічні перетворювачі;  
 оптичні перетворювачі.

#### **7. За видом функції перетворення:**

**масштабні перетворювачі** – змінюють в певну кількість разів розмір вхідної величини без зміни її фізичної природи. В результаті масштабного перетворення вхідна величина  $X$  перетворюється в

однорідну вихідну  $X_1$ , розмір якої в  $K$  разів більший за розмір вхідної величини:

$$X_1 = K_{\text{МП}} \cdot X.$$

де  $K_{\text{МП}}$  - коефіцієнт масштабування.

Коефіцієнт масштабування  $K_{\text{МП}}$  є основною характеристикою масштабного перетворення і може приймати значення:

$K_{\text{МП}} < 1$  - послаблення;

$K_{\text{МП}} > 1$  - підсилення;

$K_{\text{МП}} = 1$  - повторення.

Масштабний перетворювач з  $K_{\text{МП}} = 1$  зазвичай забезпечує узгодження вхідних та вихідних сигналів вузлів тракту вимірювального перетворення за опором.

Класифікація масштабних перетворювачів наведена на рис. 2.5.

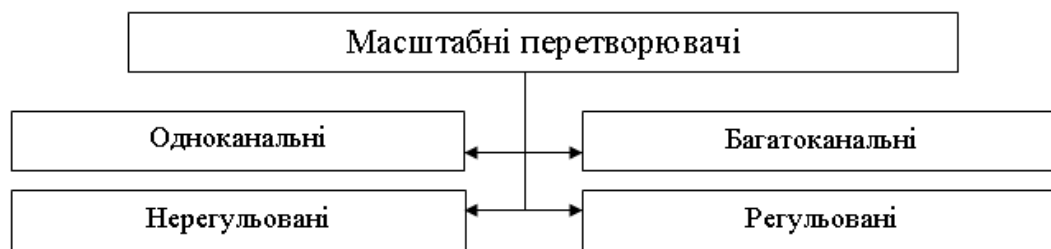


Рис. 2.5. Класифікація масштабних перетворювачів

**функціональні перетворювачі** – здійснюють однозначне функціональне перетворення вхідної величини зі зміною її фізичної природи або без її зміни;

**операційні перетворювачі** – виконують над вхідною величиною математичні операції вищого порядку – диференціювання або інтегрування за часовим параметром.

#### 8. За видом структурної схеми перетворювача:

перетворювачі прямого однократного перетворення;

перетворювачі послідовного прямого перетворення;

диференціальні перетворювачі;

перетворювачі зі зворотним зв'язком (компенсаційна схема).

**9. За видом вхідної фізичної величини, що підлягає перетворенню (за видом вимірюваної величини) розрізняють перетворювачі:**

електричних та магнітних величин;  
 теплових величин (температури);  
 механічних величин (лінійних і кутових переміщень);  
 оптичних величин (параметрів);  
 форми та розмірів;  
 акустичних величин;  
 концентрації та складу;  
 іонізаційного випромінювання.

**10. За фізичними явищами, покладеними в основу принципу дії, в Державній системі приладів та засобів автоматизації (ДСП) прийнята така класифікація ВП:**

механічні перетворювачі – з пружним чутливим елементом, дросельні, ротаметричні, об'ємні, поплавкові, швидкісні;

електромеханічні перетворювачі – тензорезистивні, термоелектричні, термомеханічні, термокондуктометричні, манометричні

теплові перетворювачі;

електрохімічні перетворювачі – кондуктометричні, потенціометричні, полярографічні.

оптичні перетворювачі – фотоколометричні, рефрактометричні, оптико-акустичні, нефелометричні,

електронно-іонізаційні (або іонізаційно-індукційні) перетворювачі – індукційні, хроматографічні, радіоізотопні, магнітні.

**11. За використаними фізико-хімічними ефектами (ефектами, що лежать в основі роботи ВП) розрізняють перетворювачі:**

резистивні;

ємнісні (електростатичні);

індуктивні та електромагнітні;

електричного заряду, напруги або струму;

зміни геометричних розмірів, маси або положення;

оптичних ефектів;

біохімічні.

**12. За видом модуляції сигналу на виході вимірювального перетворювача:**

- амплітудні (амплітудно-модульовані);



- частотні;
- фазові.

**13. За видом динамічних процесів, що відбуваються у вимірювальному перетворювачі в процесі перетворення:**

- **статичні перетворювачі** (вимірювана ФВ на виході ВП виражається через статичну характеристику ВП - коефіцієнт перетворення);

- **динамічні перетворювачі** (вимірювана ФВ на виході ВП виражається через динамічні параметри ВП (динамічні характеристики) перетворювача). Динамічні характеристики - це характеристики, що відображають процеси перетворення кінетичної енергії (або енергії магнітного поля) в потенціальну (або енергію електричного поля);

- **модуляційні перетворювачі** - окремий випадок динамічних перетворювачів - перетворюють статичний вхідний сигнал в періодичний сигнал або змінюють частоту періодичного вхідного сигналу за допомогою спеціального пристрою-модулятора.

#### **Приклади статичних перетворювачів.**

Акселерометр - прилад, що вимірює прискорення об'єкта. В даному випадку постійне прискорення перетворюється в постійний кут відхилення маятника від положення рівноваги.

Аналогічне перетворення має місце в пружинних терезах, де постійна сила тяжіння перетворюється в постійний зсув пружини.

У п'єзоелектричних терезах вага вантажу перетворюється в деформацію п'єзокристала, в якому виникає різниця потенціалів, яка вимірюється вольтметром.

#### **Приклади динамічних перетворювачів**

Гравіметри вимірюють статичну величину - прискорення вільного падіння  $g$ . В обох прикладах ця статична величина перетворюється в сигнал, який виражається через динамічні параметри гравіметра (період коливань в першому випадку і час руху вгору-вниз тіла, кинутого вгору, - у другому). В обох випадках процес перетворення супроводжується перетворенням потенціальної енергії в кінетичну і навпаки.

У модуляційному перетворювачі - постійний світловий потік електричної лампочки (статичний сигнал) перетворюється в періодичний сигнал - змінний струм  $I$ .

**14. За видом статичної характеристики** вимірювальні перетворювачі поділяються на:

лінійні;  
 нелінійні  
 реверсивні (двотактні);  
 неревверсивні (однотактні).

**15. За місцем знаходження в ланцюгу перетворення:**

первинні;  
 вторинні.

**16. За зміною роду вихідної величини:**

перетворювачі без зміни роду вихідної величини;  
 перетворювачі зі зміною роду вихідної величини.

Найбільш широке застосування в автоматичних системах знайшли вимірювальні перетворювачі, у яких вимірювана величина спочатку перетворюється в механічне переміщення, а потім за допомогою декількох елементів в електричний сигнал.

Навіть настільки розгорнута класифікація за рядом ознак не є вичерпною, оскільки за кожним визначенням стоїть група перетворювачів з різними технічними та конструктивними характеристиками.

Ще один спосіб класифікації - **за різновидом вимірюваних фізичних величин**. Розрізняють датчики лінійних і кутових переміщень, зусиль, крутящих моментів, тисків і напруг, параметрів руху, температури, концентрації речовин, випромінювання світла та ін. Такий спосіб класифікації найбільш зручний для практичних цілей. Він використовується в різних довідниках з вимірювальної техніки.

## 2.7. Датчики

Поряд з терміном „вимірювальний перетворювач” широко застосовується термін «**датчик**».

**Датчиком** називають вимірювальний перетворювач неелектричної величини, виконаний як конструктивно завершений (відокремлений) засіб вимірювань. Він призначений для розміщення безпосередньо в зоні досліджуваного об'єкта і для виконання певної функції (наприклад, датчик тиску, датчик швидкості) безвідносно до закладеного в ньому принципу перетворення. Коли необхідно одночасно охарактеризувати і принцип перетворення, в назву датчика включається відповідне визначення, наприклад, п'єзоелектричний датчик тиску тощо.

Датчик являє собою пристрій, що під впливом вимірюваної фізичної величини видає еквівалентний сигнал (звичайно електричної природи - заряд, струм, напруга або імпеданс), що є однозначною функцією вимірюваної величини. Найпростіший датчик складається з одного або декількох первинних перетворювачів і вимірювального кола. Більшість датчиків має зовнішнє джерело живлення, а як навантаження може бути використаний підсилювач, вимірювальний прилад, блок сполучення з комп'ютером і т.п.

Незважаючи на майже повний збіг змісту термінів «датчик» («сенсор», «чутливий елемент») і «первинний перетворювач», між ними існують також і деякі смислові і змістовні відмінності. Датчик (сенсор, чутливий елемент) **відчуває** (фізичну величину), а перетворювач **перетворює** (в тому числі і фізичну величину). **Сенсор** – це первинний вимірювальний перетворювач, що входить до складу датчика.

Причому «відчувати» в даному випадку означає перетворювати фізичну величину до вигляду, зручного для подальшого використання або сприйняття. Зазвичай це електричний сигнал, який легко перетворити, наприклад, в покази індикатора. Однак це може бути і неелектричний сигнал, а зміна кольору (наприклад, розчину або лакмусового паперу), яка може бути пов'язана із наявністю певної речовини в розчині або газі.

Основне призначення датчиків, що застосовуються при вимірюваннях фізичних величин, полягає в сприйнятті і перетворенні досліджуваних величин у вид, зручний для подальшого використання. У більшості випадків датчики перетворюють неелектричну величину в електричну, наприклад температура перетворюється за допомогою терморезисторів в ЕРС, а механічне переміщення, пов'язане зі зміною положення якоря електромагніту, змінює індуктивність його обмотки. У деяких випадках за допомогою датчиків здійснюється перетворення одних електричних величин в інші. Прикладами таких датчиків є підсилювач, вимірювальний трансформатор або фазочутлива схема.

Електричні датчики є одним з головних елементів в будь-якій системі автоматики і телемеханіки. Призначення датчика - перетворення контрольованої або регульованої величини в величину іншого роду, зручну для подальшого використання. У більшості випадків датчики перетворюють неелектричну величину в електричну, наприклад температура перетворюється за допомогою

термопари в ЕРС, а механічне переміщення, пов'язане зі зміною положення якоря електромагніту, змінює індуктивність його обмотки. У деяких випадках за допомогою датчиків здійснюється перетворення одних електричних величин в інші. Прикладами таких датчиків є підсилювач, вимірювальний трансформатор або фазочутлива схема.

За характером електричних величин, одержуваних на виході, електричні датчики поділяються на параметричні, або пасивні, і генераторні, або активні.

У **параметричних датчиках** зміна вимірюваної величини викликає відповідну зміну параметра електричного кола (активного опору, індуктивності або ємності). Параметричними перетворювачами є більшість датчиків сили, тиску, переміщення.

До генераторних відносяться такі датчики, які самі є джерелами електричної енергії (електричного сигналу), причому виникаюча на виході енергія пропорційна вимірюваній величині. Це – термоелектричні перетворювачі; пристрої, в основі функціонування яких лежать піро- і п'єзоелектричні ефекти, явище електромагнітної індукції, фотоефект, ефект Хола та ін.

Структурна схема датчика зображена на рис. 2.6.

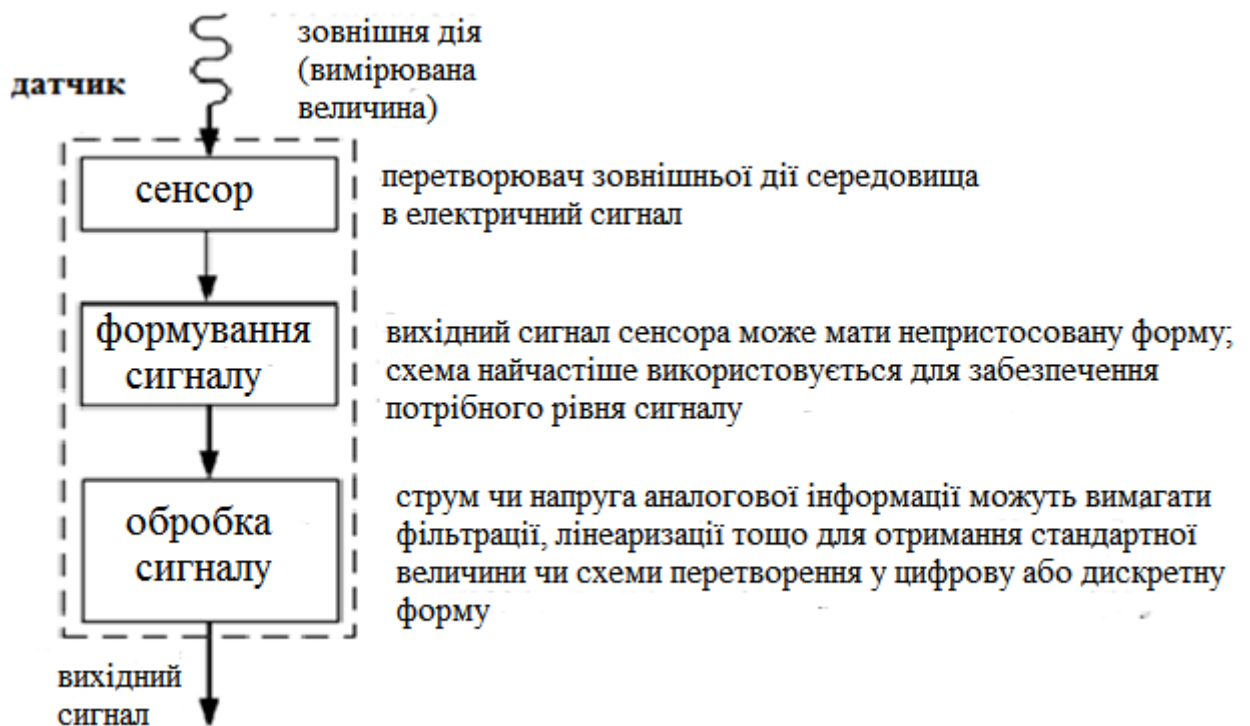


Рис. 2.6. Структурна схема датчика

Датчик як функціональний елемент вимірювальної системи повинен сприймати і перетворювати вимірювану величину, і його можна розглядати як пристрій, що складається зі сприймаючого (чутливого) елемента і проміжних перетворювачів. Виходячи з цього, можна дати наступне визначення: датчиком називається конструктивно відокремлений (завершений) вимірювальний перетворювач вимірюваної неелектричної величини в електричну.

Термін «датчик» зазвичай застосовують в поєднанні з фізичною величиною, для перетворення якої він призначений: датчик температури, датчик тиску, датчик прискорення тощо. Датчики можуть виконуватися як у вигляді найпростіших за устроєм і схемою функціональних елементів (термопари, дровові тензодатчики і т. п.), так і у вигляді більш складних пристроїв, що складаються з ряду самостійних елементів (наприклад, датчик тиску, що складається з пружного елемента, важеля і змінного електричного опору; в цьому випадку вимірюваний тиск впливає на пружний елемент, який через систему важелів переміщує повзунок змінного опору, і, таким чином, тиск перетворюється в електричний опір). Необхідність розробки і застосування складних датчиків обумовлена головним чином тим, що вони дозволяють отримати більші, ніж найпростіші датчики, чутливість, точність і лінійність перетворення.

Класифікація датчиків являє собою досить складне завдання, оскільки класифікаційних ознак дуже багато.

Для простоти виділимо три ознаки:

1. тип сенсорної функції, що заміщується;
2. радіус дії;
3. спосіб перетворення.

За **типом функції, що заміщається**, датчики можна поділити на чотири групи: кінестетичні, локаційні, візуальні й тактильні.

**Кінестетичні датчики** формують інформаційний масив даних про узагальнені координати й сили, тобто про положення й відносні переміщення окремих робочих органів і розвиваючих ними зусиллях. До кінестетичних відносяться датчики положення, швидкості, вимірювачі сил і моментів у зчленуваннях багатоланкового механізму.

**Локаційні датчики** призначені для визначення й виміру фізичних параметрів середовища шляхом випромінювання й прийому відбитих від об'єктів сигналів. За значеннями цих параметрів

формується локаційний образ середовища, що використовується для ідентифікації її об'єктів. Найпоширеніші електромагнітні, у тому числі оптичні, а також акустичні пристрої.

**Візуальні датчики** забезпечують одержання інформації про геометричні й фізичні характеристики зовнішнього середовища на основі аналізу її освітленості в оптичному діапазоні, включаючи ІЧ, СВЧ і рентгенівського випромінювання. Прикладом є різні телевізійні системи.

**Тактильні датчики** дозволяють визначити характер контакту з об'єктами зовнішнього середовища з метою їхнього розпізнавання. Це, наприклад, тактильні матриці й силомоментні датчики. Тактильні датчики відносяться до датчиків контактного типу.

Залежно від **радіуса дії** розрізняють контактні датчики, датчики ближньої й далекої дії. Кінестетичні датчики є контактними.

Сенсорні пристрої ближньої дії одержують інформацію про середовище поблизу об'єкта роботи, далекої - про всю робочу зону. Прикладами є візуальні й акустичні перетворювачі.

Датчики можуть бути систематизовані за видом вхідних (вимірюваних) величин, що може бути корисним при виборі датчиків для вимірювання заданої величини.

За видом вхідних (вимірюваних) величин датчики зазвичай поділяють на такі групи:

- 1) датчики переміщень;
- 2) датчики зусиль;
- 3) датчики моменту обертання;
- 4) датчики розмірів;
- 5) датчики рівня;
- 6) датчики швидкості;
- 7) датчики прискорення;
- 8) датчики параметрів вібрацій;
- 9) датчики тиску і витрати;
- 10) датчики температури;
- 11) датчики вологості;
- 12) датчики для аналізу складу речовини.

У межах кожної групи можливо і подальше розділення датчиків. Наприклад, можна розрізнити датчики лінійного і кутового переміщення, датчики високих і низьких температур тощо.

Систематизація датчиків за видом їх вихідного сигналу дозволяє визначити, які вимірювальні пристрої найбільш придатні для роботи з

даними датчиками або, навпаки, які типи датчиків слід використовувати для заданих вимірювальних пристроїв.

За видом вихідного сигналу датчики, які застосовуються для електричних вимірювань неелектричних величин, можна розділити на групи в залежності від перетворення ними вимірюваної величини в електричний опір, в індуктивність, в ємність, в значення постійного струму або напруги, в фазу змінного струму або напруги, в частоту змінного струму або напруги.

Крім того, вихідними сигналами датчика можуть бути стандартні аналогові сигнали струму чи напруги, дискретний сигнал або цифровий двійковий код. Цей набір характеристик називають форматом вихідного сигналу. Отже, кожний датчик характеризується набором вхідних параметрів, які можуть бути будь-якої фізичної природи та набором вихідних електричних параметрів.

До електричних датчиків незалежно від типу і будови висуваються наступні основні вимоги:

- надійність в роботі;
- висока завадостійкість в умовах електромагнітних завад, коливань напруги й частоти;
- простота конструкції
  - достатня чутливість, що дозволяє істотно спростити схему системи, наприклад автоматичного контролю. У цьому випадку відпадає необхідність у підсиленні сигналу, точність системи підвищується;
  - неперервна залежність його вихідної величини у від вхідних  $x$ , тобто  $y = f(x)$ , де  $x$  - контрольована величина, а  $y$  - вихідна, що змінюється від величини  $x$ ;
  - мінімальні габаритні розміри і вага;
  - необхідний діапазон зміни параметрів;
  - відсутність зворотного впливу датчика на вимірюваний процес. Так, наприклад, при зміні температури контрольованого середовища через наявність в ній датчика може з'явитися значна похибка вимірювання;
  - невелика інерційність (інтервал часу між зміною вхідної величини і відповідною зміною вихідної величини);
  - робота в заданих умовах навколишнього середовищ

На роботу електричних датчиків впливають такі чинники: періодичність та максимальна частота процесу, знакозмінність кривої зміни процесу і наявність в ній постійної складової, температурні

умови місця вимірювання, атмосферні умови (вологість, температура повітря тощо), наявність вібрації, прискорень або струсів в установці та інші.

Датчики можуть перебувати у безпосередньому контакті з об'єктом: розташовуватись на поверхні чи всередині об'єкта або не мати безпосереднього зв'язку з ним. Датчики, які не перебувають у безпосередньому зв'язку з об'єктом, називають безконтактними. У таких датчиків обмін енергією між сенсором і об'єктом може здійснюватись за допомогою магнітного поля (безконтактний індуктивний датчик наближення), ультразвуковим сигналом (безконтактний ультразвуковий сигнал присутності) тощо.

Великі можливості відкриваються при використанні датчиків в вимірювально-обчислювальних комплексах (ВОК) спільно з комп'ютерами. Таке використання дозволяє вирішити цілий спектр завдань, пов'язаних зі збором, переробкою, передачею, зберіганням, пошуком і видачею інформації, «джерелом» якої є датчики. Одночасно вирішуються такі проблеми, як компенсація зовнішніх впливів на датчики, підвищення точності і надійності проведених вимірювань, прискорення і спрощення експериментальних робіт тощо.

## 2.8. Зовнішні умови

Окрім врахування всіх факторів, пов'язаних з виготовленням перетворювачів, необхідно вирішити питання вибору перетворювача для конкретного застосування, умови якого відіграють важливу роль. Де передбачається використовувати перетворювач? Які умови потрібно врахувати при його роботі?

Все це вкрай важливо при виборі перетворювачів, оскільки зовнішні умови, в яких він знаходиться можуть суттєво впливати на його роботу. Зовнішні умови потрібно враховувати для того, щоб перетворювач точно виконував свої функції не тільки в момент вводу в експлуатацію, але і протягом всього терміну служби вимірювальної системи.

Взагалі кажучи, вплив зовнішніх умов на перетворювач та пов'язану з ним вимірювальну систему може бути трьох видів.

**По-перше**, безпосередній вплив зовнішніх умов на сам перетворювач. Можливо, що температура навколишнього середовища перетворювача тиску є занадто високою и викликає



плавлення деталей приладу або перетворювач, що вимірює температуру двигуна, не витримує вібрацій, виникаючих при нормальній роботі останнього.

**По-друге**, якщо відомо, що перетворювач безпосередньо під дією зовнішніх умов не руйнується, то необхідно з'ясувати чи зберігає він точність протягом тривалого часу. Може виявитися, що у прилада під дією зовнішніх умов з часом характеристики точності погіршуються до рівня, який був неприпустимий в момент його установки у вимірювальну систему. Якщо перетворювач погіршує свої характеристики точності, його потрібно замінити на новий.

**По-третє**, вплив зовнішніх умов на лінії зв'язку між вимірювальною системою та перетворювачем, хоча при цьому вони впливають на перетворювач опосередковано (непрямо). Чи можуть ці лінії зв'язку протистояти зовнішнім умовам? Чи можуть зовнішні умови призвести до спотворення сигналу?

Розглянемо ряд зовнішніх чинників, що називаються **впливовими величинами**, які без прийняття спеціальних захисних або охоронних заходів здійснюють шкідливий вплив на результат перетворення і, як наслідок, вимірювання. Основними впливовими величинами є:

- температура навколишнього середовища, що змінює електричні і механічні характеристики датчика, а також розміри складових його деталей;
- тиск навколишнього середовища, а також прискорення і вібрації, що змінюють метрологічні характеристики датчика і в першу чергу його чутливість;
- вологість навколишнього середовища як один з основних можливих джерел порушення електричної ізоляції між окремими конструктивними елементами датчика (або між датчиком і навколишнім середовищем);
- зовнішнє постійне або змінне магнітне поле, що спотворює корисний сигнал;
- зміни амплітуди і частоти напруги живлення датчиків (якщо такі мають потребу в живленні від сторонніх джерел).

Повністю уникнути наслідків впливу на датчик перерахованих впливаючих величин неможливо, але істотно зменшити ступінь завданої метрологічної шкоди вдається як мінімум **трьома шляхами**:

1. зниженням значень впливових величин шляхом застосування методів і засобів захисту від них (застосування антивібраційних основ, магнітних екранів тощо);

2. стабілізацією впливових величин (застосування термостатів, стабілізаторів напруги живлення тощо);

3. компенсацією впливу впливових величин шляхом використання методів і засобів корекції в наступних (подальших) вимірювальних ланцюгах.

## **2.9. Области застосування первинних вимірювальних перетворювачів**

Области застосування датчиків (первинних вимірювальних перетворювачів) надзвичайно різноманітні. Завдяки впровадженню нових технологій виготовлення (високовакуумне наплення, розпилення, хімічне осадження з газової фази, фотолітографія тощо) і нових матеріалів безперервно розширюються сфери їх застосування. Розглянемо лише деякі з них.

Можливі області застосування первинних перетворювачів дуже різноманітні:

промислова техніка вимірювання і регулювання,  
 робототехніка,  
 автомобілебудування,  
 побутова техніка,  
 медична техніка.

Застосування того чи іншого первинного перетворювача в цих сферах визначається перш за все відношенням ціна/ефективність.

У промисловій техніці стандартні датчики використовують для вимірювання: витрати, об'єму; тиску; температури; рівня; хімічного складу.

Зі стандартних датчиків все більшим попитом користуються датчики нових типів, наприклад:

- датчики положення, переміщення і зображення;
- оптичні і волоконно-оптичні датчики;
- біодатчики (біотехнологія);
- багатокоординатні датчики (розпізнавання образів).

Для сучасних виробництв характерна тенденція застосування датчиків в інтерактивному режимі, тобто коли результати вимірювань відразу ж використовуються для регулювання процесу. Завдяки

цьому в будь-який момент забезпечується коригування технологічного процесу, що природно веде до більш раціонального виробництва. При промисловому застосуванні визначальним фактором є похибка, яка при регулюванні процесів повинна бути не більше 1 ... 2%, а для задач контролю - 2 ... 3%.

В робототехніці, яка в принципі являє собою складну інформаційну систему, робот забезпечує отримання, обробку та перетворення інформації. При отриманні інформації через датчики роботу потрібна перш за все здатність «бачити» і «обмацувати», тобто використання оптичних і багатокоординатних датчиків.

При виготовленні датчиків для автомобільної електроніки все в більшій мірі застосовують сучасні технології, що забезпечують економічне виготовлення датчиків мінімальних розмірів для окремих систем автомобіля (рульове управління, двигун, гальма, електроніка кузова), для забезпечення безпеки і надійності (система блокування і протиугінна система), інформаційна система (витрата палива, температура, маршрут руху тощо). За допомогою цих датчиків вимірюються різні фізичні параметри - температура, тиск, швидкість обертання, прискорення, вологість, переміщення або кут, витрата тощо. Вимоги до цих датчиків щодо впливу навколишнього середовища досить високі.

Досить часто вимірювана величина, згідно з її визначенням, просто вимірюється електронною системою, а отриманий результат тільки відображається або запам'ятовується. Однак у деяких випадках вимірювання створюють вхідний сигнал керуючої схеми, яка служить або для **регулювання вимірюваної величини**, або для **управління змінною величиною** у відповідності з вимірюваною.

Прийнято розрізняти ці області використання перетворювачів, називаючи їх відповідно **контрольно-вимірювальне устаткування** та **управляюче устаткування**.

Основні складові контрольно-вимірювального устаткування представлені на рис. 2.7.



Рис. 2.7. Основні складові контрольно-вимірювального устаткування:  
1 - вимірювана величина; 2 - вимірювальний перетворювач; 3 - лінія зв'язку; 4- відображення або запам'ятовування.

На рис. 2.8. представлена типова схема управління.

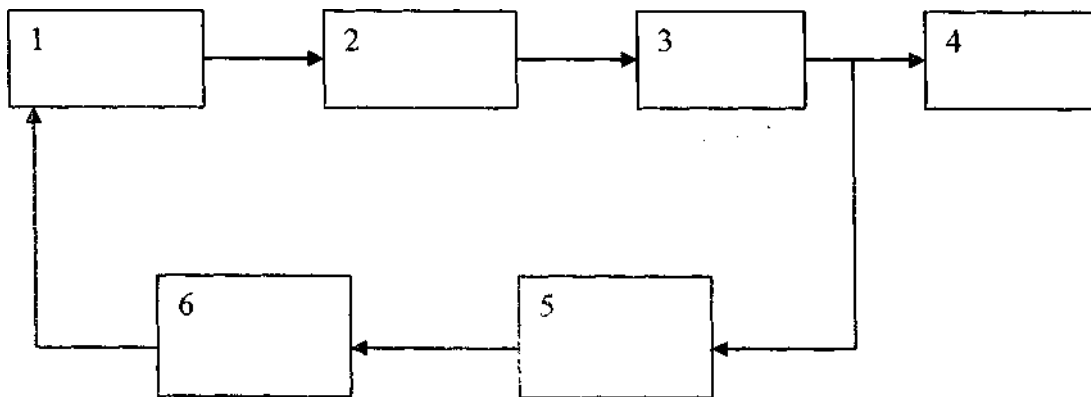


Рис. 2.8. Типова схема управління:  
1 - вимірювана величина; 2 - вимірювальний перетворювач;  
3 - лінія зв'язку; 4 - відображення або запам'ятовування; 5 -  
компаратор; 6 — виконуючий пристрій

Процес управління є необхідним, зокрема, для того, щоб контролювати виробничі процеси (наприклад, контролювати та управляти процесом прокату сталі) та т.п.

З рис. 2.8. видно, що по суті частина системи управління є контрольно - вимірювальною системою.

На рис. 2.7, та 2.8 цифрою 2 позначений вимірювальний перетворювач. Його ще називають вхідним перетворювачем. Цифрою 6 позначений виконуючий пристрій. Він може мати назву вихідного перетворювача.

Згідно з цими двома схемами вхідний перетворювач перетворює будь - яку фізичну величину в електричний сигнал. Вихідний перетворювач згідно з рис. 2.8 перетворює електричний сигнал у деяку фізичну величину. Той факт, що вхідний перетворювач

повинен звідки-небудь отримувати енергію, щоб виконувати процес перетворення (або безпосередньо від самої вимірюваної величини, або від зовнішнього джерела) допомагає визначити тип пристрою. Наприклад, вхідний перетворювач, що отримує енергію від вимірюваної величини, часто називають **пасивним перетворювачем**. Пасивний перетворювач - це і є чутливий елемент, сенсор, або датчик. Згідно з цією схемою, вихідний перетворювач є **активним перетворювачем**. Такий перетворювач отримує енергію від зовнішнього джерела (він перетворює електричний сигнал в деяку фізичну величину).

Вхідних перетворювачів набагато більше, ніж вихідних. Тому, коли кажуть просто «перетворювач» мають на увазі вхідний перетворювач, тобто такий перетворювач, який перетворює вимірювану фізичну величину в електричний сигнал.

## 2.10. Системи дистанційної передачі сигналів вимірювальної інформації та первинні вимірювальні перетворювачі

Первинні вимірювальні перетворювачі вимірювану величину перетворюють у сигнал вимірювальної інформації, що дає можливість передати його на певну відстань і за місцем призначення відтворити вимірювальну величину у формі, прийнятній для спостерігача або ж ввести у відповідний засіб вимірювання.

Вимірювання, перетворення, передача і відповідне зображення вимірюваної величини проходить за схемою, зображеною на рис. 2.9.

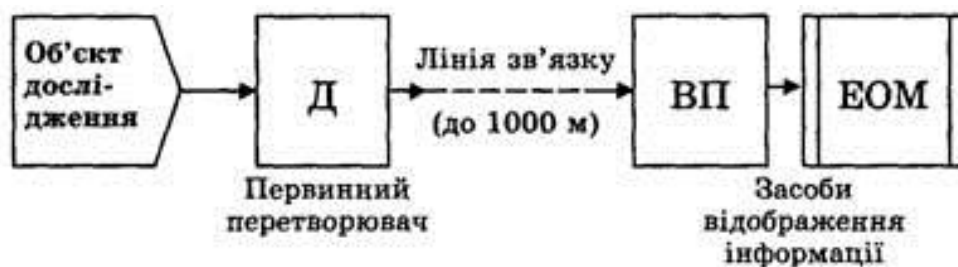


Рис. 2.9. Схема дистанційної передачі сигналів вимірювальної інформації:

Д – датчик (первинний перетворювач); ВП – вимірювальний пристрій; ЕОМ – електронно-обчислювальна машина.

Первинний перетворювач перетворює вимірювану величину об'єкта (температуру, тиск, рівень, переміщення, зусилля та ін.) у сигнал вимірювальної інформації (електричний, пневматичний, оптичний тощо), який лініями зв'язку передається до вторинного приладу, перетворювача, ЕОМ тощо.

З іншого боку, вимірювальний перетворювач може бути використаний на виході системи, щоб, наприклад, генерувати механічний рух залежно від електричного сигналу, що є управляючим.

Прикладом реалізації перетворювачів є система, в якій мікрофон (вхідний перетворювач) перетворює звук (вимірювану фізичну величину) на електричний сигнал. Останній підсилюється, а потім поступає на гучномовець (вихідний перетворювач), що відтворює звук істотно більш гучний, ніж той, який сприймається мікрофоном.

Розглядаючи структурні схеми контрольно-вимірювальних і управляючих систем слід зупинитися на наступних головних моментах.

Комплекс технічних засобів у складі первинного перетворювача, лінії зв'язку та засобу відтворення вимірюваної величини називається **системою дистанційної передачі сигналів вимірювальної інформації**.

Таким чином, вимірювана величина перетворюється в сигнал певної фізичної природи, який передається лінією зв'язку до вторинного приладу, де знову сигнал перетворюється у вимірювану величину, що набуває форми, прийнятної для спостерігача.

Системи дистанційної передачі сигналів вимірювальної інформації розподіляються на дві великі групи:

1. системи з уніфікованими сигналами, приведені до виду і рівня, що відповідають вимогам Державної системи промислових приладів (ДСП), і

2. системи з неуніфікованими сигналами, які не приведені до виду і рівня, що відповідають вимогам ДСП й не відповідають стандарту.

Найперспективнішими є перетворювачі з уніфікованими вихідними сигналами.

До систем дистанційних передач сигналів вимірювальної інформації ставляться такі вимоги: точність передачі; достовірність і надійність передачі; перешкодозахищеність; дистанційність передачі;

мінімальна інерційність; стабільність сигналів, незалежність від джерела живлення; економічність системи дистанційної передачі.

Задовольнити усі наведені вимоги у повному обсязі за допомогою однієї дистанційної системи передачі досить складно, проте у своїй більшості системи відповідають цим вимогам.

Типи перетворювачів дистанційних передач обираються залежно від об'єкта і виду вимірюваної фізичної величини, яка перетворюється в сигнал, що передається лінією зв'язку (струм, напруга, частота, стиснуте повітря тощо). Для перетворення лінійного переміщення в уніфікований сигнал найчастіше використовуються диференціально-трансформаторні та струмові перетворювачі, а саме:

1. перетворювачі кутового переміщення — феродинамічні, сельсинні та частотні перетворювачі;
2. перетворювачі зусиль — електросилові та пневмосилові компенсуючі перетворювачі.

## **РОЗДІЛ 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРВИННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

### **3.1. Загальні відомості про характеристики вимірювальних перетворювачів**

Характеристика (від грец. - риса, особливість) - визначення та опис відмінних властивостей, достоїнств і недоліків будь-чого (або будь-кого).

Характеристики, якими описуються засоби вимірювальної техніки, поділяються на дві великі групи:

1. метрологічні;
2. неметрологічні.

Характеристики перетворювачів, як і інших засобів вимірювань, поділяються на дві групи – перетворюючі (технічні) та метрологічні.

**Перетворюючі характеристики** - це характеристики, які встановлюють зв'язок між вхідною і вихідною величинами. До них відносяться функції перетворення (градувальні характеристики), коефіцієнти перетворення, чутливість, діапазон перетворення, поріг чутливості.

**Метрологічні характеристики засобів вимірювань** - це характеристики, які:

1. нормуються для визначення результату вимірювання та його похибки;
2. впливають на результат і точність вимірювань.

Метрологічні характеристики засобів вимірювань - це показники якості засобів вимірювальної техніки, що визначають їх придатність для вимірювань. Вони є складовою частиною вихідної інформації, призначеної для:

- визначення результатів вимірювань і розрахункової оцінки характеристик інструментальної складової похибки вимірювань або стандартних невизначеностей результату вимірювань;
- розрахунку метрологічних характеристик каналів вимірювальних систем;
- вибору засобів вимірювань;
- використання при контролі засобів вимірювань на відповідність встановленим нормам.

Метрологічні характеристики датчиків, в основному, залежать від досконалості первинних перетворювачів, оскільки вони



здійснюють, по-перше, селекцію вимірюваної величини в об'єкті вимірювання, так званий інформативний параметр, і, по-друге, первинне перетворення цієї фізичної величини в інший рід фізичної величини - електричний сигнал в реальних умовах об'єкта.

Розрізняють **нормовані метрологічні характеристики**, вимоги до яких встановлені нормативними документами, і **ненормовані**.

**Нормування метрологічних характеристик** полягає у раціональному виборі та законодавчому затвердженні їх номенклатури (переліку), встановленні номінальних значень та допустимих відхилень реальних метрологічних характеристик перетворювачів від їх номінальних значень.

**Номенклатура метрологічних характеристик** встановлюється Державним стандартом.

Нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювань поділяють на наступні групи:

1. характеристики, призначені для визначення результатів вимірювань (без введення поправки);
2. характеристики похибок засобів вимірювань;
3. характеристики чутливості засобів вимірювань до впливаючих величин;
4. динамічні характеристики засобів вимірювальної техніки;
5. метрологічні характеристики впливу на похибку;
6. неінформативні параметри вихідного сигналу.

До першої групи характеристик відносять: функцію перетворення вимірювального перетворювача або вимірювального приладу; значення однозначної або значення багатозначної міри; ціну поділки шкали вимірювального приладу або багатозначної міри; вид вихідного коду, число розрядів коду, ціну одиниці найменшого розряду коду засобів вимірювань, призначених для видачі результатів в цифровому вигляді.

Характеристики похибки засобів вимірювань (друга група) можуть бути представлені у вигляді повної похибки або її складових.

Характеристики **систематичної складової похибки** засобів вимірювань вибирають з числа наступних:

- 1) значення систематичної складової  $\Delta_c$ ;
- 2) значення систематичної складової  $\Delta_c$  і, додатково, математичне сподівання  $M[\Delta_c]$  і середнє квадратичне відхилення  $\sigma[\Delta_c]$  систематичної складової похибки.

Характеристики **випадкової складової похибки** засобів вимірювань можуть бути представлені у вигляді:

1) середньоквадратичного відхилення  $\sigma[\Delta_B]$  випадкової складової похибки;

2) середньоквадратичного відхилення випадкової складової похибки  $i$ , додатково, нормалізованої автокореляційної функції або функції спектральної густини випадкової складової похибки.

Характеристики чутливості засобів вимірювань до впливаючих чинників (третя група) виражаються функцією впливу  $\varphi(\xi)$ , що представляє собою залежність зміни метрологічної характеристики засобу вимірювання від зміни впливаючої величини (наприклад, зміни похибки вимірювання тиску тензодатчиком від температури), або зміною значень метрологічних характеристик, викликаних змінами впливаючих величин  $\xi$  у встановлених межах.

Четверту групу метрологічних характеристик доводиться враховувати при динамічних вимірюваннях, коли стають важливими інерційні властивості засобу вимірювань.

Якщо на вхід засобу вимірювань подається нестационарний, змінний сигнал вимірювальної інформації вихідний сигнал приладу буде нести «запізнілу» (через інерційні затримки в механізмі приладу) і спотворену (через динамічні похибки) інформацію про вимірювану величину. Якщо такі «затримки» для засобу вимірювань великі, то їх недоцільно застосовувати для вимірювання швидкозмінних величин.

Характеристики інерційних властивостей засобів вимірювань називають динамічними характеристиками. До їх складу можуть входити повна динамічна характеристика та часткові динамічні характеристики.

П'яту групу метрологічних характеристик складають характеристики засобів вимірювальної техніки, що відображають їх здатність впливати на інструментальну складову похибки вимірювань внаслідок взаємодії засобів вимірювань з будь-яким з підключених до їх входу чи виходу компонентів (таких як об'єкт вимірювань, інший засіб вимірювань тощо). Такі характеристики називають імпедансними характеристиками або імпедансами. Вони відображають обмін енергією між засобом вимірювання і підключеними до їх входу або виходу об'єктами. (наприклад, вимірювання температури термометром або термопарою, вимірювання витрат рідин і газів витратомірами. Імпедансом може

бути внутрішнє тертя в пружних елементах при їх деформації, тертя в опорах.)

Неінформативні параметри вихідного сигналу (шоста група характеристик) не є, строго кажучи, метрологічними характеристиками, так як не несуть інформації про значення вимірюваної величини. Однак вони впливають на нормальну роботу засобів вимірювань і повинні бути обмежені. Так, нормальна робота частотоміра обумовлена постійністю амплітуди і форми сигналу вимірювальної інформації; характеристики стандартних зразків складу та властивостей речовин і матеріалів залежать від кількості домішок, структури матеріалу та інші.

Залежно від режиму роботи як технічні, так і метрологічні характеристики поділяються на **статичні** і **динамічні**.

Статичні характеристики відповідають статичному режиму роботи перетворювача, при якому перетворювана (вимірювана) величина не залежить від часу.

Динамічними називають характеристики, які проявляються при роботі перетворювача (датчика) в динамічному режимі, тобто коли перетворювана величина є функцією часу.

**Динамічним режимом** роботи технічного пристрою вважається режим роботи, при якому зміна величини у на виході перетворювача в залежності від зміни вхідної величини  $x$  відбувається, не миттєво, а з деяким запізненням, яке зумовлюється часом перебігу фізичних процесів у самому перетворювачі (інерційними властивостями). Ця залежність і становить динамічну характеристику перетворювача.

Отже, робота перетворювача описується двома основними характеристиками: статичною та динамічною.

### **3.2. Основні характеристики вимірювальних перетворювачів.**

**Вимірювальний перетворювач** - технічний засіб з нормативними метрологічними характеристиками, що служить для перетворення вимірюваної величини в іншу величину або вимірювальний сигнал, зручний для обробки, зберігання, подальших перетворень, індикації або передачі. З огляду на те, що об'єкт вимірювання, як правило, складний процес, який характеризується великою кількістю різних параметрів, то **інформативним параметром** вхідного сигналу будемо вважати безпосередньо

вимірювану величину або величину, функціонально пов'язану з вимірюваною величиною.

**Неінформативний параметр** не пов'язаний функціонально з вимірюваною величиною, але впливає на метрологічні характеристики перетворювача.

Параметри, що характеризують умови, в яких працює перетворювач, і що впливають на його функцію перетворення, називають впливаючими величинами. Залежність зміни метрологічних характеристик перетворювача від зміни впливаючої величини або неінформативного параметра вхідного сигналу в межах робочих умов експлуатації називається **функцією впливу**. Функція впливу може бути нормована у вигляді формули, графіка або таблиці.

Характеристики перетворювачів поділяються на **статичні**, які характеризують датчик у **статичному режимі**, і **динамічні**, що характеризують його в **динамічному режимі**.

**Статичним** режимом роботи перетворювача називається режим роботи, коли на вході датчика діє **стала** фізична величина. Однак стала фізична величина — лише зручна математична модель, абстракція, яка застосовується для теоретичного аналізу. В природі всі величини змінюються з тією чи іншою швидкістю. З іншого боку, реальні технічні пристрої, зокрема перетворювачі, мають інерцію, тобто реагують на вхідну дію не миттєво, а з деяким запізненням. Враховуючи все це, доцільно вважати **статичним режимом** реального технічного пристрою (перетворювача) такий режим, коли інерційними властивостями пристрою можна знехтувати порівняно зі швидкістю зміни сигналу на його вході.

**Динамічним режимом** роботи перетворювача вважається режим роботи, в якому динамічні характеристики перетворювача, обумовлені його інерційністю, істотно впливають на результат роботи.

При оцінці і порівнянні ВП необхідно враховувати їх наступні основні характеристики:

1. Сталість в часі функції перетворення. При зміні з часом функції перетворення доводиться повторно здійснювати градування, що вкрай небажано, а в деяких випадках неможливо.

2. Вид функції перетворення. Зазвичай найбільш бажаний лінійний характер залежності  $Y = f(X)$ . Багатозначність або розрив функції перетворення вказують на непридатність ВП для роботи в даному інтервалі зміни вимірюваної величини.

3. Похибка і чутливість. Основна похибка вимірювального перетворювача - це похибка при нормальних умовах, тобто при номінальних значеннях впливаючих величин. Додаткова похибка вимірювального перетворювача - це похибка, обумовлена відхиленням однієї з впливаючих величин (наприклад, температура, вологість або тиск навколишнього середовища) від номінального значення.

4. Зворотний вплив перетворювача на вимірювану величину. Наприклад, термопара, терморезистор спотворюють температурне поле об'єкта дослідження).

5. Динамічні властивості перетворювача. При вимірюванні вхідної величини у вимірювальному перетворювачі виникає перехідний процес (пов'язаний не тільки з інерційністю), характер якого залежить від наявності в перетворювачі елементів, що накопичують енергію (деталі, що переміщуються, котушки індуктивності, конденсатори, деталі, що володіють теплоємністю). Перехідний процес проявляється також у вигляді інерції - запізнювання реакції вимірювального перетворювача на зміну вхідної величини.

### 3.3. Статичні характеристики перетворювачів

Режим роботи вимірювального пристрою, при якому значення вхідного  $X$  і вихідного  $Y$  сигналів не змінюються з часом, називають статичним (стаціонарним чи врівноваженим).

**Статичною характеристикою** перетворювача називається залежність  $Y=f(X)$  вихідної величини  $Y$  від вхідної  $X$ , якщо вхідна величина змінюється настільки повільно, що в кожний момент часу її можна вважати незмінною.

Функція  $f(X)$  називається **функцією перетворення**. Для деяких вимірювальних перетворювачів вона відома, а для інших її доводиться знаходити експериментально, тобто вдаватися до градування вимірювальних перетворювачів, під яким розуміють залежність між значеннями величин на виході і вході засобу вимірювань, Результати градування виражаються у вигляді таблиць, графіків або аналітично. Тому статичну характеристику для вимірювального перетворювача іноді називають характеристикою шкали (градувальною характеристикою).

Статичні характеристики дозволяють оцінити роботу перетворювачів у режимі, що встановився. Однак у реальних умовах датчикам іноді доводиться працювати в умовах швидкоплинних процесів, тобто в динамічному режимі, коли на вхід надходять сигнали, що змінюються в часі. У цих випадках починають проявлятися явища відставання вихідного сигналу від вхідного зміни його частоти, фази, амплітуди.

Розрізняють **номінальну** (ідеальну) функцію перетворення  $Y = F_n(X)$  і **реальну** (дійсну, робочу) функцію перетворення  $Y = F_p(X)$ .

**Номінальна (або ідеальна) функція перетворювача** – це функціональна залежність між інформативним параметром вихідного сигналу  $Y$  та інформативним параметром  $X$  вхідного сигналу:

$$Y = F_n(X), \quad (3.1)$$

яка приписана вимірювальному перетворювачу згідно з державними стандартами, технічними умовами та іншими нормативними документами, вказана в його паспорті і використовується при виконанні за його допомогою вимірювань.

**Реальною функцією** перетворювача називається функція, яку має конкретний екземпляр вимірювального пристрою даного типу в дійсності.

Через недосконалість конструкцій і технологій виготовлення вимірювальних пристроїв реальна функція перетворення відрізняється від номінальної. Ця відмінність і визначає природу похибок даного вимірювального пристрою.

Отже, для реальних перетворювачів функція перетворення відрізняється від номінальної (істинної) і називається **реальною (робочою) функцією перетворення**:

$$Y = F_p(X). \quad (3.2)$$

Іноді її ще називають градуовальною характеристикою вимірювального перетворювача.

Похибки перетворення виникають внаслідок різниці між

$$Y = F_n(X) \quad \text{та} \quad Y = F_p(X)$$

тобто

$$\Delta_{\text{пер.}} = \Delta Y = F_p(X) - F_n(X), \quad (3.3)$$

де  $\Delta_{\text{пер.}}$  - похибка перетворення.

Функція перетворення характеризує вимірювальний перетворювач у всьому діапазоні зміни вхідної і вихідної величини і є повною статичною характеристикою.

Як правило, вихідна величина залежить не тільки від вхідної (вимірюваної) величини, а й від деяких інших величин (впливаючих факторів) - наприклад, температури навколишнього середовища, тиску, вібрації, напруги джерела живлення тощо, тобто

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots X_n)$$

Очевидно, що вплив на засіб вимірювань сторонніх чинників  $X_1, X_2, X_3, \dots X_n$  необхідно усунути або зменшити. Це досягається шляхом екранування та ізоляції засобу вимірювань від впливу перешкод, їх компенсації, стабілізації тощо.

Однак у багатьох випадках функція перетворення є одновимірною, тобто пов'язує вихідну величину (сигнал) перетворювача тільки з однією вхідною.

Статична характеристика може бути як лінійною (рис 3.1,а), так і нелінійною, наприклад, логарифмічною, експоненціальною, степеневою тощо (рис. 3.1,б,в).

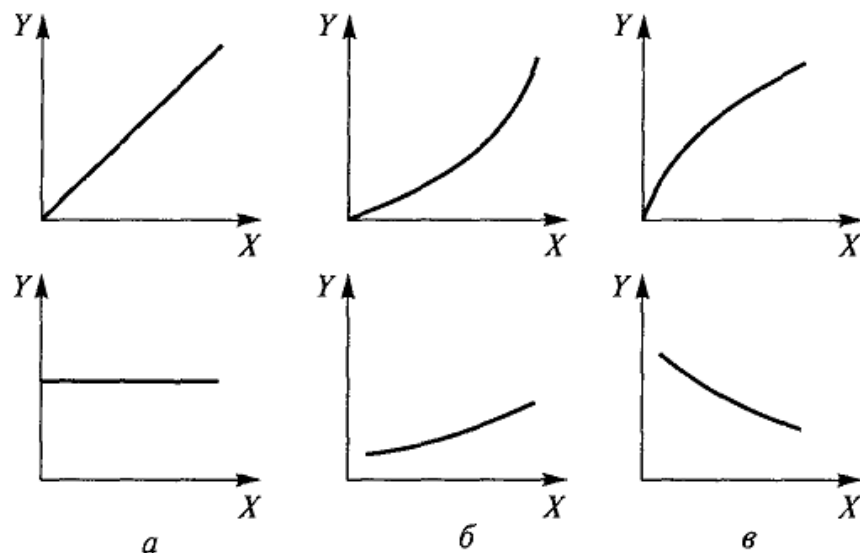


Рис. 3.1. Функції перетворення: а - лінійна; б, в - нелінійні

Одновимірна лінійна функція, як відомо, має вигляд

$$y = a + S \cdot X$$

де  $a$  - постійна складова (тобто значення вихідного сигналу при нульовому вхідному);  $S$  - тангенс кута нахилу прямої до вісі  $x$ .

У випадку лінійної залежності  $S = \text{const}$ . Тоді вводять позначення  $S = K$ . Коефіцієнт  $K$  називають коефіцієнтом перетворення або масштабним коефіцієнтом.

Логарифмічна функція перетворення описується залежністю

$$y = a + s \cdot \ln X$$

експоненціальна

$$y = ae^{sX}$$

степенева

$$y = a + bX^k$$

де  $s$ ,  $b$ ,  $k$  - постійні числа.

У багатьох випадках нелінійні перетворювачі можуть вважатися лінійними всередині обмеженого діапазону значень вхідної величини. Для більш широкого діапазону значень нелінійна функція перетворення представляється у вигляді відрізків кількох прямих ліній. Ця процедура називається кусково-лінійною апроксимацією.

У загальному випадку функції перетворення окремих однотипних перетворювачів (датчиків) через наявність індивідуальних особливостей будуть дещо відрізнятися один від одного, тобто кожний окремий перетворювач може характеризуватися своєю індивідуальною функцією перетворення.

Визначення статичної характеристики пов'язано з виконанням градування, тому для всіх засобів вимірювань використовують поняття градувальної характеристики, під яким розуміють залежність між значеннями величин на виході і вході засобу вимірювань, складену у вигляді таблиці, графіка чи формули. Тому статичну характеристику вимірювального перетворювача іноді називають характеристикою шкали (градувальною характеристикою).

Головною загальною характеристикою перетворювачів є **коефіцієнт перетворення** (або коефіцієнт передачі), що представляє собою відношення вихідної величини перетворювача  $y$  до вхідної величини  $x$ ,



$$K = \frac{Y}{X} \quad (3.4)$$

або відношення приросту вихідної величини  $\Delta Y$  або  $dY$  (рис. 3.2) до приросту вхідної величини  $\Delta X$  або  $dX$ :

$$K' = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (3.5)$$

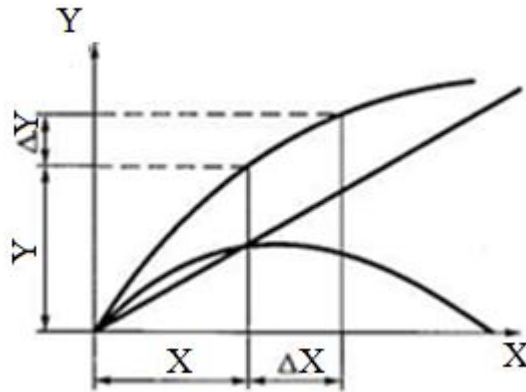


Рис. 3.2. Види статичної характеристики перетворювачів

У першому випадку коефіцієнт  $K$  називається статичним коефіцієнтом перетворення, а в другому випадку  $K'$  - динамічним коефіцієнтом перетворення. При  $\Delta X \rightarrow 0$ ,  $K' = \frac{dY}{dX}$ . Зв'язок між значеннями  $X$  і  $Y$  визначається функціональною залежністю; значення коефіцієнтів  $K$  і  $K'$  залежать від форми характеристики перетворювача або виду функції  $Y = f(X)$ , а також від того, за яких значень величин розраховуються  $K$  і  $K'$ . У більшості випадків вихідна величина змінюється пропорційно вхідній, і коефіцієнти перетворення рівні між собою, тобто  $K = K' = \text{const}$ .

Як видно з рис. 3.2, функціональний зв'язок між вихідною та вхідною величинами може підкорятися будь-якій закономірності, але бажано, щоб характеристика перетворювача була лінійною.

Статичний і динамічний коефіцієнти перетворення характеризуються величинами, що мають розмірність. Наприклад, якщо розмірність вхідної величини  $^{\circ}\text{C}$ , а вихідної  $a$ , то розмірність коефіцієнта перетворення буде  $a/^{\circ}\text{C}$ . Коефіцієнти  $K$  і  $K'$  можуть бути також виражені у відносних (безрозмірних) величинах за умови, що вхідна і вихідна величини мають однакову розмірність.

Величина, що представляє собою відношення відносного збільшення вихідної величини  $\Delta Y/Y$  до відносного приросту вхідної величини  $\Delta X/X$ , називається відносним коефіцієнтом перетворення

$$\eta_{\Delta} = \frac{\Delta Y/Y}{\Delta X/X} = \frac{\Delta Y/\Delta X}{Y/X} \quad (3.6)$$

При  $\Delta X \rightarrow 0$  отримуємо

$$\eta_{\Delta} = \frac{dY/Y}{dX/X} = \frac{dY/dX}{Y/X} = K' \cdot \frac{1}{K} \quad (3.7)$$

Наприклад, якщо зміна вхідної величини на 2% викликає зміну вихідної величини на 3%, то відносний коефіцієнт перетворення  $\eta_{\Delta} = 1,5$ . З останньої формули видно, що відносний коефіцієнт перетворення дорівнює відношенню динамічного коефіцієнта перетворення до статичного. Отже, відносний коефіцієнт перетворення  $\eta_{\Delta}$  розмірності не має. Для перетворювача з пропорційною характеристикою  $\eta_{\Delta} = \eta = 1$ .

Стосовно різних засобів вимірювань коефіцієнти перетворення  $K'$ ,  $K$ ,  $\eta_{\Delta}$  і  $\eta$  мають певний фізичний зміст і свою назву. Наприклад, стосовно до перетворювача (датчика) коефіцієнт перетворення називається чутливістю (статичної, динамічної, відносної); бажано, щоб вона була якомога більше. Для підсилювачів коефіцієнт перетворення прийнято називати коефіцієнтом підсилення; бажано, щоб він був також якомога більше. Для більшості підсилювачів (в тому числі і електричних) величини  $x$  і  $y$  є однорідними, і тому коефіцієнт підсилення являє собою безрозмірну величину.

Графічний вигляд найбільш поширених функцій перетворення наведений на рис. 3.3.

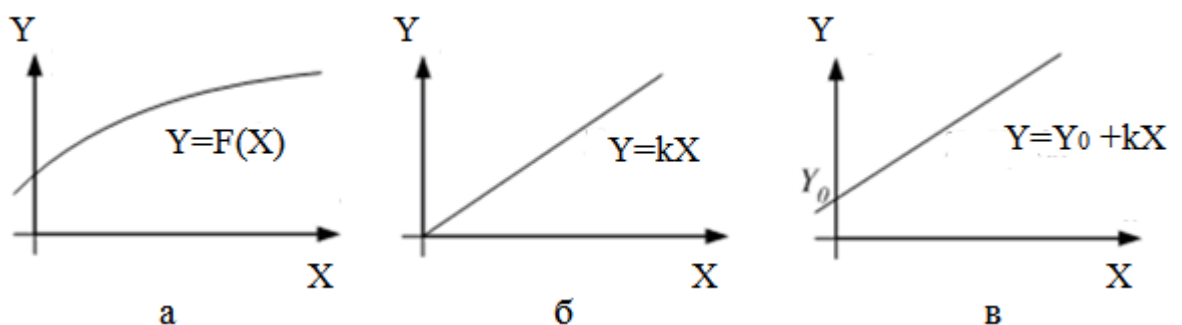


Рис. 3.3. Типові функції перетворення: а) нелінійна, б) лінійна, в) лінійна, що не проходить через 0.

Зазвичай в рівняння перетворення входять конструктивні параметри. Для реального перетворювача статичну характеристику можна отримати експериментально. Для більш наочного сприйняття часто використовують графічну форму представлення статичної характеристики. Найбільш часто використовувані статичні характеристики вимірювальних перетворювачів (датчиків) наведені на рис. 3.4.

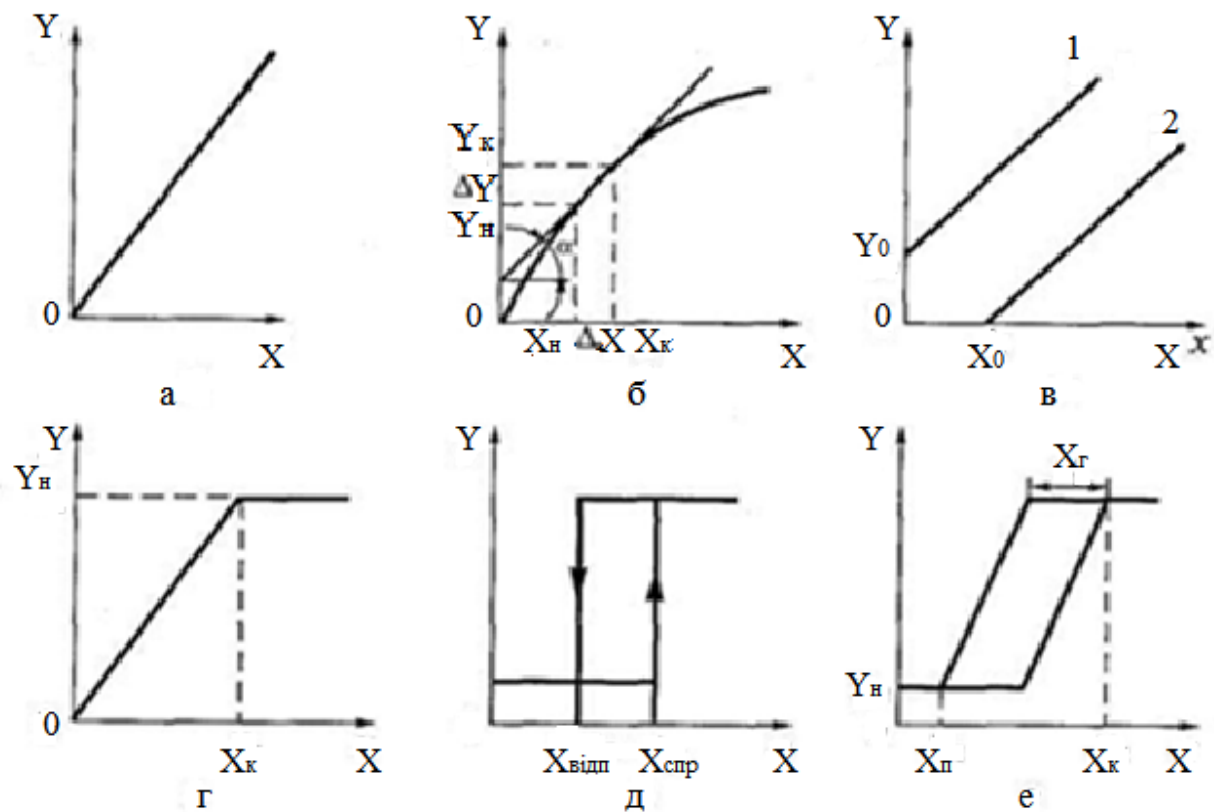


Рис. 3.4. Статичні характеристики датчиків:

а – лінійна; б – нелінійна; в – х сигналом холостого ходу та зоною нечутливості; г – з ділянкою насичення; д – релейного характеру; е - з петлею гістерезису.

В загальному випадку статичні характеристики ВП не відрізняються від аналогічних характеристик узагальнених ланок систем управління, оскільки самі входять в їх число.

Статична характеристика може бути лінійною та нелінійною (рис. 3.4, а,б). При цьому необхідно відрізнити нелінійність як функціональну залежність, що вимагається (наприклад експоненціальну, логарифмічну), від власне нелінійності як похибки лінійності.

В загальному випадку рівняння перетворення для лінійної статичної характеристики має вигляд:

$$Y = f(X) = \pm V + KX,$$

де  $V$  - стала;  $K$  - коефіцієнт перетворення.

Якщо  $V = 0$ , то графік рівняння проходить через початок координат і ВП не має ні вихідного сигналу холостого ходу  $Y_0$ , ні зони відсутності чутливості  $0 \dots X_0$ , тобто нульової чутливості (зони нечутливості) (рис.3.4,а).

При  $V > 0$  характеристика зсувається відносно початку координат по осі абсцис на величину вихідного сигналу холостого ходу  $Y_0 = V$  (рис.3.4,в, пряма 1)

При  $V < 0$  характеристика має зону нечутливості  $0 \dots X_0$ , в межах якої при зміні  $X$ ,  $Y = 0$  (рис. 3.4, в, пряма 2).

Статична характеристика може мати ділянку насичення (рис. 3.4, г), тоді вона описується двома рівняннями: на ділянці  $0 \dots X_k$  - рівнянням  $Y = KX$ ; на ділянці  $X > X_k$  - рівнянням  $Y = Y_n$ .

При  $K = \infty$  характеристика набуває релейного характеру (рис. 6.3, д). Така характеристика, властива датчикам позиційного регулювання, характеризується коефіцієнтом повернення  $K_{\Pi}$ :

$$K_{\Pi} = \frac{X_{\text{відп.}}}{X_{\text{спр.}}} \quad (3.8)$$

де  $X_{\text{відп.}}$  і  $X_{\text{спр.}}$  - значення вхідного сигналу, яке забезпечує відповідно відпускання і спрацювання датчика (реле).

Ряд датчиків мають неоднозначність ходу статичної характеристики при зростанні і зменшенні вхідної величини  $x$  (см. рис. 3.4, е). Це явище має назву **гістерезису** і характеризується відповідним коефіцієнтом:

$$K_{\Gamma} = \frac{X_{\Gamma}}{(X_k - X_{\Pi})} \quad (3.9)$$

де  $X_{\Gamma}$  - ширина зони неоднозначності;  $X_k$ ,  $X_{\Pi}$  - значення відповідно кінця і початку робочого діапазону вхідної величини.

На рис. 3.4 наведені характеристики одноктактних (неревверсивних) датчиків.

Характеристики двотактних датчиків мають другу аналогічну вітку, розташовану у третьому квадранті симетрично початку координат.

Нелінійну характеристику можна перетворити на лінійну (лінійаризувати) або функціональну за допомогою апроксимації.

Для нелінійних характеристик коефіцієнт перетворення не є сталою величиною, тому в цьому випадку використовують **диференціальний коефіцієнт перетворення**  $K_d$ , під яким розуміють границю відношення вихідної і вхідної величин:

$$K_d = \frac{dY}{dX} = \left| \frac{\Delta Y}{\Delta X} \right|_{\Delta X \rightarrow 0}$$

Диференціальний коефіцієнт перетворення в загальному випадку змінюється від точки до точки і визначається кутом  $\alpha$  нахилу дотичної до характеристики в робочій точці, тобто  $K_d = \operatorname{tg} \alpha$ . Коефіцієнт перетворення характеризує чутливість датчика  $K_s$  і в залежності від найменування вхідної і вихідної величин може бути представлений в розмірному або безрозмірному вигляді.

Якщо на характеристиці виділити лінійну ділянку, в межах якої працює перетворювач, то різниця між верхнім та нижнім значеннями вхідного (вихідного) сигналу визначає робочий діапазон  $\Delta_p$  його (сигналу) зміни, а їх відношення – динамічний діапазон  $\Delta_d$  (см. рис. 3.4, б):

$$\Delta_p(X) = X_k - X_n; \Delta_d(X) = \frac{X_k}{X_n}; \Delta_p(Y) = Y_k - Y_n; \Delta_d(Y) = \frac{Y_k}{Y_n}$$

**Чутливість перетворювача** - відношення зміни вихідного сигналу  $\Delta Y$  до зміни вхідного сигналу  $\Delta X$ , що викликала цю зміну вихідного сигналу. Вона визначається як

$$S(X) = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (3.10)$$

Якщо функція перетворення задана аналітично, то чутливість визначається як похідна від функції перетворення по вхідній величині:

$$S(X) = \frac{dY}{dX} = F'(X)$$

і геометрично визначається як тангенс кута нахилу дотичної в будь-якій точці кривої функції перетворення.

Розмірність чутливості - це відношення розмірностей вихідного та вхідного сигналів.

Наприклад: для реостатного перетворювача одиниця чутливості - Ом/мм;

- для термопари - мВ/К;
- для фотоелемента - мкА/лм;
- для двигуна - об/(с·В) або Гц/В;
- для гальванометра - мм/мкА тощо.

Для перетворювачів, функція перетворення яких лінійна, чутливість буде постійною. Якщо графік функції перетворення проходить через початок координат, чутливість дорівнює коефіцієнту перетворення.

Для характеристики нелінійних перетворювачів часто користуються поняттям середньої чутливості в діапазоні перетворювача:

$$S_{\text{сер.}} = \frac{Y_K - Y_H}{X_K - X_H}$$

де  $Y_K$ ,  $Y_H$  та  $X_K$ ,  $X_H$  – діапазони перетворення відповідно по вихідній і вхідній величинам;

$Y_K$ ,  $X_K$ ,  $Y_H$ ,  $X_H$  – кінцеві і початкові межі вимірювань відповідно.

Під відносною чутливістю розуміють відношення відносної зміни вихідної величини до відносної зміни вхідної величини:

$$S_{\text{відн.}} = \frac{\Delta Y/Y}{\Delta X/X} \quad (3.11)$$

Чутливість перетворювача, що складається з декількох послідовно включених проміжних перетворювачів (ланок)

визначається як добуток чутливостей всіх перетворювачів, що утворюють канал передачі інформації.

$$S = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot \dots \cdot S_n \quad (3.12)$$

Приклад: прилад для вимірювання та реєстрації швидких лінійних переміщень складається з датчика, вимірювального нерівноважного моста, підсилювача і вібратора - магнітоелектричного осцилографа (рис. 3.5).

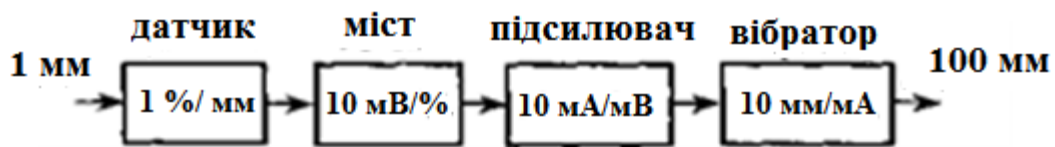


Рис. 3.5. До визначення чутливості вимірювального приладу

Нехай датчик під впливом на нього вимірюваного переміщення в 1 мм змінює свій опір на 1% від початкового значення. Тоді його чутливість  $S_d = 1\%/мм$ . Датчик включений в міст, який при  $X = 0$  урівноважений. При відхиленні  $X$  від 0 міст виходить з рівноваги, і на його виході виникає напруга. Якщо при зміні опоры датчика на 1% на виході моста з'являється напруга 10 мВ, то чутливість моста дорівнює  $S_m = 10 мВ/\%$ . Вихідна напруга моста подається на вхід підсилювача, і якщо чутливість підсилювача складає  $S_{yc} = 10 мА/мВ$ , то вихідний струм підсилювача, що надходить до вібратора осцилографа, буде дорівнювати 100 мА. При чутливості вібратора  $S_v = 1 мм/мА$  цей струм викличе відхилення променя вібратора на 100 мм. Таким чином, результуюча чутливість приладу буде дорівнювати:

$$S = S_d \cdot S_m \cdot S_{yc} \cdot S_v = 1\% / мм \cdot 10 мВ / \% \cdot 10 мА / мВ \cdot 1 мм / мА = 100 мм / мм.$$

Отже, для збільшення чутливості приладу в цілому потрібно прагнути до збільшення чутливості окремих ланок схеми.

**Поріг чутливості вимірювального перетворювача.** Під порогом чутливості розуміють найменше значення вхідної величини, яке може бути впевнено зафіксовано даним перетворювачем. Поріг чутливості має розмірність вхідного сигналу.

Появу порога чутливості викликають як зовнішні, так і внутрішні чинники (тертя, люфти, гістерезис, внутрішні шуми, перешкоди тощо).

На рис. 3.6, а показана характеристика перетворювача при наявності «мертвого» ходу. З характеристики видно, що коли вхідна величина  $x$  змінюється в межах від  $X_1$  до  $X_2$ , вихідна величина  $Y$  не змінюється і дорівнює нулю. Значення  $X_1$  і  $X_2$  називаються порогами чутливості, а відстань між  $X_1$  і  $X_2$ , що дорівнює  $\Delta X$ , - зоною нечутливості. При наявності релейних властивостей характеристика перетворювача може набувати реверсивний характер (рис. 3.6, б). В цьому випадку вона також володіє порогом чутливості і зоною нечутливості.

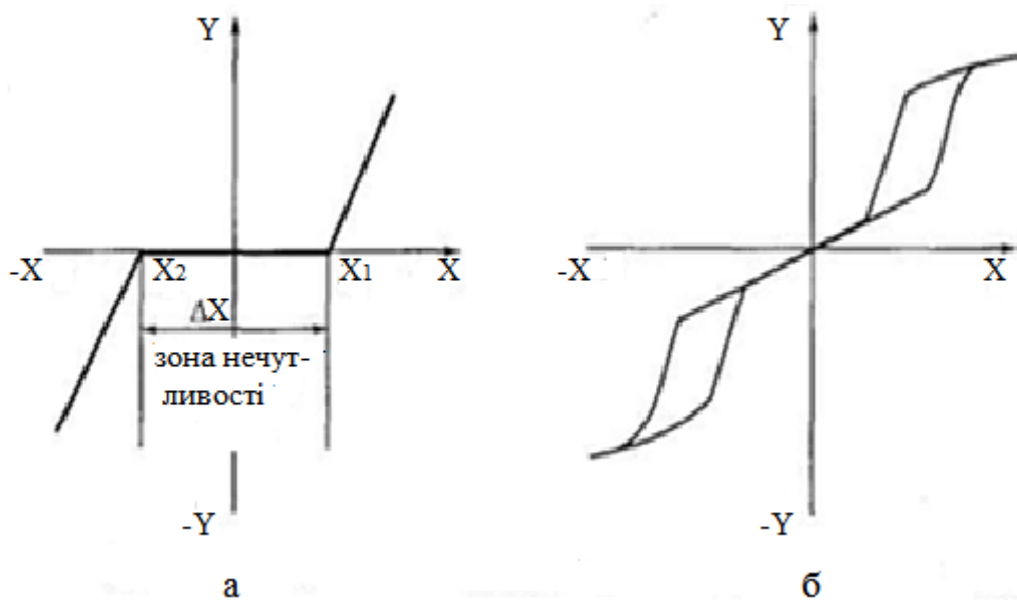


Рис. 3.6. Схема визначення порога чутливості:

- а – характеристика перетворювача при наявності «мертвого ходу»;  
 б – характеристика перетворювача при наявності релейних властивостей.

**Межа перетворення перетворювача** – це максимальне значення вхідної величини, яка ще може бути сприйнята перетворювачем без спотворення цієї величини і без пошкоджень перетворювача.

**Робочий або динамічний діапазон перетворювача** — це діапазон зміни вхідної величини, в якому параметри перетворювача не виходять за задані межі.



**Діапазон перетворення вхідної величини** – це різниця між максимальним і мінімальним значенням вхідної фізичної величини:

$$D_x = X_k - X_p, \quad (3.13)$$

де  $X_k$ ,  $X_p$  – відповідно максимальне (кінцеве) і мінімальне (початкове) значення вхідної величини.

Аналогічно діапазон перетворення по вихідній величині

$$D_y = Y_k - Y_p \quad (3.14)$$

де  $Y_k$ ,  $Y_p$  – відповідно максимальне (кінцеве) і мінімальне (початкове) значення вихідної величини.

**Гістерезис** - це запізнювання зміни фізичної характеристики речовини від зміни фізичної величини, що її викликає наприклад, магнітний гістерезис - відставання стану намагніченості феромагнетика від зміни напруженості зовнішнього магнітного поля. Пружний гістерезис - відставання зміни деформації тіла від зміни механічної напруги.

Для вимірювальних перетворювачів наявність гістерезису є причиною додаткової похибки як різниці  $\Delta Y$  значень вихідної величини у при зростанні («прямий хід») і зменшенні («зворотний хід») вхідної величини  $X$  і номінальним значенням  $Y$  (рис. 3.7).

Типовою причиною виникнення гістерезису є тертя і структурні зміни в матеріалах.

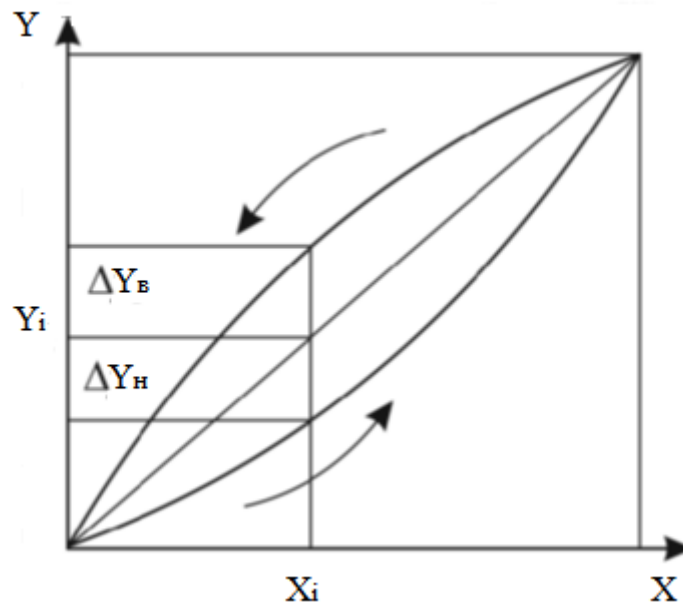


Рис. 3.7. Функція перетворення із гістерезисом:

$\Delta Y$  - похибка від гістерезису;  $Y_H$  – значення вихідної величини при зростанні вхідної величини  $x$ ;  $Y_B$ - значення вихідної величини при зменшенні вхідної величини  $X$ .

**Лінійність перетворювача** — це ступінь наближення функції перетворення датчика до прямої лінії. Для аналого-цифрового перетворення сигналу необхідна пряма пропорційна залежність між вихідним значенням перетворювача і фізичною величиною на вході датчика, тому лінійність датчика є дуже важливим параметром.

**Нелінійність.** Нелінійність визначається для перетворювачів, функцію перетворення яких можна апроксимувати прямою лінією. Під нелінійністю розуміється максимальне відхилення реальної функції перетворення від апроксимуючої прямої лінії.

Нелінійність зазвичай виражається або в процентах від максимального значення вихідної величини, або в одиницях цієї величини.

Слід зазначити, що відомі різні методи лінеаризації нелінійної функції перетворення. Один із способів - проведення прямої через кінцеві точки функції перетворення. Другий спосіб заснований на застосуванні методу найменших квадратів

Ще один спосіб - метод найкращої прямої - полягає в знаходженні лінії, що проходить посередині між двома паралельними прямими, розташованими якомога ближче один до одного і які охоплюють всі вихідні значення реальної функції перетворення.

**Відтворюваність.** Відтворюваність - це здатність перетворювача при однакових умовах видавати однакові результати. Відтворюваність можна оцінити або за максимальною різницею значень вихідної величини, або за величиною середньоквадратичного відхилення.

**Постійність у часі функції перетворення** - важлива статична характеристика перетворювача. Сутність її полягає в тому, що при виконанні вимірювань впродовж тривалого часу необхідно повторно виконувати градуювання шкали, що є небажано, а в деяких випадках неможливо.

**Потужність**, яку споживає ВП, залежить від його вхідного опору та характеризує ступінь взаємодії ВП та досліджуваного об'єкта. Актуальним є зменшення потужності споживання ВП, оскільки вона призводить до спотворення режиму контрольованого кола і виникнення похибки взаємодії.

**Роздільна здатність** перетворювача— це властивість розрізняти два близькі значення вхідної величини.

**Повторюваність** — це властивість датчика зберігати свої параметри від екземпляра до екземпляра.

**Опір перетворювача.** Опір є важливим фактором, що характеризує перетворювач. Опір - це відношення узагальненої сили до обумовленої нею узагальненої швидкості (для електротехніки - це відповідно електричні напруги і струм). Опір характеризує втрати енергії в системі.

Опір може бути активним, реактивним, комплексним.

Для перетворювача можна говорити про вхідний і вихідний опори, а також про перехідний, динамічний тощо.

**Вхідний і вихідний імпеданс датчика** — це вхідний і вихідний повні опори. Ці характеристики датчиків дуже важливі для узгодження параметрів датчика з іншими пристроями в каналі вимірювання, а також для оцінки впливу датчика на досліджуваний процес.

**Зворотна дія перетворювача на вимірювану величину.** Наприклад, відомо, що чутливим елементом термперетворювача є терморезистор, поміщений до середовища, температура якого змінюється, що призводить до зміни опору терморезистора. При проходженні струму через терморезистор температура його зростає, що приводить до зростання температури середовища. Саме в цьому й полягає зворотна дія на вимірювану величину

Окремо слід відзначити **неметрологічні** характеристики перетворювачів.

**Неметрологічні характеристики засобів вимірювань (перетворювачів)** – це характеристики, які не впливають на результат і точність вимірювань, але визначають технічні та експлуатаційні параметри засобів вимірювальної техніки. Вони, як правило, не нормуються.

До неметрологічних характеристик належать:

**Надійність.** Під надійністю розуміють здатність об'єкта (зокрема, датчика, перетворювача) зберігати свої характеристики в заданих межах за певних умов експлуатації протягом заданого часу. Основним показником і характеристикою надійності засобу вимірювань є працездатність,

Надійність характеризує поведінку датчика (перетворювача) в часі і є узагальненим поняттям, що включає в себе безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збереженість.

**Працездатність засобу вимірювань** – це такий стан засобу вимірювань, за якого він здатний виконувати свої функції згідно з вимогами нормативно-технічних документів (НТД).

**Безвідмовність** - це властивість об'єкта неперервно зберігати працездатний стан протягом тривалого часу у певних умовах експлуатації. При цьому не допускаються відмови. Під **відмовою** об'єкта розуміється невиконання будь-яких функцій або режимів, обумовлених в технічній документації. Показником безвідмовності є напрацювання на відмову.

**Відмова** – це порушення працездатності засобу вимірювань. Розрізняють **раптову відмову**, коли засіб вимірювань повністю втрачає робочу здатність, наприклад, внаслідок обриву кола, та **поступову відмову**, коли із старінням засобу вимірювань його метрологічні характеристики виходять за допустимі межі.

**Напрацювання** – це тривалість роботи засобу вимірювань в годинах, циклах або обсяг роботи, а **напрацювання на відмову** - відношення напрацювання ремонтного засобу вимірювань до кількості відмов упродовж цього напрацювання.

**Довговічність** - це властивість об'єкта зберігати працездатний стан і задану ефективність до настання граничного стану, при якому він не здатний виконувати всі або одну зі своїх функцій, в тому числі не забезпечувати виконання будь-яких параметрів в заданих межах. Показниками довговічності є термін служби і ресурс

**Термін служби** – це календарна тривалість експлуатації працездатність, а **ресурс** — напрацювання до граничного стану, за якого подальша експлуатація працездатність повинна бути припинена.

**Економічність засобу вимірювань** – простота конструкції та виправдана економічна вартість.

До статичних характеристик перетворювачів інформації ставляться певні вимоги: **однозначність**(мінімальний гістерезис); **стабільність у часі**; **ідентичність** для однотипних перетворювачів.

Статичні характеристики дозволяють оцінити роботу перетворювачів у сталому режимі. Однак в реальних умовах перетворювачам іноді доводиться працювати в умовах швидкозмінних процесів, тобто в динамічному режимі, коли на вхід поступають сигнали, які змінюються в часі. В таких випадках починають проявлятися явища відставання вихідного сигналу від вхідної, зміни його частоти, фази, амплітуди, тобто починають проявлятися динамічні характеристики перетворювача.

### **3.4. Динамічні характеристики перетворювачів. Динамічний режим роботи перетворювача**

Динамічні характеристики визначають специфіку роботи перетворювача в динамічному режимі.

Зміна величини  $Y$  на виході перетворювача залежно від зміни вхідної величини  $X$  відбувається не миттєво, а з деяким запізненням, яке зумовлюється часом перебігу фізичних процесів у самому перетворювачі. Ця залежність  $Y = f(t)$ , де  $t$  – час, становить **динамічну характеристику перетворювача**. Один із способів вираження динамічної характеристики перетворювача плавної дії полягає в тому, що аналізується зміна вихідної величини  $Y$  у часі після того, як у деякий момент часу вхідна величина  $X$  зазнає стрибкоподібної зміни від початкового значення  $X_{\text{п}}$  до кінцевого  $X_{\text{к}}$ .

**Динамічним режимом** називається процес переходу елементів і систем з одного сталого стану в інший, тобто така умова їх роботи, коли вхідна величина  $X$ , а отже, і вихідна величина  $Y$  змінюються в часі. Процес зміни величин  $X$  і  $Y$  починається з деякого порогового часу  $t = t_{\text{п}}$  і може протікати в інерційному і безінерційному режимах. За відсутності інерційності процес зміни  $X$  і  $Y$  може характеризуватися графіком, приведеним на рис. 3.8, а.

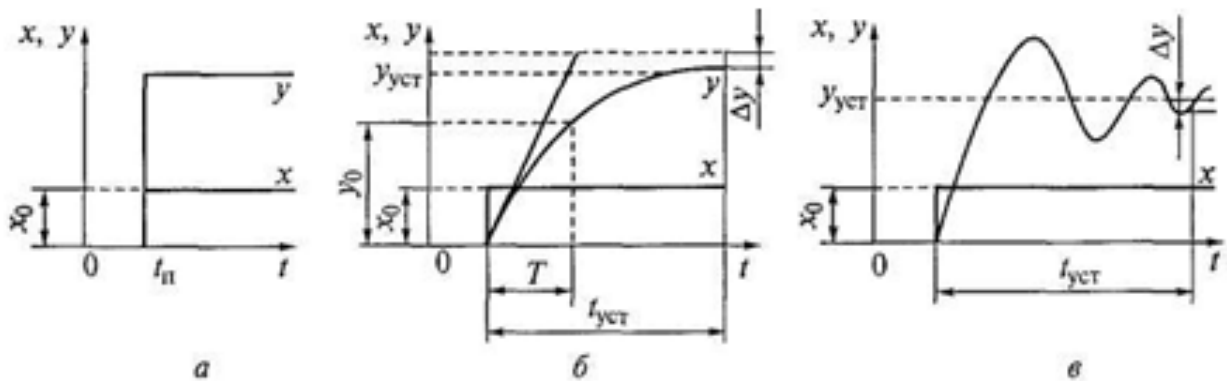


Рис.3.8. Перехідні процеси в елементі при стрибкоподібній зміні вхідної величини:

а – при відсутності інерційності; б, в – при наявності інерційності

За наявності інерційності спостерігається запізнення зміни  $Y$  по відношенню до зміни  $X$ . Тоді при стрибкоподібній зміні вхідної величини від  $0$  до  $x_0$  (рис. 3.8, б) вихідна величина  $Y$  досягає сталого значення  $Y_{вст}$  не відразу, а по завершенні проміжку часу, протягом якого відбувається перехідний процес. При цьому перехідний процес може бути аперіодичним (неколивним) затухаючим (див. рис. 3.8, б) або коливним затухаючим (рис. 3.8, в).

Час  $t_{вст}$  (час встановлення), протягом якого вихідна величина  $Y$  досягає сталого значення, залежить від інерційності елемента (перетворювача), що характеризується постійною часу  $T$ . В найпростішому випадку встановлення величини  $Y$  відбувається по експоненціальному закону:

$$Y = Y_0(1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

де  $T$  - постійна часу елемента (перетворювача), яка залежить від параметрів, пов'язаних з його інерційністю.

Встановлення вихідної величини  $Y$  тим довше, чим більше значення  $T$ . Час встановлення  $t_{вст}$  вибирається залежно від необхідної точності вимірювання датчика і складає зазвичай  $(3... 5)T$ , що дає похибку в динамічному режимі не більше  $5... 1\%$ . Ступінь наближення  $\Delta Y$  (див. рис. 3.8, б, в) зазвичай обумовлюється і в більшості випадків складає від  $1$  до  $10\%$  від сталого (встановленого) значення.

Диференціальне рівняння, що описує динамічні властивості перетворювачів, має вигляд:

$$a_2 \frac{d^2}{dt^2} Y(t) + a_1 \frac{d}{dt} Y(t) + a_0 Y(t) = b_0 X(t) \quad (3.15)$$

де  $a_2, a_1, a_0$  і  $b_0$  - коефіцієнти узагальненого перетворювача, значення яких визначаються параметрами перетворювача;

$X(t)$  та  $Y(t)$  – залежності величин  $X$  та  $Y$  від часу  $t$ .

Основна вимога до динамічних характеристик перетворювачів - досягнення якомога меншої тривалості перехідного процесу.

В залежності від повноти опису динамічних властивостей вимірювального перетворювача розрізняють **повні** і **часткові динамічні характеристики**

**Повні динамічні характеристики** відбивають всю повноту інформації про інерційні властивості перетворювача. До них належать перехідна характеристика, імпульсна перехідна характеристика, амплітудно-фазова характеристика, сукупність амплітудно-частотної та фазово-частотної характеристик, передаточна функція.

**Часткові динамічні характеристики** не відбиває повністю динамічні властивості перетворювача (датчика). Вони характеризують тільки певні властивості перетворювача. Прикладами таких характеристик є час реакції перетворювача, коефіцієнт демпфування, значення резонансної власної кутової частоти, значення амплітудно-частотної характеристики на резонансній частоті, значення запізнення, час наростання, час встановлення, час першого максимуму, статична похибка, смуга пропускання, стала часу.

**Час встановлення показів** — проміжок часу від моменту стрибкоподібної зміни вхідного сигналу до моменту встановлення показу відлікового пристрою із заданою точністю.

**Час вимірювання** — час від початку зміни вимірюваної величини до встановлення показу на відліковому табло з нормованою точністю. Вказується для цифрових приладів.

**Частотний діапазон ВП** визначається тим діапазоном частот вхідного сигналу, за якого характеристики точності ВП знаходяться в допустимих межах.

Верхня (кінцева)  $X_K$  і нижня (початкова)  $X_{\Pi}$  границі діапазону частот нормуються для кожного ВП технічними умовами.

**Діапазон вимірювань** – різниця між верхньою і нижньою границями вимірювання —  $X_K - X_{\Pi}$ .

**Перехідною характеристикою** перетворювача  $h(X)$  називається реакція датчика, тобто його вихідний сигнал на одноступінчатий сигнал на вході.

**Імпульсною характеристикою** перетворювача  $g(X)$  називається реакція датчика на вхідний імпульсний сигнал надзвичайно малої тривалості.

**Амплітудно – частотною характеристикою** перетворювача називається залежність відношення амплітуд вихідного і вхідного синусоїдальних сигналів від частоти (при постійності амплітуди вхідного сигналу).

**Фазово – частотна характеристика** перетворювача — це залежність різниці фаз (фазового зсуву) вихідного і вхідного сигналів від частоти зміни вхідного сигналу.

**Комплексна частотна характеристика** — це комплексна функція, модулем якої є амплітудно-частотна, а аргументом — фазово-частотна характеристики.

Амплітудно-частотні та фазово-частотні характеристики (і взагалі динамічні характеристики) має сенс розглядати для датчиків (перетворювачів неелектричних величин в електричні), осцилографів і деяких інших приладів, які використовуються для вимірювання параметрів перехідних (несталих) процесів. Для стрілочних приладів, компенсаторів з ручним керуванням і подібних до них приладів, призначених для вимірювань в сталому режимі, ці характеристики, як правило, не розглядаються. У паспортах приладів, призначених для вимірювання параметрів сталих процесів в ланцюгах змінного струму, зазвичай вказується частотний діапазон, в якому вони працюють без значних похибок.

Слід зазначити, що якщо амплітудно- і фазово-частотні характеристики і передавальна функція дозволяють судити про динамічні властивості вимірювального пристрою і його можливості при вимірюваннях в перехідних (несталих) режимах, то частотний діапазон характеризує можливості вимірювального пристрою при вимірюваннях періодичних процесів в сталих режимах.

Таким чином, динамічні властивості вимірювальних перетворювачів (вимірювальних пристроїв) можна охарактеризувати:



- 1) динамічною похибкою;
- 2) передавальною функцією перетворювача;
- 3) амплітудно і фазово-частотними характеристиками.

Різниця між значеннями вихідної величини в динамічному і статичному режимах називається **динамічною похибкою**. Бажано, щоб вона була якомога менше.

У електромеханічних і електромашинних елементах інерційність в основному визначається механічною інерцією рухомих частин і частин, що обертаються.

У електричних елементах інерційність визначається електромагнітною інерцією або іншими подібними чинниками. Інерційність може бути причиною порушення стійкої роботи елемента або системи в цілому.

**За динамічними характеристиками** більшість датчиків належить до підсилювальних, аперіодичних і коливних ланок першого і більш високих порядків. Найчастіше використовуються наступні **характеристики** датчиків: частотна і передаточна функція, а **параметри** – стала часу, час затримки і коефіцієнт підсилення.

### 3.5. Похибки вимірювальних перетворювачів

Будь-який технологічний параметр неможливо виміряти абсолютно точно. Це пояснюється недосконалістю вимірювальних перетворювачів, дією на процес вимірювання різних зовнішніх збурень та іншими чинниками. Тому будь-яке вимірювання здійснюється з похибкою, під якою розуміють відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваного параметра.

**Похибка вимірювання** - основна метрологічна характеристика вимірювальних перетворювачів і вимірювального ланцюга. Тому вивчення похибок є головним в теорії вимірювань.

У вимірювальних перетворювачів результати вимірювань представляються в одиницях вихідної величини. У зв'язку з цим для вимірювальних перетворювачів прийнято розрізняти похибки по входу і виходу. При визначенні цих похибок необхідно знати приписану даному вимірювальному перетворювачу функцію перетворення (градувальну характеристику)  $Y = f(X)$ .

Різниця між номінальною (паспортною) і реальною характеристиками перетворювача називається похибкою вимірювального перетворювача.

Похибки перетворювачів (датчиків), як і похибки інших засобів вимірювань, можуть бути класифіковані за різними ознаками.

За **характером прояву** (за ступенем невизначеності) похибки поділяють на систематичні, випадкові і прогресуючі похибки.

**Систематична похибка** - це складова похибки вимірювання (перетворення), значення якої залишається постійним або закономірно змінюється при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини (рис. 3.9). Систематичною похибкою є, наприклад, похибка, що виникає від нелінійності реальної градуовальної характеристики при апроксимації її лінійною залежністю. До постійних систематичних похибок відносять похибку градування шкали, температурну похибку тощо. До змінних систематичних похибок відносять похибку, обумовлену нестабільністю джерела живлення. Головна властивість систематичних похибок полягає в тому, що вони можуть бути практично повністю усунені шляхом калібрування, введення відповідних поправок або виправлень.

Основна небезпека систематичних похибок полягає в тому, що їх присутність дуже важко виявити, на відміну від випадкових, прогресуючих або таких похибок, що є функціями певних параметрів. Постійні систематичні похибки зовні себе ніяк не проявляють і можуть довгий час залишатися непоміченими. Вони можуть бути виявлені шляхом вимірювання фізичної величини або різними однотипними приладами, або різними методами. Іноді може бути корисною перевірка нуля і чутливості вимірювального приладу шляхом повторної атестації приладу за зразковими мірами.

До систематичних похибок можна віднести більшість додаткових похибок, що не є змінними в часі функціями впливаючих величин (температура, частота, напруга тощо), які їх викликають. Ці похибки завдяки постійності в часі функцій впливу також можуть бути скориговані введенням додаткових коригувальних перетворювачів, що сприймають впливаючу величину і вводять відповідну поправку в результат перетворення основного перетворювача.

**Випадкові похибки** - це складові похибки вимірювання (перетворення), що змінюються випадковим чином при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини. Значення і знак випадкових похибок визначити неможливо, оскільки в їх появі не вдається встановити будь-якої закономірності (рис. 3.9). Присутність випадкових похибок (на відміну від систематичних) легко

виявляється при повторних вимірюваннях у вигляді деякого розкиду результатів. У переважній більшості випадків процес появи випадкових похибок - це стаціонарний випадковий процес. Тому розмір випадкових похибок характеризують наведенням закону розподілу їх ймовірностей або зазначенням параметрів цього закону, розроблених в теорії ймовірностей і теорії інформації. Вплив випадкових похибок на результат вимірювань може бути врахований, використовуючи методи математичної статистики і теорії ймовірності.

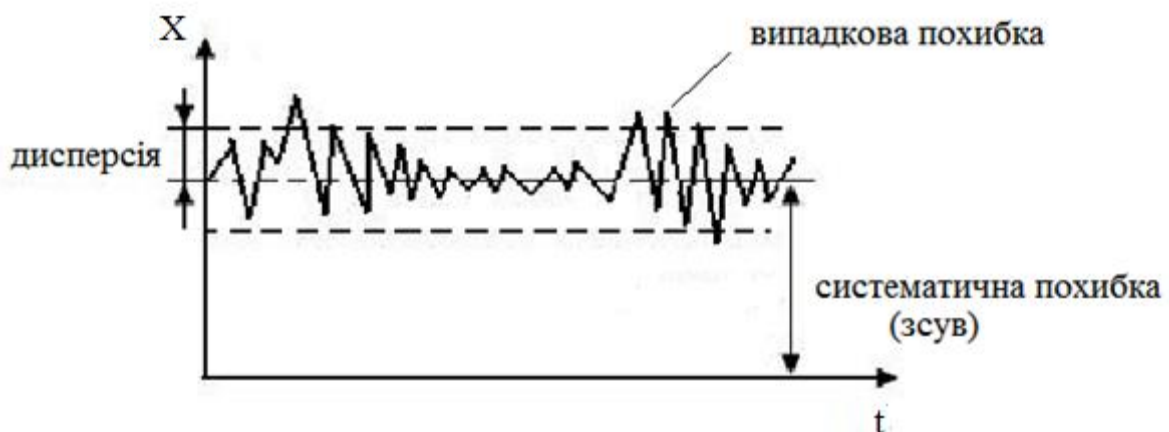


Рис. 3.9. Систематична і випадкова складові похибки вимірювання

Присутність випадкових похибок (на відміну від систематичних) легко виявляється при повторних вимірюваннях у вигляді деякого розкиду результатів. Різноманіття значень випадкових похибок характеризують визначенням закону розподілу ймовірності їх появи або параметрів такого закону.

Отже, залежно від характеру прояву (міри невизначеності) похибка перетворювача (датчика), приведена до входу або виходу, може бути представлена як

$$\Delta_{\text{вх}} = \Delta_{\text{вх.сист.}} + \Delta_{\text{вх.вип.}}$$

$$\Delta_{\text{вих}} = \Delta_{\text{вих.сист.}} + \Delta_{\text{вих.вип.}}$$

де  $\Delta_{\text{вх.сист.}}$ ,  $\Delta_{\text{вих.сист.}}$  і  $\Delta_{\text{вх.вип.}}$ ,  $\Delta_{\text{вих.вип.}}$  - відповідно систематичні і випадкові похибки.

Випадкові похибки описуються методами математичної статистики і теорії ймовірності. Для визначення випадкової похибки

необхідно провести для кожної (чи обраної) точки діапазону багатократні вимірювання, далі по експериментальних даних побудувати гістограму розподілу похибок. Якщо розподіл похибок відповідає нормальному закону, випадкова похибка оцінюється за величиною середньоквадратичного відхилення  $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

де  $n$  — кількість вимірювань;  $x_i$  — результат  $i$ -го вимірювання;  $\bar{x}$  — математичне очікування (середнє значення) для  $n$  вимірювань.

Встановлено, що при досить великому  $n$  випадкова похибка знаходиться в інтервалі  $\pm\sigma$  з ймовірністю 0,68;  $\pm 2\sigma$  - з вірогідністю 0,95; нарешті,  $\pm 3\sigma$  - з вірогідністю 0,997.

**Прогресуючими** називаються похибки, що повільно змінюються з часом. Причина їх виникнення – процес старіння тих чи інших деталей апаратури (розрядка джерел живлення, старіння резисторів, конденсаторів, деформація механічних деталей, усадка паперової стрічки в самописних приладах тощо). Вони можуть бути скореговані введенням поправки, але лише на даний момент часу, а далі знову монотонно змінюються. Тому на відміну від систематичних похибок прогресуючі похибки вимагають безперервного здійснення корекції. Інша особливість прогресуючих похибок полягає в тому, що з точки зору теорії ймовірностей їх зміну в часі являє собою нестационарний процес і не може бути описана в рамках добре розробленої теорії стаціонарних процесів.

Похибки перетворювача залежать від **умов його застосування** і за цією ознакою поділяються на **основні** і **додаткові**.

Будь-який вимірювальний перетворювач піддається впливу (дії) зовнішніх збурюючих факторів, якими можуть бути наприклад, зміна температури, тиску і вологості навколишнього повітря, напруги джерела живлення, вібрація тощо.

Похибка перетворювача змінюється під дією цих збурень. У зв'язку з цим для кожного вимірювального перетворювача регламентують нормальні умови експлуатації (температуру і вологість в приміщенні, тиск, напругу живлення тощо). Похибка вимірювального перетворювача при його експлуатації в нормальних умовах є **основною**. Зміна основної похибки, що виникає при

відхиленні умов експлуатації від нормальних, спричиняє виникнення **додаткової** похибки перетворювача.

Отже, **основна похибка перетворювача** – це максимальна різниця між вимірним реальним (дійсним) значенням вихідного сигналу  $Y_p$  перетворювача (датчика) та його номінальним (істинним) значенням  $Y_H$ , що визначається за ідеальною статичною характеристикою для даної вхідної величини, при нормальних умовах експлуатації.

Поняття "нормальні умови" обумовлюється в стандартах і в технічній документації на перетворювач. Наприклад, нормальними можуть бути наступні умови: температура довкілля  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ; атмосферний тиск  $760 \pm 20$  мм рт. ст.; відносна вологість, що дорівнює  $60_{-15}^{+20}\%$  при температурі  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ .

Величина, яка не вимірюється даним засобом, але впливає на результат вимірювання, називається **впливаючою величиною**. Це може бути температура, тиск, вологість тощо.

Основна похибка перетворювача може виражатися як в **абсолютних одиницях**:  $\Delta Y = Y_p - Y_H$ , так і у **відносних**. В останньому випадку вона дорівнює відношенню абсолютної похибки до дійсного істинного значення вихідного сигналу:

$$\varepsilon = \frac{\Delta Y}{Y_p} \cdot 100\% = \frac{Y_p - Y_H}{Y_p} \cdot 100\% \quad (3.16)$$

Можна використати **відносну приведену похибку**  $\gamma$ , яка дорівнює відношенню максимальної абсолютної похибки  $\Delta_{\max}$  в діапазоні вимірюваної величини до верхнього (кінцевого) значення цього діапазону  $Y_k$  у відсотках:

$$\gamma = \frac{\Delta_{\max}}{Y_k} \cdot 100\% \quad (3.17)$$

**Додаткові похибки** - це похибки засобу вимірювань (перетворювача), що виникають при відхиленні значення однієї з впливаючих величин від її нормального значення або виходом її значення за обумовлені в технічній документації межі (наприклад, для попереднього випадку температура вище  $25^\circ\text{C}$ ).

**Додаткові похибки** – це похибки, зумовлені умовами зовнішнього середовища і внутрішніми процесами в деталях перетворювача. До цих процесів можна віднести: зміни температури, вологості; коливання напруги джерела живлення; механічні впливи; старіння та знос матеріалу.

Додаткові похибки виражаються у відсотках до зміни чинника, що її викликав. Наприклад: 1% на 5°C.

В залежності від специфіки застосування перетворювачів похибки нормуються абсолютним значенням, відносним значенням або класом точності, який визначається узагальненою характеристикою основної і додаткових похибок.

Границі допустимих похибок засобів вимірювань нормують поряд з іншими метрологічними характеристиками.

**Границею допустимої похибки** засобу вимірювання називається найбільша (без урахування знака) похибка, з якою його можна визнати придатним для застосування.

За **способом вираження** похибки поділяють на абсолютні, відносні і приведені.

**Абсолютною похибкою** називається різниця між дійсним (реальним) значенням вихідної величини  $Y_p$  і його номінальним значенням -  $Y_n$ :

$$\Delta Y = Y_p - Y_n. \quad (3.18)$$

Абсолютна похибка вимірювального перетворювача або приладу являє собою відхилення його реальної функції перетворення (рис. 3.10) від номінальної. Ці відхилення, які відлічуються вздовж осі  $x$  або осі  $y$ , тобто різниці типу  $\Delta Y = Y_p - Y_n$  або  $\Delta X = X_n - X_p$  є абсолютними похибками перетворення, виражені в одиницях величин  $X$  та  $Y$ .

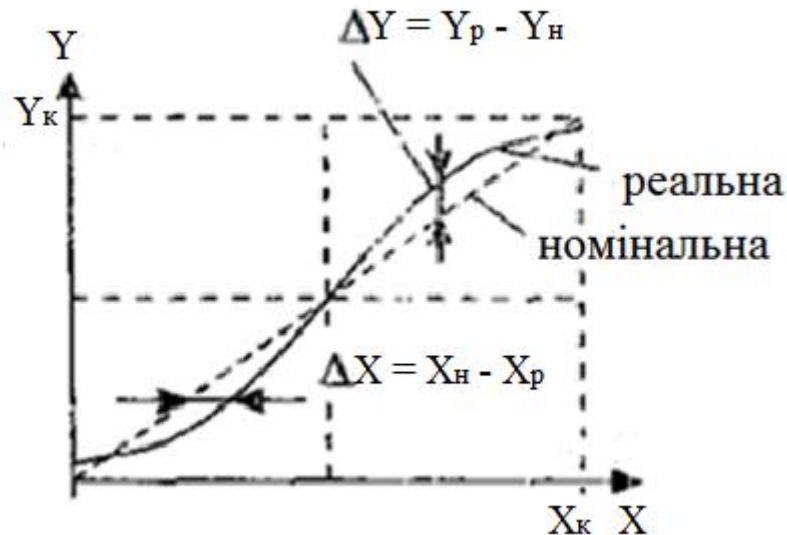


Рис.3.10. До абсолютної похибки вимірювального перетворювача

**Відносною похибкою** називається відношення абсолютної похибки  $\Delta Y$  до реального (дійсного) значення вихідної величини  $Y_p$ :

$$\varepsilon_Y = \frac{\Delta Y}{Y_p} \cdot 100\% \quad (3.19)$$

Відносна похибка вводиться тому, що абсолютна похибка не може бути мірою точності, оскільки не відображає її частку у вимірюваній величині. Відносна похибка зазвичай виражається у відсотках вимірюваної величини.

Значення відносної похибки  $\varepsilon_Y$  не залишається сталим вздовж шкали приладу при зміні  $x$  та  $y$ , а, навпаки, стає різним для різних значень вимірюваної величини. Для нульового значення  $X$  вона стає нескінченною. Внаслідок цього вводиться ще одне специфічне поняття – поняття приведеної похибки

**Приведеною похибкою** називається відношення абсолютної похибки до нормуючого значення: для перетворювачів це найбільше значення вихідної величини, для приладів максимальне значення шкали. Значення цієї похибки визначає клас точності приладу 0,1; 0,5; 1,0 тощо:

$$\gamma_Y = \frac{\Delta Y}{Y_{\max}} \cdot 100\% \quad (3.20)$$

Приведена похибка, як і відносна, є безрозмірною величиною і зазвичай виражається у відсотках. Крім того, вона пропорційна абсолютній похибці. Тому якщо абсолютна похибка вимірювального перетворювача постійна в усьому діапазоні вимірювання, то приведена буде також постійною. Отже, вона характеризує точність вимірювального перетворювача незалежно від значення вимірюваного параметра. Тому приведену похибку вважають основною метрологічною характеристикою вимірювального перетворювача.

Абсолютні, відносні та приведені похибки перетворювача визначаються по входу і виходу, так як вхідна і вихідна величини можуть мати різну фізичну природу, а також внаслідок того, що часто відсутній вимірювальний перетворювач, за яким можна було б повірити робочий перетворювач. Зміст визначення похибок по входу і виходу пояснюється на рис. 3.11, а.

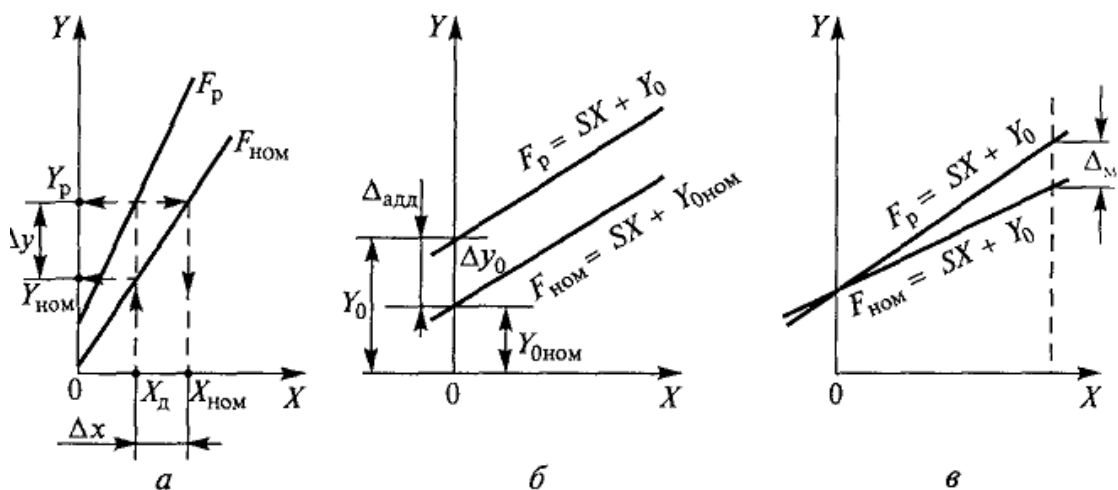


Рис. 3.11. Графіки похибок: а - по входу і виходу; б - адитивна; в - мультиплікативна

**Абсолютною похибкою вимірювального перетворювача по виходу  $\Delta Y$**  називається різниця між дійсним (реальним) значенням величини  $Y_p$  на виході перетворювача, що відбиває (відображає) вимірювану величину, і номінальним значенням  $Y_n$  величини на виході, яке визначається за дійсним (реальним) значенням величини  $X_d$  на вході за допомогою градуовальної характеристики, приписаної перетворювачу. Вона обчислюється за формулою:



$$\Delta Y = Y_p - Y_H \quad (3.21)$$

де  $Y_p$  - значення вихідного сигналу перетворювача при певному значенні вхідного сигналу;

$Y_H$  - значення вихідного сигналу, який повинен вироблятися перетворювачем, позбавленим похибки, при тому ж значенні вхідного сигналу.

Значення  $Y_p$  визначають за допомогою робочого еталону (зразкового засобу вимірювань), а значення  $Y_H$  розраховують за допомогою функції перетворення за дійсним значенням вхідної величини  $X_d$ , яке відтворюється мірою або визначається за допомогою відповідного робочого еталону (зразкового засобу вимірювань):

$$Y_H = f(X_d) \quad (3.22)$$

З формул (3.21) та (3.22) знаходимо:

$$\Delta Y = Y_p - f(X_d) \quad (3.23)$$

Оскільки виникнення похибок є наслідком неспівпадання дійсної (реальної) функції перетворення  $F_p(X)$  і номінальної функції перетворення  $F_H(X)$  (рис. 3.12), то абсолютна похибка по виходу може бути визначена як

$$\Delta Y = Y_p - Y_H = Y_p - k_{H.X} X_p = k_p X_p - k_{H.X} X_p = (k_p - k_{H.X}) \cdot X_p = \frac{k_p - k_{H.X}}{k_p} \cdot Y_p \quad (3.24)$$

де  $X_p$  – реальне (дійсне) значення величини, що подається до входу вимірювального перетворювача;  $Y_p$  - дійсне значення вихідної величини, виміряне на виході перетворювача;  $Y_H$  - значення вихідної величини, визначене за номінальною функцією перетворення  $F_H(x)$  для дійсного значення вхідної величини  $X_p$ ;  $k_{H.X}$  - номінальний коефіцієнт перетворення, що відповідає значенню  $X_p$  по

градувальній характеристиці;  $k_p = \frac{Y_p}{X_p}$  – реальний (дійсний) коефіцієнт перетворення.

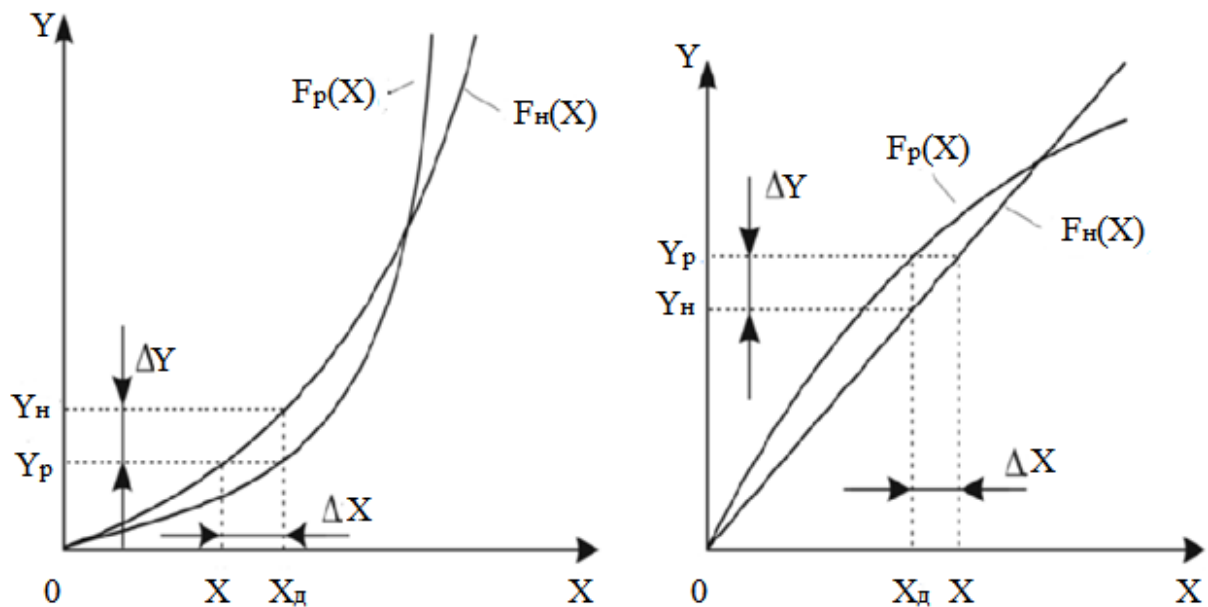


Рис. 3.12. До визначення похибок вимірювального перетворювача по входу і по виходу

Похибка створюється самим перетворювачем, тому доцільно знати значення вхідного сигналу, що відповідає похибці перетворювача.

**Абсолютна похибка вимірювального перетворювача по входу** визначається за формулою:

$$\Delta X = X_H - X_D, \quad (3.25)$$

де  $X_D$  – дійсне (реальне) значення вхідної величини;  $X_H$  – значення вхідної величини, що визначається за номінальною функцією перетворення  $Y_H = f_H(X)$  при значенні вихідної величини  $Y_H$ , що відповідає дійсному значенню  $X_D$ .

Значення  $X_D$  визначається за допомогою відповідного робочого еталону (зразкового засобу вимірювань) або відтворюється мірою, а значення  $X_H$  визначається за значенням  $Y_H$  вихідного сигналу за допомогою функції перетворювача, розв'язаної (вирішеної) відносно  $X$ , тобто  $X_H = \varphi(Y_H)$  ( $\varphi$  - символ зворотної функції перетворення).

Таким чином, підставляючи значення  $X_H$  у формулу (3.25) отримуємо формулу:

$$\Delta X = \varphi(Y_H) - X_d \quad (3.26)$$

або абсолютна похибка по входу дорівнює

$$\Delta X = X_H - X_p = \frac{Y_p}{k_{H,Y}} - X_p = \frac{k_p X_p}{k_{H,Y}} - X_p = \frac{k_p - k_{H,Y}}{k_{H,Y}} X_p = \frac{k_p - k_{H,Y}}{k_p k_{H,Y}} Y_p \quad (3.27)$$

де  $X_H$  — значення вхідної величини, що відповідає дійсному значенню вихідної величини  $Y_p$ , і яке визначається за номінальною функцією перетворення;  $X_p$  — дійсне значення вхідної величини;  $k_{H,Y} = \frac{Y_p}{X_H}$  - номінальний коефіцієнт перетворення, що відповідає значенню  $Y_p$  по градуовальній характеристиці;  $k_p = \frac{Y_p}{X_p}$  — дійсний (реальний) коефіцієнт перетворення.

**Відносною похибкою вимірювального перетворювача по входу (виходу)** називають відношення абсолютної похибки вимірювального перетворювача по входу (виходу) до дійсного значення величини на вході за градуовальною характеристикою, приписаною перетворювачу. Обчислення проводять за наступними формулами:

1. відносна похибка вимірювального перетворювача по входу:

$$\begin{aligned} \varepsilon_X &= \frac{\Delta X}{X_p} \cdot 100\% = \frac{\varphi(Y_H) - X_p}{X_p} \cdot 100\% = \frac{k_p - k_{H,Y}}{k_{H,Y}} \cdot 100\% = \\ &= \left( \frac{k_p}{k_{H,Y}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (3.28) \end{aligned}$$

2. відносна похибка вимірювального перетворювача по виходу:

$$\begin{aligned} \varepsilon_Y &= \frac{\Delta Y}{Y_p} \cdot 100\% = \frac{Y_H - f(X_p)}{f(X_p)} \cdot 100\% = \frac{k_p - k_{H,X}}{k_p} \cdot 100\% = \\ &= \left( 1 - \frac{k_{H,X}}{k_p} \right) \cdot 100\% \quad (3.29) \end{aligned}$$

де  $\varepsilon_X$  і  $\varepsilon_Y$  — відносна похибка по входу и виходу відповідно.  
Звідси отримуємо

$$\varepsilon_Y = \frac{k_p - k_{H.X}}{k_p - k_{H.Y}} \cdot \frac{k_{H.Y}}{k_p} \cdot \varepsilon_X$$

З виразів (3.24) і (3.27) можна отримати зв'язок між абсолютними похибками перетворювача по входу та виходу:

$$\Delta Y = \frac{k_p - k_{H.X}}{k_p - k_{H.Y}} k_{H.Y} \cdot \Delta X \quad (3.30)$$

Якщо градувальна характеристика лінійна, то  $k_{H.Y} = k_{H.X} = k_H$ , і тоді

$$\begin{aligned} \Delta Y &= k_H \Delta X ; \\ \varepsilon_Y &= \frac{k_H}{k_p} \varepsilon_X . \end{aligned}$$

**Приведеною похибкою вимірювального перетворювача по входу (виходу)** називають відношення абсолютної похибки до нормуючого значення вхідного  $X_N$  ( $X_N = X_{\max} - X_{\min}$ ) та вихідного  $Y_N$  ( $Y_N = Y_{\max} - Y_{\min}$ ) сигналу відповідно, де  $X_{\max}$ ,  $Y_{\max}$ ,  $X_{\min}$ ,  $Y_{\min}$  – максимальні і мінімальні значення вхідної і вихідної величин перетворювача.

Приведена похибка вимірювального перетворювача по входу обчислюється за формулою:

$$\gamma_X = \frac{\Delta X}{X_N} \cdot 100\% = \frac{\varphi(X_D) - X_D}{X_N} \cdot 100\% \quad (3.31)$$

Приведена похибка вимірювального перетворювача по виходу обчислюється за формулою:

$$\gamma_Y = \frac{\Delta Y}{Y_N} \cdot 100\% = \frac{Y_D - f(X_D)}{Y_N} \cdot 100\% \quad (3.32)$$

де  $\gamma_X$  і  $\gamma_Y$  - приведена похибка вимірювального перетворювача по входу и виходу відповідно.

В якості нормуючого значення  $X_N, Y_N$  використовується діапазон вимірювань перетворювача ( $X_B - X_H$ ) або діапазон вимірювань вихідного сигналу ( $Y_B - Y_H$ ), що йому відповідає, де  $X_B$  та  $X_H$  – верхня та нижня межа діапазону вимірювання вхідного сигналу  $X; Y_B$

та  $Y_H$  - верхня та нижня межа діапазону вимірювання вихідного сигналу  $Y$ .

Тоді формули (3.31) і (3.32) виглядатимуть наступним чином:

$$\gamma_X = \frac{\varphi(X_D) - X_D}{X_B - X_H} \cdot 100\% \quad (3.33)$$

$$\gamma_Y = \frac{Y_D - f(X_D)}{Y_B - Y_H} \cdot 100\% \quad (3.34)$$

Похибки перетворення залежать як від властивостей самого перетворювача, так і від умов, в яких він працює (температури і вологості навколишнього середовища, наявності зовнішніх електричних і магнітних полів і т.д.). При нормуванні точності вимірювальних перетворювачів зазвичай вказують область допустимих значень похибок перетворення, що реалізується перетворювачем при «нормальних умовах» (основна похибка), і допустимі зміни функції перетворення при певних змінах впливаючих величин.

На практиці часто використовуються перетворювачі з лінійною функцією перетворення, що не проходить через початок координат (рис. 3.11, б),

$$Y_p = SX + Y_0, \quad (3.35)$$

де  $Y_0$  - значення вихідної величини при нульовому значенні вхідної.

Відхилення такої реальної функції від номінальної викликано відхиленнями  $Y_0$  і чутливості  $S$ . Похибка, обумовлена не номінальним значенням вихідної величини при нульовому значенні вхідної, називається **адитивною**:

$$\Delta_{ад} = \Delta Y_0 = Y_0 - Y_{0н}, \quad (3.36)$$

де  $Y_{0н}$  - номінальне значення вихідної величини при нульовому значенні вхідної.

При зміні  $Y_0$  графік функції перетворення (рис. 3.11, б) зсувається паралельно самому собі, тобто адитивна похибка не залежить від вхідної величини.

Похибка, обумовлена не номінальним значенням чутливості  $S$ , називається **мультиплікативною**. Похибка чутливості, що представляє собою мультиплікативну складову основної похибки, призводить до зміни кута нахилу реальної характеристики перетворювача щодо номінальної (рис. 3.11, в). При цьому абсолютна похибка  $\Delta_M = Y_0 - Y_H$  залежить від вхідної величини  $X$ . Наприклад, при зміні температурних умов роботи перетворювача його чутливість змінилася на  $\Delta S$  і стала рівною  $S = S_H + \Delta S$ , де  $S_H$  - номінальне значення чутливості перетворювача. Абсолютна похибка чутливості перетворювача в цьому випадку буде

$$\Delta_M = [(S_H + \Delta S)X + Y_0] - [S_H X + Y_0] = \Delta S X, \quad (3.37)$$

тобто абсолютна мультиплікативна похибка пропорційна вхідній величині  $X$ .

Наявність різних показників точності - абсолютної і приведеної, основної і додаткової похибок - ускладнює порівняння вимірювальних перетворювачів. Тому потрібна узагальнена характеристика їх метрологічних властивостей. Такою характеристикою вимірювального перетворювача є **клас точності**, під яким розуміють його максимальну приведену похибку (у відсотках) за нормальних умов експлуатації

У складному вимірювальному колі необхідно визначити його загальну похибку. Проте, як правило, не можна встановити зв'язок між результуючою похибкою вимірювального ланцюга і похибками окремих перетворювачів, що складають цей ланцюг. Можна лише оцінити межі значень приведеної похибки складного ланцюга.

Якщо вважати, що похибки усіх перетворювачів вимірювального ланцюга одного знаку, то результуюча похибка ланцюга дорівнюватиме їх сумі. В цьому випадку похибка складного ланцюга виявиться максимальною  $\Delta_{\max}$ :

$$\Delta_{\max} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \dots + \Delta_n \quad (3.38)$$

де  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_n$  - похибки вимірювальних перетворювачів ланцюга.

Більш реальна оцінка отримується, якщо вважати похибки усіх перетворювачів випадковими і зумовленими незалежними між собою

чинниками. В цьому випадку приведена похибка ланцюга буде менше  $\Delta_{\max}$ . Така приведена похибка називається середньоквадратичною похибкою  $\sigma$  і знаходиться за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots + \sigma_n^2} \quad (3.39)$$

Формули (3.38) і (3.39) використовують для наближеної оцінки величини приведеної похибки складного вимірювального кола. Як видно з цих формул, щоб зменшити похибку усього вимірювального кола, слід зменшити похибки утворюючих його перетворювачів.

В процесі експлуатації вимірювальних перетворювачів їхні метрологічні характеристики можуть змінюватися. Тому з періодичністю, встановленою Державним стандартом, усі технічні засоби вимірювань повинні піддаватися повірці, при якій їх покази порівнюються з показами більш точного - зразкового перетворювача. Клас точності зразкового перетворювача має бути не менше ніж в три рази вищий за клас точності перетворювача, що повіряється. Так, для повірки перетворювача класу точності 1,5 потрібний перетворювач з класом точності 0,5.

## РОЗДІЛ 4. ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

### 4.1. Методи вимірювань неелектричних величин

**Метод вимірювання** - це сукупність окремих перетворень, необхідних для сприйняття інформації про розмір вимірюваної величини і перетворення її в таку форму, яка необхідна одержувачу інформації (людині, машині).

Всі методи вимірювань неелектричних величин можна розділити на дві групи: **контактні** та **безконтактні**.

При **контактних методах** вимірювань первинний перетворювач безпосередньо контактує з досліджуваним об'єктом. Ці методи порівняно нескладні у реалізації і забезпечують високу чутливість, а також можливість локалізації точки вимірювання в тому місці технологічного процесу, яке, наприклад, є найінформативнішим. Необхідно, однак, відзначити, що при контактному методі спостерігається зворотна дія вимірювального перетворювача на параметри досліджуваного об'єкта, що може призвести до значних неточностей результату вимірювань.

При **безконтактних вимірюваннях** первинний перетворювач безпосередньо не контактує з досліджуваним об'єктом і не впливає на його параметри. У таких перетворювачів обмін енергією між сенсором і об'єктом може здійснюватись за допомогою магнітного поля (безконтактний індуктивний перетворювач (датчик) наближення), ультразвуковим сигналом (безконтактний ультразвуковий сигнал присутності) тощо. Однак на результати вимірювань у цьому випадку значно впливає довкілля, яке відділяє досліджуваний об'єкт від первинного перетворювача.

Незалежно від того, контактний чи безконтактний метод вимірювань використовують для вимірювань фізичних величин перевага надається саме електричним вимірюванням неелектричних величин. Первинні вимірювальні перетворювачі вимірювану величину перетворюють у сигнал вимірювальної інформації, що дає можливість передати його на певну відстань і за місцем призначення відтворити вимірювальну величину у формі, прийнятній для спостерігача або ж ввести у відповідний засіб вимірювання.

Первинні перетворювачі перебувають в особливо складних умовах експлуатації. Вони розміщуються на об'єкті контролю, часто піддаються дії великих перепадів температури, тисків, агресивним



діям контрольованих середовищ. Вимірювальний первинний перетворювач сприймає поточне значення контрольованого технологічного параметра і перетворює його в електричний сигнал, зручний для введення в систему автоматичного регулювання. Контрольована величина (технологічний параметр), що ним сприймається, є вхідною величиною. До них належать, наприклад, температура, тиск, кут повороту вала, швидкість переміщення об'єкта, сила та ін.

**Сигнал вимірювальної інформації є вихідною величиною первинного перетворювача.**

Слід зазначити, що кількість типів вимірювальних перетворювачів значно перевищує кількість вимірюваних величин, оскільки одну і ту ж фізичну величину можна виміряти різними методами і датчиками різних конструкцій.

В термінах електроніки вимірювальний перетворювач визначається, зазвичай, як прилад, що перетворює неелектричну фізичну величину (звану вимірюваною фізичною величиною) в електричний сигнал, або навпаки.

Звідси випливає, що вимірювальні перетворювачі використовуються в електронних системах, тобто в технічних пристроях з електричним сигналом, який відображає результат вимірювань або спостережень.

## **4.2. Принципи перетворення вимірюваних фізичних параметрів**

Принцип дії кожного перетворювача заснований на певному фізичному явищі, яке пов'язане з електричними характеристиками пристрою (ВП) так, що зміна вимірюваної величини спричиняє зміну цих характеристик. Зміна в електричних характеристиках, в свою чергу, створює електричний сигнал, залежний від вимірюваної величини.

Незважаючи на те, що існують тисячі вимірювальних перетворювачів, принципів дії, на яких вони засновані, існує відносно небагато. Тому можна розглянути ці принципи досить детально. Усі використовувані в перетворювачах основні принципи можна об'єднати в декілька категорій.

Отже, за **фізичними принципами**, покладеними в основу принципу дії, ВП можуть бути поділені на такі групи:

**1. Механічні пружні перетворювачі.** В основу принципу дії таких перетворювачів покладені залежності між вхідними механічними зусиллями і викликаними ними переміщеннями чи механічними напруженнями в матеріалі чутливого елемента, що визначаються його пружними властивостями.

**2. Резистивні перетворювачі** (механічних величин). Дуже великим класом вимірювальних перетворювачів є резистивні перетворювачі, принцип дії яких заснований на перетворенні значення вимірюваної величини в зміну опору. Носієм вимірювальної інформації у резистивних перетворювачах механічних величин є електричний опір, зміна якого може бути наслідком переміщення повзунка реостата чи реохорда в реостатних та реохордних перетворювачах або ж внаслідок тензоефекту в тензорезистивних перетворювачах.

Зміна опору може бути викликана різними ефектами в перетворюючому елементі, наприклад нагріванням або охолодженням, механічною напругою, дією світлового потоку (як в фотопровідних перетворювачах), зволоженням, осушенням, механічним переміщенням контактної щітки реостата.

Якщо через резистивний матеріал під час зміни вимірюваної величини протікає фіксований струм, то результатом буде зміна напруги уздовж матеріалу, яка відбиває зміну вимірюваної величини.

#### **Різновиди резистивних перетворювачів:**

**А.** Одним з варіантів резистивного перетворювача є **перетворювач потенціометра**, в якому зміна вимірюваної величини перетвориться в зміну вихідної напруги внаслідок зміни положення контактної щітки на резистивному матеріалі, що живиться від зовнішнього джерела (рис. 4.1). Певний механічний елемент перетворить зміну вимірюваної величини в переміщення щітки.



Рис. 4.1. Резистивне перетворення, при якому використовується пристрій потенціометра, що викликає зміну вихідної напруги

Потенціометр, зображений на рис 4.1, можна представити у вигляді еквівалентної електричної схеми, як це зроблено на рис 4.2.

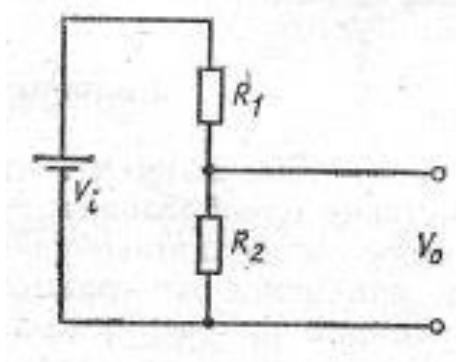


Рис. 4.2. Еквівалентна схема пристрою потенціометра, зображеного на рис. 4.1.

Його вихідна напруга визначається виразом

$$V_0 = \frac{V_1 R_2}{(R_1 + R_2)}$$

де  $V_1$  - напруга на вході.

Коли напруга, що прикладається на вхід приладу, є постійною і вимірюване значення визначається положенням щітки потенціометра, тоді вихідна напруга є безпосередньо функція вимірюваної величини.

У перетворювачах можуть використовуватися пристрої (з одним або декількома опорами всхемі) потенціометрів або вони самі є потенціометром. В останньому випадку елемент потенціометра буде змінним.

Деякі перетворювачі мають недротяні опори, такі, як металокерамічна підкладка або пластикова плівка, що проводить. Зустрічаються потенціометри, в яких повний діапазон змін положення щітки рівний  $270^\circ$ , тоді як інші конструкції мають діапазон в 10 або навіть 20 повних обертів ( $3600$  або  $7200^\circ$ )

### **Б.Тензодатчики**

Оскільки опір провідника визначається співвідношенням

$$R = \frac{\rho L}{S}$$

де  $\rho$  - питомий опір матеріалу;  $L$  - довжина  $S$  - площа поперечного перерізу, то опір може змінюватися при будь-якій зміні вимірюваної величини, яка впливає на один або декілька аргументів, що входять в цей вираз.

Приведена залежність використовується в **тензодатчиках** - перетворювачах, які перетворюють зміну зусилля, що докладається, на зміну опору (рис.4.3). Як правило, такий перетворювач застосовується разом з мостом Уїтстона, коли одне, два або навіть усі чотири плеча представляють собою тензодатчики, а вихідна напруга змінюється у відповідь на варіації вимірюваного зусилля.

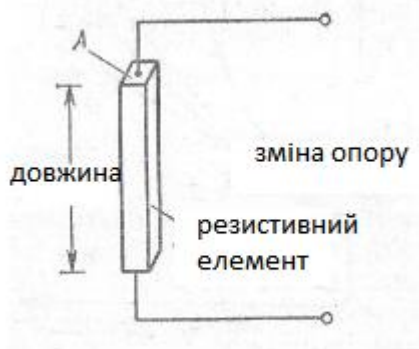


Рис. 4.3. Тензометричне перетворення (тензодатчик)

У тензодатчиках використовуються металеві перетворюючі елементи, при прикладанні механічного навантаження до яких відбувається зміна їхніх довжини або площі поперечного перерізу, що приводить, у свою чергу до зміни опору. Деякі матеріали тензодатчиків, наприклад напівпровідникові, проявляють п'єзоелектричний ефект, при якому прикладене до матеріалу навантаження викликає велику зміну його питомого опору. Тензодатчики такого типу мають на два порядки більшу чутливість, ніж розглянуті раніше.

В загальному випадку будь-який параметр, який відтворює рух або силу, може бути використаний для створення тензометричних перетворювачів.

Резистивні перетворювачі теплових величин (терморезистивні перетворювачі) та резистивні перетворювачі хімічних величин (електрохімічні резистивні перетворювачі) відносять відповідно до теплових та електрохімічних, оскільки їх принцип дії вигідно розглядати саме з погляду теплових чи електрохімічних явищ.

### 3. Електромеханічні перетворювачі

**Електромеханічний перетворювач** – пристрій для перетворення механічних переміщень (коливань) в зміну електричного струму або напруги (електричний сигнал) і навпаки.

Застосовуються головним чином як виконавчі пристрої систем автоматичного регулювання (управління) і як датчики механічних переміщень в автоматичній і вимірювальній техніці.

Електромеханічні перетворювачі випускаються в різному виконанні, але усі вони виконуються у формі механічного контактного пристрою, що працює під дією фізичної величини, що змінюється, вимірювання якої і здійснюється. Зазвичай контакти мають просту форму і працюють в дискретному режимі, як, наприклад, біметалічний вимикач (рис. 4.4)

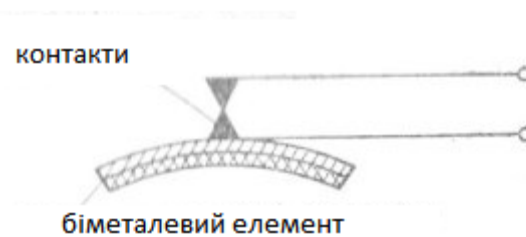


Рис. 4.4. Біметалевий елемент, що працює як електромеханічний перетворювач

Коли значення вимірюваної величини перевищує точку перемикавання, контакт розмикається або замикається, внаслідок цього в замкнутому або розімкненому електричному ланцюзі формується вихідний сигнал перетворювача.

Електромеханічні перетворювачі, як правило, цифровими (дискретними), оскільки їх контакти можуть бути лише в двох положеннях і є елементом включений/вимкнений.

**4. Ємнісні перетворювачі.** В основу принципу дії ємнісних перетворювачів покладена залежність ємності конденсатора від відстані між його електродами, площі їх перекриття чи діелектричної проникності середовища між електродами, коли відстань, площа перекриття (кут повороту) чи діелектрична проникність є мірою вимірюваної величини (рис. 4.5).

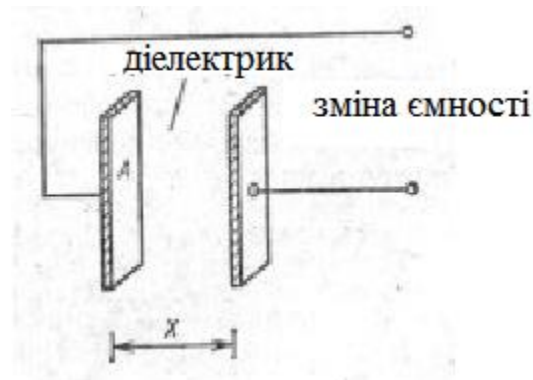


Рис. 4.5. Принцип дії ємнісного перетворювача

Конденсатор формується з двох пластинів, розділених шаром діелектрика, а його ємність визначається з наступного виразу:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot S}{x}$$

де  $\epsilon_0$  - електрична постійна,  $\epsilon$  - діелектрична проникність діелектрика;  $S$  - площа поверхні кожної пластини;  $x$  - відстань між пластинами.

Перетворюючі елементи ємностей ( $\epsilon$ ,  $S$ ,  $x$ ) перетворюють зміни вимірюваної величини на зміни ємності.

**5. П'єзоелектричні перетворювачі.** До п'єзоелектричних належать перетворювачі, принцип дії яких оснований на використанні явища поляризації п'єзоелектрику внаслідок дії на нього механічних зусиль. Різновидом п'єзоелектричних є п'єзорезонансні перетворювачі, принцип дії яких оснований на використанні залежності резонансної частоти п'єзоелемента від значення вимірюваної величини, наприклад, температури доквілля.

П'єзоелектричний ефект, який покладений в основу принципу дії п'єзоелектричного перетворювача (рис. 4.6), полягає в тому, що змінюваної величини перетворюється на зміну електростатичного заряду або напруги, що виникають в деяких матеріалах при їх механічній напрузі. Напруга зазвичай утворюється під дією сил стискування, розтягування або вигину, які є вимірюваною величиною і впливають на чутливий елемент або безпосередньо, або за допомогою деякого механічного зв'язку.

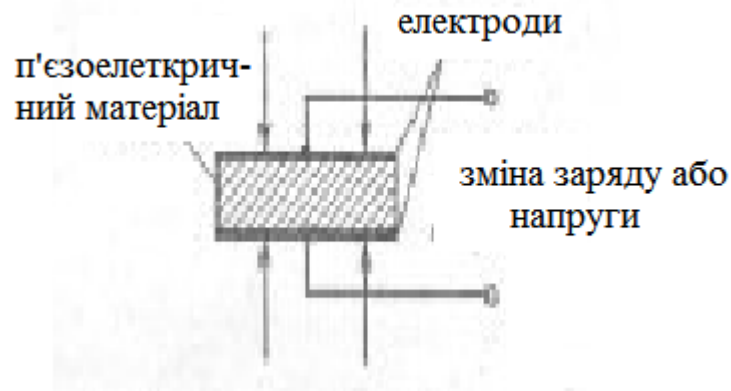


Рис. 4.6. Принцип дії п'єзоелектричного перетворювача

Щоб виміряти зміну заряду або напруги, до п'єзоелектричного матеріалу під'єднують дві металеві пластинки, які фактично утворюють пластини конденсатора, ємність якого визначається у виді

$$C = \frac{Q}{V}$$

де  $Q$  - заряд;  $V$  - напруга.

В якості п'єзоелектричного матеріалу в п'єзоелектричних перетворювачах використовуються: 1) природні кристали, такі, як кварц або **рочеллева** сіль; 2) синтетичні кристали, наприклад сульфат літію; 3) поляризована феромагнітна кераміка, наприклад титанат барію.

**6. Індуктивні перетворювачі.** Це перетворювачі, в яких використовується залежність повного електричного опору намагнічувальної обмотки від значення комплексного магнітного опору магнітного кола перетворювача, який може бути результатом зміни повітряного проміжку в магнітному колі перетворювача або результатом зміни магнітних властивостей феромагнетика внаслідок дії на нього механічних зусиль, як в індуктивних магнітопружних перетворювачах.

Індуктивне перетворення показано на рис. 4.7, де самоіндукція котушки міняється відповідно до зміни вимірюваної величини. Зміна індуктивності може бути здійснена шляхом руху феромагнітного сердечника (осердя) усередині котушки або шляхом внесення зовнішнього потоку, що змінюється, до котушки з нерухомим осердям.

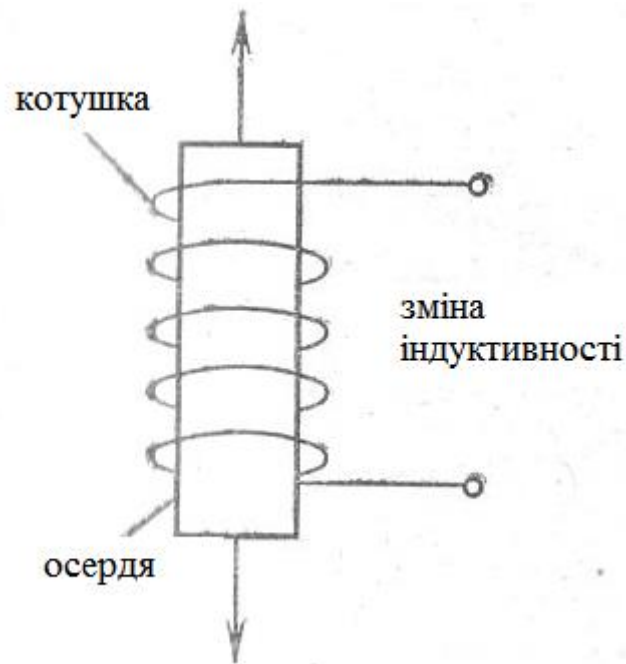


Рис. 4.7. Індуктивне перетворення

**7. Взаємоіндуктивні (трансформаторні) перетворювачі.** Принцип їх дії оснований на використанні залежності магнітного потоку і відповідно наведеної у вторинній обмотці ЕРС (при незмінних намагнічувальних ампервитках) від значення комплексного магнітного опору магнітопроводу, який, як і в індуктивних перетворювачах, може змінюватись зі зміною повітряного проміжку чи магнітних властивостей феромагнетику, спричинених його механічною деформацією.

**8. Електромагнітні перетворювачі.** Електрорушійна сила (ЕРС) генерується уздовж провідника, коли його перетинає змінне магнітне поле. І, навпаки, коли провідник рухається через магнітне поле, уздовж нього генерується ЕРС (рис. 4.8), яка визначається з наступного співвідношення:

$$E = - \frac{d(N\Phi)}{dt}$$

де  $\frac{d(N\Phi)}{dt}$  - швидкість зміни потокозщеплення.





Рис. 4.8. Електромагнітне перетворення

Перетворення магнітного опору показано на рис. 4.9, на якому ланцюжок опору між двома або більш котушками (чи окремими частинами однієї або декількох котушок) змінюється залежно від варіацій вимірюваної величини. Коли до системи котушок прикладається змінний струм, тоді, зміна вимірюваної величини трансформується в зміну вихідної напруги.

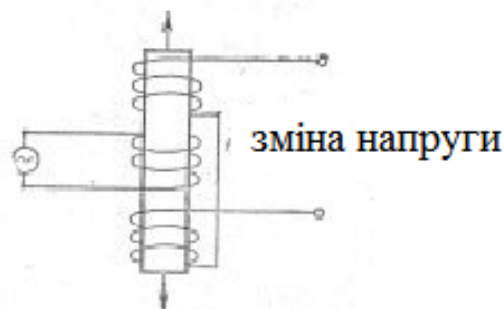


Рис. 4.9. Перетворення магнітного опору, використовуване в диференціальному трансформаторі з виходом, що лінійнозмінюється

**9. Індукційні перетворювачі.** Їх принцип дії заснований на використанні явища електромагнітної індукції. Вхідними (вимірюваними) величинами таких перетворювачів можуть бути швидкість зміни магнітного потоку або швидкість лінійного чи кутового переміщення вимірювальної котушки.

**10. Гальваномагнітні перетворювачі.** Їх принцип дії базується на використанні гальваномагнітних ефектів Гаусса або Холла. Суть ефекту Гаусса полягає у зміні електричного опору провідника чи напівпровідника при проходженні через нього електричного струму та одночасної дії на нього магнітного поля, а ефекту Холла – в появі

за названих умов поперечної різниці потенціалів (ЕРС Холла). Основними різновидами гальваномагнітних перетворювачів є відповідно магніторезистивні перетворювачі та перетворювачі Холла.

### Ефект Холла

Коли провідник із струмом, що протікає по ньому, поміщається в магнітне поле так, що напрям струму виявляється перпендикулярним магнітним силовим лініям, то утворюється поперечне електричне поле, пропорційне добутку щільності магнітного потоку і силі електричного струму. Цей ефект виникає в провідниках, проте найбільш суттєвий він в напівпровідниках, де відомий під назвою ефекту Холла.

На рис. 4.10 показана напівпровідникова пластина, до якої прикладено магнітне поле з індукцією  $B$ , перпендикулярне струму  $I$ , що протікає через неї, і електричне поле, що виникає при цьому, з напруженістю  $E$ .

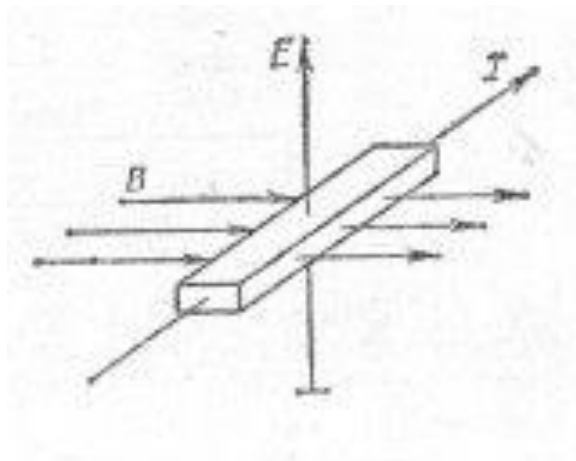


Рис. 4.10. Ефект Холла

Відношення між магнітною індукцією, струмом і напруженістю визначається таким чином:

$$E = -R_H (IB)$$

де  $R_H = \frac{1}{ne}$  - коефіцієнт Холла;  $n$  - концентрація зарядів, що протікають через одиницю об'єму і утворюють електричний струм в провіднику або напівпровіднику;  $e$  - заряд носія зарядів.

Ефект Холла використовується в багатьох типах перетворювачів, призначених для виміру магнітного поля, а також в безконтактних перемикальних приладах.

**11. Теплові перетворювачі.** Тепловими називають перетворювачі, в основу принципу роботи яких покладені фізичні ефекти, що визначаються тепловими процесами. Теплові перетворювачі - це, переважно, перетворювачі температури. Правда, непрямо вони можуть використовуватись для перетворень інших величин, що проявляються через теплові процеси, наприклад, хімічного складу, концентрацій, швидкості руху газів чи рідин тощо. Є дві основні групи теплових перетворювачів, які широко застосовуються у вимірювальній техніці. Це - **терморезистивні**, що використовують залежність опору матеріалу від температури та **термоелектричні**, в основу принципу дії яких покладена залежність термо-ЕРС термопари від різниці температур ( а якщо відома температура вільних кінців термопари – то від перетворюваної температури, якою є температура гарячого спаю термопари).

**12. Електрохімічні перетворювачі.** Принцип дії електрохімічних перетворювачів оснований на залежності електропровідності електролітичної комірки від складу, концентрації, температури чи інших параметрів досліджуваного розчину (електрохімічні резистивні перетворювачі); залежності електродних потенціалів від активності водневих іонів (гальванічні перетворювачі рН-метрів); а також залежності різниці електричних потенціалів на межі розділу твердої та рідкої фаз від швидкості переміщення розчину (електрокінетичні перетворювачі).

**13. Оптичні перетворювачі.** В основу принципу дії оптичних перетворювачів покладена залежність параметрів оптичного (світлового чи теплового) випромінювання від значення вимірюваної (перетворюваної) величини. Остання може діяти безпосередньо на джерело випромінювання, змінюючи інтенсивність його випромінювання, як в оптичних пірметрах, або ж на оптичний канал, впливаючи на параметри оптичного потоку, як, наприклад, у вимірювача оптичної щільності.

Різновидом оптичних перетворювачів є **фотоелектричні перетворювачі та фотопровідні перетворювачі.**

**Фотоелектричними** є такі первинні вимірювальні перетворювачі, які реагують на електромагнітне випромінювання, що падає на поверхню перетворюючого елемента. Випромінювання може бути видимим, тобто світловим, а також мати велику або меншу довжину хвилі і бути невидимим. Відомі два основні

типи фотоелектричних перетворювачів: фотоелектричні і фотонапівпровідникові.

**Фотопровідні** перетворювачі перетворюють зміну вимірюваної величини на зміну опору використовуваного матеріалу (рис. 4.11).

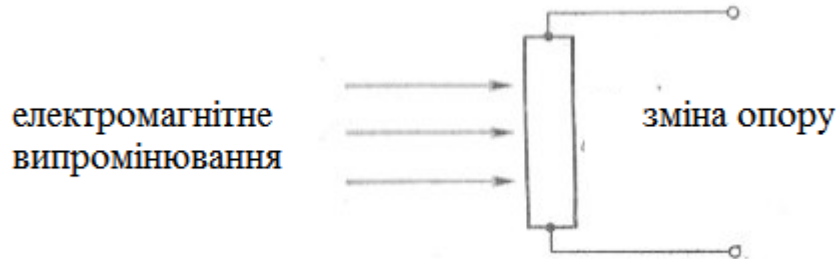


Рис. 4.11. Фотопровідне перетворення

Незважаючи на те що використовувані матеріали є напівпровідниковими, перетворювачі, що фотопроводять, не завжди є напівпровідниковими приладами, оскільки вони не мають переходів між різними типами напівпровідників. Такі перетворювачі називаються пасивними, тобто потребують зовнішнього живлення. Частенько їх назва характеризує тип використовуваного перетворення, наприклад світлочутливі резистори.

Опір матеріалу є функцією густини основних носіїв заряду, і так як густина збільшується із зростанням інтенсивності випромінювання, то провідність зростає. Оскільки провідність обернено пропорційна опору, можна вважати, що опір є зворотною функцією інтенсивності опромінення. Значення опору при повному опроміненні складає в загальному випадку 100- 200 Ом, а в повній темряві цей опір дорівнює мегаомам. У конструкції залежних від світла резисторів найчастіше використовуються такі матеріали, як сульфід кадмію або селенід кадмію.

### **Сонячні елементи**

Сонячними елементами є фотоелектричні перетворювачі, які перетворюють випромінювану електромагнітну енергію на електричну, тобто зміна вимірюваного значення випромінювання перетвориться в зміну вихідної напруги (рис. 4.12).

Конструкція перетворювача включає шар фоточутливого високоомного матеріалу, розміщеного між двома електродами, що проводять. Один з електродів виконаний з прозорого матеріалу, через який проходить випромінювання і потрапляє на фоточутливий

матеріал. При повному освітленні один елемент виробляє вихідну напругу між електродами близько 0,5 В.

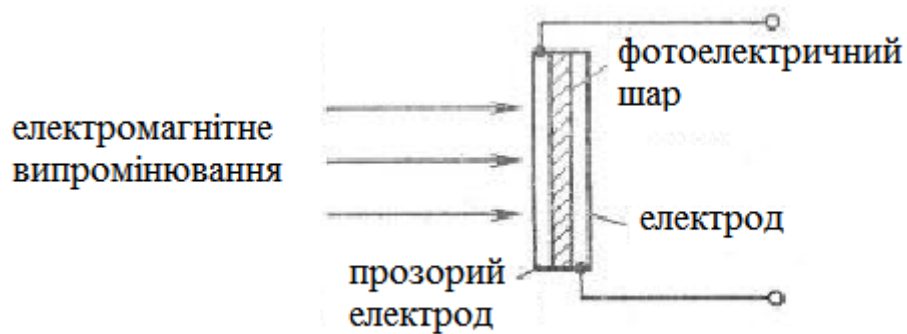


Рис. 4.12. Сонячний елемент як приклад фотоелектричного перетворення

**14. Іонізаційні перетворювачі (перетворювачі іонізаційного випромінювання).** Принцип дії таких перетворювачів оснований на перетворенні інтенсивності іонізаційного чи рентгенівського випромінювання. У перетворювачах іонізаційного випромінювання вихідна електрична величина функціонально зв'язана з інтенсивністю іонізаційного чи рентгенівського випромінювання, яка є мірою досліджуваної величини.

Іонізаційні перетворюючі елементи перетворюють зміну вимірюваної величини на зміну струму іонізації, який протікає, наприклад, через рідину, розташовану між двома електродами (рис. 4.13).

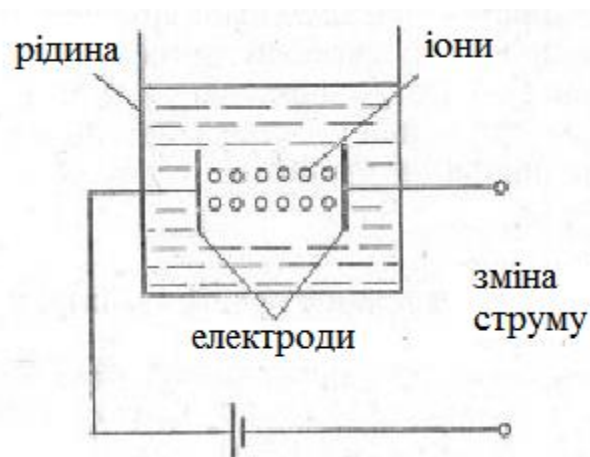


Рис. 4.13. Іонізаційне перетворення, при якому іони мігрують в рідині до електродів і діють як переносники зарядів, викликаючи тим самим електричний струм

Типовим прикладом використання іонізаційного принципу є прилад для виміру кислотності розчину. Міра кислотності розчину визначається концентрацією в нім позитивно заряджених іонів водню, званою водневим потенціалом (відомого більше у вигляді аббревіатури рН). Причому

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

де  $\text{H}^+$  - концентрація іонів водню в грамах на літр.

Значення рН дорівнює 0 для чисто кислотного розчину, 7 для нейтрального розчину (наприклад, чистої води) і 14 для чисто лужного розчину.

Типовий рН-зонд має електроди, що знаходяться в желатині з відомим значенням водневого потенціалу. Вони формуються спеціальною скляною мембраною, яка, знаходиться у контакті з розчином, значення рН якого вимірюється. Різницю потенціалів між двома електродами відбиває значення рН розчину (близько 59 мВ на одиницю рН).

### **15. Температурні перетворювачі. Термістори**

Опір також змінюється при зміні температури. Для металу ця зміна має лінійну залежність

$$R = R_0(1 + \alpha T),$$

де  $R_0$  - опір при температурі  $0^\circ\text{C}$ ;  $T$  - температура,  $^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  - температурний коефіцієнт опору.

Типові залежності опору деяких металів від температури показані на рис. 4.14. Вони свідчать про високу міру лінійності зв'язку між опором і температурою. Для створення температурних вимірювальних перетворювачів такого типу зазвичай використовується дріт з платини.

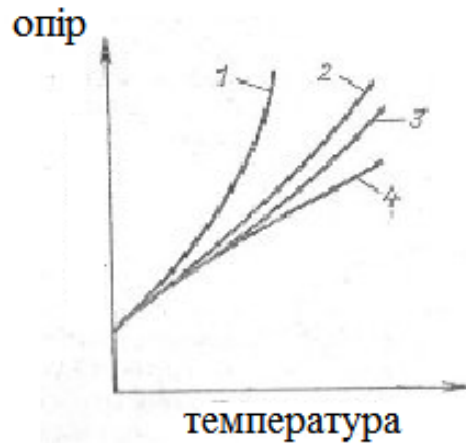


Рис. 4.14. Характеристики залежності опору деяких металів від температури: 1 - нікель; 2 - вольфрам; 3 - мідь; 4 - платина

### Термістори

Інша основна група чутливих до температури перетворювачів, використовуваних в термометричних приладах, відома під назвою термістори. Вони мають дуже нелінійну характеристику, проте можуть бути ефективно використані в системах для вимірювання температури. Опір термістора визначається наступним виразом:

$$R_T = A \exp\left(\frac{B}{T}\right)$$

де  $R_T$  - опір;  $A$  - постійна, значення якої для різних матеріалів різне;  $B$  - характеристична температура приладу;  $T$  - температура, К.

Типова характеристика термістора представлена на рис. 4.15.

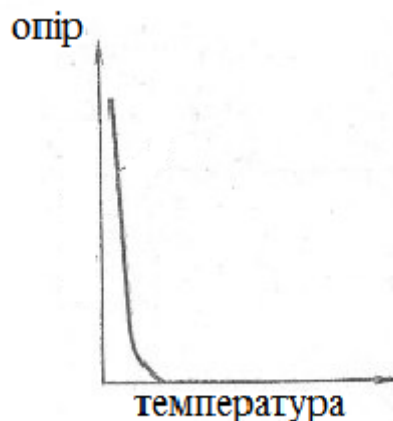


Рис. 4.15. Залежність опору типового термістора від температури

Зіставлення характеристик резистивних перетворювачів (рис. 4.14) з характеристиками термістора дозволяє зробити висновки про те, що останні:

1) характеризуються більшою крутизною, тобто температурний коефіцієнт опору у них істотно більший, ніж в металах, принаймні в основній частині кривої;

2) спадають із збільшенням температури, тобто температурний коефіцієнт опору у них негативний.

Термісторні перетворювачі з негативним температурним коефіцієнтом опору відомі більше як NTC - термістори. Необхідно відзначити, що існують і термістори з позитивним коефіцієнтом опору, які позначаються як PTC-термістори. Останні частіше застосовують не для вимірювання температури, а для попередження перегрівання.

Іншою і зручнішою формулою для опису характеристики термістора у разі, коли відомий його опір  $R_1$  при деякій температурі  $T_1$ , є вираз

$$R = R_1 \exp B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right),$$

який отримується шляхом підстановки в раніше приведену формулу наступного очевидного співвідношення :

$$R_1 = A \exp \left( \frac{B}{T_1} \right)$$

Термістори істотно менше за габаритами, ніж металеві резистивні перетворювачі, і тому вони швидше реагують на зміну температури. З іншого боку, невеликі розміри термісторів призводять до того, що для їх самонагріву вимагається невеликий струм. Отже, можна вважати, що струм впливає на точність вимірювань.

### **16. Напівпровідникові перетворювачі**

Напівпровідникові прилади відносяться до категорії електронних компонентів, які називаються напівпровідниками. Чисті або бездомішкові напівпровідники зазвичай не використовуються в цих приладах. Леговані домішками в напівпровідникову кристалічну решітку вони стають домішковими напівпровідниками.

Домішкові напівпровідники легуються так, щоб забезпечити надлишок електронів (напівпровідники n -типа) або їх недолік



(напівпровідники р -типа). Наявність домішок в напівпровідниковій кристалічній решітці визначає міру електропровідності ґратки.

Поодинокі шари n- або р - напівпровідника не знаходять застосування, і напівпровідниковий матеріал стає напівпровідниковим приладом тільки тоді, коли два або більше шарів різних типів контактують один з одним. Простий р-n-перехід формує випрямний прилад або діод. Вольт-амперна характеристика діода встановлюється згідно із співвідношенням, відомим як рівняння Шоклі або рівняння ідеального діода, а саме:

$$I=I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

де  $I_0$  - струм насичення (чи струм витоку);  $q$  - заряд електрона;  $V$  - напруга, що прикладається до діода;  $k$  - постійна Больцмана;  $T$  - температура, К.

Будь-яка зміна вимірюваної величини, яка викликає зміну приведенного вище виразу, може бути використана для зміни струму, що протікає через перехід. Наприклад, діод іноді застосовується як перетворювач температури, оскільки струм витоку напівпровідника змінюється як функція температури. Струм витоку кремнію складає приблизно 25 нА при температурі 25 °С і збільшується до 6.5 мА при температурі 150°С.

### **Фотодетектори**

Напівпровідникові перетворювачі, призначені для вимірювання змін параметрів світлового випромінювання, називаються **фотодетекторами**. Фотодетектор – це один з видів фотоелектричного перетворювача, яким є напівпровідниковий діод. Існує декілька типів таких перетворювачів. Один з основних серед них - фотодіод, в якому використовується ефект опромінення світлом (видимим або інших довжин хвиль) р–n переходу з негативним зміщенням. За наявності опромінення змінюється струм, що протікає через перехід. Час відгуку такого фотодіода складає всього декілька наносекунд.

Для забезпечення швидшої реакції на зміну параметрів випромінювання розроблені PIN -диоди, в яких між шарами р- і n -типа є шар бездомішкового напівпровідника. Це підвищує чутливість до світлового випромінювання і одночасно зменшує місткість переходу, завдяки чому діод швидше реагує на зміну рівня вимірюваної величини.

### Фототранзистори

У цілому ряду приладів фототранзистори використовуються разом з підсилювачами для підвищення чутливості. Зазвичай, в звичайному транзисторі (тришаровий напівпровідниковий прилад  $n-p-n$ - або  $p-n-p$ -типа) знаходиться  $p-n$ -перехід з негативним зміщенням, і прилад здатний підсилювати струм, тобто він має усі необхідні властивості фотодіода і підсилювача. І усе це в одному приладі.

Фототранзистор відрізняється від звичайного напівпровідникового тріода тим, що він виконується в прозорому корпусі, який пропускає світлове випромінювання. Світло падає на перехід колектор-база фототранзистора ( $p-n$ -перехід з негативним зміщенням), викликає в базі фотострум, який підсилюється з коефіцієнтом підсилення транзистора, що призводить до дуже великого струму емітера.

Струм емітера  $I_E$  фототранзистора визначається з наступного співвідношення:

$$I_E = (1 + h_{BE}) I_F$$

де  $h_{BE}$  - коефіцієнт підсилення транзистора по сталому струму;  $I_F$  - фотострум бази.

Для досягнення вищого підсилення використовують фотодетектори Дарлінгтона, що містять в собі фототранзистор і транзистор з високим, коефіцієнтом підсилення, що працюють в режимі пари Дарлінгтона. Обидва транзистори розміщуються в одному корпусі.

Оскільки фотодетектори є напівпровідниковими приладами, їх струм насичення залежить від температури. Тому за відсутності світлового випромінювання в них протікає так званий темновий струм, що обмежує можливості приладу при вимірюванні низьких рівнів світлового випромінювання.

### 17. Термоелектричні перетворювачі

Термоелектричні перетворюючі елементи перетворюють зміну вимірюваної величини (температури) на зміну струму, що виникає внаслідок різниці температури на спаї двох різнорідних матеріалів, в якому виникає ефект Зеебека (рис. 4.16).



Рис. 4.16. Ефект Зеебека, при якому в схемі, що складається із спаїв двох різнорідних металів, що знаходяться при різній температурі, виникає струм

Термоелектричний перетворювач більше відомий під назвою **термопари**. Термопара являє собою зонд, який складається з двох спаїв, один з яких розміщується в точці, де здійснюється вимірювання температури, а другий - в точці опорної температури (рис. 4.17). Різниця потенціалів  $V_1 - V_2$ , яка утворюється на двох спаях (відома як контактні потенціали), залежить від температури спаїв і вимірюється вольтметром. Таким чином, покази вольтметра відображають різницю температур між спаями.

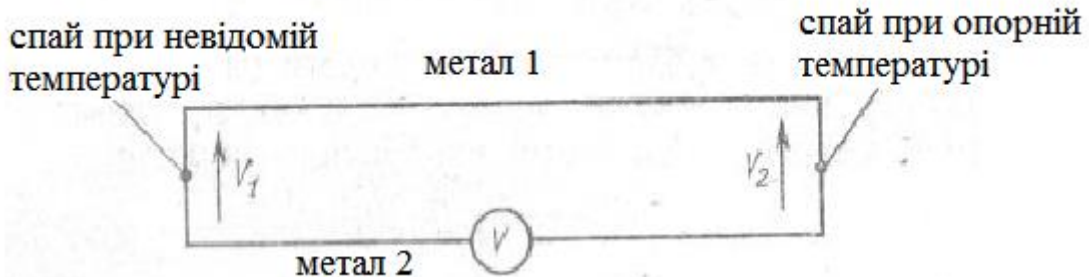


Рис.4.17. Принцип дії термопари

На рис. 4.18 показана крива, залежності напруги від різниці температур двох спаїв для ряду типових матеріалів, з яких утворюються спаї термопар. Хоча ці залежності здаються лінійними, детальні дослідження показують, що це не зовсім так.

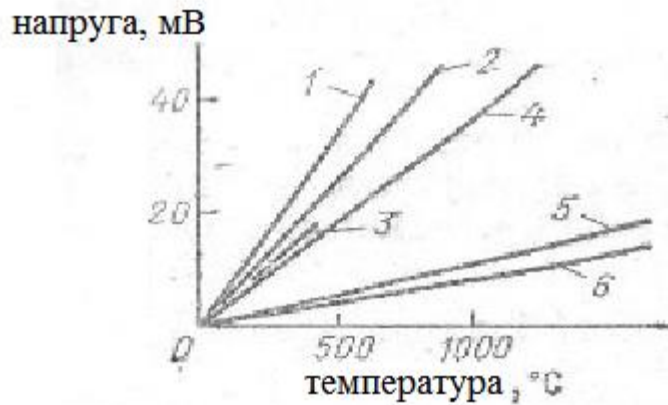


Рис. 4.18. Типові залежності напруги від різниці температури двох спаїв для термопар, спаї яких виконані з різних матеріалів :  
 1 - нікель-хром/константан (тип E); 2 - залізо/константан (тип J), 3 - мідь/константан (тип T); 4 - нікель-хром/нікель-марганец-алюміній-кремній (тип K); 5 платина-родій/платина (тип R) 6 - платина-родій/платина (тип S)

На практиці не так просто досягти необхідної точності температурних вимірювань за допомогою термопар, як це може здатися з приведених вище міркувань, оскільки з'єднання вольтметра з термоелектричною схемою само по собі утворює новий спай в схемі. Крім того, об'єкт, температура якого вимірюється, може знаходитися на деякій відстані від вольтметра, що ускладнює процес формування стабільної опорної температури.

В таблиці 4.1 наведені деякі приклади перетворення різних видів енергії в електричний сигнал за допомогою первинних перетворювачів

Таблиця 4.1. Деякі приклади перетворення різних видів енергії в електричний сигнал

Енергія	Перетворювачі
Механічна	Тензорезистори, тензодіоди, транзистори, ємнісні перетворювачі, діод Ганна, мікроелектроди (тунельний ефект).
Акустична	П'єзоперетворювачі, тензоперетворювачі.
Електрична	Мікроелектроди, іоночутливі прилади.
Магнітна	Датчики Холла, магніторезистори, магнітодіоди, магнітотранзистори.
Теплова	Терморезистори, діоди, транзистори, піроелектрони.
Світлова	Фоторезистори, фотодіоди, фото транзистори.
Хімічна	Мікроелектроди, хемотронні прилади, іоночутливі прилади.
Ядерна	Напівпровідникові детектори випромінювання.

В таблицях 4.2 и 4.3 наведено приклади фізичних ефектів, що використовуються для побудови первинних вимірювальних перетворювачів.

Таблиця 4.2. Фізичні ефекти, що використовуються для побудови активних (генераторних) датчиків

Вимірювана величина	Ефект, що використовується	Вихідна величина
Температура	Термоелектричний ефект Піроелектричний ефект	Напруга Заряд
Потік оптичного випромінювання	Зовнішній фотоефект Внутрішній фотоефект в напівпровідниках з р-п - переходом Фотоелектромагнітний ефект	Струм Напруга  Напруга
Сила, тиск, прискорення	П'єзоелектричний ефект	Заряд
Швидкість	Електромагнітна індукція	Напруга
Переміщення	Ефект Холла	Напруга

Таблиця 4.3. Фізичні принципи перетворення величин, що використовуються для побудови пасивних (параметричних) датчиків

Вимірювана величина	Електричний параметр змінюється під дією вимірюваної величини	Використовувані матеріали (тип)
Температура	Опір	Метали (платина, нікель, мідь), напівпровідники
Наднизькі температури	Діелектрична проникність	Скло, кераміка
Потік оптичного випромінювання	Опір	Напівпровідники
Деформація	Опір	Сплави нікелю, легований кремній
Переміщення	Магнітна проникність, опір, ємність	Феромагнетики магніторезистивні матеріалі, вісмут, антимонід індію
Вологість	Діелектрична проникність, опір	Хлористий літій, оксид алюмінію, полімери.
Рівень	Діелектрична проникність, коефіцієнт заломлення	Рідкі матеріали

### 4.3. Принцип дії, вимірювальне коло і види схем вимірювальних перетворювачів

Кожний засіб вимірювань (ЗВ) - це технічний пристрій певної структури, складність якої визначається характером і кількістю проміжних перетворень інформативного параметра вхідного на інформативний параметр вихідного вимірювального сигналу. У засобі вимірювань можуть відбуватися перетворення вимірювальної інформації, погоджені між собою таким чином, щоб забезпечити певне перетворення вхідного сигналу у вихідний. Всі ці проміжні вимірювальні перетворення здійснюються перетворювальними елементами і базуються на певних фізичних ефектах, які в сукупності погоджені так, щоб забезпечити потрібне функціонування ЗВ, причому один із них домінуючий. Тому принципом дії ЗВ даного виду називають фізичний ефект або принцип, що покладений в основу його побудови. Принцип дії засобу вимірювань визначається характером основних перетворень вимірювальної інформації. Він часто відображається у назві ЗВ, наприклад, електродинамічний ватметр, термоелектричний термометр.

Елемент засобу вимірювань, призначений для реалізації певного етапу перетворень, називається **перетворювальним**.

Сукупність всіх відповідно з'єднаних (у коло вимірювального перетворення) перетворювальних елементів даного засобу вимірювань утворює його **вимірювальне коло**. З точки зору точності важлива роль першого перетворювального елемента у колі перетворення. Та його частина, що перебуває під безпосередньою дією вимірюваної чи перетворюваної величини, називається **чутливим елементом** або **сенсором** (наприклад, чутливим елементом терморезистивного термометра є терморезистор).

Кола перетворення (вимірювальні кола засобів вимірювань) зображаються графічно їх схемами - **структурними, функціональними і принциповими**. Схема кола перетворення є його графічною моделлю і її не можна називати реальною схемою кола.

**1. Структурна схема** кола перетворення ЗВ відображає (у вигляді відповідно з'єднаних прямокутників) основні частини вимірювального кола, їх функціональне призначення і взаємозв'язок. Ступінь диференціації структурної схеми на структурні елементи залежить від призначення схеми. Прямокутником може бути



зображений окремий перетворювальний елемент, з'єднання елементів або й весь ЗВ.

2. Схема, яка крім структури кола перетворення (вимірювального кола), пояснює також функціонування окремих його ділянок, процеси, що в них відбуваються, називається **функціональною схемою**.

3. Схема, яка відображає повний склад перетворювальних елементів і їх з'єднання, дає уявлення про принцип дії ЗВ та взаємозв'язки між ними (елементами), називається **принциповою, або повною, схемою** кола перетворення ЗВ чи його окремої ділянки.

#### 4.4. Структурні схеми вимірювальних перетворювачів

Схеми включення перетворювачів для отримання електричної величини визначають метрологічні властивості самих приладів для вимірювання неелектричних величин. Ці прилади можна розділити на прилади прямого і компенсаційного перетворень.

Виділяють наступні схеми включення перетворювачів в приладах для вимірювання неелектричних величин:

1. схема прямого однократного перетворення;
2. схема прямого послідовного перетворення;
3. диференціальна схема;
4. компенсаційна схема або схема із зворотним зв'язком (зрівноважувальна);
5. комбінована (змішана) схема перетворення.

##### 1. Метод прямого перетворення

Найпростіші вимірювальні перетворювачі складаються з одного перетворювача (однократне пряме перетворення). **Структурна схема прямого однократного перетворення** реалізується в багатьох вимірювальних перетворювачах з природними вихідними сигналами, наприклад, в термопарах, датчиках тиску та розрідження, в яких вимірювана величина перетворюється безпосередньо в електричний сигнал, переміщення або зусилля.

**Пряме перетворення** вимірювальної інформації характерне тим, що воно відбувається тільки в одному напрямку — від входу до виходу вимірювального кола, без зворотного зв'язку (рис. 4.19).

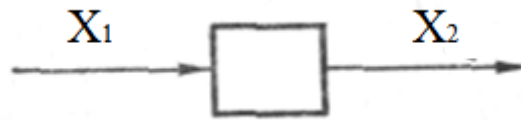


Рис. 4.19. Структурна схема прямого однократного перетворення  
 $X_1$  і  $X_2$ —відповідно вхідна і вихідна величини структурного елемента.

Статична характеристика, похибка та інші властивості в даному випадку повністю визначаються параметрами найчутливішого елемента.

**2. Послідовне пряме перетворення.** В тих випадках, коли первинне перетворення не дозволяє отримати зручний або необхідний для подальшого використання сигнал, застосовують структурні схеми з декількома **послідовними перетвореннями** (рис. 4.20), наприклад, при необхідності отримання уніфікованого вихідного сигналу, перетворення неелектричної величини в електричну, корекції статичної або динамічної характеристики перетворювача. У випадку **послідовного** сполучення (з'єднання) декількох первинних перетворювачів вихідна величина попереднього перетворювача є вхідною величиною наступного. Послідовне з'єднання ВП застосовують в тому випадку, коли однократне перетворення не дає зручного для використання вихідного сигналу.

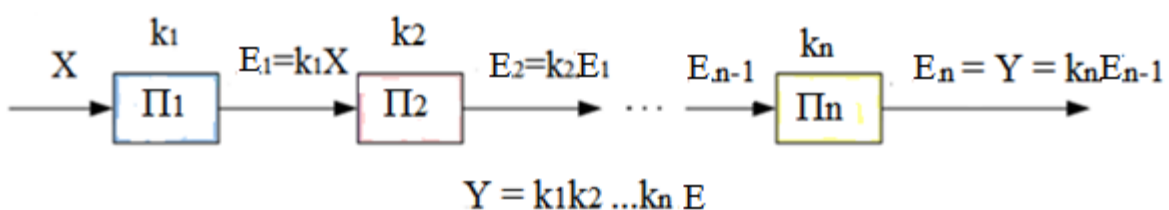


Рис. 4.20. Структурна схема прямого послідовного перетворення:  
 $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$  - перетворювачі;  $k_1, k_2, \dots, k_n$  - коефіцієнти перетворення

У колі послідовного перетворення вимірюваного сигналу прийнято розрізняти первинний перетворювач (чутливий елемент) і проміжні перетворювачі (рис. 4.20). Вимірювана величина впливає

безпосередньо на первинний перетворювач. Проміжні перетворювачі можуть виконувати функції підсилення, лінеаризації, перетворення роду сигналу тощо.

У вимірювальному перетворювачі  $P_1$  відбувається перетворення вимірюваної неелектричної величини  $X$  в електричну  $E$ . Цю величину в загальному випадку можна перетворити у вимірювальному колі ще кілька разів. Потім величина  $E_n = k_n E_{n-1}$  підсилюється при необхідності підсилювачем і надходить на відліковий пристрій, що реєструє значення вхідної величини  $X$ .

У приладах, що використовують метод прямого перетворення (рис. 4.20), результат вимірювання отримується після ряду послідовних перетворень вимірюваної величини у відхилення рухомої частини вимірювача. Ці прилади досить прості, надійні, але вони мають невисокі метрологічні характеристики.

**Пряме перетворення** описується наступним рівнянням перетворення:

$$Y = k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n \cdot X = X \cdot \prod_{i=1}^n k_i,$$

де  $k_i$  - коефіцієнти перетворення відповідних перетворювальних елементів (вимірювальних блоків) засобу вимірювань;

$n$  - кількість перетворювальних елементів.

Тобто чутливість приладу  $k_{пр}$  дорівнює добутку чутливостей (коефіцієнтів перетворення) окремих перетворювачів, що входять до вимірювального кола:

$$k_{пр} = k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n = \prod_{i=1}^n k_i$$

Отже, для збільшення чутливості (сумарного коефіцієнту перетворення) приладу в цілому потрібно прагнути до збільшення чутливості окремих ланок схеми. Проте одночасно з цим збільшується чутливість приладу до зовнішніх додаткових факторів (коливанням напруги живлення, частоти, зміни температури зовнішнього навколишнього середовища тощо), що призводить до появи додаткових похибок приладу. Ці похибки будуть тим більше, чим менше різниця між чутливістю до додаткових факторів і чутливістю до вимірюваної величини. Загальна похибка перетворення дорівнює сумі похибок складових ланок.

Щоб чутливість всього приладу була постійною, тобто функція його перетворення  $\alpha=f(X)$  була строго лінійною, функції перетворення вимірювальних перетворювачів приладу повинні бути лінійними і постійними, а лінійність характеристик окремих вимірювальних перетворювачів, що входять до схеми приладу, повинна бути узгоджена за діапазоном. При цьому слід враховувати, що чутливість кожного перетворювача постійна тільки на певній ділянці характеристики, яка обмежується, з одного боку, межею перетворення, а з іншого - порогом чутливості.

**Межа перетворення перетворювача** - це максимальне значення вхідної величини, яка ще може бути сприйнята перетворювачем без спотворення цієї величини і без пошкоджень перетворювача.

**Поріг чутливості перетворювача** - це мінімальна зміна значення вхідної величини, яке можна виявити за допомогою даного перетворювача.

Абсолютна похибка для приладу з послідовним з'єднанням перетворювачів дорівнює алгебраїчній сумі перерахованих до виходу похибок всіх перетворювачів, що входять до вимірювального кола:

$$\Delta Y = k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n \cdot \Delta E + k_2 \cdot \dots \cdot k_n \cdot \Delta E_1 + \dots + k_n \cdot \Delta E_{n-1}$$

Приведена похибка для такого приладу дорівнює сумі приведених похибок складових:

$$\gamma_{\text{пр}} = \gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n \quad (4.1)$$

а приведена середньоквадратична похибка при відсутності кореляції між складовими визначається за формулою

$$\gamma(\sigma)_{\text{пр}} = \sqrt{\gamma^2(\sigma)_1 + \gamma^2(\sigma)_2 + \dots + \gamma^2(\sigma)_n} \quad (4.2)$$

З наведеного випливає, що похибка вимірювання неелектричної величини  $X$  залежить від похибок всіх послідовно включених перетворювачів.

Сумарна систематична похибка схеми прямого перетворення

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial Y}{\partial k_i} \Delta_i$$

де  $\frac{\partial Y}{\partial k_i}$  - часткова похідна функції  $Y$  по  $i$ -му аргументу, яку називають коефіцієнтом впливу похибки  $i$ -го аргументу  $\Delta_i$  на сумарну похибку  $\Delta Y$ .

Відносна систематична похибка схеми прямого перетворення

$$\varepsilon_Y = \frac{\Delta Y}{Y} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i}{k_i} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i$$

де  $\varepsilon_i = \frac{\Delta_i}{k_i}$  - відносна систематична похибка  $i$ -го перетворювального елемента.

3. В перетворювачах, побудованих за **диференціальною схемою**, вимірювана величина подається одночасно на два ідентичні вимірювальні перетворювачі  $\Pi_1$ , і  $\Pi_2$  (рис.4.21). Основу таких схем складає різницевий перетворювач  $\Pi_3$  - це перетворювач з двома входами, вихідна величина якого пропорційна різниці двох вхідних однойменних сигналів  $E_1$  і  $E_2$  перетворювачів  $\Pi_1$ , і  $\Pi_2$ , тобто  $E = f(E_1 - E_2)$ . Якщо вихідні сигнали мають однакові знаки, то засіб порівняння виконує операцію віднімання, якщо знаки різні – операцію сумування.

Використання в приладах **диференціальної схеми включення** перетворювачів дозволяє істотно поліпшити метрологічні характеристики приладів.

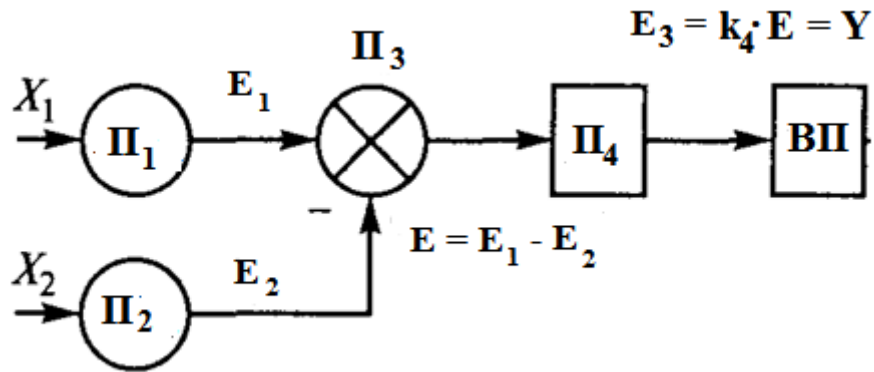


Рис. 4.21. Структурна схема приладу з диференціальним перетворювачем: ВП – вимірювальний пристрій

Тут є два самостійні, як правило, однакові канали послідовно включених перетворювачів, які перебувають в однакових робочих умовах, в один з яких включений робочий перетворювач  $\Pi_1$  а в другий - неробочий перетворювач  $\Pi_2$ . Неелектричні величини  $X_1$  і  $X_2$ , що надходять на вхід перетворювачів  $\Pi_1$ , і  $\Pi_2$ , перетворюються в електричні сигнали  $E_1$  і  $E_2$  і надходять на різницевий перетворювач  $\Pi_3$ . Сигнал  $E = E_1 - E_2$  з виходу різницевого перетворювача йде далі вже по ланцюгу прямого перетворення.

Розглянемо в загальному вигляді властивості диференціальної схеми, вважаючи для простоти, що перетворювачі  $\Pi_1$ , і  $\Pi_2$  мають лінійну функцію перетворення виду (6.4)

$$Y_1 = SX_1 + Y_0; \quad Y_2 = SX_2 + Y_0. \quad (4.3)$$

Тоді функція перетворення диференціального перетворювача запишеться у вигляді

$$Y = Y_1 - Y_2 = S(X_1 - X_2). \quad (4.4)$$

Розглянемо роботу диференціальної схеми включення перетворювачів в двох режимах.

1. Нехай  $X_1 = X$ , а  $X_2$ - однойменна їй фізична величина, що має постійне значення. Тоді функцією перетворення диференціального перетворювача є залежність  $Y = SX$ , а його чутливість дорівнює чутливості одного каналу  $S_d = \frac{dY}{dX} = S$ . Другий канал в цьому випадку використовується для компенсації похибок, пов'язаних з можливими змінами умов експлуатації приладу.

2. Нехай попередньо перетворена вимірювана величина  $X$  діє на обидва канали одночасно, але в протифазі при  $X_0 = \text{const}$

$$X_1 = X_0 + X; \quad X_2 = X_0 - X$$

У цьому випадку функція перетворення диференціального перетворювача має вигляд

$$Y = 2SX, \quad (4.5)$$

а його чутливість  $S_d$  в два рази більше чутливості одного каналу:

$$S_d = 2S, \quad (4.6)$$

і ці співвідношення виконуються тим краще, чим менше вимірювана величина  $X$ .

Розглянемо похибку диференціального перетворювача. Нехай перетворювачі  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$  мають адитивні похибки. В цьому випадку можна записати

$$Y_1 = SX_1 + \Delta Y; \quad Y_2 = SX_2 + \Delta Y.$$

Похибки  $\Delta Y$  обох каналів можна вважати рівними, так як канали однакові і знаходяться в одних і тих же умовах. З виразу (4.4) для функції перетворення диференціального перетворювача видно, що адитивні похибки обох каналів взаємно компенсуються.

Мультиплікативна похибка, що залежить від рівня вхідного сигналу  $X$  тем менша, чим менша вимірювана величина і чим вища і стабільніша лінійність функції перетворення.

Лінійність функції перетворення диференціальної схеми в другому режимі роботи досить висока і при малих  $X$  краще, ніж лінійність функції перетворення перетворювачів  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$ .

Можливі варіанти, коли на один із входів подається еталонний сигнал і порівняння відбувається з ним або інформація перетворюється по одному каналу в реальних умовах, а по другому – в еталонних. При цьому виключається вплив на результат перетворення спотворюючих зовнішніх факторів завдяки співставленню (порівнянню) перетвореної і деякої еталонної величин, які однаково піддаються дії цих факторів.

До переваг диференціальних схем побудови перетворювачів слід віднести наступні:

- а. значне зменшення адитивних (постійних) складових загальної похибки, зумовлених впливом збурюючих факторів;
- б. збільшення чутливості вдвічі при подачі вхідного сигналу на обидва входи;
- в. отримання реверсної статичної характеристики;
- г. зменшення нелінійності статичної характеристики і постійної складової вихідного сигналу порівняно з характеристиками окремих ВП, що входять до диференціальної схеми.

**4. Метод компенсаційного перетворення (структурна схема із зворотним зв'язком).** Схема із зворотним зв'язком, або компенсаційна схема є найбільш досконалою схемою ВП. Вона характеризується високою точністю, універсальністю і малою залежністю коефіцієнта перетворення від зовнішніх впливів. В перетворювачах, побудованих за такою схемою, забезпечується автоматичне зрівноваження контрольованої величини компенсуючою величиною того ж роду безпосередньо або після попереднього перетворення. Тому часто таку структурну схему називають **методом зрівноважувального перетворення**. Зрівноважувальне перетворення полягає в тому, що вимірювана величина зрівноважується іншою величиною тієї ж самої фізичної природи.

Основна перевага такої схеми полягає в її здатності компенсувати значні зміни параметрів вимірювального тракту. Крім того, основна частина енергії, необхідної для роботи перетворювача, береться від додаткових джерел, а не від вимірювального елемента.

У приладах, що використовують метод компенсаційного перетворення (із застосуванням негативного зворотного зв'язку), вдається значно зменшити як адитивну, так і мультиплікативну похибки. Застосування зворотного зв'язку дозволяє створити прилади, що володіють малою статичною та динамічною похибками, і які мають велику вихідну потужність.

Структурна схема такого приладу з компенсацією вимірюваної електричної величини на виході перетворювача приведена на рис. 4.22.



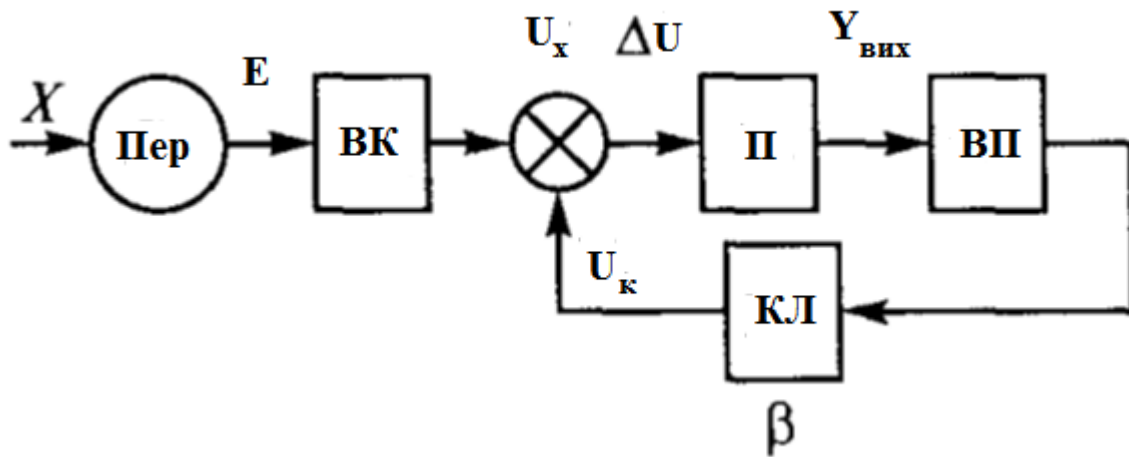


Рис. 4.22. Структурна схема приладу з компенсаційним перетворювачем

Вхідна неелектрична величина  $X$  після її перетворення надходить у вигляді електричного сигналу  $U_x$  на один із входів різницевого перетворювача, на інший вхід якого подається напруга  $U_K$ , що отримується на виході від компенсаційного ланцюга КЛ.

Компенсаційний ланцюг приводиться в дію вихідною напругою підсилювача П з таким розрахунком, щоб різниця  $\Delta U$  була достатньо малою. Мірою вимірюваної неелектричної величини є величина  $Y_{\text{вих}}$ , яка впливає на компенсаційний ланцюг КЛ. Вимірювач ВП в даному випадку є механічним пристроєм, наприклад реохордом, включеним в коло моста або компенсатора. Загальна похибка вимірювання складається тільки з похибок вимірювального перетворювача Пер, вимірювального та компенсаційного ланцюгів.

Перетворювачі із зворотним зв'язком мають високу чутливість і дозволяють легко змінювати параметри налаштування шляхом зміни коефіцієнтів перетворення зворотного кола.

**5. Комбіноване (змішане) перетворення** поєднує особливості прямого і компенсаційного. Структурні схеми реальних вимірювальних перетворювачів можуть представляти собою будь-яку комбінацію з розглянутих вище типових структур.

Різниця між схемою компенсаційного та комбінованого перетворення поглядає у тому, що ланка зворотного зв'язку в компенсаційній схемі охоплює весь канал прямого перетворення, а у комбінованій схемі тільки частину каналу прямого перетворення (можливо неодноразово) (рис. 4.23).

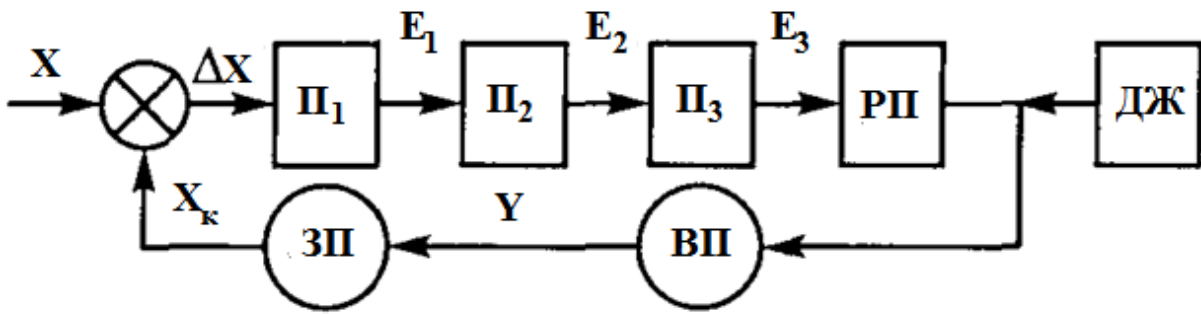


Рис. 4.23. Структурна схема комбінованого (змішаного) перетворення

Тут зворотний перетворювач ЗП перетворює вихідну електричну величину  $Y$  в неелектричну  $X_k$ , однорідну з вимірюваною величиною  $X$ . Різниця між  $X$  і  $X_k$  ( $\Delta X$ ), перетворена в електричну величину  $E$  і підсилена підсилювачем  $\Pi_3$ , впливає на регулюючий пристрій РП, який пов'язаний з джерелом живлення ДЖ. В результаті цього на вимірювальний пристрій ВП і зворотний перетворювач ЗП подається така електрична величина  $Y$ , яка, будучи перетворена в неелектричну величину  $X_k$ , компенсує вимірювану величину  $X$ . Таким чином, весь ланцюг прямого перетворення виявляється охопленим зворотним перетворенням і при  $\Delta X \ll X$  похибка всіх ланок перетворення практично виключається. Загальна похибка вимірювання складається тільки з похибок вимірювача ВП і зворотного перетворювача. Отже, в порівнянні з попереднім випадком, тут замість похибки прямого перетворювача з'являється похибка зворотного перетворювача. Реальний вигравш при переході від схеми на рис. 6.5 до схеми на рис. 6.6 може бути отриманий лише в тому випадку, коли похибка зворотного перетворювача буде менше похибки прямого перетворювача. У приладах зі зворотним зв'язком роль перетворювача зворотного зв'язку виконують прості пристрої, що володіють високою точністю. При цьому високу точність має і прилад в цілому.

Більшість сучасних вимірювань неелектричних величин електричними методами не вимагає допустимої похибки, менше 0,5 ... 1,0%, так як часто похибки самих перетворювачів досить великі. Проте потрібні більш прості пристрої з досить швидким відліком вимірюваної величини безпосередньо за шкалою вимірювального пристрою. У практиці вимірювання неелектричних величин часто застосовують мостові і компенсаційні схеми.

#### **4.5. Спряження первинних перетворювачів з електричними засобами вимірювань**

Велика різноманітність вимірюваних неелектричних величин та параметрів технологічних процесів з одного боку, і прагнення до універсальності засобів вимірювань – з іншого, зумовили необхідність та перспективність побудови комплексних засобів вимірювань за принципом агрегування. Складовими елементами комплексних засобів вимірювань є вимірювальні перетворювачі, пристрої порівняння, пристрої спряження (узгодження, сумісності) – масштабуючі, лінеаризуючі, уніфікуючі перетворювачі, універсальні електричні вимірювальні прилади.

Для того щоб за допомогою існуючих засобів можна було скласти складні інформаційні системи (керування, вимірювання), необхідно, в першу чергу, забезпечити інформаційну сумісність технічних засобів. З цією метою спочатку були уніфіковані, а потім стандартизовані вихідні сигнали ВП.

За виглядом вихідних сигналів розрізняють вимірювальні перетворювачі з природним і уніфікованим вихідними сигналами. Перші являють собою пристрої, в яких здійснюється первинне (зазвичай одноразове) перетворення вимірюваної фізичної величини. Природне формування сигналу забезпечується методом перетворення та конструкцією ВП. Такі перетворювачі найчастіше використовують в пристроях прямого регулювання або при централізованому контролі відносно простих об'єктів.

Для створення відносно складних систем з використанням ЕОМ, при необхідності передачі сигналів на великі відстані використовують перетворювачі природних сигналів в уніфіковані. Для цієї мети розробляються спеціальні нормуючі перетворювачі, параметри вихідних сигналів яких наведені на рис. 4.24.

Окрему групу складають перетворювачі з дискретним релейним вихідним сигналом, які мають на виході контактну групу, що змінює своє положення при досягненні вимірюваною величиною заданого значення. Їх використовують для позиційного регулювання і сигналізації.

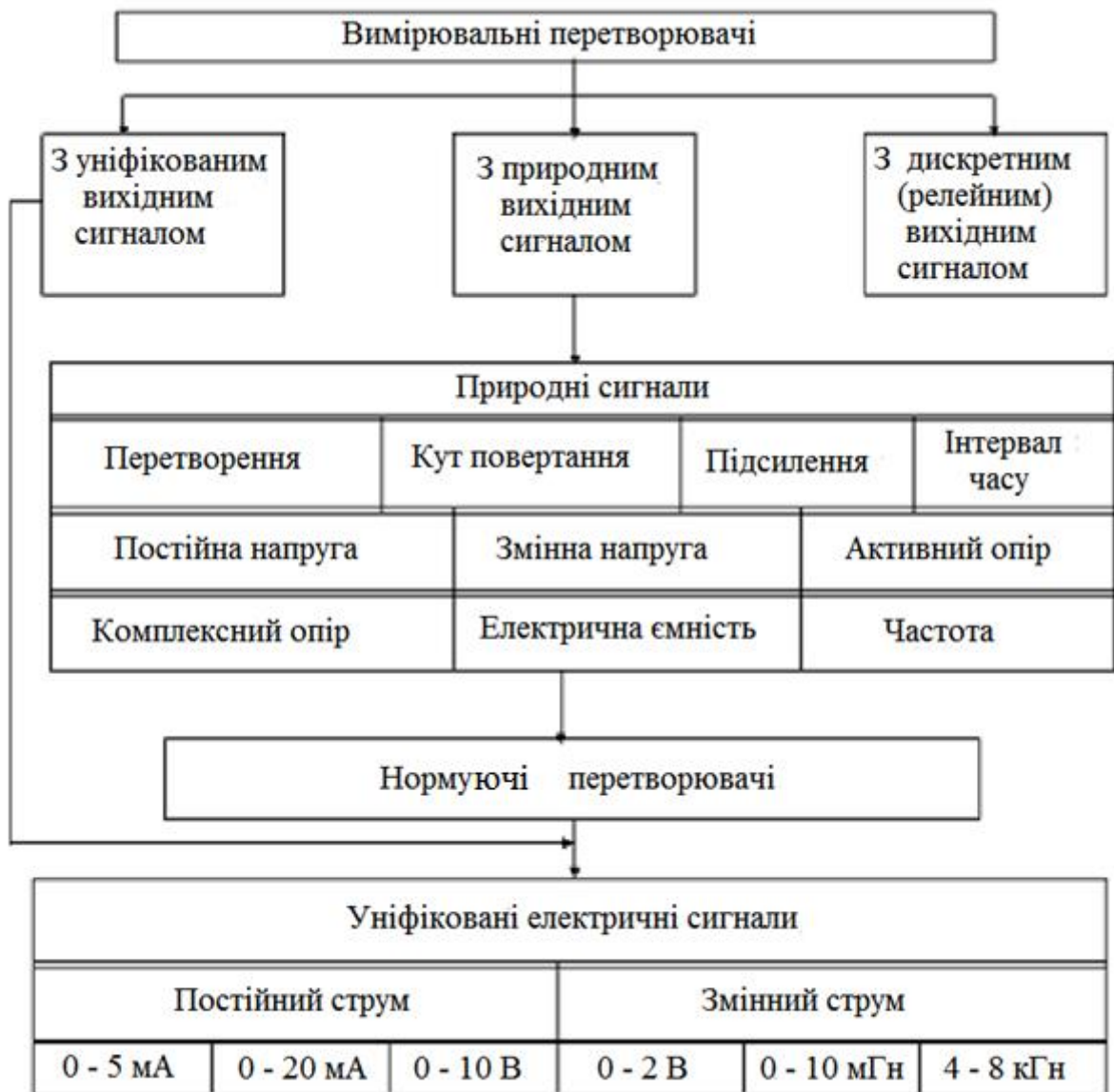


Рис. 4.24. Параметри вихідних сигналів нормуючих перетворювачів

Як вимірювальні перетворювачі, так і пристрої спряження, що входять до складного засобу вимірювань, мають свої метрологічні, конструктивні, експлуатаційні та інші технічні характеристики. Завдання спряження (сумісності) цих елементів полягає у виробленні єдиних вимог до цих елементів, виконання яких забезпечує їх сумісність.

Закладені в Державній системі приладів (ДСП) загальні для всіх виробів поняття сумісності можна сформулювати наступним чином.

1. Найперше повинна забезпечуватись інформаційна сумісність, щоб забезпечити узгодженість вхідних та вихідних сигналів окремих елементів, зокрема, робочих діапазонів. Цього можна досягти

уніфікацією сигналів первинних перетворювачів або застосуванням допоміжних узгоджувальних пристроїв.

**Інформаційна сумісність** – сукупність стандартизованих характеристик, яка забезпечує узгодженість (спряження) сигналів зв'язку за видами та номенклатурою, їх інформативними параметрами, рівнями, просторово - часовими і логічними співвідношеннями та типами логіки.

**Інформаційна сумісність** – це така властивість засобів, що спрягаються, яка забезпечує узгодженість їх вхідних та вихідних сигналів, зокрема, їх робочих діапазонів. Це досягається уніфікацією сигналів первинних перетворювачів або застосуванням допоміжних узгоджувальних пристроїв, що вмикаються поміж узгоджуваними засобами вимірювань (перетворювачем та електричним вимірювальним приладом).

Для всіх виробів ДСП прийнято уніфіковані сигнали зв'язку та єдині інтерфейси, які представляють собою сукупність програмних та апаратних засобів, що забезпечують взаємодію пристроїв в системі.

**2. Метрологічна сумісність** – це сукупність вибраних метрологічних характеристик та властивостей засобів вимірювань, що забезпечують порівнянність (співставленість) результатів вимірювань і можливість розрахунку похибки результатів вимірювань при роботі технічних засобів у складі системи. Це досягається використанням єдиної математичної моделі похибок окремих засобів вимірювань, єдиного способу нормування та подання одноіменних характеристик, а також єдиних пристроїв узгодження метрологічних характеристик.

Отже, необхідною умовою забезпечення метрологічної сумісності є методологічна сумісність аналізу, нормування, синтезу, ідентифікації та прогнозування похибок засобів, що спрягаються.

**3. Засоби вимірювань повинні задовольняти вимоги конструктивної сумісності.** **Конструктивна сумісність** – це сукупність властивостей, що забезпечують узгодженість конструктивних параметрів та механічне спряження технічних засобів, а також виконання ергономічних норм та естетичних вимог при спільному використанні.

**4. Експлуатаційна сумісність** – це сукупність властивостей, що забезпечують працездатність і надійність функціонування технічних засобів при спільному використанні у виробничих умовах (стійкість

до дії зовнішніх чинників), а також зручність обслуговування, настройки та ремонту.

**5.** Засоби вимірювань у системі повинні також задовольняти вимоги енергетичної сумісності. **Енергетична сумісність** – це сукупність властивостей, що забезпечують узгодженість вимог до параметрів джерел живлення.

Первинні вимірювальні перетворювачі переважно мають нелінійну функцію перетворення. Досягти лінійності перетворення можна конструкторсько-технологічними прийомами, зокрема використанням спеціальних матеріалів, застосуванням відповідної технології або спеціального конструктивного виконання.

Сукупність конструкторсько-технологічних, математичних, структурних та інших методів, спрямованих на забезпечення із заданою точністю лінійної функції перетворення, називають лінеаризацією функції перетворення.

## РОЗДІЛ 5. ПАРАМЕТРИЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

### 5.1. Загальні поняття про параметричні перетворювачі

Первинні вимірювальні перетворювачі неелектричних величин в залежності від виду вихідного сигналу поділяють на дві великі групи: **параметричні і генераторні**

Якщо вхідна неелектрична величина перетворюється в один з параметрів електричного кола: опір  $R$ , індуктивність  $L$ , взаємну індуктивність  $M$ , ємність  $C$ , то перетворювач називається **параметричним**. Для нормальної роботи параметричних перетворювачів необхідне додаткове джерело живлення (електричної енергії), що забезпечує утворення вихідного сигналу перетворювача. Отже, особливістю роботи параметричних перетворювачів є потреба в додатковому джерелі енергії.

Якщо вхідна неелектрична величина перетворюється в електрорушійну силу (ЕРС), напругу, струм, електричний заряд, то перетворювач називається **генераторним**.

До **параметричних вимірювальних перетворювачів** належать:

1. Резистивні (резисторні) датчики, що використовують залежність опору реостата від положення його повзунка, який переміщається під впливом вимірюваної величини.

2. Датчики контактного опору, у яких використовується залежність контактного опору між поверхнями двох твердих тіл (наприклад, вугільних шайб) від тиску одного тіла на інше.

3. Тензометричні (тензорезисторні) датчики, що використовують явище зміни опору провідника при його розтягуванні або стисканні (тобто при деформаціях чутливого елемента датчика).

4. Терморезисторні (терморезистивні) датчики, в основі дії яких лежить властивість провідника змінювати свій опір залежно від температури.

5. Електролітичні датчики (опору), що використовують залежність опору розчину електроліту від концентрації розчину.

6. Фоторезисторні (фотоелектричні) датчики, що використовують явище зміни опору напівпровідника залежно від освітлення.

7. Ємнісні датчики, дія яких базується на залежності електричної ємності конденсатора від розмірів і взаємного розташування його обкладок, а також від діелектричної проникності його діелектрика

8. Індуктивні датчики, засновані на залежності їхньої індуктивності від величини немагнітних зазорів, від довжини і площі перетину осердь, а також від взаємного розташування частин магнітопроводу і обмоток датчиків.

9. Магнітострикційні датчики в яких параметр, що контролюється, перетворюється в інтервал часу або частоту.

10. Магнітопружні датчики, що використовують залежність індуктивності котушки від механічної напруги феромагнітного матеріалу, що утворює осердя котушки.

11. Іонізаційні датчики, засновані на залежності опору газового розрядного проміжку від ступеня іонізації газу.

12. Електронні (механотронні) датчики, засновані на залежності анодного струму електронних ламп від відстані між їх електродами;

Розглянемо основні типи **параметричних** вимірювальних перетворювачів та їх характеристики.

## 5.2. Резистивні перетворювачі

Параметричні перетворювачі, в яких вихідною величиною є зміна електричного опору, називаються **резистивними**.

В основу принципу дії таких перетворювачів покладене явище зміни електричного опору:

1. або внаслідок переміщення повзунка реостата,
2. або внаслідок тензоефекту в тензорезистивних перетворювачах.

До цієї групи належать реостатні перетворювачі, перетворювачі контактного опору, контактні резистивні перетворювачі, фоторезистивні, кондуктометричні (резистивні електролітичні) перетворювачі, термо- і тензорезистивні.

### 5.2.1. Реостатні перетворювачі

**Реостатним** називають резистивний перетворювач, виконаний у вигляді реостата, повзунок якого переміщується під дією вхідної неелектричної перетвореної (вимірюваної) величини. Вхідною



величиною перетворювача є переміщення повзунка, яке може бути або кутовим, або лінійним, а вихідною – активний опір, розподілений лінійно або за певним законом по шляху рухомого контакту (повзунка), який перетворюється вимірювальним ланцюгом в напругу (рис 5.1).

Принцип дії реостатних перетворювачів заснований на зміні електричного опору провідника під впливом вхідної величини – механічного переміщення.

Реостатний перетворювач (рис.5.1) являє собою реостат, рухомий контакт якого переміщається під дією вимірюваної неелектричної величини. Перетворювач складається з обмотки (дроту), намотаної на каркас, і рухомої щітки. Опір майже всіх реостатних перетворювачів змінюється не плавно, а ступінчасто. Це призводить до виникнення похибки дискретності  $\Delta_D$ , яка зменшується із збільшенням кількості витків на одиницю вимірюваного переміщення.

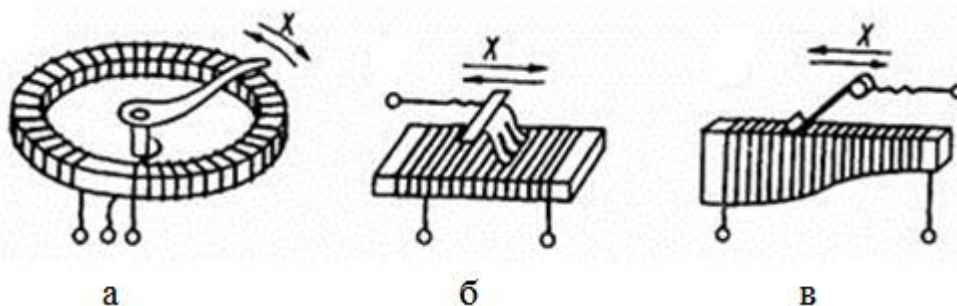


Рис. 5.1. Реостатні перетворювачі для кутових і лінійних переміщень:

а – для кутових переміщень; б, в – для лінійних переміщень

Як матеріал дроту використовують манганін, константан, ніхром та інші матеріали, що мають високий питомий опір. У відповідальних випадках, коли вимоги до зносостійкості контактних поверхонь дуже великі або коли контактні тиски дуже малі, застосовують сплав платини з іридієм, паладієм, рубідієм, рутенієм або осмієм. Провід реостата повинен бути покритий або емаллю, або шаром окислів для ізоляції сусідніх витків один від одного. Повзунки виконують з двох-трьох дротів (платина з іридієм) з контактним натисканням 0,003...0,005Н або пластинчастими (зі срібла, фосфористої бронзи) з натисканням 0,05 ... 0,10Н. Контактну поверхню намотаного дроту

полірують. Ширина контактної поверхні дорівнює двом-трьом діаметрам дроту.

Каркаси виготовляють у виді пластин, циліндрів, кілець тощо. Каркас реостатного перетворювача зазвичай виготовляють з текстоліту, пластмаси або алюмінію, покритого ізоляційним лаком або оксидною плівкою товщиною до 10 мкм, що володіє досить хорошими ізоляційними властивостями. Форми каркасів дуже різноманітні: вони можуть бути у вигляді плоскої або циліндричної пластини, плоского або циліндричного кільця, плоского сегмента тощо. Реактивний опір реостатних перетворювачів дуже малий, і ним зазвичай можна знехтувати при частотах звукового діапазону.

Вимірювальні ланцюги, в які включаються реостатні перетворювачі, живляться переважно постійною напругою, але можуть мати і джерела змінної напруги. Напруга живлення перетворювача визначається його допустимою потужністю і опором.

Електрична схема найпростішого перетворювача з рівномірною намоткою дроту наведена на рис.5.2, а.

При  $R_H = \infty$  напруга  $U_0$  розподіляється рівномірно по довжині реостата  $l$  і вихідний сигнал перетворювача

$$U_{\text{вих}} = \frac{U_0}{l} x = kx, \quad (5.1)$$

де  $k = \frac{U_0}{l}$  — коефіцієнт перетворювача;  $x$  — переміщення повзунка.

Рівняння (5.1) показує, що характеристика перетворювача - лінійна функція.

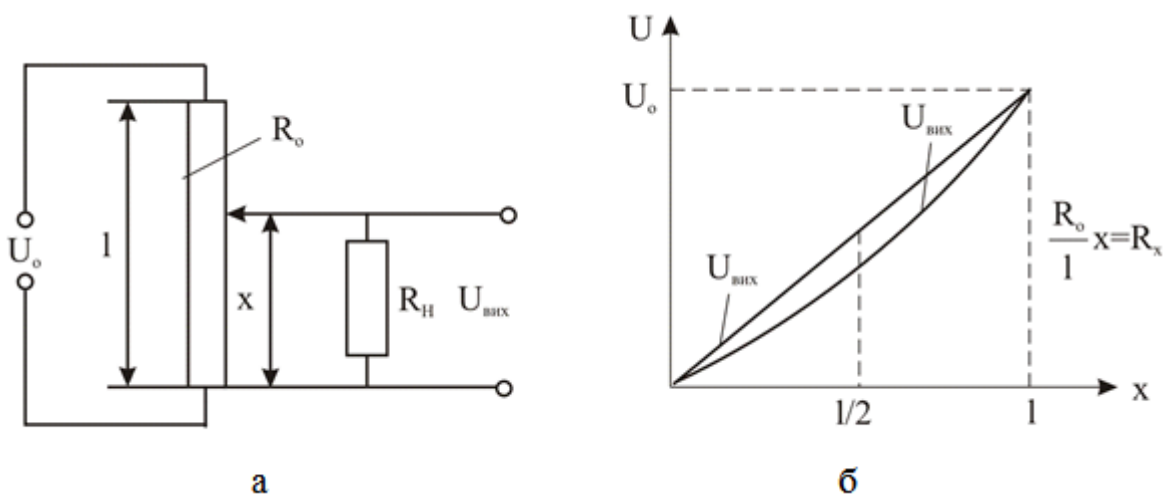


Рис. 5.2. Електрична схема (а) і характеристики (б) реостатного перетворювача.

При підключенні до виходу перетворювача навантаження  $R_H$  спад напруги уздовж реостата буде нерівномірним, тому що паралельно опорів  $R_x = \frac{R_0}{1}x$  підключається опір  $R_H$ .

У цьому випадку еквівалентний опір ланцюга

$$R_e = R_0 - R_x + \frac{R_x R_H}{R_x + R_H}, \quad (5.2)$$

де  $R_0$  — повний опір реостата.

Вихідний сигнал перетворювача з врахуванням шунтуючої дії навантаження

$$U_{\text{вих}}^* = I \frac{R_x R_H}{R_x + R_H} = \frac{U_0}{R_e} \frac{R_x R_H}{R_x + R_H}. \quad (5.3)$$

Підставивши у вираз (5.3) значення  $R_e$  із рівняння (5.2) і позначивши  $\frac{R_0}{R_H} = a$ , одержуємо

$$U_{\text{вих}}^* = \frac{U_0 \cdot x}{1 + a \cdot x - \frac{a \cdot x^2}{1}}. \quad (5.4)$$

З рівняння (5.4) випливає, що з врахуванням навантаження характеристика перетворювача нелінійна. Для зручності аналізу рівняння (5.4) перетворимо до виду

$$U_{\text{вих}}^* = kx(1 - \delta), \quad (5.5)$$

Щоб визначити при якому значенні вхідного сигналу  $x$  похибка  $\delta$  досягає максимуму, відшукаємо похідну  $\frac{d\delta}{dx}$  і прирівняємо її до нуля. В результаті знайдемо, що  $\delta$  досягає максимального значення  $\delta_{\text{макс}}$  при  $x = \frac{1}{2}$ . Підставляючи  $x = \frac{1}{2}$  в вираз для  $\delta$ , одержимо

$$\delta_{\text{макс}} = \frac{\alpha}{4 + \alpha}. \quad (5.5)$$

З рівняння (5.5) випливає, що при  $\alpha = 0,04$  максимальне

відхилення  $U_{\text{вих}}^*$  від лінійної залежності (5.1) не перевищує 1%. Тому характеристику реостатного перетворювача при  $\alpha > 0,04$  (або  $R_{\text{н}} > 25 R_0$ ) можна вважати лінійною і користуватися залежністю (5.1), тому що основна похибка перетворювача не перевищує 1%. Характеристики реостатного перетворювача, побудовані за рівняннями (5.1) і (5.4), наведені на рис. 5.2,б.

Зона нечутливості перетворювача дорівнює діаметрові дроту, тому що мінімальна зміна вихідної напруги не може бути меншою спаду напруги на одному витку реостата.

Преваги реостатного перетворювача: відносна простота конструкції, можливість одержання високої точності перетворення та значних за рівнем вихідних сигналів.

Основний недолік реостатних перетворювачів — наявність ковзаючого контакт, перехідний опір якого вносить додаткову похибку і знижує надійність, необхідність відносно великих переміщень рухомого контакту, наявність в деяких випадках значного зусилля для його переміщення. На точність перетворення може впливати і температура за рахунок зміни питомого опору проводу обмотки при зміні температури навколишнього середовища. Однак використання потенціометричної схеми включення датчика дозволяє компенсувати цей вплив температури.

Оскільки в переміщення можуть бути перетворені за допомогою механічних пружних елементів багато неелектричних величини, то реостатні перетворювачі використовують також для вимірювання тиску, рівня, витрати, сили тощо. Найбільш широко реостатні перетворювачі застосовуються в приладах для вимірювання рівня - так званих реостатних рівнемірах, використовуваних в літаках, автомобілях тощо.

Приклади використання реостатних перетворювачів: реостатний рівнемір, котрий застосовують в бензобаках для визначення кількості палива (повзунок перетворювача пов'язаний з поплавком у баку); пружинний акселерометр - датчик прискорення, що використовується для вимірювання віброприскорень і вібропереміщень.

**Перетворювачі контактного опору** (рис. 5.3) побудовані на залежності перехідного опору між стиковими електропровідними елементами від зусиль їх стискання або деформації.

Існує два різновиди контактних перетворювачів:

- перемикаючі;

· резистивні перетворювачі сили.

**Контактними перемикаючими** називаються вимірювальні перетворювачі, в яких вимірюване механічне переміщення перетворюється в замкнутий або розімкнутий стан контактів, які керують електричним колом. Природною вхідною величиною перетворювачів є просторове переміщення.

Найпростіший комутаційний перетворювач (рис. 5.3) є однограничним і має одну пару контактів 4 і 5, замикання яких відбувається в залежності від вимірюваного переміщення, наприклад зміни розміру виробу 1.

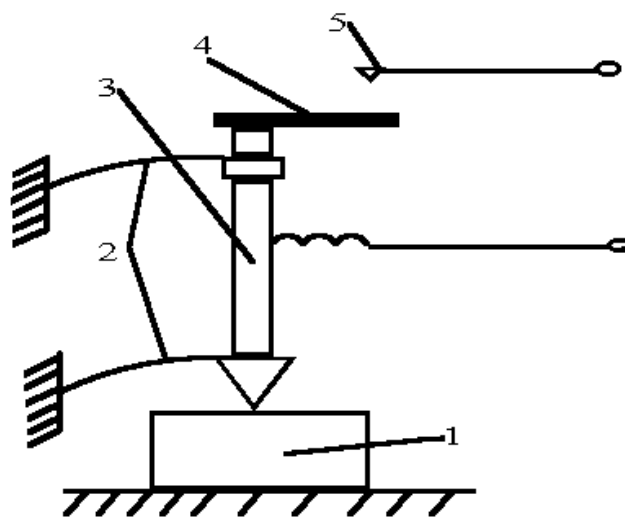


Рис. 5.3. Контактний перемикаючий перетворювач:  
1- об'єкт вимірювання; 2 – пружина; 3 –штук; 4, 5 – контакти.

При збільшенні розміру виробу штук 3 переміщається і закріпленний на ньому контактуючий елемент 4 входить в дотик з контактом 5. При цьому активний опір між контактами змінюється від нескінченності до малої величини, яка визначається значенням контактного опору.

Конструктивно вимірювальний штук закріплюється на плоских пружинах 2. Похибка спрацьовування перемикаючих перетворювачів становить 1-2 мкм.

Як електропровідні елементи для таких перетворювачів використовують, наприклад, електропровідний папір, гуму та інші електропровідні матеріали з питомим об'ємним опором  $\rho \rightarrow 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , оскільки перехідний опір набагато більший за об'ємний опір

контактувальних елементів. Одним з перших первинних перетворювачів цього типу є вугільний мікрофон.

**Контактні резистивні перетворювачі** (резистивні перетворювачі сили) (рис. 5.4) - це перетворювачі, в яких використовується зміна перехідного опору контакту при різному зусиллі притиску. З вугільних пластинок завтовшки близько 1 мм набирають стовпчик, щоб прикладене осьове зусилля змінювало перехідний опір контакту, який, в основному, і становить активний опір стовпчика пластинок (рис. 5.4).

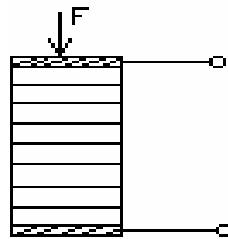


Рис. 5.4. Резистивний перетворювач сили

Для загального активного опору стовпа справедливий вираз

$$R = R_k + R_0 = R_0 + \frac{k}{F} \quad (5.6)$$

де  $R_k$  - контактний опір між пластинками;  $R_0$  - опір пластинок;  $k$  - коефіцієнт пропорційності;  $F$  - сила.

Зміна опору в залежності від прикладеного навантаження можна представити у вигляді:

$$\Delta R = -k \frac{\Delta F}{F(F+\Delta F)} \quad (5.7)$$

Поряд з простотою конструктивного виконання такі перетворювачі характеризуються високою чутливістю. Однак їм властиві відносно великі похибки вимірювань (нестабільність нуля, нестабільність, обумовлена старінням).

Недоліком таких перетворювачів конструкції є спрацювання контактів, ненадійність роботи при наявності вібрацій, низька відтворюваність і старіння пластинок.

Резистивні перетворювачі сили використовують у тих випадках, коли немає необхідності в неперервному вимірюванні неелектричної величини, а потрібно визначити тільки досягнення заданого рівня.

### 5.2.2. Тензометричні перетворювачі (тензорезистори)

Принцип роботи тензорезисторів ґрунтується на явищі тензорезистивного ефекту, суть якого полягає в зміні активного електричного опору провідників і напівпровідників при їх механічній деформації.

При деформації провідника змінюються його довжина  $l$  і площа поперечного перерізу  $S$ . Деформація кристалічної решітки призводить до зміни питомої опору  $\rho$ . Ці зміни призводять до зміни опору провідника:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Основною характеристикою тензоефекту матеріалу є коефіцієнт відносної тензочутливості  $k$ . Він визначається як відношення відносної зміни опору  $R$  до відносної зміни довжини  $l$  провідника:

$$k = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}, \quad (5.8)$$

де  $\frac{\Delta R}{R}$  - відносна зміна опору провідника;  $\frac{\Delta l}{l}$  - відносна зміна довжини провідника.

Основною вимогою до матеріалу тензорезисторів є якнайбільше значення коефіцієнта відносної чутливості  $k$ . Це пояснюється тим, що відносна зміна опору  $\frac{\Delta R}{R}$  більшості тензорезисторів дуже мала, вона не перевищує  $(5...7) \cdot 10^{-3}$ . Нагрівання перетворювача може викликати зміну його опору, порівняну з робочою зміною. Тому другою не менш важливою вимогою до матеріалу тензоперетворювачів є можливо менша величина температурного коефіцієнта опору матеріалу. Третя вимога - високий питомий опір матеріалу, з якого виготовляється перетворювач, так як необхідно прагнути до можливо меншої площі, займаної перетворювачем.

Матеріали, які найбільш часто застосовуються для виготовлення тензорезисторів наступні: константан, ніхром, манганин, нікель,

хромель, вісмут, титаноалюмінієвий сплав, напівпровідникові матеріали (сполуки германію, кремнію тощо).

Як приклад розглянемо деформацію розтягування провідного стрижня квадратного перерізу (рис. 5.5, а)

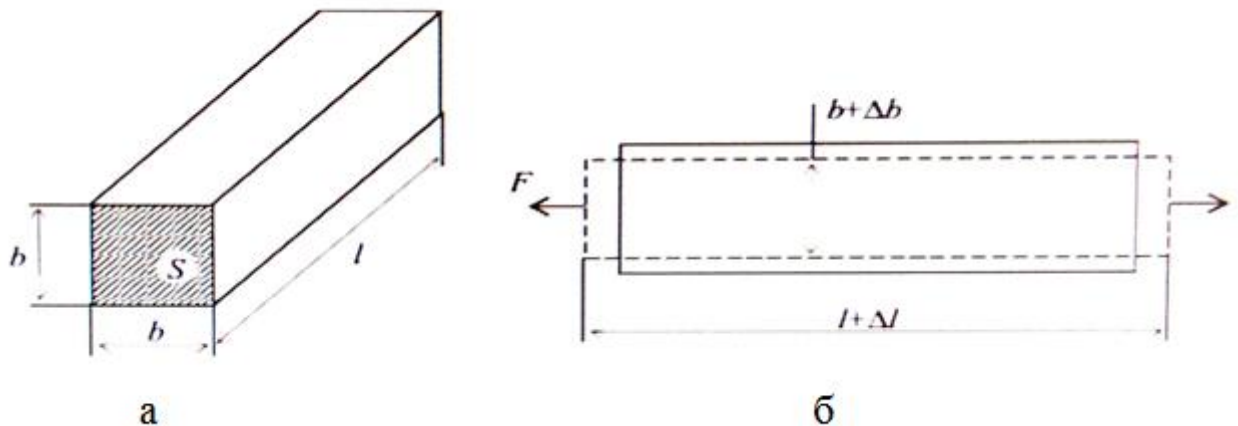


Рис. 5.5. Деформація розтягування провідника

Електричний опір такого стрижня довжиною  $l$ , з площею поперечного перерізу  $S$  і питомим електричним опором матеріалу  $\rho$  визначається виразом:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (5.9)$$

Зміна опору стрижня при механічному впливі на нього пояснюється зміною геометричних розмірів (довжини, діаметра) і питомого опору матеріалу.

Зміна опору в результаті деформації знаходиться диференціюванням (5.9):

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial \rho} \Delta \rho + \frac{\partial R}{\partial l} \Delta l + \frac{\partial R}{\partial S} \Delta S = R \left( \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} \right) \quad (5.10)$$

Для стрижня квадратного перетину:

$$S = b^2; \quad \frac{\Delta S}{S} = \frac{1}{b^2} \frac{\Delta S}{\partial b} \Delta b = 2 \frac{\Delta b}{b} \quad \text{и} \quad \Delta R = R \left( \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - 2 \frac{\Delta b}{b} \right) \quad (5.11)$$

В діапазоні пружних деформацій зміна поперечного розміру стрижня пов'язано зі зміною його поздовжнього розміру (рис. 5.5, б) співвідношенням:



$$\frac{\Delta b}{b} = -\mu \frac{\Delta l}{l} \quad (5.12)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт Пуассона, що пов'язує поздовжні і поперечні деформації.

В результаті підстановки (5.12) в (5.11) отримуємо:

$$\Delta R = R \left[ \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\mu) \right]. \quad (5.13)$$

Електричні властивості провідників (металів, електролітів) практично не залежать від прикладеної до них механічної напруги. Тому першою складовою у виразі (5.13) можна знехтувати. В цьому випадку:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} \ll \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\mu); \Delta R \approx R \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\mu); k = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} \approx (1 + 2\mu) \quad (5.14)$$

Для провідників, що знаходяться в твердому стані  $\mu = 0,24 \dots 0,4$ . Відповідно значення коефіцієнта відносної тензочутливості становить  $k = 1,48 \dots 1,8$ .

Для провідників, що знаходяться в рідкому стані (ртуть, електроліти) характерна незмінність об'єму при деформації. Тому  $\mu = 0,5$ , а значення коефіцієнта відносної тензочутливості становить  $k \approx 2$ .

Для напівпровідникових матеріалів характерна сильна залежність питомого опору від деформації, оскільки механічний вплив викликає різку зміну числа вільних електронів в напівпровіднику. В цьому випадку:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} \gg \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\mu); \Delta R \approx R \frac{\Delta \rho}{\rho}; k = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} \approx \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta l/l} \quad (5.15)$$

Значення коефіцієнта відносної тензочутливості для напівпровідників визначається відносною зміною питомого електричного опору матеріалу і знаходиться в межах  $k = 40 \dots 200$ , що багаторазово перевищує відповідний показник для провідників. Недоліком напівпровідникових тензоперетворювачів є сильна залежність тензочутливості від температури.

Основна область застосування тензорезистивних перетворювачів - вимірювальне перетворення в електричний сигнал сил, механічних напруг, деформацій. Вимірюваний механічний вплив може прикладатися безпосередньо до тензоперетворювача, що виконує в цьому випадку одночасно роль пружного елемента (рис. 5.5).

В іншому варіанті тензорезистор наклеюється на поверхню пружного елемента, що деформується, наприклад, на досліджувану деталь (рис. 5.6).

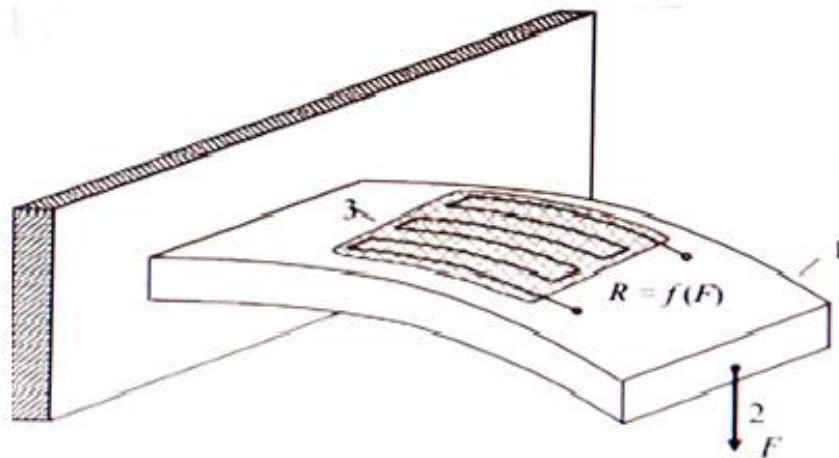


Рис. 5.6. Тензорезистивний вимірювальний перетворювач, що наклеюється:

1 - пружний елемент (досліджувана деталь), 2 - сила, що перетворюються; 3 - тензорезистор.

В цьому випадку можна умовно вважати, що перетворення механічної дії в електричний сигнал відбувається в два етапи. Перший етап - проміжне перетворення механічної дії в деформацію пружного елемента з закріпленням на його поверхні тензоперетворювачем. Другий етап - перетворення деформації останнього в електричний сигнал (зміна активного опору).

У практиці електричних вимірювань тензоефект використовується у двох напрямках.

По-перше, це тензоефект в провіднику чи напівпровіднику в результаті об'ємного стискання. Вхідною величиною таких перетворювачів є тиск газу чи рідини, що їх оточують. На цьому принципі будуються перетворювачі високих та надвисоких тисків, які

виготовляються у вигляді безкаркасної обмотки з манганінового дроту. Для низьких тисків застосовують германієвий чи кремнієвий тензорезистор.

Суть другого напрямку полягає у використанні тензоефекту, викликаного розтягненням чи стискуванням тензочутливого матеріалу. Перетворювачі цієї групи можуть бути виконані у вигляді наклеюваних дротяних тензоперетворювачів, фольгових, плівкових чи так званих навісних тензоперетворювачів.

На даний час найбільш широко поширені дрові, фольгові і плівкові тензорезистори.

Провідникові тензорезистори поділяються на **дротові і фольгові**.

**Тензочутливі дрові перетворювачі** (дротові тензорезистори) являють собою тонкий зигзагоподібний дріт 2 з константану діаметром 0,01...0,05 мм, покладений між двома електроізоляційними гнучкими підкладками 1. До кінців дроту припаяні вихідні кінці 3 (рис. 5.7, а). Залежність опору  $R$  від відносної деформації  $l$  з достатньою точністю описується лінійним двочленом  $R = R_0(l/k + 1)$ , де  $R_0$  - опір тензорезистора без деформації. Тензочутливість датчика з константану становить  $k \approx 2$ . Нелінійність функції перетворення не перевищує 1%.

Широко застосовувані нині наклеювані дрові тензорезистори - це тонкий зигзагоподібний дріт 1 (тензочутливий елемент), який наклеюється на еластичну смужку (підкладку) (рис. 5.7, а). Тензорезистори наклеюються на досліджуваний об'єкт так, щоб вони разом із ним зазнавали деформації стискання або розтягування.

Перетворювач встановлюють таким чином, щоб напрямок очікуваної деформації збігався з поздовжньою віссю дрових ґрат. Як матеріал для перетворювача звичайно використовують константановий дріт, а для підкладки – тонкий папір (0,03...0,05 мм) і плівку лаку або клею (БФ-2, БФ-4, бакелітовий та ін.).

**Фольгові тензорезистори** являють собою тонку лакову плівку, на яку нанесена фольгова тензочутлива решітка (ґратка) з константану товщиною 4-12 мкм (рис. 5.7, б.). Замість дроту в них використовується фольга. Решітка зверху покрита лаком. Фольгові тензорезистори нечутливі до поперечної деформації внаслідок малого опору перемичок між тензочутливими елементами.

Дротяний тензорезистор має аналогічну конструкцію, але решітка виконана з константанового дроту діаметром 20-50 мкм. Однак за метрологічними і експлуатаційними характеристиками

краще фольгові перетворювачі. Номінальна опір фольгових і дротяних тензорезисторів становить 100-800 Ом, напівпровідникових - 50-800 Ом.

Великою перевагою фольгових перетворювачів є можливість збільшувати переріз кінців перетворювача, що дозволяє надійно припаювати (приварювати) виводи. Крім того, фольгові перетворювачі можна виготовляти з більшим перерізом, ніж дрові, що дає можливість пропускати через перетворювачі великі струми і, отже, робити прилади з тензоперетворювачами більш чутливими. При співвідношенні ширини смужки до товщини, що дорівнює 10, допустимий струм в перетворювачі з фольги в 1,4 рази більше, ніж в перетворювачі з дроту того ж перерізу.

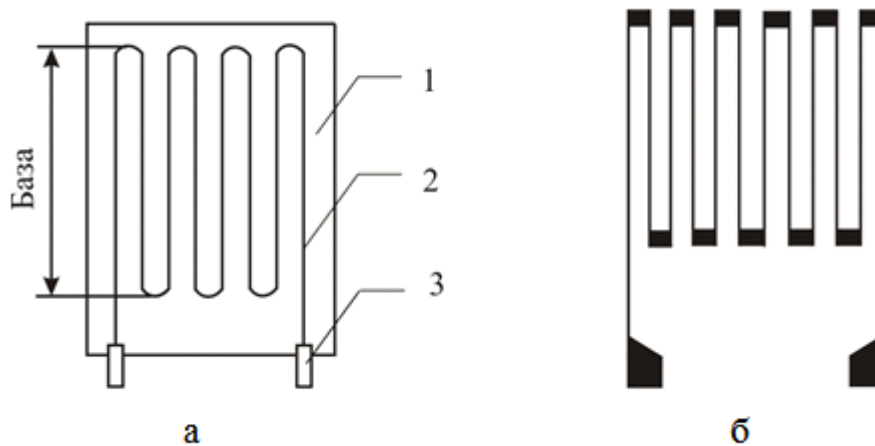


Рис. 5.7. Принципові схеми тензорезисторних перетворювачів:  
а — дрового; б — фольгового.

Широкого поширення набули також **плівкові тензорезистори**, що виготовляють шляхом сублимації тензочуттєвого матеріалу з наступним осадженням його на підкладку. Плівкові тензорезистори виготовляють методом вакуумної сублимації тензочутливого матеріалу з подальшою конденсацією його на підкладку.

Для виготовлення перетворювачів використовують дріт з наступних матеріалів: константан, ніхром, манганін, нікель, хромель, вісмут, титаноалюмінієвий сплав і напівпровідники. Основною вимогою до матеріалу є мале значення температурного коефіцієнта електричного опору, оскільки, як правило, зміна опору перетворювачів при дослідженні деформації деталей порівнянна зі зміною опору перетворювачів при зміні температури.

Тензорезистори спеціальним клеєм наклеюються на поверхню випробовуваної деталі або арматури так, щоб напрямок їхньої бази збігався з напрямком очікуваної деформації. Деформації, що сприймаються тензорезистором змінюють розміри чутливого елемента і його питомий опір.

У тих випадках, коли потрібна висока чутливість, застосовують **напівпровідникові тензочутливі перетворювачі** (полікристалічні з порошкоподібного напівпровідника та монокристалічні з кристала кремнію).

Напівпровідникові тензорезистори являють собою тонку пластинку монокристала кремнію або германію довжиною 5-10 мм, шириною 0,2-0,8 мм, до кінців якої спеціальним методом прикріплюються вивідні провідники. Коефіцієнт тензочутливості напівпровідникових тензорезисторів вище і знаходиться в межах 55-130. Однак сталість коефіцієнта  $k$  в діапазоні вимірювань, тобто лінійність характеристики перетворення, досягається лише у вузькому діапазоні вимірюваних значень механічної напруги. До того ж напівпровідникові тензодатчики мають погану відтворюваність характеристик. В даний час випускаються інтегральні напівпровідникові тензорезистори, що утворюють міст або напівміст з використанням елементів термокомпенсації. Якщо для металів коефіцієнт тензочутливості визначається в основному зміною геометричних розмірів перетворювача, то для напівпровідників - п'єзорезистивним ефектом.

Оскільки чутливість напівпровідникових тензорезисторів у десятки разів вище, ніж у металевих, і, крім того, інтегральна технологія дозволяє в одному кристалі кремнію формувати одночасно як тензорезистори, так і мікроелектронний блок обробки, то в останні роки отримали переважний розвиток інтегральні напівпровідникові тензочутливі перетворювачі.

Недоліками напівпровідникових тензорезисторів є великий розкид параметрів, необхідність індивідуального градування, сильна залежність опору від температури.

Основною характеристикою тензометричного перетворювача є коефіцієнт відносної тензочутливості  $k$ , що визначається як відношення відносної зміни опору до відносної зміни довжини провідника (див. (5.8)).

Оскільки деформація тензорезистора і досліджуваної деталі однакова, то (5.8) можна звести до виду

$$\frac{\Delta R}{R} = S \frac{\Delta l}{l} = S \frac{\sigma}{E}, \quad (5.16)$$

де  $\sigma$  — механічна напруга в місці наклейки тензорезистора;  $E$  — модуль пружності матеріалу досліджуваної деталі.

Для того, щоб у матеріалі чутливого елемента тензорезистора не відбулись незворотні зміни внаслідок великих механічних напружень, допустиме значення напружень у них не повинно перевищувати 20...30% межі пружності.

Оскільки значення відносної деформації  $\frac{\Delta l}{l}$  у межах пружних властивостей матеріалу не перевищує  $(2,0 \dots 2,5) \cdot 10^{-3}$ , то при  $k = 0,5 \dots 4$  відносна зміна опору  $\frac{\Delta R}{R} = (1 \dots 0) \cdot 10^{-3}$ , тобто не перевищує 1%. При таких незначних змінах опору від вимірюваної величини чутливі елементи тензорезисторів повинні відзначатися дуже високою стабільністю опору в часі, мати незначний температурний коефіцієнт опору (ТКО).

Значення  $k$  для напівпровідникових тензорезисторів значною мірою залежить від питомого електричного опору, типу провідності і досягає 150...200. У напівпровідниках n-типу коефіцієнт тензочутливості від'ємний, а в напівпровідниках p-типу - додатний. На відміну від провідникових тензорезисторів, коефіцієнт тензочутливості напівпровідникових тензорезисторів значною мірою залежить від значення та знака деформації, а також від температури.

На практиці виділяють два основних напрямки застосування тензорезисторів для вимірювання неелектричних величин:

1) використання тензоефекту в провіднику, що знаходиться в стані об'ємного стиснення. В такому випадку природною вхідною величиною перетворювача є тиск оточуючого його газу або рідини. На цьому принципі будуються манометри для вимірювання високих і надвисоких тисків. Вихідною величиною перетворювача є зміна його активного опору;

2) використання тензоефекту при розтягуванні і стисненні тензочутливого матеріалу. При цьому тензорезистори застосовуються у вигляді вільних перетворювачів і перетворювачів, що наклеюються.

Вільні тензоперетворювачі виконуються у вигляді одного або ряду дротів, закріплених на кінцях між рухомою і нерухомою

деталлями, і, як правило, виконують одночасно роль пружного елемента. Природною вхідною величиною таких перетворювачів є дуже мале переміщення рухомої деталі.

Найбільш поширені дротові тензорезистори, які наклеюються на досліджувану деталь (рис. 5.6). Такий перетворювач, будучи приклеєним до випробуваної деталі, сприймає деформації її поверхневого шару.

Таким чином, природною вхідною величиною такого тензоперетворювача є деформація поверхневого шару деталі, на яку він наклеєний, а вихідною - зміна опору перетворювача, пропорційна цій деформації. Вимірювальною базою перетворювача є довжина  $l$  бази деталі, яку займає дріт. Найбільш часто використовуються перетворювачі з базою 5 ... 20 мм, що володіють опором 30 ... 500 Ом.

Тензоперетворювачі найбільш часто застосовуються для вимірювання деформацій і механічних напруг (зусиль, тисків, моментів тощо). Тензорезистори застосовують також для вимірювання механічних величин, які можна перетворити у деформацію пружного елемента. Дротові тензометри на паперовій основі, а також фольгові і плівкові тензометри застосовуються для вимірювання відносних деформацій від 0,005 до 2,000%. Вільні дротові тензометри можуть бути використані для вимірювання деформацій до 6 ... 10%. Тензорезистори практично безінерційні і застосовуються в діапазоні частот від 0 до 100 кГц.

Недоліками таких перетворювачів є низька чутливість і помітна температурна залежність вихідного сигналу, а також низька навантажувальна здатність, обумовлена товщиною провідника і обмеженнями, що накладаються на величину струму перетворювача з метою зниження ефекту самонагріву.

Вплив температури вдається значною мірою зменшити за допомогою застосування схем температурної компенсації, наприклад, використанням диференціальної схеми включення перетворювача. У сусіднє з вимірювальним плечем моста включається такий же перетворювач, наклеєний на той же матеріал і поміщений в ті ж самі температурні умови.

Принципово нові можливості у розвитку тензорезисторних датчиків на основі напівпровідникових чутливих елементів відкрилися з розробкою і дослідженням структур типу "кремній на діелектрику". Із них найбільш вивчена і технологічно освоєна структура "кремній на сапфірі". Це тонка монокристалічна плівка

кремнію, вирощена на монокристалічній сапфіровій підкладинці з певною кристалографічною орієнтацією. Такі перетворювачі мають хороші пружні властивості, малу похибку гістерезису, широкий діапазон вимірюваних деформацій.

### 5.3. Фотоелектричні перетворювачі

Фотоелектричне перетворення ґрунтується на явищі фотоелектричного ефекту (відкритий у 1888 р. російським вченим О. Г. Столетовим), сутність якого полягає в перетворенні енергії електромагнітних хвиль оптичного діапазону спектра в електричний струм.

**Фотоэффект** – явище взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, в результаті якого енергія фотонів передається електронам речовини і останні переходять у новий енергетичний стан. Це повне або часткове вивільнення електронів від зв'язків з ядрами атомів речовини внаслідок дії на неї електромагнітного випромінювання (світла, рентгенівського чи гамма-променів).

Розрізняють:

1) Зовнішній фотоэффект – явище вибивання електронів з поверхні тіла під дією електромагнітного випромінювання (фотоелектронна емісія).

2) Внутрішній фотоэффект – процес взаємодії електромагнітного поля випромінювання з речовиною, в результаті якого енергія квантів випромінювання передається електронам речовини, які, внаслідок цього, змінюють в ній свій енергетичний стан. За рахунок перерозподілу електронів за енергетичними рівнями відбувається збільшення електропровідності напівпровідників або діелектриків (фотопровідність).

3. Вентильний фотоэффект – збудження світлом електрорушійної сили на межі метал-напівпровідник або на межі різнорідних напівпровідників (р-п - перехід).

Фотоелектричний перетворювач являє собою фотоелектронний прилад (фотоелемент), який використовується в якості вимірювального перетворювача і в якому вимірювана неелектрична величина і вихідна електрична пов'язані між собою потоком електромагнітного випромінювання оптичного діапазону частот ( $f = 10^{12} \dots 10^{17}$  Гц,  $\lambda = 300 \dots 0,003$  мкм).



**Фотоелектричний перетворювач** вимірюваної неелектричної величини  $X$  у вихідну електричну величину  $E$  містить джерело 1 випромінювання світлового потоку  $\Phi_1$ , оптичний канал 2 і приймач випромінювання 3, який сприймає потік  $\Phi_2$  і в якому енергія випромінювання перетворюється на електричний сигнал  $E$  (рис.5.8).

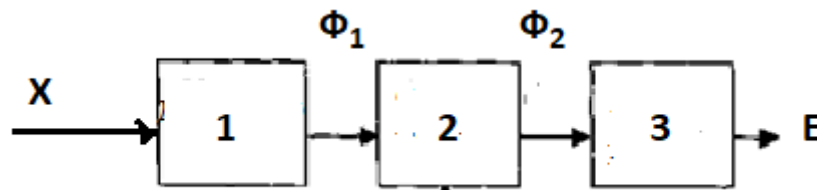


Рис. 5.8. Блок-схема фотоелектричного перетворювача:  
1 – джерело випромінювання; 2 – оптичний канал; 3 – приймач випромінювання

Принцип дії фотоелектричних перетворювачів полягає в тому, що один із параметрів вихідного електричного сигналу функціонально пов'язаний з певним параметром світлового потоку  $\Phi$ . Останній є функцією вимірюваної неелектричної величини.

Джерела оптичного випромінювання поділяються на теплові (лампи розжарювання) і люмінесцентні (газорозрядні лампи, оптичні квантові генератори-лазери і світлодіоди). У багатьох випадках джерелом випромінювання є сам об'єкт вимірювання.

Приймачі оптичного вимірювання поділяють на **теплоелектричні** та **фотоелектричні**.

До **теплоелектричних** належать термоперетворювачі та болометри, принцип роботи яких заснований на перетворенні енергії оптичного випромінювання в теплову з подальшим її перетворенням в електричний сигнал.

До них відносяться термоелементи, болометри і піроелектрики.

**Термічні елементи** - це тонкий металевий диск із зачерненою поверхнею, в дотику з якою знаходиться робочий спай термопари (диск під впливом променевої енергії нагрівається).

В **болометрах** використовується зміна електричного опору зачерненої тонкої смужки з провідникового або напівпровідникового матеріалу під дією підвищення температури, викликаного опроміненням.

**Піроелектрик** - це кристал, електрична поляризація якого змінюється при підвищенні температури, спричиненому поглинанням падаючого на нього випромінювання.

До **фотоелектричних** приймачів, із загальною назвою «фотоелементи», належать перетворювачі, в яких перетворення оптичного сигналу в електричний здійснюється фотоприймачами, що використовують різні фізичні ефекти.

**Фотоелектричні перетворювачі** (частіше їх називають фотоелементами) в залежності від типу фотоприймача поділяються на три групи:

- фотоелементи з зовнішнім фотоелементом;
- фотоелементи з внутрішнім фотоелементом (фоторезистори);
- фотогальванічні (вентильні) перетворювачі (вентильні фотоелементи) (рис. 5.9).

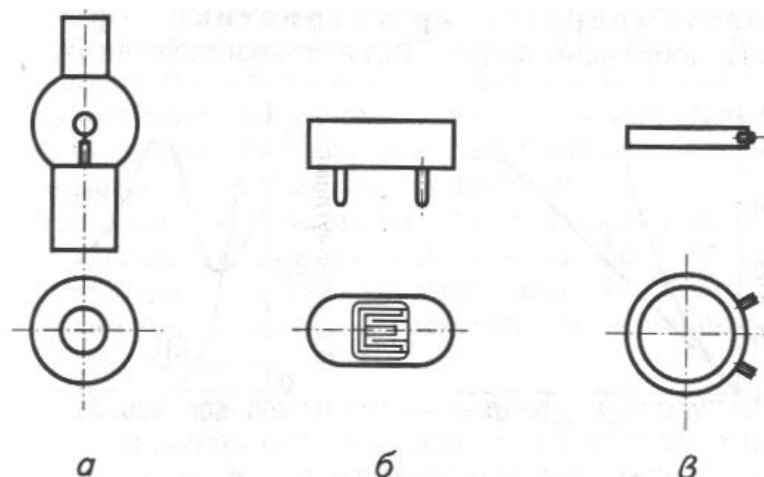


Рис. 5.9. Фотоелементи:

а — з зовнішнім фотоелементом; б—з внутрішнім фотоелементом;  
в — вентильний

В практиці електричних вимірювань використовуються всі три типи фотоелектричних перетворювачів, але найбільшого поширення отримали перетворювачі двох останніх типів.

Дія фотоелектричних приймачів випромінювання ґрунтується на зміні електронної структури речовини при її опроміненні. Основними типами таких приймачів є вакуумні та газонаповнені фотоелементи, фоторезистори, фотопомножувачі, вентильні фотоелементи,

фотодіоди, фототранзистори, багатоелементні твердотільні приймачі випромінювання.

Кожний фотоелемент має свої характеристики, відмінні від характеристик інших фотоелементів, навіть якщо вони належать до однієї групи. Головними характеристиками фотоелементів є:

1. **Світлова характеристика**, тобто залежність струму фотоелемента від інтенсивності світлового потоку, який на нього падає. Відповідно до закону Столетова, фотострум прямо пропорційний інтенсивності променистого потоку (при незмінності спектрального складу потоку); проте в ряді випадків вторинні процеси, які накладаються на основний фотоелектричний ефект, викликають відхилення від закону Столетова.

2. **Чутливість фотоприймача  $S$**  визначається як відношення зміни вихідного сигналу фотоприймача (напруги  $dU$  або струму  $dI$ ) до зміни монохроматичного потоку, що викликав цю зміну:

$$S = \frac{dU}{d\Phi} \quad \text{или} \quad S = \frac{dI}{d\Phi} \quad (5.17)$$

Інтегральна чутливість може бути визначена зі світлових характеристик фотоелемента.

3. **Спектральна чутливість** - залежність чутливості фотоприймача від довжини хвилі  $\lambda$ . Спектральна характеристика визначається матеріалом, з якого виготовлений приймач випромінювання. Наприклад, CdS має максимальну чутливість в зеленій області спектра, CdSe - в червоній області.

Спектральна чутливість визначається для кожної певної частоти із спектральної характеристики фотоелемента.

4. **Спектральна характеристика**, тобто залежність фотоструму від довжини хвилі падаючих променів при незмінній нарузі живлення фотоелемента та інтенсивності світлового потоку. Слід зазначити, що застосування фотоелемента в поєднанні, з відповідним світлофільтром дає змогу отримати спектральну характеристику, що забезпечує найбільшу чутливість фотоелемента в потрібній (для конкретної вимірювальної задачі) частині спектру.

5. **Поріг чутливості  $\Phi_{\text{п}}$**  - це мінімальна величина світлового потоку, яку здатний реєструвати фотоприймач. Він характеризує здатність конкретного приймача реєструвати малі сигнали.

**6. Швидкодія фотоприймача** характеризується постійною часу  $\tau$  або проміжком часу, протягом якого сигнал на виході приймача випромінювання зменшується в  $e$  разів після припинення опромінення приймача. Більш повно динамічні властивості фотоприймача описуються **частотною характеристикою**

**7. Частотна (інерційна) характеристика**, тобто залежність фотоструму від частоти зміни інтенсивності падаючого світлового потоку. Зовнішній фотоэффект настає практично миттєво після початку освітлення поверхні, тобто може вважатися «безінерційним». Однак в ряді випадків вторинні явища, які відбуваються в деяких фотоелементах, призводять до інерційності виникнення фотоструму. Фоторезистори і вентильні фотоелементи мають деяку інерцію.

**8. Вольт-амперна характеристика**, тобто залежність фотоструму від значення прикладеної до нього напруги при незмінній інтенсивності світлового потоку, що падає на фотоелемент.

**9. Температурна характеристика.** Підвищення температури призводить до збільшення числа найбільш швидких електронів, енергія яких більше роботи виходу з поверхні даного металу. Це має наслідком як збільшення фотоструму, так і зміну спектральної характеристики фотоелемента. При температурах, що перевищують певні значення, різні для різних типів фотоелементів, останні різко змінюють фотоелектричні властивості.

**10. Енергетичні характеристики** - це залежність величини корисного сигналу на виході фотоприймача від величини потоку випромінювання, падаючого на його чутливу поверхню.

**11. Старіння (втома) фотоелемента**, що виражається в зміні характеристик фотоелементу, зокрема чутливості, в залежності від часу його роботи. Тому для практичного використання фотоелементів важливо знати зміну світлової характеристики фотоелемента в часі і оптимальний режим його роботи з точки зору можливо більш тривалого збереження характеристик незмінними.

### 5.3.1. Фотоелектричні перетворювачі з зовнішнім фотоелементом

Фотоелектричні перетворювачі з зовнішнім фотоелементом поділяються на вакуумні та газонаповнені фотоелементи і фотоелектронні помножувачі.

**Вакуумні фотоелементи** складаються з вакуумної скляної колби, що містить два електроди: анод і катод. При освітленні фотокатода під впливом фотонів світла він емітує електрони. Кількість таких електронів (їх називають фотоелектронами) прямо пропорційна (випадок монохроматичного світла) кількості падаючих фотонів. Відношення цих величин називають квантовим виходом  $\eta$ . Під дією напруги, прикладеної між катодом і анодом, електрони прямують до анода і викликають у зовнішньому контурі струм  $I$ . Оскільки він викликаний фотонами, його називають фотострумом. Він, як і падіння напруги  $U_R$  на робочому опорі  $R$ , пропорційний потоку випромінювання  $\Phi$ , що падає на катод (рис. 5.10.)

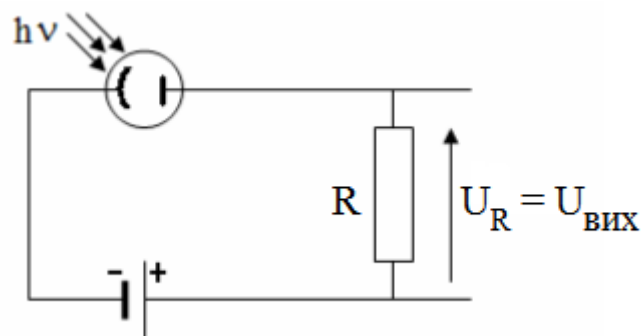


Рис. 5.10. Схема включення вакуумного фотоелемента

Для фотоемісії електронів необхідно, щоб енергія фотона  $E = h\nu$ , де  $\nu$  - частота світла;  $h$  - постійна Планка, була більше роботи виходу електронів  $\Phi$ , характерною для даного матеріалу фотокатода. Частота  $\nu_{гр} = \frac{\Phi}{h}$  називається червоною границею фотоелементу, а відповідна їй довжина хвилі  $\lambda_{гр} = \frac{c}{\nu_{гр}}$ , де  $c$  - швидкість світла, - довгохвильовим порогом фотоелементу. Якщо  $\lambda > \lambda_{гр}$ , то ніяка інтенсивність світла не може викликати фотоелемент.

Найбільш поширеними типами вакуумних фотоелементів із зовнішнім фотоелементом є фотоелементи з киснево-цезієвим і сурм'яно-цезієвим катодами.

**Газонаповнений фотоелемент** аналогічний вакуумному, але відрізняється від останнього тим, що він заповнений інертним газом. Завдяки цьому первинні електрони, прискорені електричним полем, іонізують атоми газу, вивільняючи вторинні електрони. При цьому виникають так звані електронні лавини, а первинний струм фотоemisії підсилюється в сотні разів. У той же час позитивні іони дуже повільно переміщуються до катода, тому верхня гранична частота даних детекторів значно нижче, ніж у вакуумних фотоелементів (десятки МГц), і не перевищує 10 кГц.

Особливо слід підкреслити, що фотоелементи є селективними перетворювачами, тому вихідна величина фотоелементів визначається поряд з інтенсивністю падаючого на них випромінювання також і його спектральним складом. Чутливість газонаповнених фотоелектричних перетворювачів вище, ніж у вакуумних. Проте спектральна чутливість фотоприймачів, заснованих на зовнішньому фотоэффекті, не є постійною. Вона зменшується в довгохвильовій області через наявність енергетичного бар'єру (червона границя) при генерації фотоструму. Зниження чутливості в короткохвильовій області пов'язано з кінцевою товщиною фотокатода, з одного боку, поглинанням фотонів із зростаючою енергією, з іншого боку. В товстих фотокатодах зменшується ймовірність виходу фотоелектронів з внутрішніх областей. Однак спеціальним підбором матеріалів фотокатодів вдається створити фотоелементи окремо для вакуумного ультрафіолету (ВУФ), ультрафіолету (УФ) і інфрачервоної (ІЧ) області в спектральному діапазоні від 100 до 1200 нм.

Характеристики фотоелементів з зовнішнім фотоэффектом наведено на рис. 5.11.

На рис. 5.11,а приведені світлові характеристики двох киснево-цезієвих елементів КЦ для номінальної напруги, прикладеної до обох фотоелементів, що дорівнює 240 В. Характеристика 1 стосується газонаповненого фотоелемента, а характеристика 2 — вакуумного. Графіки свідчать про перевагу газонаповненого фотоелемента над вакуумним, так як перший (газонаповнений) при рівних світлових потоках, що падають на обидва фотоелементи, має набагато більший струм, ніж другий (вакуумний). Як видно з наведених кривих, пропорційність між фотострумом і світловим потоком зберігається лише в межах ділянок, проведених суцільними лініями. Допустимі значення світлових потоків для промислових типів фотоелементів

лежать в межах  $10^{-3} \dots 10^{-2}$  лм. В цих межах фотоелементи всіх зазначених вище типів мають лінійну світлову характеристику. З характеристик також видно, що у газонаповненого фотоелемента величина струму зростає швидше, ніж світловий потік. При підвищенні напруги це може спричинити виникнення самостійного газового розряду з руйнуванням катодного покриття та повним виходом з ладу фотоелемента.

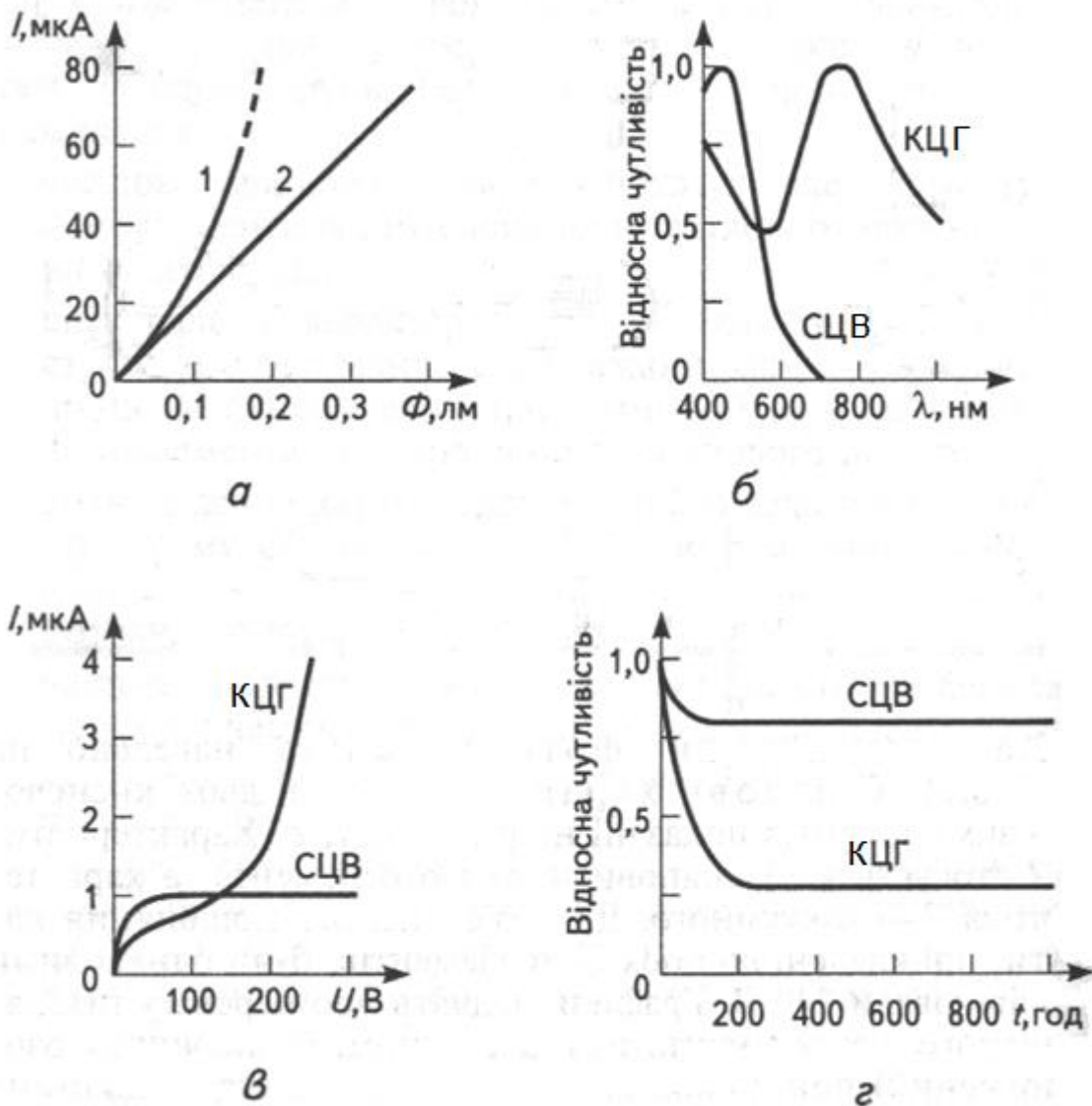


Рис. 5.11. Характеристики фотоелементів із зовнішнім фото ефектом: а — світлова; б — спектральна; в — вольтамперна; г — старіння

Спектральні характеристики фотоелементів зображено на рис. 5.11, б. З характеристик видно, що стибій-цезієвий фотоелемент СЦ (вакуумний) доцільно використовувати головним чином у

високочастотній частині спектра видимого світла, а киснево-цезієвий КЦ (газонаповнений) — практично в усій видимій частині спектра.

Вольтамперні характеристики фотоелементів зображено на рис. 5.11, в. Розглядаючи їх, можна дійти висновку, що при малих напругах більш сприйнятною буде характеристика вакуумного фотоелемента, оскільки від нього можна одержати більшу величину струму при рівних напрузі й світловому потоці з газонаповненим фотоелементом. Хоча при більших значеннях напруг доцільніше використовувати цезієвий газонаповнений фотоелемент. Слід зазначити, що наведені на рис. 5.11,а,б,в криві характеризують так звані початкові параметри фотоелементів, тобто параметри, які фотоелементи мають до їх стомлення в процесі роботи.

На рис. 5.11,г приведені криві зменшення чутливості (стомлення) фотоелементів як функції від тривалості роботи, з яких видно, що у киснево-цезієвих фотоелементів (КЦГ) відбувається різке (до 70-75%) зменшення чутливості впродовж перших 150-200 годин роботи, після чого чутливість цих фотоелементів практично стабілізується. Сурм'яно-цезієві фотоелементи (СЦВ) більш стабільні в часі.

Нарешті, слід зазначити, що всі наведені вище криві характеризують тільки так звану статичну чутливість  $S_{\phi}$  фотоелемента. При роботі фотоелемента на навантаження  $R_H$  слід враховувати динамічну чутливість  $S_d$ , меншу ніж  $S_{\phi}$ :

$$S_d = \frac{S_{\phi}}{1 + \frac{R_H}{R_i}}$$

де  $R_i$  - внутрішній опір фотоелемента.

При  $R_i \gg R_H$ , що має місце в більшості практичних випадків,  $S_d = S_{\phi}$ .

Зазначимо, що для роботи в ультрафіолетовій області спектра придатні обидва фотоелементи, особливо другий. Для роботи у близькій до інфрачервоної області спектра придатний тільки киснево-цезієвий фотоелемент.

Залежність чутливості киснево-цезієвих фотоелементів від температури досить висока. Сурм'яно-цезієві фотоелементи значно більш стійкі до змін температури; при підвищенні температури до 50 °С чутливість їх практично не змінюється.



При підвищенні температури киснево-цезієвих фотоелементів, крім зміни чутливості, спостерігається також поява помітних «темнових струмів». Темнові струми у сурм'яно-цезієвих фотоелементів практично відсутні.

Вакуумні фотоелементи працюють практично безінерційно. Питання про інерцію газонаповнених фотоелементів має істотне значення при використанні їх для вимірювання швидкозмінних процесів. Досвід показує, що у газонаповнених фотоелементів зміни фотоструму відстають від змін світлового потоку.

Інерція газонаповнених фотоелементів пояснюється значно меншою рухливістю (ніж електронів) позитивних іонів, які, поряд з фотоелектронами, обумовлюють струм фотоелемента; переміщення цих іонів вимагає деякого часу. Звідси зрозуміло, що інерція газонаповнених фотоелементів в значній мірі залежить від напруги.

Незважаючи на можливість отримання у газонаповнених фотоелементів чутливості приблизно в п'ять-шість разів більше, ніж у вакуумних фотоелементів, для цілей вимірювальної техніки перевагу слід надати останнім. Окрім інерції газонаповнених фотоелементів, різка залежність чутливості від напруги (крива ЦГ на рис. 11.2) змушує ставити дуже високі вимоги до стабільності напруги джерела живлення ланцюга, в той час як чутливість вакуумних фотоелементів при напругах більше 50 В практично не залежить від напруги. Крім того, температурна стійкість газонаповнених фотоелементів менше, а стомлюваність більше, ніж у вакуумних фотоелементів.

**Фотоелектронний помножувач (ФЕП)** являє собою вакуумну трубку зі світлочутливою поверхнею, яка поглинає фотони і емітує електрони. Цей вакуумний фотоелемент забезпечений системою електродів для підсилення струму фотоемісії. Принципова схема ФЕП показана на рис. 5.12.

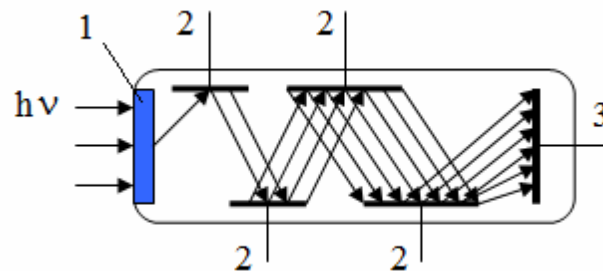


Рис. 5.12. Фотопомножувач:  
1 - фотокатод, 2 - діоди, 3 - анод

Електрони, вибиті з фотокатода (потенціал  $V_k$ ) під дією падаючого світла, прискорюються електричним полем і потрапляють на перший діод (потенціал  $V_1 > V_k$ ). Прискорені первинні електрони володіють досить високою енергією і викликають вторинну емісію електронів з першого діода. Відношення кількості вторинних електронів до кількості первинних електронів називають коефіцієнтом вторинної емісії  $\eta$ . Він залежить від матеріалу діода, кута падіння первинних електронів і від обробки поверхні. Коефіцієнт вторинної емісії зростає зі збільшенням кінетичної енергії падаючих електронів. При 200 еВ цей коефіцієнт для найбільш поширених матеріалів діодів становить від 1.4 до 14.

Вторинні електрони з першого діоду прискорюються і потрапляють на другий діод. Процес розмноження електронів повторюється до останнього діода в помножувачі. Якщо такий прилад містить  $N$  діодів, то фотострум  $I$  між катодом і першим діодом пов'язаний зі струмом анода  $I_a$  наступним співвідношенням:

$$I_a = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdots \eta_N \cdot I. \quad (5.18)$$

У такому приладі первинний фотострум  $I$  може підсилюватися в  $10^3 \dots 10^9$  разів при невеликому рівні шумів в широкому інтервалі робочих частот.

Фотоелектронні помножувачі мають високу чутливість і використовуються для вимірювання дуже малих світлових потоків (до  $10^{-5}$  лк).

Світлові характеристики фотопомножувачів при малих анодних струмах (кілька мікроампер) дуже близькі до лінійних. Явище вторинної емісії практично безінерційне, тому фотопомножувачі, як і вакуумні фотоелементи, можуть використовуватися для реєстрації досить швидкоплинних процесів (до  $10^{-9}$  с).

Фотоелементи із зовнішнім фотоелементом завжди потребують підсилення електричних сигналів, бо їхній вихідний струм здебільшого становить лише кілька мікроампер. Тому вони звичайно працюють з електронним чи напівпровідниковим підсилювачем.

### 5.3.2. Фоторезисторні перетворювачі

Принцип дії фоторезисторних перетворювачів ґрунтується на явищі **внутрішнього фотоефекту**, що полягає в утворенні вільних носіїв зарядів в напівпровіднику під впливом падаючого випромінювання.

**Перетворювачі з внутрішнім фотоефектом** (фоторезистори) чутливі до світлового випромінювання завдяки внутрішньому фотоефекту, що полягає в перерозподілі електронів по енергетичним станам за рахунок поглинених фотонів. При цьому зростає концентрація носіїв струму всередині речовини і з'являється додаткова провідність - фотопровідність. Поглинання фотонів може відбуватися як в основній речовині - власний фотоефект, так в домішках - домішковий фотоефект. Чутливий елемент такого перетворювача виконаний у вигляді пластинки, на яку нанесено шар напівпровідникового фоточутливого матеріалу.

Прикладами фоторезисторів з власною провідністю можуть служити перетворювачі з селену, сполук селену з сіркою, телуру зі свинцем, вісмутом, талієм або кадмієм. Домішкові фоторезистори виготовляють в основному з германію і кремнію, які леговані золотом, міддю, свинцем, індієм тощо. Фоторезистори байдужі до зміни полярності напруги, прикладеної до них, і мають характеристики, зовнішньо дещо подібні до розглянутих вище фотоелементів, але здатних пропускати через себе значно більші струми (до кількох десятків міліампер).

Схема фоторезистора та його статична характеристика  $R = f(\Phi)$  наведені на рис. 5.13.

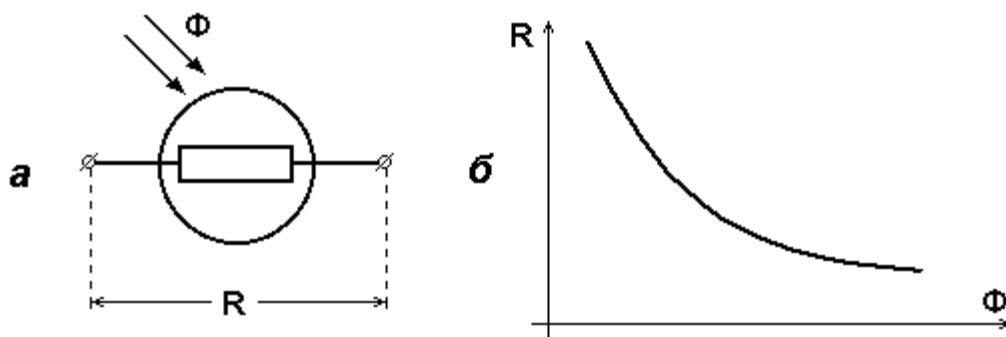


Рис. 5.13. Схема фоторезистора (а) і його статична характеристика перетворення (б):

$R$  – опір фоторезистора;  $\Phi$  – світловий потік

Виконують їх на основі напівпровідників, а саме: германію селену, сірчаноокислих талію, вісмуту, свинцю тощо. З фотоелементів цього типу найбільшого поширення отримали селенові фоторезистори.

Спектральні характеристики фоторезисторів визначаються властивостями використовуваних напівпровідникових матеріалів. Напівпровідникові фоторезистори перекривають спектр від інфрачервоних до ультрафіолетових випромінювань.

Електропровідність напівпровідникових матеріалів обумовлена збудженням електронів у валентній зоні і на домішкових рівнях. При збудженні електрони переходять в зону провідності; в валентній зоні з'являються дірки. При освітленні збудження електронів зростає, що викликає зростання електропровідності. Чим більша освітленість, тим більша кількість фотонів, а, отже, і електронів. Таким чином, при зростанні освітленості опір матеріалу зменшується. Максимальна довжина хвилі, що відповідає мінімально необхідній енергії для подолання забороненої зони (так звана червона границя фотоефект) у фоторезисторів знаходиться в інфрачервоній області, наприклад, для сірчато-свинцевих  $\lambda_{гр} = 2,7$  мкм.

У таблиці 5.1 наведені значення заборонених зон і відповідних значень  $\lambda_{гр}$  для різних матеріалів, які використовуються для створення фоторезисторів.

Таблиця 5.1. Характеристики деяких матеріалів фоторезисторів

Матеріал	Ширина забороненої зони, еВ	$\lambda_{гр}$ , мкм
ZnS	3,6	0,345
CdS	2,41	0,52
CdSe	1,8	0,69
CdTe	1,5	0,83
Si	1,12	1,10
Ge	0,67	1,85
PbS	0,37	3,35
InAs	0,35	3,54
Te	0,33	3,75
PbTe	0,3	4,13
PbSe	0,27	4,58
InSb	0,18	6,90

Характеристики напівпровідникових фоторезисторних датчиків нелінійні і залежать від температури. Тому вибір відповідного типу фоторезистора і схеми його включення багато в чому залежить від конкретної області його застосування.

При невеликих освітленостях кількість збуджених світлом електронів прямо пропорційна освітленості і опір фоторезистора визначається за законом Ома:

$$R = \frac{U}{I_{\phi}} \quad (5.19)$$

де  $U$  - напруга, прикладена до фоторезистори;  $I_{\phi}$  - фотострум.

Підвищення провідності фоторезистора під впливом променевої енергії обумовлено не тільки первинними електронами, звільненими безпосередньо квантами променевої енергії, а й вторинними електронами, що виникають в результаті взаємодії первинних електронів з кристалами напівпровідника. Завдяки цьому чутливість фоторезисторів значно вище, ніж чутливість фотоелементів із зовнішнім фотоефектом, і досягає в деяких випадках декількох міліампер на люмен.

При великих освітленостях фоторезистора пропорційність між  $U$  і  $I_{\phi}$  порушується.

Вольт-амперна характеристика фоторезисторів лінійна (рис. 5.14), тобто їх опір не залежить від прикладеної напруги.

Для фоторезисторів важливою характеристикою є чутливість, яка визначається кратністю зміни величини їхнього опору при переході від повної темноти до повного їх освітлення:

$$S = \frac{R_T}{R_{CB}} \quad (5.20)$$

де  $R_T$  – темновий опір, тобто опір неосвітленого фоторезистора;  $R_{CB}$  – опір освітленого фоторезистора при освітленості (звичайно приймається освітленість  $E = 200$  лк).

Ця кратність може бути від 30...35 до 140...150, що свідчить про високу чутливість фоторезисторів. Наприклад, зміна опору при освітленості  $E = 200$  лк складає 15-20% від темного опору. Селенові фоторезистори мають найбільшу чутливість в червоній області спектра і червону границю близько 0,9 мкм (інакше кажучи,

промені з довжиною хвилі більшою, ніж 0,9 мкм, не викликають фотоефекту). Сірчасто-свинцеві фоторезистори мають найбільшу чутливість в променях довжиною хвилі 1,5-2,5 мкм, а сірчасто-вісмутові фоторезистори - у видимій частині спектру.



Рис.5.14. Вольт-амперна характеристика фоторезистора

Інерційність фоторезисторів дуже значна і характеризується постійною часу  $\tau$ , яка може приймати значення від десятків мікросекунд до десятків мілісекунд. У сірчасто-кадмієвих перетворювачів  $\tau$  лежить в межах 1-140 мс, у селеністо-кадмієвих - 0,5-20 мс. При частоті 100 Гц фоторезистори знижують чутливість в порівнянні з чутливістю на постійному світловому потоці приблизно в два-три рази. Однак сірчасто-свинцеві фоторезистори зберігають чутливість практично незмінною до 5000 Гц.

Світлова характеристика фоторезисторів, як правило, нелінійна.

**Переваги** фоторезисторів: висока чутливість при малій освітленості, широкий спектральний діапазон фоторезисторів від 0.5 до 150 мкм, низька вартість, довільні розміри, можливість вимірювань без додаткового підсилення сигналу.

**Недоліки:** значна інерційність, залежність опору (а отже і чутливості) від температури, низька частота перемикання (кілька герц), старіння.

Сталість у часі характеристик фоторезисторів та їх температурна стійкість значно менше, ніж у фотоелементів із зовнішнім фотоефектом.

При цьому слід мати на увазі, що в довгохвильовій ІЧ області можна працювати тільки з глибоко охолодженими приймачами - аж до азотних (80 К) або гелієвих (4 К) температур. Ця обставина

принципова, загальна для всіх фотоелектричних приладів: справа в тому, що енергія фотонів в даній області спектра дуже мала і порівнянна з тією енергією, яку електрон може отримати в результаті теплових коливань. Тому при звичайних температурах фотострум практично важко відрізнити від темного фотоструму, обумовленого тепловими процесами.

### 5.3.3. Фотогальванічні перетворювачі

Особливий практичний інтерес представляє прояв фото ефекту в напівпровідниках з р-п-переходом. Завдяки об'ємному заряду, який утворюється поблизу границі р- і п-областей, виникає потенційний бар'єр для носіїв струму. При поглинанні випромінювання в результаті внутрішнього фото ефекту утворюються додаткові носії заряду, які змінюють потенційний рельєф і утворюють ЕРС. Даний ефект носить назву **вентильного**, або **фотогальванічного**.

**Вентильний фотоелемент** (рис. 5.15) являє собою звичайний напівпровідниковий діод (але великих розмірів), один з електродів якого є напівпрозорим, щоб дозволити світловим променям потрапити в чутливу зону. Чутливою зоною є запірний шар, який виникає при контакті двох напівпровідників з різним типом домішки. Випромінювання  $h\nu$  проходить через напівпрозорий електрод, тонкий шар напівпровідника п-типу і поглинається в прилеглий до нього частині пластинки напівпровідника р-типу. Якщо фотон з енергією більшою, ніж ширина забороненої зони, поглинається фотодіодом, то це призводить до генерації електронно-діркової пари. Таким чином, внаслідок фото ефекту утворюється підвищена концентрація електронно-діркових пар. Електрони захоплюються полем потенційного бар'єру і проникають в шар п-напівпровідника. Це порушує рівноважний розподіл носіїв струму і призводить до зміни контактної різниці потенціалів, тобто до виникнення фото - ЕРС.

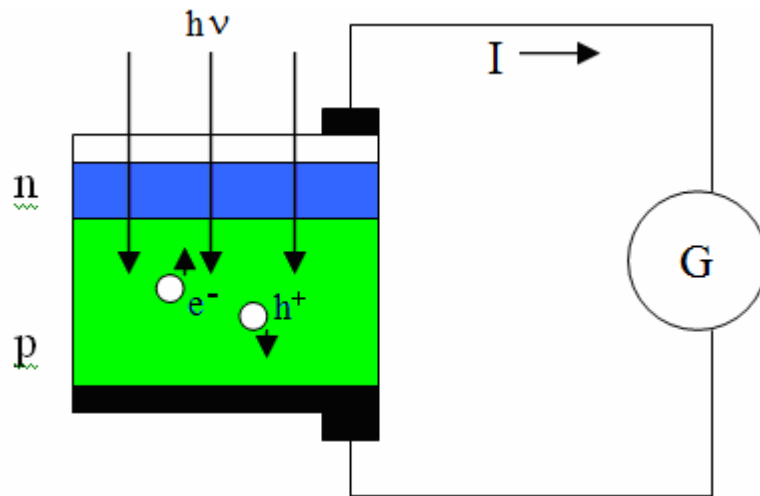


Рис. 5.15. Принцип дії вентильного фотоелемента

Опір р-п-переходу в зворотному напрямку  $R_{зв}$  становить десятки кілоом, тому надлишок основних носіїв (дірок) в р-області знижує величину її електричного опору  $r$ . Опір  $R_{зв}$  різко зменшується з ростом світлового потоку  $\Phi_x$ , оскільки висота потенційного бар'єру р-п-переходу знижується на значення фото-ЕРС (падіння напруги на сумі опорів р- шару  $r$  і навантаження  $R_H$ ).

Таким чином, фото-ЕРС не може перевищувати величину зазначеного потенційного бар'єру, який становить від 0.1 до 0.3 В.

Вентильний елемент можна розглядати як джерело струму  $I_\phi = k\Phi$ , де  $k$  – деякий коефіцієнт (чутливість фотоелемента), але в навантаження потече лише струм

$$I_H = \frac{I_\phi R_{зв}(\Phi)}{R_{зв}(\Phi) + r + R_H} = \frac{k\Phi}{r + R_H/R_{зв}(\Phi) + 1} \quad (5.21)$$

Струм в навантаженні лінійно залежить від потоку  $\Phi$  тільки при  $r + R_H \ll R_{зв}$ , тобто при малих значеннях потоку і малих значеннях опору навантаження ( $R_H \approx 1 \dots 100$  Ом). При великих світлових потоках  $R_{зв} < r$  світлові характеристики нелінійні навіть в режимі короткого замикання.

Електричне коло з таким фотоелементом не потребує окремого джерела струму. З цієї точки зору вентильні фотоелементи варто було б віднести до групи генераторних перетворювачів. Однак з методичних міркувань доцільно розглядати ці фотоелементи та їх



експлуатаційні характеристики в цій главі, разом з іншими типами фотоелементів.

**Фотогальванічні (вентильні) перетворювачі** являють собою фотоелектронні прилади з р-n-переходом: **фотодіоди** і **фототранзистори**.

Фотодіоди і їх різновиди (лавинні фотодіоди, рiп - фотодіоди, дрейфові фотодіоди), фототранзистори відносяться до групи приймачів випромінювання з р-n переходами.

**Фотодіоди** являють собою вентильні фотоелементи, до яких прикладена зворотна напруга (від 10 до 30 В) від зовнішнього джерела. При такому включенні потенційний бар'єр зростає і визначається зовнішньою напругою. Умови проникнення неосновних носіїв з освітленої зони через бар'єр істотно полегшуються, а зворотний опір цього переходу різко зростає. Внаслідок цього зростає чутливість, а світлові характеристики в широкому діапазоні світлових потоків стають строго лінійними.

Фотодіоди можуть працювати в **фотодіодному** режимі (із зовнішнім джерелом живлення) і в **генераторному** (вентильному) режимі (без зовнішнього джерела живлення).

При роботі в фотодіодному режимі перетворювач підключають до запірної напруги (рис. 5.16, а). При цьому струм, що протікає через навантаження, здатний створювати падіння напруги, порівнянне з напругою живлення, а величина струму мало залежить від останнього.

При збільшенні освітленості фотодіода зростає зворотний струм, що призводить до збільшення напруги  $U_n$  на опорі  $R_n$ . Напругу  $U_n$  і чутливість можна визначити за вольт-амперною характеристикою і навантажувальною прямою (рис. 5.16,б). Залежність струму фотодіода від освітленості практично лінійна. Внутрішній диференціальний опір фотодіода має величину порядку мегаомів, тому зазвичай вони працюють в режимі, близькому до короткого замикання.

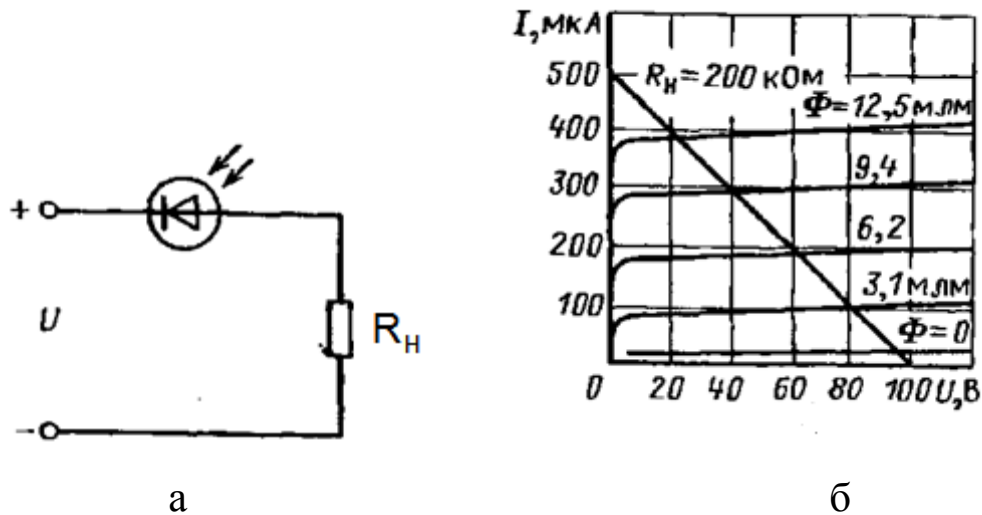


Рис. 5.16. Схема включення фотодіода в фотодіодному режимі (а) та його вольт-амперна характеристика (б)

Повний струм фотодіода  $I$  можна розглядати як суму

$$I = I_T + I_\Phi = I_T + S \cdot \Phi, \quad (5.22)$$

де  $I_T$  - темновий струм фотодіоду;  $I_\Phi$  - фотострум, який визначається світловим потоком  $\Phi$ ;  $S$  – чутливість фотоелементу.

Фотодіоди - малоінерційні перетворювачі. Їх постійна часу має порядок  $10^{-7} \dots 10^{-8}$  с.

Перевагами фотодіодного режиму є: велика чутливість, мала інерційність, значна лінійність енергетичної характеристики.

Недоліки: значення темного струму  $I_T$  сильно залежить від температури, значні шуми.

В генераторному режимі фотодіод включають за схемою, наведеною на рис. 5.17, а, і він сам є джерелом струму. Фотострум, напруга на навантаженні  $U_H$  і чутливість можна визначити за вольт-амперною характеристикою, наведеною на рис. 5.17,б.

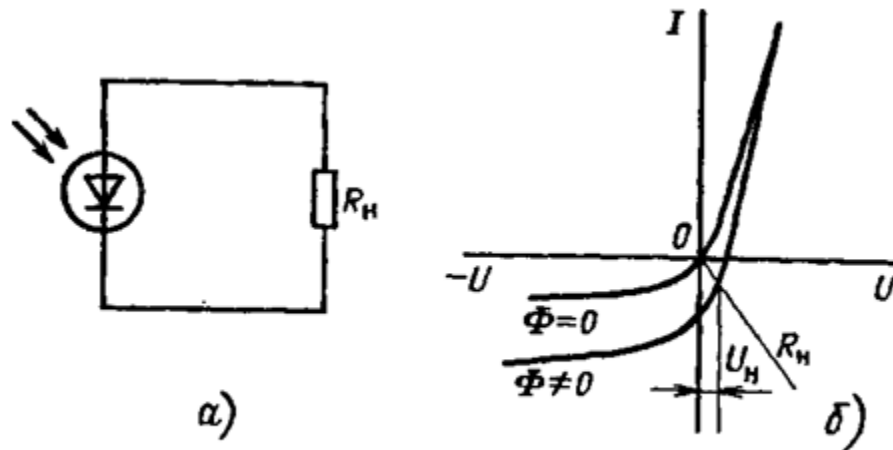


Рис. 5.17. Схема включення фотодіода в генераторному режимі (а) та його вольт-амперна характеристика (б)

Найбільш поширені селенові, германієві і кремнієві фотодіоди. Їх спектральні характеристики охоплюють область інфрачервоного випромінювання (для германієвих фотодіодів від 0,4 до 2 мкм,  $\lambda_{\max} = 1,5$  мкм,  $\lambda_{\text{гр}} = 2$  мкм, для кремнієвих від 0,4 до 1 мкм,  $\lambda_{\max} = 0,9$  мкм,  $\lambda_{\text{гр}} = 1,2$  мкм).

Чутливість вентильних фотоелементів в багатьох випадках практики дозволяє обійтися без підсилення фотострумів, що є їхньою перевагою.

Відносно стійкості в часі вентильні фотоелементи дещо поступаються фотоелементам із зовнішнім фотоефектом.

Зміна навколишньої температури досить сильно впливає на чутливість вентильних фотоелементів, що обумовлено в основному зміною опору запірного шару.

**Фототранзистори** використовують підсилювальні властивості комбінованих р-п-р і п-п-р структур. За їх допомогою величина фотоструму, що виникає в одному з напівпровідникових переходів, включеному в зворотному напрямку, посилюється в десятки разів (колекторний перехід). Ці перетворювачі мають світловий вхід в області бази транзистора і включаються за схемою з загальним емітером.

Незважаючи на більш високу інтегральну чутливість, фототранзистори поступаються фотодіодам за стабільністю характеристик, швидкістю і граничними (пороговими) характеристиками.

На закінчення необхідно відзначити, що до цих пір одним з найдосконаліших фотоприймачів в діапазоні від 380 до 780 нм є людське око. Око містить два типи чутливих до світла елемента, званих колбочками і паличками. Загальна кількість паличок в сітківці становить 130 млн. Вони визначають світлочутливість ока. Кожні 10 паличок пов'язані із зоровим нервом, по яким і передаються електричні сигнали. Колбочки менш чутливі і найбільш активні при нормальних умовах освітлення. Саме вони переважно забезпечують розрізнення кольорів і високу роздільну здатність.

#### **5.4. Типи фотоелектричних перетворювачів та особливості їх застосування для вимірювання несвітлових величин**

Фотоелектричні перетворювачі застосовуються для вимірювання різних неелектричних величин і надзвичайно різноманітні щодо конструкції і схеми оптичного пристрою, що визначає вплив світлового потоку на фотоелемент. Однак, в основному, фотоелектричні перетворювачі можна розділити на дві групи.

До першої групи належать фотоелектричні перетворювачі, в яких фотострум визначається світловим потоком, що залежать, в свою чергу, від вимірюваної неелектричної величини.

До другої групи належать фотоелектричні перетворювачі, що працюють в такому режимі, коли значення фотоструму не є функцією вимірюваної величини, наприклад в разі вимірювання швидкості обертання валу (див. нижче, кінець п. 3).

До фотоелектричних перетворювачів першої групи ставляться вимоги незалежності їх характеристик в часі і від впливу сторонніх чинників (коливання напруги джерел живлення, температури). До перетворювачів ж другої групи дані вимоги, очевидно, є зайвими.

Фотоелектричні перетворювачі, що використовуються для вимірювання несвітлових величин, мають ряд переваг, а саме:

1. можливість вимірювання без контакту з об'єктом вимірювання,
2. відсутній механічний вплив на об'єкт вимірювання.

Розглянемо **основні принципи** використання фотоелементів в якості перетворювачів.

1. Джерелом променевої енергії є об'єкт вимірювання А (рис. 5.18, а); світловий потік від об'єкта вимірювання спрямований на

фотоелемент. Як приклад застосування подібної принципової схеми можна вказати на перетворювачі фотоелектричних і кольорових пірометрів, де інтенсивність світлового потоку і спектральний розподіл інтенсивності є функціями вимірюваної температури тіла.

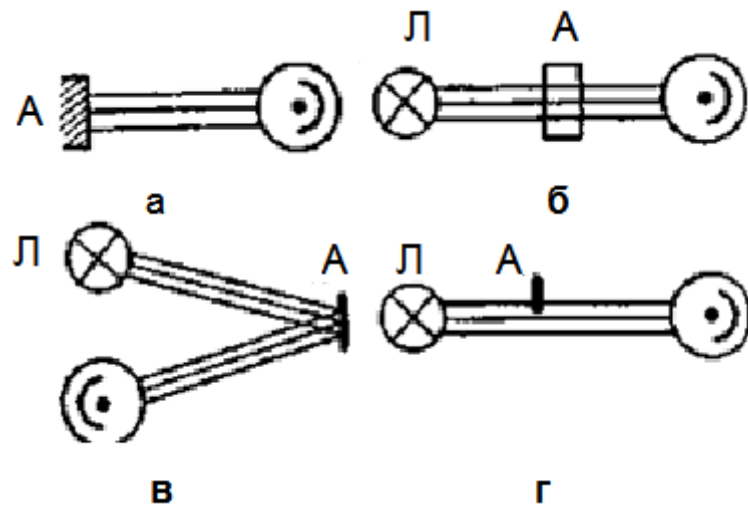


Рис. 5.18. Принципові схеми використання фотоелектричних перетворювачів

2. Джерелом світла (рис. 5.18,б) є лампа розжарювання Л (або будь-яке інше джерело світла); світловий потік проходить на фотоелемент через об'єкт вимірювання А, в якому частково поглинається, в залежності від вимірюваного параметра середовища об'єкта А. До перетворювачів, які працюють за подібною схемою, відносяться, наприклад, перетворювачі фотоелектричних колориметрів і нефелометрів, які використовують для вимірювання прозорості та мутності рідкого або газового середовища.

3. Джерело світла (лампа Л) посиляє світловий потік на об'єкт вимірювання А (рис. 5.18, в); відбиваючись від поверхні тіла А, світловий потік потрапляє на фотоелемент. Відбивна здатність поверхні залежить від якості та стану цієї поверхні, що, в свою чергу, може бути функцією вимірюваної неелектричної величини.

За подібною схемою можуть працювати фотоелектричні перетворювачі приладів, що використовуються для вимірювання якості поверхні (блискучість, шорсткість тощо). За цією ж схемою можна використовувати фотоелектричний перетворювач і як імпульсне реле, наприклад в приладах для вимірювання вологості за точкою роси; при температурі, що відповідає появі роси (помутніння

дзеркала), фотострум різко зменшується. Цю ж схему можна використовувати і для вимірювання швидкості обертання валу, якщо дзеркальце закріпити на останньому. Тоді фотоелемент отримує один імпульс за час одного обороту валу, і частота фотоструму буде функцією швидкості обертання.

4. Світловий потік по шляху від лампи Л до фотоелементу (рис. 5.18, г) зустрічає об'єкт вимірювання А, що закриває частину потоку, а отже, змінює величину освітленості фотоелемента. Ступінь екранування світла в подібних перетворювачів визначається вимірюваним лінійним переміщенням або вимірюваними розмірами тіла А. Тілом А може бути, наприклад, нитка, товщину якої можна таким шляхом виміряти. Ця ж схема може бути використана і для роботи фотоелемента в режимі другої групи, якщо об'єкт вимірювання при своєму переміщенні закриває світловий потік, що може бути застосовано, наприклад, для рахунку числа виробів, що проходять по конвеєру.

5. При вимірюванні несутлових величин, коли проміжною величиною перетворення є величина світлова, наприклад, при вимірюванні концентрації речовини в розчині, коли проміжною величиною є зміна поглинання світла розчином.

Для зменшення похибки вимірювання фотоелектричні перетворювачі включаються в диференціальні або компенсаційні вимірювальні ланцюги. Диференціальна схема з двома фотоелектричними перетворювачами для вимірювання концентрації розчину наведена на рис. 5.19.

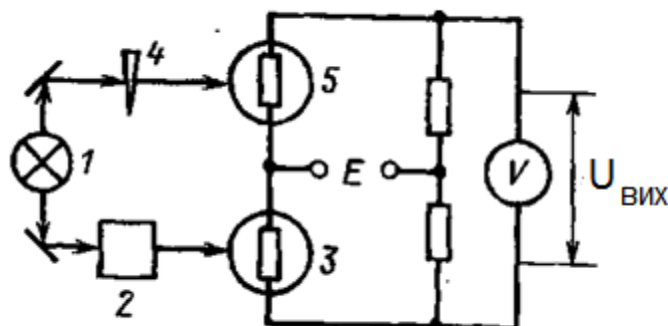


Рис 5.19. Диференціальна схема з двома фотоелектричними перетворювачами

Перший промінь світла від джерела 1 проходить через об'єкт, вимірювання 2, наприклад через кювету з досліджуваним розчином, і потрапляє на фоторезистор 3. Другий промінь проходить через застосовуваний для настройки приладу оптичний клин 4 і потрапляє на другий фоторезистор 5.

Фоторезистори включені в мостову схему. Завдяки диференціальній схемі здійснюється компенсація температурних і інших адитивних похибок. Однак внаслідок розкиду характеристик і параметрів фотоелектричних перетворювачів канали диференціальної схеми дещо відрізняються один від одного, і компенсація виходить неповною. Перевагою схеми є її придатність для вимірювання швидко змінних величин. Інерційність приладу обумовлюється інерційністю фотоелектричних перетворювачів і вихідного приладу.

Меншу похибка мають диференціальні схеми з одним фотоелектричним перетворювачем (рис. 5.20, а).

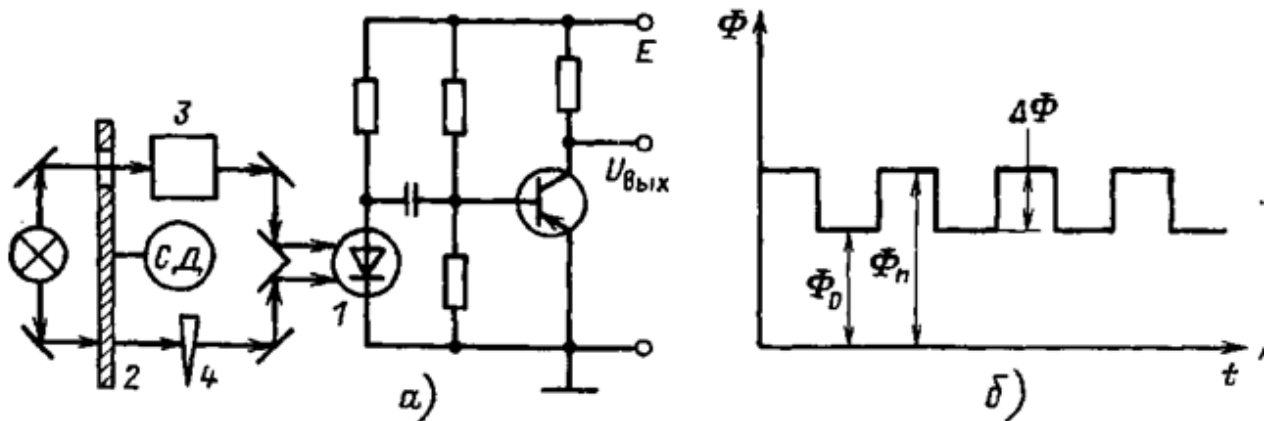


Рис. 5.20. Диференціальна схема з одним фотоелектричним перетворювачем (а) та зміна світлового потоку з часом (б)

За цією схемою промені світла з одного та іншого каналів позмінно освітлюють фотоелектричний перетворювач 1. Комутація здійснюється за допомогою диска 2, що має отвори і обертається з постійною швидкістю за допомогою синхронного двигуна СД. Світловий потік, падаючий на фотоелектричний перетворювач, модулюється і змінюється в часі, як показано на рис. 5.20,б. Змінна складова світлового потоку

$$\Delta\Phi = \Phi_n - \Phi_0, \quad (5.23)$$

де  $\Phi_{\Pi}$  - світловий потік, що пройшов через об'єкт вимірювання 3;  
 $\Phi_0$  - зразковий світловий потік, що пройшов через оптичний клин 4.

Змінна складова світлового потоку перетворюється в змінну напругу і підсилюється. В даному приладі обидва канали диференціальної вимірювальної схеми розрізняються менше, ніж в попередньому прикладі, і краще компенсуються адитивні похибки.

## 5.5. Теплоелектричні перетворювачі

Для теплових приймачів випромінювання первинним процесом є перетворення енергії поглиненого світла в енергію теплового збудження кристалічної решітки, яке викликає підвищення температури приймача, що приводить до зміни його електричних властивостей.

До електричних величин, які з успіхом можуть використовуватися для вимірювання потоку випромінювання, відносяться:

- опір металевого або напівпровідникового елемента (болметри);
- термо-ЕРС (ефект Зеебека);
- спонтанна електрична поляризація піроелектриків.

Поглинанню випромінювання сприяє чорніння приймальної поверхні відповідним покриттям (наприклад, платиновою черню), випромінювальна здатність якого  $\epsilon$  близька до 1. Коефіцієнт поглинання чорненої поверхні мало відрізняється від одиниці в діапазоні від ультрафіолетового до інфрачервоного випромінювання, якщо шар черні має товщину (до 30-40 мкм), що перевищує величину максимальних довжин хвиль, на які розрахований приймач. Таким чином, вихідна величина приймача пропорційна інтегральній потужності  $P$  падаючого на його площадку випромінювання і не залежить від спектрального складу цього випромінювання.

Розглянемо один з видів теплоелектричних перетворювачів – **пірометри**. Пірометри (інфрачервоні датчики) – це прилади, що використовують енергію випромінювання нагрітих тіл, що дає можливість вимірювати температуру різних об'єктів на відстані. Як правило, перетворювачі для вимірювання температури передбачають безпосередній контакт між чутливими елементами і вимірюваним об'єктом або середовищем. Верхня межа використання таких методів обмежується термічною стійкістю використовуваних чутливих



елементів і лежить в межах до 2500 °С. Але трапляються випадки, коли необхідно виміряти більш високі температури або неможливий безпосередній контакт датчика з середовищем. В цих випадках використовують безконтактні засоби вимірювання – пірометри, які вимірюють температуру за тепловим випромінюванням. Пірометри забезпечують вимірювання температур в діапазоні від 20 до 6000°С.

В основі безконтактних методів вимірювання температур лежить температурна залежність випромінювання абсолютно чорного тіла, тобто тіла, яке здатне повністю поглинати випромінювання будь-якої довжини хвилі, що падає на нього. Але реальні тіла повною мірою не поглинають падаюче випромінювання і характеризуються коефіцієнтом поглинання  $\alpha$ , який визначає здатність поглинати випромінювання досліджуваним тілом в порівнянні з абсолютно чорним тілом.

Світність будь-якого тіла  $R$  можна виразити через світність абсолютно чорного тіла  $R^*$  за виразом:

$$R = \alpha \cdot R^*$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання досліджуваного тіла.

При даній температурі  $T$  максимальне значення спектральної світності абсолютночорного тіла складає  $R^* = 1,301 \cdot 10^{-5} T^5$ , а його інтегральна світність визначається законом Стефана-Больцмана

$$R^* = \sigma T^4$$

де  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  – константа випромінювання;  $T$  – абсолютна температура тіла.

Ці фундаментальні закони дозволяють використовувати оптичні безконтактні перетворювачі для вимірювання температури реальних тіл.

Пірометри діляться на радіаційні, яркісні і кольорові.

Радіаційні пірометри використовуються для вимірювання температур від 20 до 2500 °С, причому прилад вимірює інтегральну інтенсивність випромінювання реального об'єкта. Температура, що вимірюється радіаційним пірометром  $T_p$  завжди менша за істинну температуру тіла  $T$ . Залежність між ними визначається виразом  $T_p = T \sqrt[4]{\epsilon}$ , де  $\epsilon$  – коефіцієнт неповноти (чорноти) випромінювання, який

має різні значення для різних матеріалів. Тому радіаційні пірометри потребують градування конкретно для тих тіл, температуру яких вони вимірюють.

Яркісні (оптичні) пірометри використовуються для вимірювання температур від 500 до 4000 °С. Принцип їх дії заснований на порівнянні у вузькій ділянці спектру яскравості досліджуваного об'єкта з яскравістю зразкового випромінювача (фотометричної лампи). За спектральною густиною випромінювання можна визначити потрібну температуру. Яркісні пірометри також мають похибку від неповноти випромінювання – вимірювана ними температура відрізняється від істинної. Але ці похибка залишається приблизно сталою в широких межах зміни коефіцієнта  $\varepsilon$  і може бути врахована градуванням пристрою в робочих умовах.

Кольорові пірометри засновані на вимірюванні відношення інтенсивностей випромінювання на двох довжинах хвиль, які обирають зазвичай в червоній або синій частинах спектра. Якщо коефіцієнти наповноти випромінювання для обох обраних довжин хвиль однакові, то температура, яка вимірюється кольоровими пірометрами, дорівнює істинній температурі тіла. Це одна з вирішальних переваг кольорових пірометрів. Крім того, покази кольорових пірометрів не залежать від відстані до об'єкта вимірювання і від поглинання радіації в середовищі, що заповнює цю відстань, якщо коефіцієнти поглинання однакові для обох довжин хвиль. Кольорові пірометри використовуються для вимірювання температури в діапазоні від 800 °С.

Пірометри дозволяють вимірювати температуру у важкодоступних місцях і температуру рухомих об'єктів, високі температури, де інші датчики вже не працюють.

### **5.6. Терморезисторні перетворювачі (терморезистори).**

Терморезистивне вимірювальне перетворення засноване на залежності електричного опору провідників і напівпровідників від температури.

Термоопір являє собою провідник або напівпровідник зі струмом, який має великий температурний коефіцієнт і знаходиться в теплообміні з навколишнім середовищем.

Існує кілька шляхів теплообміну: 1) конвекцією; 2) теплопровідністю середовища; 3) теплопровідністю самого провідника; 4) випромінюванням.

Інтенсивність теплообміну провідника з навколишнім середовищем залежить від наступних факторів:

- швидкість газового або рідкого середовища;
- фізичні властивості середовища (густина, теплопровідність, в'язкість);
- температура середовища;
- геометричні розміри провідника.

Залежність температури провідника, а отже, і його опору від перерахованих факторів можна використати для вимірювання різних неелектричних величин, що характеризують газове або рідке середовище: температури, швидкості, концентрації, густини (вакууму).

Промисловість випускає термоопори різноманітного конструктивного виконання. Перевагою їх є дуже високий (негативний) температурний коефіцієнт опору (2,5 ... 4,0% на 1 °C).

Для вимірювання температури широке застосування отримали електричні **термометри опору**, принцип роботи яких заснований на зміні електричного опору металевих провідників (або напівпровідників) в залежності від температури. Електричний опір провідників (металів) при нагріванні збільшується, а напівпровідників - зменшується. Таким чином, **терморезистори** можуть бути використані для вимірювання неелектричних величин, що характеризують температуру середовища.

Маючи залежність опору провідника від температури і визначаючи цей опір за допомогою електровимірювального приладу, можна визначити значення температури провідника. При розробці перетворювача конструкцію його намагаються зробити такою, щоб він був чутливий тільки до вимірюваної неелектричної величини, тобто щоб теплообмін перетворювача і середовища визначався саме цим параметром.

У вузькому температурному діапазоні залежність питомого електричного опору провідників від температури близька до лінійної:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_c(\theta - \theta_0)], \quad (5.24)$$

де  $\rho$  - питомий електричний опір провідника при температурі  $\theta$ ;  $\rho_0$  -

питомий електричний опір при температурі  $\theta_0$ ;  $\alpha_c$  - температурний коефіцієнт опору (ТКО).

У табл. 5.2 наведені значення питомого електричного опору  $\rho$  при  $0^\circ\text{C}$  і температурного коефіцієнта  $\alpha_c$  для деяких матеріалів.

Таблиця 5.2. Електричні властивості провідникових матеріалів при  $0^\circ\text{C}$

Матеріал	Питома електрична провідність, МСм/м	Питомий електричний опір, мкОм·м	Температурний коефіцієнт опору на $1^\circ\text{C}$
Фехраль	0,83	1,2	0,0002
Ніхром	0,91	1,1	0,0003
Ртуть	1,06	0,94	0,001
Манганін	2,38	0,42	0,000015
Константан	2	0,5	0,00005
Ванадій	5,55	0,18	0,004
Сталь	5...10	0,1 ...0,2	0,005
Платина	10,19	0,0981	0,004
Залізо	11,6	0,086	0,0065
Нікель	16,28	0,0614	0,007
Кальцій	21,7	0,0406	0,0042
Алюміній	40	0,025	0,0046
Золото	48,5	0,0206	0,004
Мідь	64,5	0,0155	0,0043
Срібло	67,1	0,0149	0,0043

В перетворювачах промислових термометрів опору застосовуються провідникові матеріали (мідь, платина, нікель).

У широкому діапазоні температур залежність питомого електричного опору від температури носить нелінійний характер. На рис. 5.21 показана залежність  $\rho(\theta)$  вольфраму для діапазону температур  $0 \dots 3600^\circ\text{C}$ . Апроксимація цієї залежності лінійною функцією (показана на рис. пунктирною лінією) дає в зазначеному інтервалі температур відносну похибку, що досягає 10%. Тому для вимірювальних перетворень, що вимагають високої точності, використовується апроксимація температурної залежності питомого

електричного опору поліномом третього порядку виду:

$$\rho = \rho_0 [1 + a(\theta - \theta_0) + b(\theta - \theta_0)^2 + c(\theta - \theta_0)^3] \quad (5.25)$$

де  $a, b, c$  – коефіцієнти, що визначаються хімічним складом матеріалу.

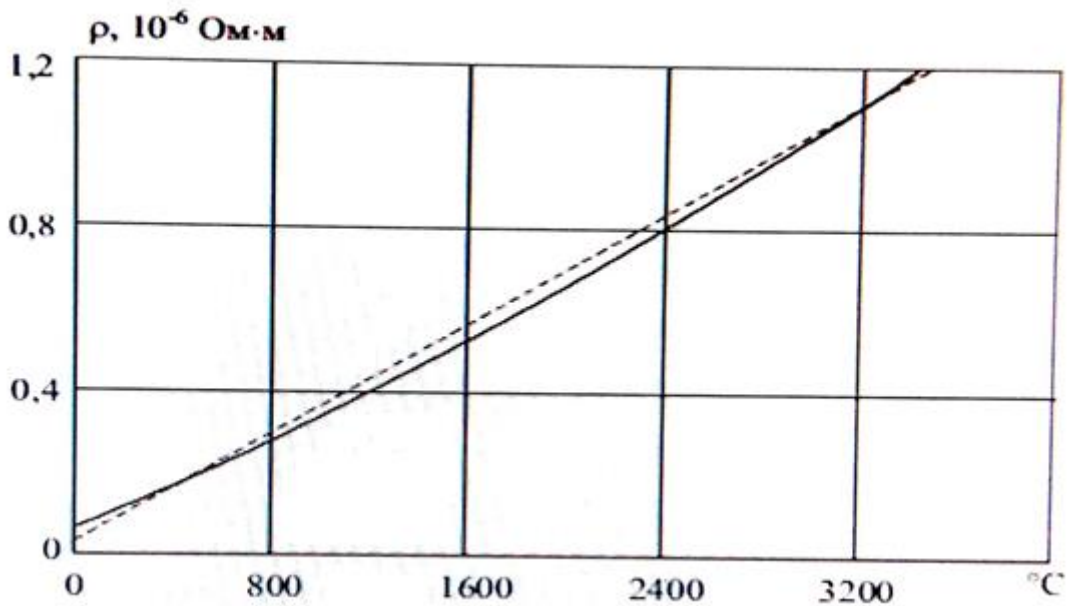


Рис. 5.21. Залежність питомого електричного опору вольфраму від температури (суцільна лінія) і апроксимація її лінійною залежністю (пунктирна лінія)

Залежність питомого електричного опору напівпровідників від температури має яскраво виражений нелінійний характер. На рис. 5.22 показана типова залежність електричного опору напівпровідникового резистора (термістора) від температури  $R(\theta)$ , а для порівняння наведена аналогічна залежність для металу (платини).

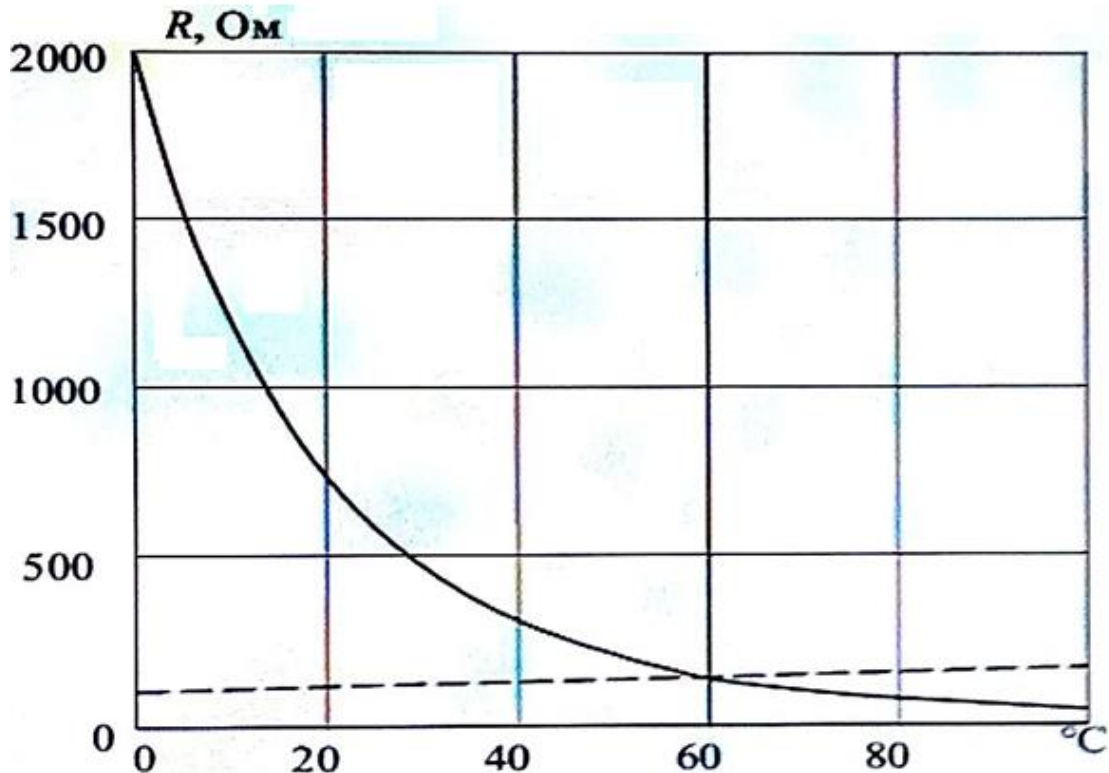


Рис. 5.22. Залежність електричного опору резисторів з напівпровідника (суцільна лінія) и платини (штрихова лінія) від температури

Аналіз цих залежностей показує, що опір термістора значно чутливіший до зміни температури, але характеризується набагато більшою нелінійністю залежності  $R(\theta)$  порівнянно з резистором з платини.

Залежність опору напівпровідника від температури можна апроксимувати різними функціями, але найбільшого поширення набув експоненціальний вираз:

$$R = R_0 \left[ \exp \beta \left( \frac{1}{\theta} - \frac{1}{\theta_0} \right) \right] \quad (5.26),$$

де  $R_0$  - опір напівпровідникового резистора при температурі  $\theta_0$ , К;  $R$  - опір напівпровідникового резистора при температурі  $\theta$ , К;  $\beta$  - температурний коефіцієнт, який визначається матеріалом напівпровідника і має розмірність  $1/\text{К}$ .

Величину  $\beta$  у вузькому діапазоні температур вважають постійною і такою, що не залежить від зміни температури (для наведеного на рис.8.10 прикладу  $\beta = 4000$  1/K). У широкому діапазоні температур залежність  $\beta$  від температури апроксимують поліномами другого і третього ступеня.

Перевагою напівпровідникових терморезисторів в порівнянні з металевими є висока чутливість. Недоліки полягають в значній нелінійності функції перетворення  $R(\theta)$ , її сильної залежності від хімічного складу матеріалу, що обумовлює великий розкид характеристик навіть для терморезисторів одного типу.

Для вимірювання температури в різних галузях народного господарства широко застосовують **контактні дрові терморезистори** (термометри опору). Термометри опору (ТО) представляють собою засіб вимірювання температури, що складається з одного або декількох термочутливих елементів опору і внутрішніх сполучних проводів, розташованих в герметичному захисному корпусі, зовнішніх клем або виводів, призначених для підключення до вимірювального приладу або перетворювачу.

Терморезистори випускаються двох типів: термоопори платинові (ТОП) і термоопори мідні (ТОМ), в яких як вимірювальні перетворювачі використовують чутливі елементи відповідно з платини і міді. Платинові терморезистори використовують для вимірювання температури в межах  $-260 \dots +1100$  °С, мідні -  $200 \dots +200$  °С.

Інколи для вимірювання температури застосовують також терморезистори, виконані з вольфраму і нікелю.

Принцип дії терморезистивних перетворювачів, як вже згадувалося, базується на властивості провідників чи напівпровідників змінювати електричний опір при зміні температури. Для перетворень температури використовують матеріали, які мають значний питомий електричний опір і високий температурний коефіцієнт опору (ТКО), високу стабільність ТКО, високу відтворюваність електричного опору для даної температури, стабільність хімічних і фізичних властивостей під час нагрівання, інертність до дії досліджуваного середовища.

Для вимірювання температури досить широко застосовують терморезистори, виготовлені з платинового і мідного дрові, рідше - вольфрамові і нікелеві терморезистори.

Найкращим матеріалом для термометрів опору вважається

**платина.** Цей благородний метал навіть при високих температурах в окисному середовищі не змінює своїх фізичних і хемічних властивостей і може бути легко отриманий у чистому вигляді. Вона має досить великий температурний коефіцієнт електричного опору ( $3,94 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ ) і велике значення питомого опору ( $0,099 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ). Верхня температурна межа застосування платинових термометрів опору з міркувань механічної міцності обмотки, виготовленої з дуже тонкого дроту, обмежується  $650^\circ\text{C}$ .

Опір  $R_t$  платини в залежності від температури в інтервалі  $0—650^\circ\text{C}$  знаходиться за формулою:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2), \quad (5.27)$$

де  $R_0$  - опір при  $0^\circ\text{C}$

$A$  і  $B$  — сталі, обумовлені градуванням термометра.

У платинових перетворювачах дріт без ізоляції намотують на каркас зі слюди або кераміки. На рис. 5.23, а показаний пристрій **платинового** терморезистора. У каналах керамічної трубки (2) розташовані дві (або чотири) секції спіралі (3) з платинового дроту, з'єднані між собою послідовно.

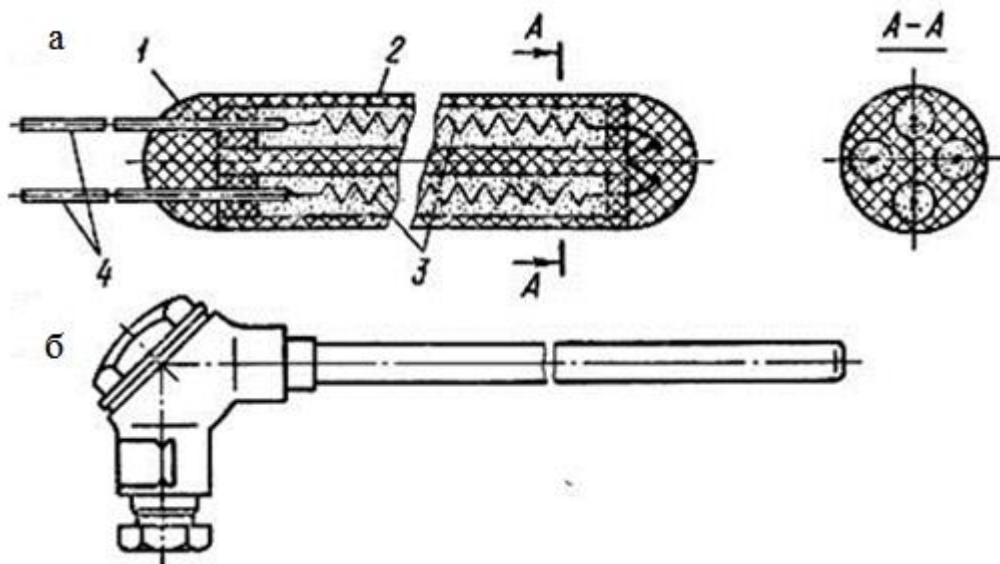


Рис. 5.23. Будова і зовнішній вигляд арматур платинового термометра опору.

а - будова платинового терморезистора: 1 – глазур; 2 – канали керамічної трубки; 3 – спіраль; 4 – виводи; б – зовнішній вигляд терморезистора



До кінців спіралі припаюють виводи (4), що використовуються для включення терморезистора у вимірювальний ланцюг. Кріплення виводів і герметизацію керамічної трубки проводять глазур'ю 1. Канали трубки засипають порошком безводного оксиду алюмінію, що виконує роль ізолятора й фіксатора спіралі. Порошок безводного оксиду алюмінію, що має високу теплопровідність і малу теплоємність, забезпечує гарну передачу тепла та низьку інерційність терморезистора. Для захисту терморезистора від механічних і хімічних впливів зовнішнього середовища його поміщають у захисні арматури (рис 5.23, б) з нержавіючої сталі.

Платинові терморезистори використовують для вимірювання температури в межах  $-260 \dots +1100 \text{ }^\circ\text{C}$

До **недоліків платинових** перетворювачів температури належать досить висока забруднюваність платини при високих температурах парами металів (особливо заліза), порівняно невисока хімічна стійкість у відновному середовищі, внаслідок чого вона стає крихкою, втрачає стабільність характеристик.

**Мідь** також має ряд позитивних властивостей, що дозволяють використовувати її для виготовлення технічних термометрів опору. **Мідь**, внаслідок низької вартості і досить високої стійкості до корозії, широко застосовується в перетворювачах температури в діапазоні  $-50 \dots +180 \text{ }^\circ\text{C}$ . У мідних терморезисторах застосовують безкаркасну обмотку з ізольованого дроту, зверху покритого фторопластовою плівкою.

До **переваг** міді відносяться її дешевизна, легкість отримання в чистому вигляді і порівняно високе значення температурного коефіцієнту електричного опору ( $4,26 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ ).

До **недоліків мідних** перетворювачів температури відносять невелике значення питомого опору ( $0,017 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$ ), високу окислюваність при високих температурах, внаслідок чого вони застосовуються у порівняно вузькому, діапазоні температур в середовищах з низькою вологістю і при відсутності агресивних газів. Верхня межа застосування мідних термометрів опору обмежується температурою до  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Залежність опору міді від температури  $t$  в інтервалі  $50 \div 180 \text{ }^\circ\text{C}$  виражається рівнянням:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (5.28)$$

де  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору міді,  $\text{град}^{-1}$ .

Якщо залежність електричного опору від температури платиногового терморезистора нелінійна (див. (5.27)), то для мідного вона має вигляд прямої лінії (рис. 5.24, пряма 1) і виражається формулою (5.28).

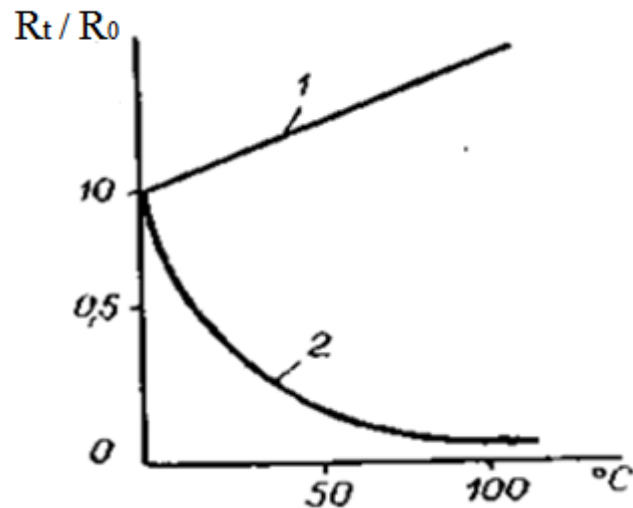


Рис. 5.24. Залежності електричного опору від температури:  
1 — мідного провідника; 2 — напівпровідника.

Мідні терморезистори використовують для вимірювання температури в межах  $-200 \dots +200$  °С.

Для забезпечення необхідної механічної міцності як платинові, так і мідні чутливі елементи вставляють у тонкостінні металеві гільзи, засипають керамічним порошком з високою теплопровідністю і герметизують.

На рисунку 5.25 показано одну з найпоширеніших конструкцій чутливого елемента сучасного платиногового терморезистивного перетворювача температури.

Чутливий елемент виконується у вигляді спіралі 1, розміщеної в канавках дво- або чотириканального керамічного каркаса 2, ущільнених порошкоподібним оксидом алюмінію.

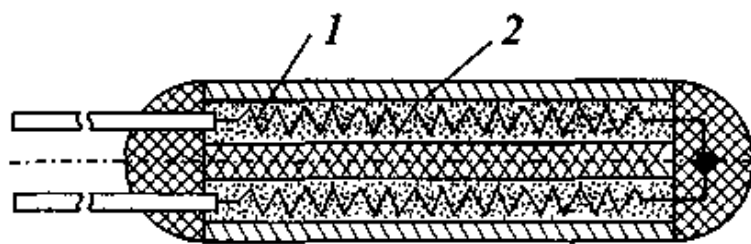


Рис. 5.25. Конструкція чутливого елемента:  
1 – спіраль; 2 – керамічний каркас

Крім платини та міді, для чутливих елементів термоперетворювачів температури використовують нікель, вольфрам та інші чисті метали.

**Нікель** є хемічно стійким матеріалом навіть при високих температурах, проте має складну залежність опору від температури і невисоку її відтворюваність.

**Тугоплавкі метали** – вольфрам, молібден, тантал і ніобій – застосовуються обмежено. Вплив рекристалізації та росту зерен в результаті дії температури робить чутливий елемент з цих матеріалів крихким і тому дуже чутливим до механічних вібрацій.

Термометр опору виготовлений з тонкого **металевого дроту**, що намотаний на каркас з електроізоляційного матеріалу (слюди, кварцу, пластмаси) і поміщений в металевий захисний чохол з головкою для підключення сполучних проводів, є первинним приладом вимірювального пристрою, що живиться від зовнішнього джерела струму.

В якості вторинних приладів, що працюють з термометрами опору, застосовують врівноважені та неуврівноважені вимірювальні мости і логометри.

Опір електричних термометрів при  $0^{\circ}\text{C}$  приймають рівним  $10 \div 100$  Ом. Збільшення опору термометра дозволяє зменшити похибку вимірювання, пов'язану зі зміною опору з'єднання провідників під впливом температури навколишнього середовища. Однак застосування термометрів з більш високим опором може привести до похибки через нагрівання їх вимірювальним струмом, тому що при тому самому об'ємі обмотки, обумовленому розмірами термометра, для підвищення його опору необхідно зменшити діаметр дроту, що відбивається також і на механічній міцності приладу.

Вимірювальний струм, що протікає по обмотці термометра опору, звичайно дорівнює 6...8 мА.

Поряд з термометрами опору з металевих провідників (платини і міді) для вимірювання температури широко використовуються напівпровідникові терморезистивні перетворювачі температури – **напівпровідникові термометри опору (напівпровідникові терморезистори)** – терморезистори (термістори), виготовлені з порошкоподібної суміші окислів деяких металів (марганцю, міді, кобальту, нікелю та ін.), спресованої і спеченої при високій температурі. Перевагами напівпровідникових термоперетворювачів у порівнянні з металевими є малі габарити, мала інерційність і великі значення температурного коефіцієнта опору. **Напівпровідникові терморезистори**, що являють собою недротяні об'ємні нелінійні резистори різної форми (циліндричні, дискові, шайбові та ін.), на відміну від металевих резисторів мають негативний температурний коефіцієнт, тобто під час нагрівання зменшують свій опір. При температурі 50°C і нижче, значення їхнього температурного коефіцієнта в 5...10 разів більше, ніж у металів, що дає порівняно велику зміну опору  $R$  у залежності від температури.

Проте вони поступаються провідниковим в точності.

Залежність опору напівпровідникового перетворювача від температури (рис. 5.24, крива 2) досить добре описується формулою

$$R_T = R_0 \exp \left[ B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (5.29)$$

де  $B$  - стала, що залежить від властивостей напівпровідника, і яка визначає температурну чутливість;  $R_T$ ,  $R_0$  - опори терморезистора, що відповідають температурам  $T$  і  $T_0$  в шкалі Кельвіна.

Якщо для даного терморезистора стала  $B$  невідома, то її обчислюють за формулою

$$B = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \cdot \ln R_1 R_2, \quad (5.30)$$

де  $R_1$  і  $R_2$  — опори при температурах  $T_1$  і  $T_2$ .

Конструктивно напівпровідникові терморезистори виготовляють у виді стрижнів, покритих емалевою фарбою, таблеток і бусинок,

оплавлених склом, капсул з металевою оболонкою і т.п. Вони можуть працювати в діапазоні температур - 60... +120°C.

Основним недоліком напівпровідникових перетворювачів, що обмежує область їхнього застосування, є нелінійна характеристика і значний розкид від зразка до зразка як номінального опору, так і сталої В. Недоліками напівпровідникових термоопорів (терморезисторів) є нелінійна залежність їх опору від температури (рис. 5.24, б) і великий розкид характеристик у різних зразків одного і того ж типу. Це ускладнює отримання лінійної шкали приладу і заміну напівпровідника, що вийшов з ладу. Крім того, у них досить малий температурний діапазон (-100 ... + 120 °С). Для одержання сигналу вимірювальної інформації опір терморезистора за допомогою моста перетворюється в напругу. Як вимірювальні прилади при вимірюванні температури за допомогою терморезисторів найчастіше використовують логометри з безпосереднім відліком температури за шкалою.

Перевагами термометрів опору є висока точність вимірювання, можливість отримання приладів з безнульовою шкалою на вузькому діапазоні температур, легкість здійснення автоматичного запису, дистанційної передачі показів і можливість під'єднання до одного вторинного приладу за допомогою перемикача декількох однотипних термометрів. Недоліком цього методу вимірювання є потреба в сторонньому джерелі струму.

Застосовуючи перетворювачі для вимірювання різних величин, потрібно прагнути до того, щоб всі фактори, крім самої вимірюваної величини, як можна менше впливали на зміну опору термоперетворювача. Отже, вимоги до перетворювача, його похибки і властивості будуть визначатися в залежності від того, що вимірює прилад.

Розглянемо конкретні приклади застосування терморезисторів.

**Термометри опору.** Прилад для вимірювання температури, принци дії якого заснований на властивості металів і напівпровідників змінювати свій електричний опір при зміні температури, називається **термометром опору**.

У перетворювачах промислових термометрів опору застосовуються провідникові матеріали (мідь, платина, нікель).

Розглянемо устрій термометрів опору на прикладі термометра з провідниковим (платиновим) перетворювачем (рис. 5.26).

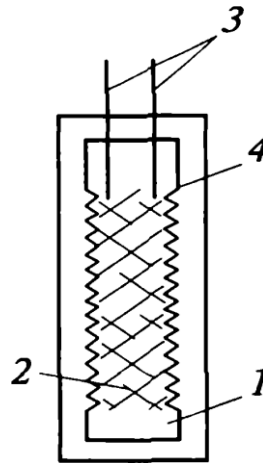


Рис. 5.26. Термометр опоры:

1 - каркас; 2 - платиновий дріт; 3 - виводи; 4 - прокладка

Перетворювач являє собою платиновий дріт 2, намотаний на слюдяний каркас 7. Обмотка покладена в зубчасту нарізку по краях каркасу. До кінців обмотки припаяні виводи 3 із срібного дроту. В термометрах опоры, призначених для вимірювання температур до 100 °С, можливе застосування виводів з міді. При більш високих температурах спай міді з платиною утворює термопару і термо-ЕРС, що розвивається нею, буде служити джерелом похибки.

Каркас затиснутий між двома ширшими пластинами 4 із слюди для ізоляції дроту від арматури. Весь пакет із слюдяних пластинок перев'язаний срібною стрічкою 5 і вставлений в арматуру (захисні трубки).

Мідні перетворювачі виконують з ізольованого мідного дроту, який намотується на пластмасовий каркас.

Найбільш істотною похибкою термометрів опоры є похибка, обумовлена зміною опоры лінії внаслідок коливання температури навколишнього середовища. При великих відстанях між об'єктом вимірювання і вимірювальною схемою опір лінії може бути 5 Ом, тоді як початковий опір терморезисторів зазвичай становить 46, 53 або 100 Ом. Тому зміна опоры лінії може внести суттєву помилку у вимірювання.

Нагрівання перетворювача струмом, що протікає по ньому, також утворює похибку. Для зменшення цієї похибки слід було б знижувати струм до мінімальної величини. Однак це призвело б до втрати чутливості мостової схеми і необхідності застосування

високочутливого індикатора. Тому струм через термоперетворювач вибирають в діапазоні 10 ... 15 мА.

Крім того, похибки вимірювання виникають в результаті втрат теплоти через випромінювання і теплопровідність захисної труби перетворювача, поміщеного в досліджуване середовище. Втрати через теплопровідність захисної труби зазвичай невеликі в порівнянні з втратами через випромінювання і залежать від матеріалу труби.

### **5.7. Вимірювальні перетворення температури в електричний сигнал на основі використання напівпровідникового р - n переходу**

Високу чутливість напівпровідникових перетворювачів температури в електричний сигнал при високій лінійності перетворення, сумірною з характеристиками термопар і металевих терморезисторів, можна забезпечити за рахунок використання в якості термоелектричного перетворювача напівпровідникового р - n переходу.

Електронно-дірковий перехід (р-n перехід) - область напівпровідника, в якій має місце просторова зміна типу провідності від електронної n до діркової р. Електронно-дірковий перехід може бути створений різними шляхами, наприклад, в об'ємі одного і того ж напівпровідника, легованого в одній частині донорної домішкою (р-область), а в іншій акцепторною (n - область).

Так як в р-області концентрація дірок набагато вище, ніж в n - області, дірки з р-області прагнуть дифундувати в n - область, а електрони - в р-область (рис.5.27, а). В результаті такого переходу зарядів виникає контактне електричне поле, яке протидіє подальшій дифузії електронів і дірок. Різниця потенціалів, що виникає між областями через наявність контактного поля і звана **контактною різницею потенціалів**, становить зазвичай десяті частки вольт. Якщо прикласти до р-n переходу зовнішнє електричне поле, напрямом якого протилежний контактному (**пряме зміщення**, позитивний потенціал прикладений до р-області), то через перехід потече електричний струм (**прямий струм  $I_{пр}$** ). Якщо прикласти до р-n переходу зовнішнє електричне поле, напрямом якого збігається з контактним (**зворотне зміщення**, позитивний потенціал прикладений до n- області), то це призведе до підвищення потенційного бар'єру. Струм через перехід (**зворотний струм  $I_{зв}$** ), буде дуже малий

(приблизно в  $10^5 - 10^6$  разів менше прямого струму), а його значення практично не залежить від прикладеної напруги. На рис. 5.27, б приведена вольт-амперна характеристика р-п переходу - залежність сили електричного струму  $I$ , що протікає через перехід, від прикладеної до переходу напруги  $U$ . Область позитивних значень напруги  $U$  відповідає прямому зміщенню переходу.

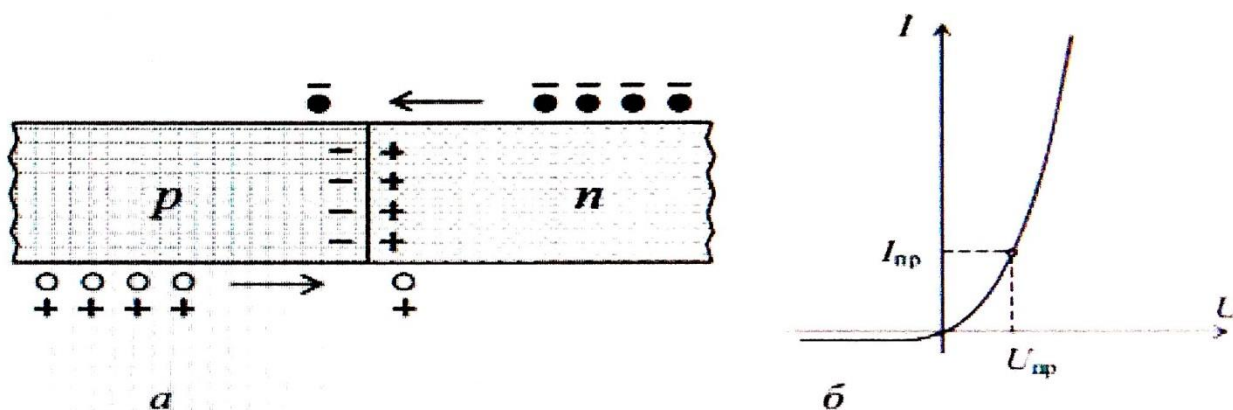


Рис. 5.27. Схема р-п переходу (а) і його вольт-амперна характеристика (б): о - електрон; • - дірка

Значення напруги  $U_{пр}$ , прикладеної до зміщеного в прямому напрямку переходу при деякому фіксованому прямому струмі  $I_{пр}$ , (рис. 5.27, б) залежить від температури переходу  $\theta$  і з її збільшенням зменшується. У досить широкому діапазоні температур можна прийняти, що зміна напруги на переході  $\Delta U_{пр}$  прямо пропорційна зміні температури  $\Delta\theta$ :

$$\Delta U_{пр} = k_T \Delta\theta \quad (5.31)$$

де  $k_T$  - температурний коефіцієнт,  $V/^\circ C$ .

Величина  $k_T$  є від'ємною, залежить від типу напівпровідника, а її орієнтовне значення становить приблизно -  $25 \text{ мВ}/^\circ C$ .

Перевагою термоелектричного перетворювача на основі р-п переходу є більш висока чутливість в порівнянні з термопарою і терморезистором, відсутність необхідності, на відміну від термопар, знати при вимірюванні температуру опорного спаю. При цьому може бути забезпечена прийнятна лінійність функції перетворення, співмірна з характеристиками термопар і металевих терморезисторів. Як недолік слід зазначити відносно малий діапазон вимірюваних



температур (зазвичай  $-50 \dots + 150$  °C). Для термопар і металевих терморезисторів цей діапазон становить  $-200 \dots +2500$  °C.

### **5.8. Основні області застосування терморезисторних перетворювачів**

Теплові перетворювачі використовуються, перш за все, для контактного і безконтактного вимірювання температури, що є важливим параметром при протіканні кліматичних, металургійних, хімічних та інших процесів. Але також теплові перетворювачі широко використовуються для перетворення таких величин, як тепловий потік, швидкість потоку рідини або газу, витрати, хімічний склад, тиск газів, вологість і т.п.

Теплове поле поверхні об'єкта є джерелом інформації про особливості теплопередачі, які, в свою чергу, залежать від внутрішньої структури об'єкта і, зокрема, наявності внутрішніх і зовнішніх дефектів.

Рис. 5.29 ілюструє застосування теплового перетворення для отримання інформації про якість з'єднання двох стрижнів з різного матеріалу. Якщо створити в такому складеному об'єкті тепловий потік теплопровідності за рахунок різної температури кінців, то в умовах термодинамічної рівноваги після завершення теплових перехідних процесів розподіл температур уздовж стрижнів матиме вигляд, показаний на рисунку. Нахил залежності  $\theta(x)$  для кожного зі стрижнів визначається питомою теплопровідністю матеріалу. У разі ідеального контакту стрижнів будь-якого стрибка температури на їх границі не відбувається. У реальному ж випадку з огляду на можливу наявність нещільності з'єднання (дефект клейового або зварного з'єднання, показаний на рисунку в збільшеному вигляді) спостерігається стрибок температури  $\Delta\theta$ , обумовлений наявністю перехідного теплового опору і який характеризує якість з'єднання.

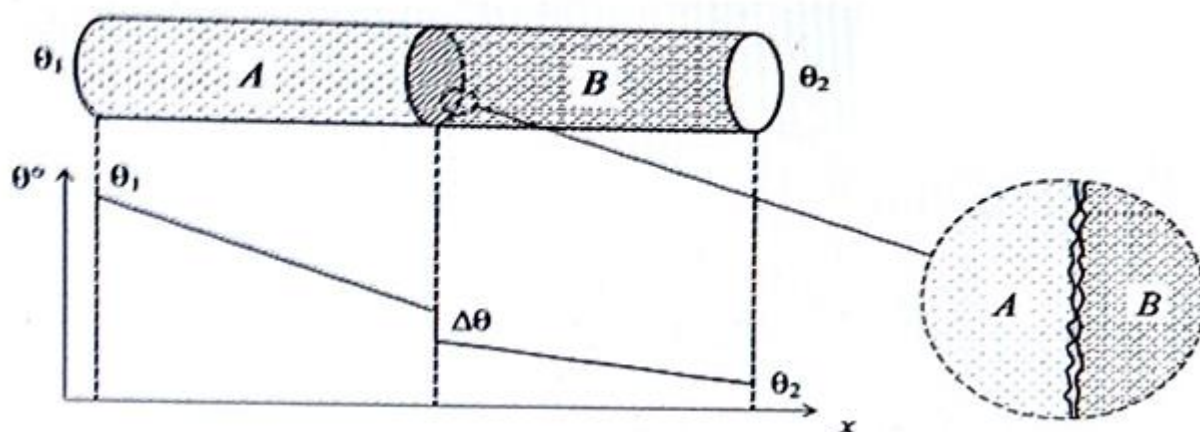


Рис. 5.29. Температурний профіль об'єкта, що складається із з'єднаних між собою стрижнів з різнорідних матеріалів.

На рис. 5.30 ілюструється застосування теплового перетворення для вимірювання швидкості газового потоку. Отримання вимірювальної інформації засновано на залежності провідності теплопередачі конвекцією від швидкості переміщення середовища. Терморезистивний перетворювач температури поміщають в досліджуване середовище і пропускають через нього електричний струм.

У стаціонарному режимі має місце рівність теплового потоку, що підводиться до терморезистору від джерела електричного струму, і теплового потоку конвекції:  $q_{\text{вн}} = q_{\text{к}}$ .

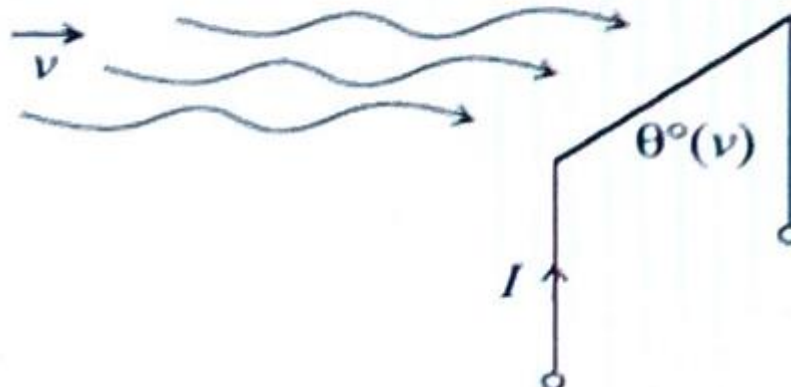


Рис. 5.30. Терморезистор, що нагрівається електричним струмом, в газовому потоці

Тепловий потік  $q_{\text{вн}}$  визначається величинами струму  $I$  і електричного опору терморезистора  $R$ :  $q_{\text{вн}} = I^2 R$ , а тепловий потік  $q_{\text{к}}$  є функцією теплової провідності конвекцією  $\gamma_{\text{к}}$  і різниці температур перетворювача  $\theta_{\text{п}}$  і середовища  $\theta_{\text{с}}$ :  $q_{\text{к}} = \gamma_{\text{к}}(\theta_{\text{п}} - \theta_{\text{с}})$ . Шляхом елементарних перетворень отримуємо:

$$\theta_{\text{п}} = \theta_{\text{с}} + \frac{I^2 R}{\gamma_{\text{к}}} \quad (5.32)$$

Таким чином, при незмінній температурі газового потоку і постійній потужності, що підводиться до термoperетворювача, його температура є функцією теплової провідності  $\gamma_{\text{к}}$  і відповідно швидкості газового потоку.

## 5.9. Електрохімічні перетворювачі

Електрохімічне вимірювальне перетворення засноване на фізико-хімічних процесах, що протікають в розчинах, які проводять електричний струм.

**Електрохімічними** називаються вимірювальні перетворювачі, принцип роботи яких ґрунтується на залежностях між складом і властивостями розчинів та електричними параметрами перетворювачів, якими є опір перетворювача, спад напруги, що утворився при проходженні струму через розчин, е. р. с. тощо.

Принцип дії електрохімічних вимірювальних перетворювачів заснований на явищах, що виникають при проходженні електричного струму через електроліти або внаслідок окислювально-відновлюваних процесів, що виникають на електродах.

Електрохімічний перетворювач являє собою електролітичну комірку, заповнену розчином, що проводить електричний струм, і яка має два або більше електродів, які поміщаються в резервуар з аналізованим розчином. У загальному випадку електроди безпосередньо беруть участь у фізико-хімічних процесах, що протікають в комірці. У ряді випадків використовується один електрод, а роль другого електроду виконують металеві стінки посудини.

Розглянемо основні фізико-хімічні процеси, що протікають в електрохімічному перетворювачі.

Основним розчинником хімічних речовин є вода. Дистильована вода має низьку електропровідність, оскільки в її молекулі  $\text{H}_2\text{O}$  зв'язок між складовими її іонами  $\text{H}^+$  і  $\text{OH}^-$  дуже сильний. Процес дисоціації протікає слабо і кількість вільних іонів (носіїв зарядів) обмежена. Значно вищу електричну провідність мають водні розчини солей, кислот і лугів. Причиною цього є діелектричні властивості води. Будучи речовиною з високою діелектричною проникністю ( $\epsilon_k = 81$ ) вода, поляризуючись в електричному полі іонів розчиненої у воді речовини, послаблює сили електричної взаємодії між цими іонами. Це призводить до інтенсивної дисоціації молекул розчиненої речовини на вільні іони (носії зарядів). Речовини, що розчиняються у воді з утворенням позитивних і негативних вільних іонів, називаються електролітами.

Питома електрична провідність розчину  $\gamma$  залежить від його концентрації і пропорційна хімічній активності розчину:

$$\gamma = \lambda f c = \lambda a$$

де  $f$  - коефіцієнт активності;  $c$  - молярна концентрація розчину (г-моль/л);  $a$  - хімічна активність розчину;  $\lambda$  - еквівалентна електропровідність, яка відповідає одиничному значенню хімічної активності розчину.

Коефіцієнт активності  $f$ , що дорівнює одиниці при дуже слабких концентраціях розчину, зменшується в міру підвищення концентрації. Таким чином, питома електрична провідність розчину є деякою складною функцією його концентрації.

Режими реальних хімічних процесів визначаються хімічною активністю розчину і тому на практиці часто потрібно вимірювати її значення.

На рис. 5.31 показані залежності питомої електричної провідності  $\gamma$  від концентрації  $c$  для різних розчинів. Аналіз цих залежностей показує, що для слабо концентрованих розчинів ( $c < 2,5$  г моль/л) характерна практично лінійна залежність  $\gamma(c)$ , оскільки для таких розчинів  $f \rightarrow 1$ . Для розчинів середньої концентрації ( $c < 3 \dots 8$  г моль/л) спостерігається слабка залежність  $\gamma$  від  $c$ . В цьому діапазоні зміни концентрації збільшення значення концентрації  $c$  компенсується зменшенням коефіцієнта активності  $f$ . Для концентрованих розчинів характерно зменшення  $\gamma$  при збільшенні  $c$ ,

оскільки для таких розчинів  $f \rightarrow 0$ . Сильно концентровані розчини володіють такою ж низькою електричною провідністю, як і дистильована вода.

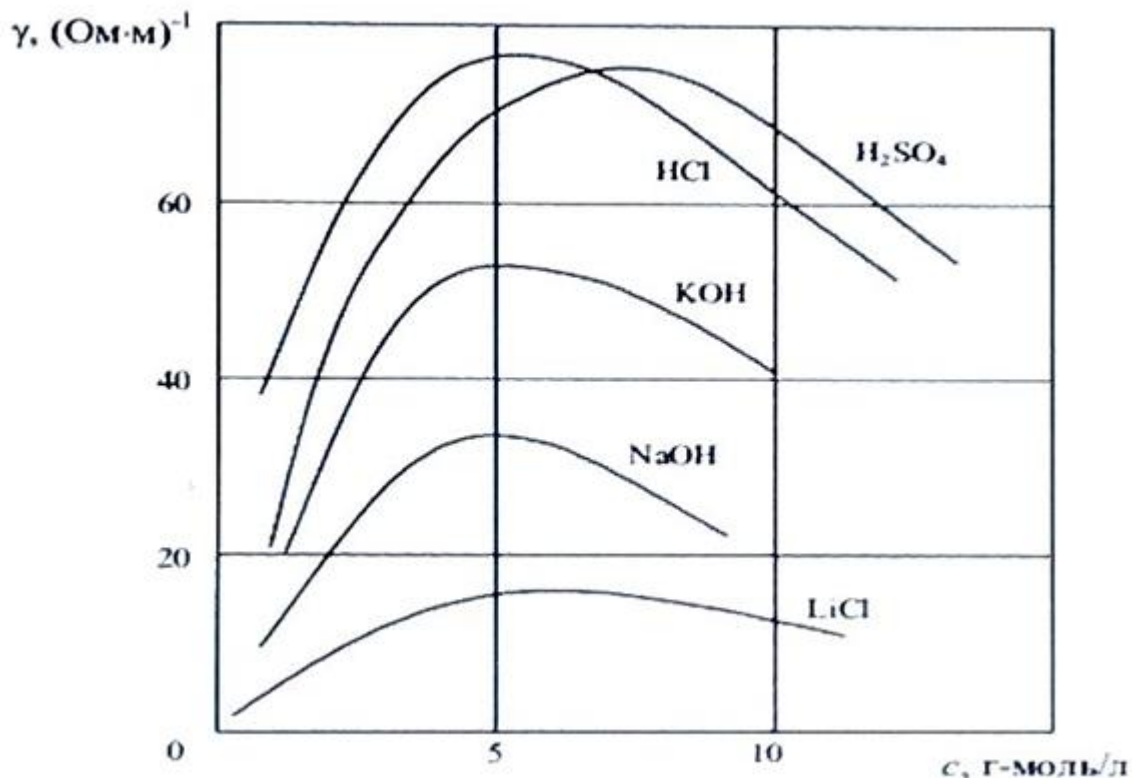


Рис. 5.31. Залежність питомої електричної провідності розчину від концентрації

Розглянуті залежності можуть бути використані для отримання інформації про склад та концентрацію розчину. Шляхом вимірювання питомої електричної провідності при відомому складі розчину може бути визначена його концентрація, а при відомій концентрації - склад розчину. Оскільки рухливість іонів сильно залежить від температури розчину, то і електропровідність розчину також залежить від температури.

Для слабо концентрованих розчинів температурна залежність описується виразом:

$$\gamma_{\theta} = \gamma_0 [1 + \beta(\theta - \theta_0)],$$

де  $\gamma_\theta$  і  $\gamma_0$  - питомі електричні провідності розчину при температурах відповідно  $\theta$  і  $\theta_0$ ;  $\beta$  - температурний коефіцієнт електропровідності.

У малому температурному діапазоні можна вважати, що значення  $\beta$  постійно і визначається тільки складом розчину. При кімнатній температурі приблизні значення  $\beta$  дорівнюють: 0, 016 K<sup>-1</sup> для кислот; 0,019 K<sup>-1</sup> для лугів і 0,024 K<sup>-1</sup> для солей. У широкому діапазоні зміни температури слід враховувати деяке зменшення значення  $\beta$  при підвищенні температури.

Електрохімічні перетворювачі застосовують для визначення складу та концентрації розчину, кількості електрики.

Такі перетворювачі використовуються головним чином для вимірювання питомої електропровідності електролітів, за якою визначають концентрацію. Найпростіший контактний кондуктометричний перетворювач містить два електроди, опущених у досліджуваний електроліт. Опір між електродами залежить від концентрації (провідності) розчину.

Для зменшення похибки від поляризації і забруднення електродів іноді застосовують чотириелектродні перетворювачі (схема 5, табл.6.1) з двома струмовими 1 і двома потенціальними 2 виводами, з яких знімається вимірювана напруга. Як правило, кондуктометричні перетворювачі працюють на змінному струмі, оскільки електроліз розчину проходить на постійному струмі, що призводить до значних похибок вимірювання. Крім визначення концентрації електролітів резистивні електрохімічні перетворювачі застосовуються для вимірювання механічних переміщень і деформацій, вологості газів, деревини тощо.

Основними різновидами електрохімічних перетворювачів є **резистивні електролітичні, гальванічні, кулонометричні та хімотронні.**

### 5.9.1. Резистивні електролітичні перетворювачі.

Принцип дії електрохімічних резистивних перетворювачів (їх називають також **кондуктометричними** або **електролітичними**) базується на використанні залежності опору  $R$  електролітичної комірки від складу і концентрації електроліту.

Дійсно,

$$R = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{L}{S} = \frac{K_\Gamma}{\gamma}$$

де  $\gamma$  — питома електропровідність розчину;  $S, L$  — площа і відстань між електродами;  $K_{\Gamma}$  — коефіцієнт перетворення, що залежить від співвідношення геометричних розмірів і визначається, як правило, експериментально шляхом використання стандартних розчинів із відомими значеннями питомої електричної провідності  $\gamma$ .

Отже, вимірюючи опір  $R$  електролітичної комірки, можна визначити при відомих  $S$  і  $l$  концентрацію розчину, а при відомій концентрації — механічні величини, зокрема лінійні або кутові переміщення (рис. 5.32, а, б).

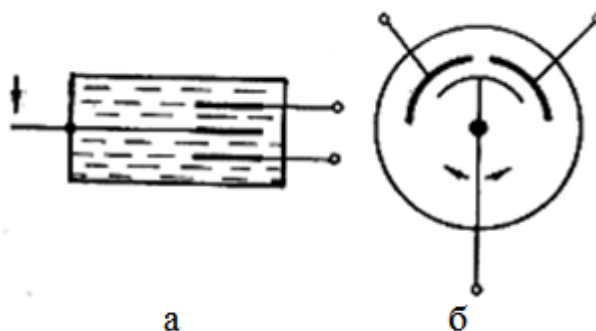


Рис. 5.32. До принципу дії резистивного електролітичного перетворювача

Вимірювання опору здійснюється, як правило, на змінному струмі (700 ÷ 1000 Гц) для виключення явища електролізу при вимірюванні на постійному струмі. Для зниження впливу ємнісного опору, що виникає внаслідок ємності подвійного шару зарядів на межі електрод-розчин і переміщення цих зарядів відносно один одного і щодо електродів, опори перетворювача вибирають з діапазону 500 ÷ 1000 Ом.

Основною перевагою електролітичних перетворювачів переміщення є незначний зворотний вплив на об'єкт дослідження (для переміщення електродів потрібні незначні зусилля). Основними недоліками таких перетворювачів є вплив поляризації, яка спричинює додаткову різницю потенціалів на межі електрод — електроліт, а також вплив температури навколишнього середовища. Щоб зменшити вплив поляризації на результат вимірювань, треба живити вимірювальне коло порівняно високою сталою (70—90 В) або змінною напругою з частотою 500—2000 Гц. Щоб зменшити

температурну похибку, застосовують відповідні схеми температурної компенсації.

### 5.9.2. Гальванічні перетворювачі.

Між двома електродами, опущеними в розчин електроліту, внаслідок фізико-хімічних процесів виникає різниця потенціалів. Власне на цьому і заснований принцип дії гальванічних перетворювачів: на залежності електродних потенціалів від концентрації розчинів.

Виникнення різниці потенціалів між металевим електродом і розчином при малій концентрації розчину обумовлено частковим розчиненням матеріалу електроду і переходом в розчин позитивних іонів металу. В цьому випадку електрод, що втратив позитивні заряди, буде мати відносно розчину, який ці заряди придбав, негативний потенціал. При великих концентраціях розчину, навпаки, позитивні іони можуть виділятися на електроді, заряджаючи його позитивно щодо розчину. Потенціал електроду відносно розчину, в який він опущений, називається **електродним потенціалом**.

Оскільки пряме вимірювання потенціалу електроду відносно розчину неможливо, вимірюють різницю потенціалів між двома електродами. В якості електрода порівняння, потенціал якого умовно приймається як нульовий, використовується **водневий електрод**. Цей електрод виконується з платини, на поверхні якої адсорбований газоподібний водень.

Найбільш широко гальванічні перетворювачі застосовують для вимірювання активності водневих іонів  $H^+$ , за допомогою якої можна визначити склад і властивості водних розчинів, які досліджуються. На практиці властивості розчинів чисельно характеризуються водневим показником рН:

$$pH = -\lg \alpha_{H^+}.$$

При переході від сильних лугів до сильних кислот значення рН змінюється від 0 до 14.

Суть методу визначення концентрації водневих іонів, тобто визначення рН вимірюванням електродного потенціалу, полягає в наступному. Якщо будь-який метал (або водень) занурити в розчин, який містить його однойменні іони, то метал набуває потенціалу, значення якого залежить від концентрації його іонів у розчині.



Залежність значення електродного потенціалу  $E$  від температури і хімічної активності розчину  $f_c$  визначається формулою Нернста:

$$E = E_0 + \frac{R\theta}{nF} \ln(f_c) \quad (5.33)$$

де  $E_0$  - нормальний потенціал електрода;  $R = 8,317$  Дж/К - універсальна газова стала;  $\theta$  - абсолютна температура, К;  $n$  - валентність іонів;  $F$  - постійна Фарадея.

Для отримання електродного потенціалу між воднем і розчином, який містить іони водню, необхідно мати водневий електрод. Для утворення водневого електрода використовують властивість водню адсорбуватися на поверхні платини. Потенціал платинового електрода, до якого безперервно підводять газоподібний водень, залежить від концентрації водневих іонів у розчині.

Значення електродних потенціалів, виміряні щодо водневого електрода при нормальній температурі ( $18^\circ\text{C}$ ) і нормальній концентрації (1 г-моль/л) електроліту, називають **нормальними потенціалами** електрода. Їх значення лежать в діапазоні  $\pm 3\text{В}$ : - 2,92 В для калію; - 0,76 В для цинку; +0,34 В для міді.

Виміряти абсолютне значення електродного потенціалу практично неможливо, але його можна виміряти відносно іншого потенціалу. Тому гальванічний перетворювач завжди складається з двох напівелементів, з'єднаних електрично між собою: робочого (електрод у досліджуваному розчині) і зразкового (нормального) з незмінним електродним потенціалом (електрод у розчині з відомою і незмінною концентрацією). Нормальним напівелементом може бути водневий електрод з нормальною сталою концентрацією водневих іонів. У промислових умовах найчастіше застосовується каломельний нормальний напівелемент.

Залежність (5.33) може бути використана для отримання вимірювальної інформації про склад і концентрацію розчину, а також про матеріал електрода. Причому для широкого класу задач зручнішим є порівняння потенціалу досліджуваного електрода, поміщеного в досліджуваний розчин, не з потенціалом водневого електрода, а з потенціалом електрода з відомого матеріалу, поміщеного в розчин з відомими складом і концентрацією.

На рис. 5.33 показана електролітична комірка, складена з двох напівелементів 1 і 2 з різними електродами і розчинами. У

досліджуваний розчин занурений електрод 1. Напівелементи з'єднуються за допомогою електролітичного ключа 3, що представляє собою заповнену концентрованим розчином КС1 трубку з напівпроникними перегородками (корками) по торцях. ЕРС такого перетворювача є функцією рН. Сумарна ЕРС  $E_{12}$  електричного кола, що складається з двох напівелементів і електролітичного ключа, визначається виразом:

$$E_{12} = E_{01} + \frac{R\theta_1}{n_1F} \ln(f_1 c_1) - E_{02} - \frac{R\theta_2}{n_2F} \ln(f_2 c_2) \quad (5.34)$$

де  $E_{01}$ ,  $n_1$ ,  $f_1 c_1$  і  $E_{02}$ ,  $n_2$ ,  $f_2 c_2$  - нормальний потенціал електроду, валентність і хімічна активність відповідно для першого і другого електродів, поміщених в перший і другий розчини.

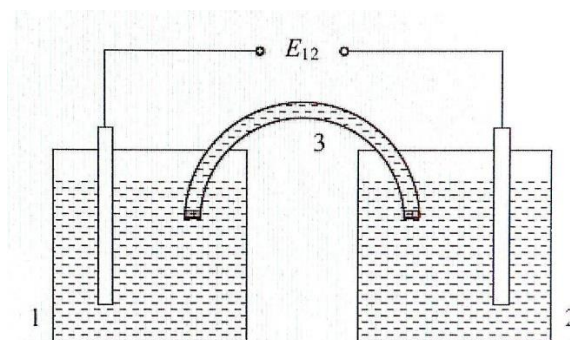


Рис. 5.33. Електролітична комірка, складена з двох напівелементів з різними електродами і розчинами:  
1,2 - ємності з розчинами; 3 - електролітичний ключ

Якщо напівелементи відрізняються тільки концентрацією однойменних іонів, то ЕРС такого гальванічного елемента залежить тільки від співвідношення активностей розчинів:

$$E_{12} = \frac{R\theta}{nF} \ln \frac{f_1 c_1}{f_2 c_2} \quad (5.35)$$

На межі двох розчинів внаслідок різної активності іонів (швидкості дифузії електроліту, яка визначається головним чином розмірами іонів) також виникає деяка різниця потенціалів між розчинами. Це **граничний** або **дифузійний потенціал**, значення якого може досягати десятків мілівольт. Для зменшення дифузійної

різниці потенціалів з'єднання двох напівелементів в гальванічний ланцюг здійснюється за допомогою електролітичного ключа, заповненого концентрованим розчином з можливо близькими за значенням рухливостями аніонів та катіонів, наприклад, КСІ.

Для вимірювань ЕРС гальванічних перетворювачів застосовують компенсатор або прилади з дуже великим вхідним опором, оскільки внутрішній опір таких перетворювачів досягає 100—200 МОм. Основним джерелом похибки гальванічних перетворювачів є коливання температури. Тому при вимірюванні рН треба враховувати поправку на температуру.

### 5.9.3. Кулонометричні перетворювачі.

Принцип роботи кулонометричного перетворювача ґрунтується на використанні явища електролізу. При проходженні через розчин електричного струму має місце явище електролізу, тобто процес хімічних перетворень в розчині з виділенням з нього речовини. Внаслідок електролізу концентрація іонів поблизу електродів буде відмінною від їх концентрації в інших частинах розчину, що призводить до зміни електродного потенціалу, тобто поляризації. Якщо, наприклад, два мідних електрода помістити в розчин  $\text{CuSO}_4$  з концентрацією 0,5 г-моль/л, то кожен електрод отримає щодо розчину електродний потенціал  $E = +0,31 \text{ В}$ , а різниця потенціалів  $E_{12}$  між електродами буде дорівнювати нулю. Якщо тепер електроди підключити до джерела ЕРС, то в електричному колі, що складається з двох електродів, електроліту і джерела ЕРС (рис. 5.34, а) потече електричний струм  $I$ .

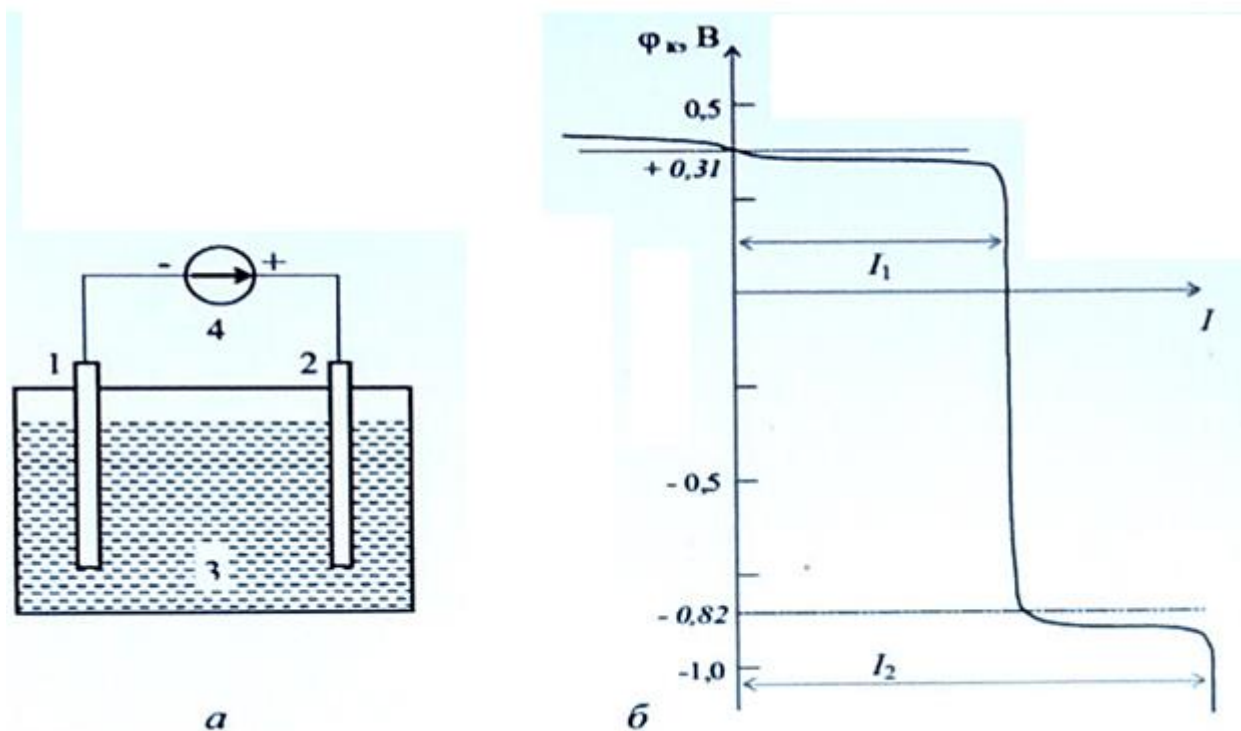


Рис. 5.34. Електролітична комірка, складена з двох мідних електродів, опущених в розчин  $\text{CuSO}_4$  (а) та її вольтамперна характеристика (б):  
1 - катод; 2 - анод; 3 - електроліт; 4 - джерело ЕРС

У міру збільшення густини струму процес дифузії не встигає вирівнювати концентрацію іонів поблизу електродів: потенціал анода стає все більш позитивним, а потенціал катода - все більш негативним (рис. 5.34, б). Внаслідок кінцевої швидкості дифузії при даній концентрації електроліту і температури до катода в одиницю часу може підходити тільки кінцеве число носіїв заряду - іонів міді  $\text{Cu}^{2+}$ . Тому при деякому струмі  $I_1$  будуть використані всі іони, принесені до катода дифузією, і подальше зростання струму припиниться, а катодний потенціал буде різко знижуватися.

При досягненні катодним потенціалом значення  $-0,82$  В струм знову почне зростати приблизно за тим же законом, як і на початковій ділянці, досягаючи нового значення насичення  $I_2$ . Це пояснюється тим, що при потенціалі катода щодо розчину, що дорівнює  $-0,82$  В, крім електроліту  $\text{CuSO}_4$ , починається електроліз води і на катоді виділяється газоподібний водень  $\text{H}_2$ .

Таким чином, кожний новий приріст струму обумовлений тим, що в перенесенні зарядів на катод починають брати участь нові іони (в нашому випадку іони водню  $\text{H}^+$ ). Потенціал, при якому в процес

електролізу вступає основна маса іонів даного виду, називається **потенціалом виділення** даного іона.

Згідно з законом Фарадея, зв'язок між кількістю електрики і кількістю речовини, що виділяється в результаті електролізу, визначається рівнянням

$$Q = \int I \cdot dt = mn \cdot \frac{F}{A}$$

де  $Q$  —кількість електрики;  $I$  – сила струму;  $m$ —маса виділеної речовини;  $n$ — валентність іонів;  $A$  — атомна вага речовини;  $F$  — стала Фарадея.

Кулонометричні перетворювачі є інтегруючими пристроями, вхідною величиною яких є кількість електрики або час (при незмінній силі струму), а вихідною —маса виділеної речовини або зміна опору електрода.

На рис. 5.35 зображено кулонометричний перетворювач для вимірювання часу протікання електролізу.

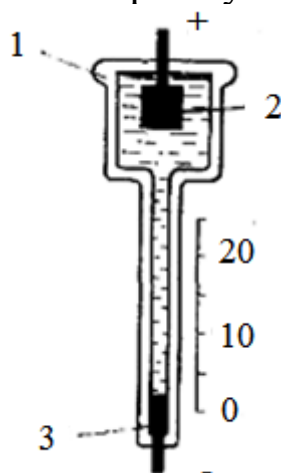


Рис 5.35. Будова кулонометричного перетворювача:

1 – корпус; 2 – анод; 3 – катод

В скляному корпусі 1 розміщено два мідні електроди — анод 2 і катод 3. Перетворювач заповнений розчином сірчаноокислого кадмію. При проходженні постійного струму відбувається електроліз, внаслідок чого анод розчиняється, а на катоді з розчину виділяється така кількість міді, що приводить до збільшення довжини  $\Delta l$  катода

$$\Delta l = \frac{A}{\rho n F} \cdot \frac{I}{S} \cdot t = kt$$

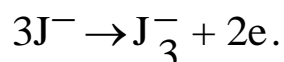
де  $\rho$  — густина міді;  $S$  — площа перерізу катода;  $t$  — вимірюваний час;  $k$  — стала величина.

Кулонометричні лічильники часу виготовляють для меж вимірювань від 5 до 10 000 год. Похибка вимірювання при відліку по шкалі досягає 20%, а при зважуванні катода може бути зменшена до 5%.

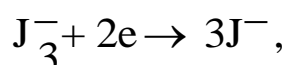
#### 5.9.4. Хімотронні перетворювачі.

Електрохімічний перетворювач, принцип дії якого ґрунтується на явищах, що відбуваються завдяки проходженню струму крізь розчин, називається хімотронним.

Принцип дії хімотронних перетворювачів ґрунтується на використанні односторонньої провідності так званого запірного шару, що виникає в деяких електролітах. Властивість односторонньої провідності мають окислювально-відновлювальні системи, що містять як окислені, так і відновлені іони деяких елементів. Найчастіше застосовують водний розчин йодистого калію  $KJ$ , що заповнює електролітичну комірку, електроди якої виготовлені з хімічно нейтральних матеріалів (золота, платини). Дисоціюючи у воді, йодистий калій утворює катіони  $K^+$  та аніони  $J^-$ . До електродів прикладають сталу напругу, що не перевищує 1 В. За таких умов катіони калію не братимуть участі в переносі зарядів (для цього треба більшу напругу), тому лише іони  $J^-$  будуть рухатись до анода, віддаючи йому свої електрони за схемою окисної реакції



Провідність розчину швидко зменшується, бо запас іонів  $J^-$  в ньому невеликий. Його можна було б поповнити за рахунок відновної реакції на катоді



але іони  $J^-$ , що утворилися на аноді, не можуть рухатись проти поля від анода до катода. Лише дуже мала їх кількість, завдяки тепловому

руху, прийде до катода, що зумовить малий зворотний струм (до 10 мкА).

Якщо в область катода впорскнути певну кількість іонів  $J_3^-$  (водний розчин йоду), то провідність розчину знову на короткий час різко збільшиться. Кількість введених іонів  $J_3^-$  може бути функцією вимірюваної неелектричної величини, і струм через перетворювач буде нести інформацію про її значення.

Хімотронні перетворювачі використовують для вимірювання тиску, переміщення, швидкості і прискорення. Частотний діапазон вимірюваних величин (від 0,001 до 400 Гц) охоплює в основному область низьких та інфранизьких частот.

### 5.10. Ємнісні вимірювальні перетворювачі. Принцип дії та характеристики.

Електроємнісне вимірювальне перетворення ґрунтується на залежності комплексного електричного опору конденсатора від різних факторів.

Конденсатор утворюється двома зближеними провідниками, розділеними діелектриком (рис. 5.36).

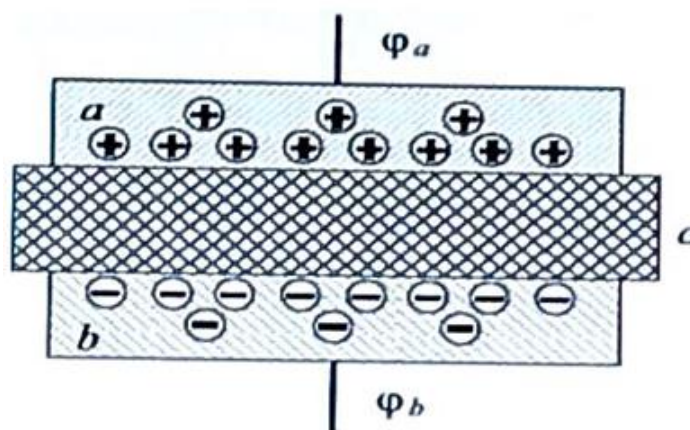


Рис. 5.36. Електричний конденсатор: а, b, - провідники; с - діелектрик

Провідники заряджаються рівними і протилежними за знаком зарядами  $q$ . Внаслідок взаємного тяжіння різнойменних зарядів поверхнева густина зарядів буде вищою на звернених одна до одної частинах поверхонь провідників, ніж на інших частинах. Між

провідниками повинна існувати різниця потенціалів  $U = \varphi_a - \varphi_b$ . Оцінка конденсаторів здійснюється за величиною електричної ємності  $C$ , що представляє собою відношення величини заряду  $q$  до різниці потенціалів  $U$ :

$$C = \frac{q}{U}$$

Одиницею вимірювання ємності є Фарада  $\Phi = \text{Кл} / \text{В}$ .

Принцип дії ємнісних перетворювачів заснований на залежності електричної ємності конденсатора від розмірів обкладинок, відстані між ними і значення діелектричної проникності середовища між обкладинками конденсатора.

Ємнісні перетворювачі являють собою конденсатори різних конструкцій, що перетворюють механічні лінійні або кутові переміщення, а також тиск, вологість або рівень середовища в зміну електричної ємності.

Розрахунок ємності конденсаторів з обкладинками різної форми проводиться на основі рівнянь електромагнітного поля.

Ємнісні вимірювальні перетворювачі працюють на змінному струмі. Принцип їх дії заснований на зміні ємності конденсатора, що визначається для плоского конденсатора співвідношенням:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (5.36)$$

де  $\varepsilon_0$  – діелектрична постійна;  $\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність діелектрика між обкладинками конденсатора;  $S$  – активна площа пластин (обкладинок);  $d$  – товщина діелектрика або відстань між пластинами (обкладинками).

З виразу (5.36) видно, що ємність конденсатора залежить від трьох величин ( $\varepsilon$ ,  $S$  і  $d$ ), Отже, перетворювач може бути побудований з використанням залежностей  $C = f_1(\varepsilon)$ ,  $C = f_2(S)$ ,  $C = f_3(d)$ .

З формули (5.36) випливає, що ємність  $C$  плоского конденсатора збільшуватиметься при зростанні діелектричної проникності середовища  $\varepsilon$  і площі пластин  $S$  і зменшуватиметься зі збільшенням відстані між пластинами  $d$ .



Таким чином, під ємнісним сенсором розуміють систему електродів, ємність яких однозначно залежить від значення заданої фізичної величини.

На рис. 5.37 показано залежність ємності конденсатора від зміни зазору  $d$  між пластинами (рис. 5.37, а) площі перекриття  $S$  пластини (рис. 5.37, б), діелектричної проникності  $\epsilon$  речовини, що знаходиться в зазорі між об'єднанками конденсатора (рис. 5.37, в)

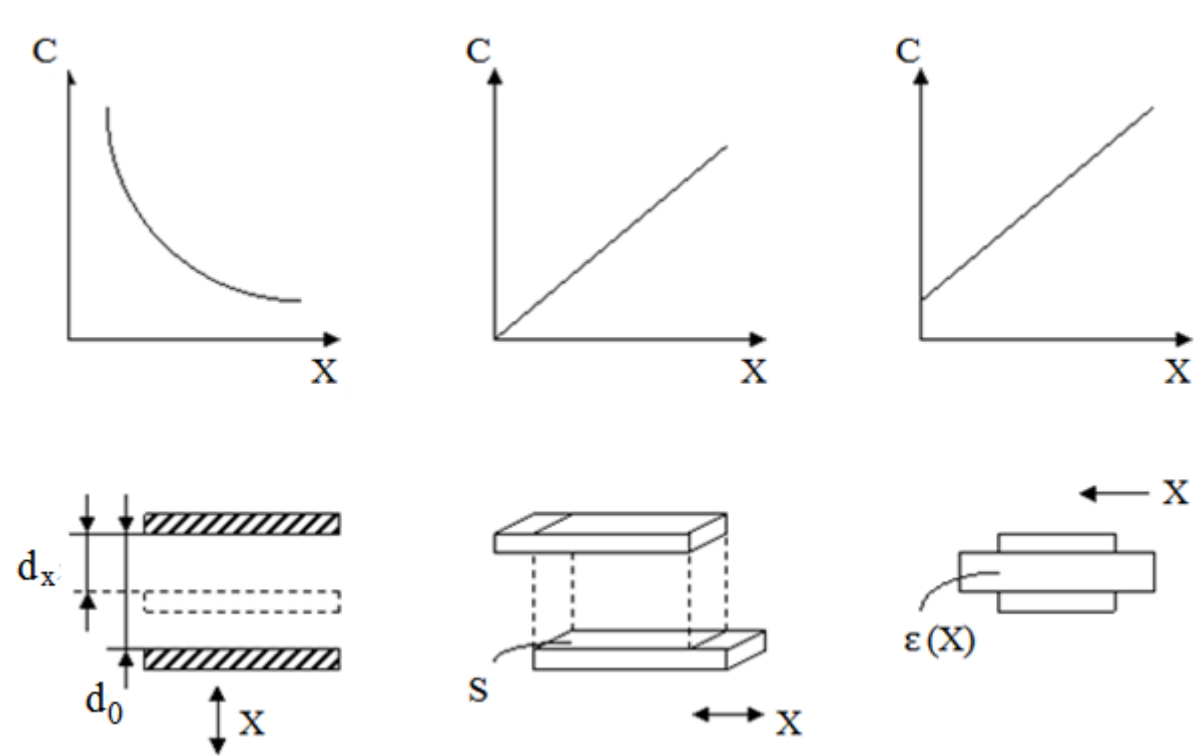


Рис. 5.37. Графіки зміни ємності при зміні різних параметрів ємнісного вимірювального перетворювача

Отже, всі фізичні величини, які безпосередньо або через допоміжні фактори будуть впливати на зміни  $\epsilon$ ,  $S$  і  $d$ , можна виміряти за допомогою ємнісних сенсорів. Останні можуть мати найрізноманітніше конструктивне виконання: дві чи три плоскі пластини, циліндр у циліндрі тощо.

Виходячи з того, що вхідними величинами в ємнісних перетворювачах можуть бути переміщення або діелектрична проникність речовини, а вихідною – ємність, ємнісні перетворювачі застосовують для вимірювання механічних переміщень і зв'язаних з ними величин (тиску, прискорення, сили, вібрації тощо), а також для вимірювання складу середовищ з різними значеннями  $\epsilon$  (наприклад,

рівня рідини, вологості ґрунту тощо).

Розглянемо вплив кожного з перерахованих факторів на ємність плоского конденсатора.

**Зміна діелектричної проникності.** Величина  $\epsilon$  має різні значення для різних речовин. Отже, цю особливість можна використати для визначення виду речовини, що знаходиться між електродами сенсора. Якщо є суміш двох речовин, значення  $\epsilon_1$  і  $\epsilon_2$  яких відомі, то, вимірюючи результуюче значення суміші  $\epsilon_c$ , можна визначити її процентний склад. Наприклад, відносна діелектрична проникність нафти  $\epsilon_H = 3$ , а води  $\epsilon_B = 81$ . Отже, найменші домішки води у нафті будуть різко збільшувати результуючу проникність  $\epsilon_c$ . На цій особливості ґрунтується будова ємнісних вимірювачів вологості.

Загалом міжелектродний простір може бути тільки частково заповнений якою-небудь твердою, сипкою або рідкою речовиною. Якщо відомо  $\epsilon$  цієї речовини, то за виміряною ємністю можна визначити ступінь заповнення міжелектродного простору в лінійних мірах або у мірах площі. На цій основі можуть бути побудовані вимірювачі переміщення твердих або рівнів сипкого і рідкого середовищ у закритих, недоступних безпосередньому спостереженню резервуарах.

Зрештою,  $\epsilon$  може змінюватись від температури. Якщо закон таких змін для даної речовини відомий і однозначний, то на цій основі можна створювати вимірювачі температури.

**Зміна площі.** Площа  $S$  може змінюватись або при лінійних переміщеннях однієї з пластин відносно іншої, або при їх відносному повертанні. Таким чином, на цій основі можуть бути створені ємнісні сенсори лінійних і кутових переміщень. Пластини можуть мати значні розміри, (до 100 мм), складатись із спарених секцій, тому ємнісні датчики такого типу придатні для вимірювання порівняно великих переміщень і кутів від 0 до 360°.

Якщо ємнісний сенсор виконати так, що вільному відносному лінійному або кутовому переміщенню пластин будуть перешкоджати відповідні пружини із наперед заданими характеристиками, то він буде придатний для вимірювання сил чи моментів, що їх обертають.

Перетворювачі зі змінною площею перекриття обкладок досліджуваним середовищем застосовують у рівнемірах.

**Зміна відстані  $d$  між пластинами.** Таку відстань часто називають зазором. Ємність сенсора змінюється обернено пропорційно зазору  $d$ . Це вимагає особливого підходу до створення вимірювальних кіл, що працюють у парі з такими сенсорами, оскільки, звичайно, намагаються забезпечити лінійну залежність між вимірюваною й вихідною величинами. Крім того, на відміну від лінійних розмірів відстань  $d$  між пластинами не може бути великою через виникнення електричних полів розсіювання. Однак величина  $d$  може набувати дуже малих значень - десяті і соті частки міліметра.

Таким чином, після зміни відстані  $d$  між пластинами можна вимірювати переміщення таким самим чином, як і після зміни  $S$ . Проте такі сенсори придатні для вимірювання дуже малих переміщень з дуже високими чутливістю і роздільною здатністю. Так, в Інституті електродинаміки НАН України створені дистанційні цифрові прилади з роздільною здатністю  $5 \cdot 10^{-6}$  мм. Цифровий міст при винесенні сенсора на 10...20 м від приладу виявляє деформації, мікропереміщення, які у тисячі разів менші за товщину людської волосини. Очевидно, що зміну зазору  $d$  між пластинами сенсора також можна використати для визначення сил, моментів деформацій, зважування вантажів, вимірювання тисків і вібрацій при відповідному оснащенні сенсорів пружними елементами.

Перетворювачі зі змінною відстанню  $d$  між обкладками використовують у засобах вимірювань малих переміщень (зазвичай до 1 мм) та сил і тисків, що викликають такі переміщення. В останніх випадках вимірювані сила чи тиск перетворюються здебільшого в прогин мембрани, яка є рухомим електродом ємнісного перетворювача.

Чутливість ємнісних перетворювачів з площинними електродами є лінійною функцією зміни площі взаємодії електродів і зміни діелектричної проникності середовища між ними:

$$\frac{\Delta C_S}{C} = \frac{\Delta S}{S}; \quad \frac{\Delta C_E}{C} = \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}.$$

У той самий час чутливість щодо відносної відстані між електродами є нелінійною функцією:

$$\frac{\Delta C_d}{C} = -\frac{\Delta d}{d} - \frac{1}{1 + \frac{\Delta d}{d}}.$$

Вибір того або іншого параметра конденсатора в якості змінюваного залежить від характеру вимірюваної величини. Так, при вимірюванні кутових механічних переміщень найбільш зручно використовувати в якості змінюваного параметра площу перекриття пластин. В цьому випадку ємність вимірювального перетворювача буде:

$$C(\varphi) = \frac{\varepsilon\varepsilon_0(r_2^2 - r_1^2)}{2d_0}(\varphi - \varphi_0), \quad (5.37)$$

або, враховуючи, що всі величини в (5.37) постійні, окрім вимірюваної змінної  $\varphi$ :

$$C = k \varphi.$$

Відповідно, статична характеристика такого ємнісного датчика буде лінійною.

При вимірювання лінійного переміщення в якості змінюваного параметра конденсатора можна вибрати величину  $d$  (рис. 5.37, а). Тоді

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d_x},$$

а статична характеристика вимірювального перетворювача буде нелінійною. В зв'язку з цим такі перетворювачі потрібно використовувати в тих випадках, коли діапазон зміни контрольованої величини відповідає порівняно невеликій ділянці характеристики, на якій її можна вважати лінійною. Як правило, значення переміщення не повинно перевищувати 1 см. При вимірюванні порівняно великих лінійних переміщень доцільно використовувати в якості змінюваного параметра конденсатора площу перекриття пластин.

На рис. 5.38. показані приклади практичного використання таких перетворювачів для вирішення деяких завдань вимірювання і контролю.

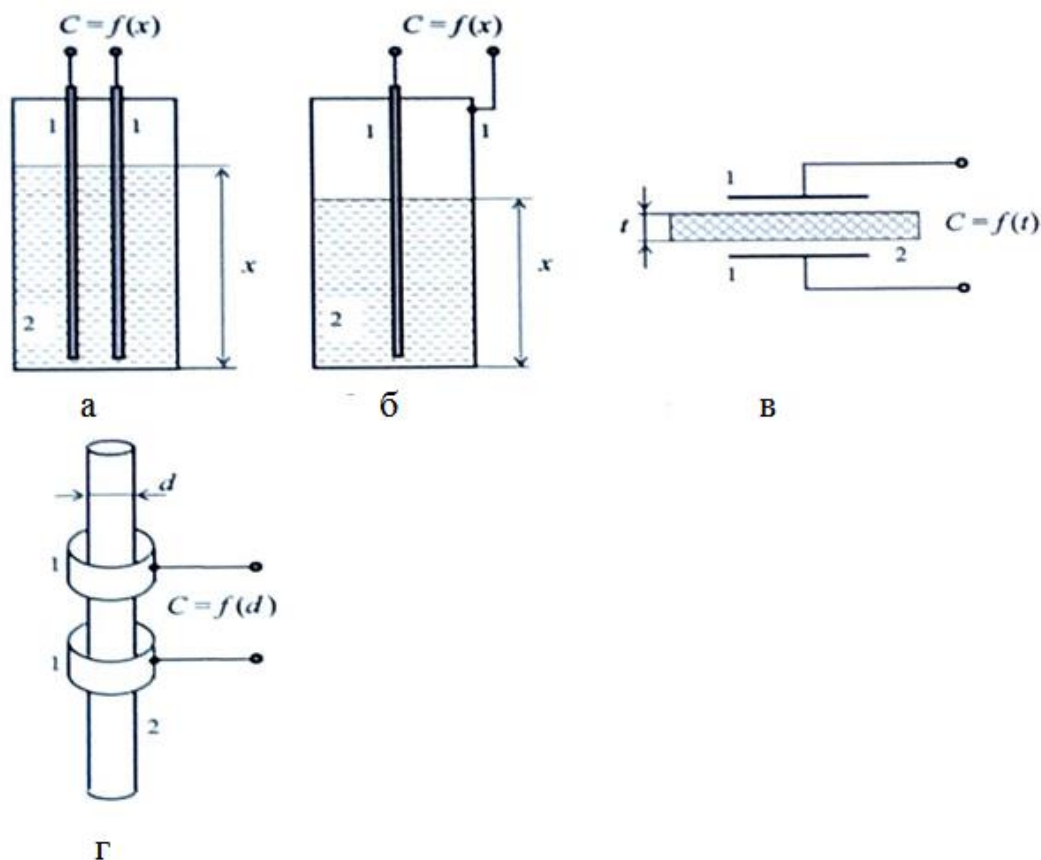


Рис. 5.38. Приклади практичного використання електроємнісного вимірювального перетворення для вимірювання рівня рідких або сипучих діелектричних матеріалів (а, б), вимірювання товщини листів з діелектричних матеріалів (в), вимірювання діаметра виробів з електропровідних матеріалів (г): 1 - електроди; 2 - об'єкт вимірювання

Застосування ємнісних вимірювальних перетворювачів для вимірювання таких фізичних параметрів, як лінійні розміри, концентрація речовини, вологість, температура, зусилля засновано на використанні властивостей зміни діелектричної проникності в залежності від зміни вимірюваного параметра. Так, наприклад, при зміні вологості проникність повітряного зазору між обкладинками змінюється. Подібне явище має місце і в випадку зміни концентрації, тобто складу речовини непровідного середовища (газ, непровідна рідина) в зазорі. Діелектрична проникність більшості діелектриків не залишається сталою і при зміні температури, при цьому температурний коефіцієнт їх зміни можна вважати достатньо високим. Проникність при температурі  $\theta_x$  визначається як

$$\varepsilon_x = \varepsilon(1 + \alpha\Delta\theta),$$

де  $\Delta\theta = \theta_x - \theta$ ,  $\varepsilon_x$  - діелектрична проникність при температурі  $\theta_x$ ;  $\varepsilon$  – діелектрична проникність при температурі  $\theta$ ;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт. Дуже зручним для використання в якості діелектричної прокладки конденсатора, яка є сприймаючим органом, при зміні температури в діапазоні  $\pm 100^\circ$ , вважається група діелектриків з титанових сполук, у яких  $\varepsilon = 15 \dots 90$ , а  $\alpha = (15 \dots 10) \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ .

Для ряду матеріалів існує залежність відносної зміни діелектричної проникності від величини механічних напруг. Ця властивість використовується як основна при побудові ємнісних вимірювальних перетворювачів, що реагують на величину зусиль. При цьому діелектрична проникність в залежності від величини тиску  $\Delta P$  визначається як

$$\varepsilon_x = \varepsilon(1 + S\Delta P),$$

де  $S$  – чутливість матеріалу до відносної зміни діелектричної проникності:  $S = \frac{\Delta\varepsilon/\varepsilon}{\Delta P}$ .

Незважаючи на всю різноманітність конструктивних різновидів ємнісних перетворювачів, їх можна об'єднати в дві великі групи: **плоскопаралельні та коаксіальні**.

На (рис. 5.39,а), зображена конструктивна схема ємнісного перетворювача для вимірювання малих (0,001 ... 1,0 мм) переміщень. Обкладинка 1 закріплена на пружинах 2 і може переміщуватися поступально під дією вимірюваної величини  $x_{вх}$ . Обкладинка 3 - нерухома.

Коаксіальний перетворювач для вимірювання рівня діелектричних рідин (рис. 5.39, б) являє собою циліндричний конденсатор, обкладками якого є стрижень 1 і циліндр 2. Тому що діелектрична проникність рідини значно більша діелектричної проникності повітря, то при зміні рівня змінюється сумарна ємність перетворювача.

Якщо між обкладками конденсатора помістити вологий матеріал, наприклад, ґрунт, то ємність конденсатора буде залежати від вологості. Цю залежність використовують для вимірювання вологості.

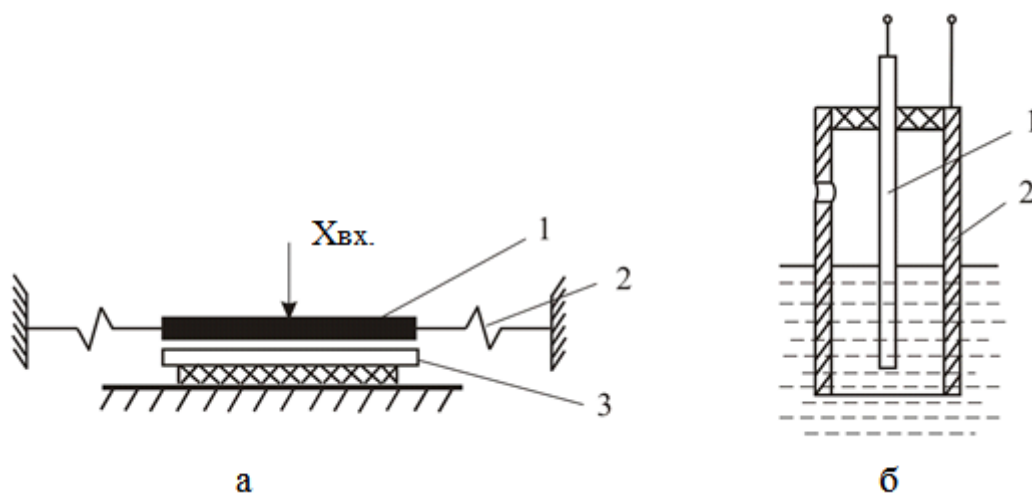


Рис. 5.39. Схеми ємнісних перетворювачів  
 а — плоского: 1 – рухома обкладинка конденсатора; 2 – пружина;  
 3 – нерухома обкладинка  
 б — коаксіального: 1- рухома обкладинка конденсатора  
 (стрижень); 2 - циліндр (нерухома обкладинка)

Перетворювач на рис. 5.40,а являє собою конденсатор, одна пластина якого переміщається під дією вимірюваної величини  $x$  щодо нерухомої пластини. Статична характеристика перетворення  $C = f(d)$  нелінійна. Чутливість перетворювача зростає зі зменшенням відстані  $d$ . Такі перетворювачі використовують для вимірювань малих переміщень (менших за 1мм).

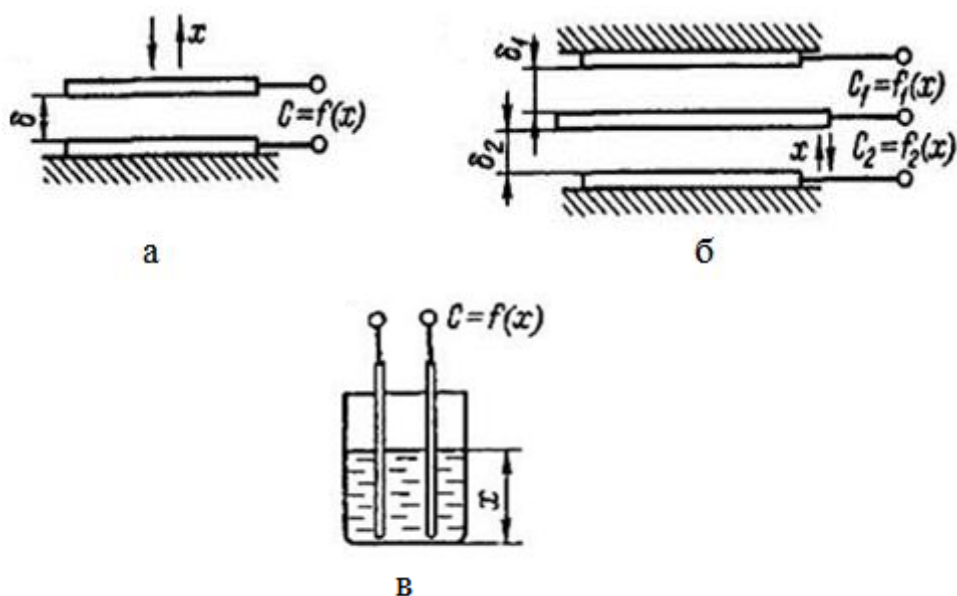


Рис. 5.40. Різні конструкції ємнісних перетворювачів

Застосовують також диференціальні перетворювачі (рис. 5.40, б), у яких є одна рухома та дві нерухомі пластини. При впливі вимірюваної величини  $x$  у цих перетворювачів одночасно змінюються ємності  $C_1$  і  $C_2$ . Такі перетворювачі використовують для вимірювання порівняно великих лінійних (більше 1 мм) і кутових переміщень. В цих перетворювачах легко отримати необхідну характеристику перетворення шляхом профілювання пластин.

Перетворювачі з використанням залежності  $C = f_1(\epsilon)$  застосовують для вимірювань рівня рідин, вологості речовин, товщини виробів з діелектриків тощо. Як приклад (рис. 5.40, в) приведемо пристрій ємнісного рівнеміра. Ємність між електродами, опущеними в посудину, залежить від рівня рідини, тому що зміна рівня призведе до зміни середньої діелектричної проникності середовища між електродами. Зміною конфігурації пластин можна отримати бажаний характер залежності показань приладу від об'єму (маси) рідини.

Для вимірювань вихідного параметра ємнісних перетворювачів застосовують мостові ланцюги та ланцюги з використанням резонансних контурів. Але найчастіше використовують мости змінного струму. Останні дозволяють створювати прилади з високою чутливістю, здатні реагувати на переміщення порядку  $10^{-7}$  мм. Ланцюг з ємнісними перетворювачами для підвищення чутливості звичайно живлять струмом підвищеної частоти (до десятків мегагерц), що викликано бажанням збільшити сигнал, який попадає у вимірювальний прилад, і необхідністю зменшити шунтуючу дію опору ізоляції.

### **5.11. Класифікація ємнісних вимірювальних перетворювачів**

Ємнісний вимірювальний перетворювач використовують для вимірювання регульованої координати, яка являє собою механічні переміщення, рівень рідини, концентрацію, зусилля чи вологість.

Ємнісні вимірювальні перетворювачі поділяють на такі групи в залежності від вибраної класифікаційної ознаки:

1. за призначенням ємнісного датчика:
  - а. датчики лінійного і кутового переміщення;
  - б. датчики рівня і лінійних розмірів;
  - в. датчики концентрації і вологості;



- г. датчики температури;
- д. датчики зусиль.
- 2. за конструктивним виконанням:
  - а. датчики з плоскопаралельними пластинами конденсатора;
  - б. датчики з циліндричною формою конденсатора;
  - в. датчики з наявністю діелектрика між обкладинками конденсатора;
  - г. датчики без діелектрика.
- 3. за видом змінюваного параметра конденсатора:
  - а. датчики зі змінюваною площею перекриття пластин;
  - б. датчики зі змінюваним зазором між обкладинками конденсатора;
  - в. датчики зі змінюваною діелектричною проникністю.

## 5.12. Переваги та недоліки ємнісних вимірювальних перетворювачів

**Перевагами** ємнісних вимірювальних перетворювачів є:

- висока чутливість;
- велика роздільна здатність при малих значеннях вхідного сигналу;
- простота конструкції;
- малі габарити і маса;
- мала інерційність;
- висока швидкодія, тому що ємнісні вимірювальні перетворювачі є практично безінерційними елементами внаслідок того, що частота напруги живлення датчика на два порядки перевищує частоту вхідного вимірюваного сигналу. Тому їх широко застосовують для вимірювання швидкозмінних величин, наприклад, для вимірювання рівня води;
- незначна сила притягання між пластинами конденсатора, яку необхідно подолати при переміщенні рухомих пластин, що визначається співвідношенням:

$$F_{\text{прит.}} = \frac{U^2}{2} \cdot \frac{dC}{dx},$$

де  $x$  – вимірюваний параметр датчика;  $U$  – напруга, прикладена до конденсатора.

- відсутність рухомих струмознімальних контактів.

До **недоліків** ємнісних вимірювальних перетворювачів можна віднести:

- необхідність у джерелах живлення підвищеної частоти;
- порівнянно низький рівень потужності вихідного сигналу;
- нестабільність характеристик при зміні параметрів зовнішнього середовища;
- шкідливий вплив паразитних ємностей;
- шкідливий вплив температури, вологості і зовнішніх електричних полів.

Для зменшення втрат потужності вихідного сигналу використовують узгодження навантаження з внутрішнім опором схеми. Реактивний опір навантаження вибирають рівним за величиною і зворотним за знаком до внутрішнього опору датчика, тобто налаштовують схему в резонанс.

Для уникнення похибок, що викликаються зміною параметрів зовнішнього середовища (температури, вологості), елементи ємнісного датчика виготовляють зі сплавів з малим температурним коефіцієнтом розширення і застосовують герметизацію датчика, що, в свою чергу, запобігає впливу шкідливих ємностей, якщо герметичний корпус виконується у вигляді екрану.

### 5.13. Електромагнітні перетворювачі

До цієї групи належать датчики, які використовують взаємодію магнітних потоків, що створюються електричним струмом, який протікає по контурах (обмотках).

Вимірювальні перетворення засновані на фізичних ефектах, результатом яких є перетворення в електричний сигнал характеристик магнітних полів або магнітних характеристик матеріалів і виробів, називаються **вимірювальними перетвореннями в магнітних полях**. Зазвичай при даному виді вимірювальних перетворень об'єкт вимірювання або його частина міститься в постійне або змінне магнітне поле, створюване за рахунок протікання електричного струму по провіднику, обмотці або безпосередньо по об'єкту, а також постійними магнітами.

**Електромагнітний перетворювач** являє собою один або кілька контурів, що знаходяться в магнітному полі, яке може бути створено як струмами, що протікають по контурах, так і зовнішнім джерелом.

Електромагнітні перетворювачі, в свою чергу, поділяються на **індуктивні, взаємоіндуктивні, магнітопружні та індукційні**. Перші три типи відносяться до параметричних перетворювачів, останній - до генераторних.

Вхідною величиною перетворювача є переміщення. Вихідною величиною може бути: індуктивність  $L$ , електромагнітна сила -  $F_{ем}$ , або індуковані ЕРС -  $E_{інд}$ .

### 5.13.1. Індуктивні вимірювальні перетворювачі

Пристрої, що перетворюють значення вимірюваної (механічної) величини в значення індуктивності, називають **індуктивними перетворювачами**.

Принцип дії індуктивних вимірювальних перетворювачів ґрунтується на залежності індуктивності  $L$  обмотки, розташованої на магнітопроводі, від параметрів обмотки (геометричних розмірів, положення) і магнітного кола (магнітного стану елементів магнітного кола), в яке включена обмотка.

Індуктивність  $L$  (від латинського *inductio* - наведення), величина, що характеризує зв'язок між електричним струмом  $I$ , що протікає в обмотці, і створюваним цим струмом потокозчепленням  $\Psi$  через дану обмотку (повний магнітний потік через всі витки обмотки):

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad (5.38)$$

Одиницею вимірювання індуктивності є Генрі (Гн).

Якщо електрична ємність конденсатора характеризує здатність конденсатора накопичувати електричний заряд, то індуктивність обмотки – це здатність останньої створювати магнітне поле. Чим вище значення індуктивності обмотки, тим сильніше магнітне поле створює дана обмотка при фіксованому значенні електричного струму  $I$  (рис.5.41).

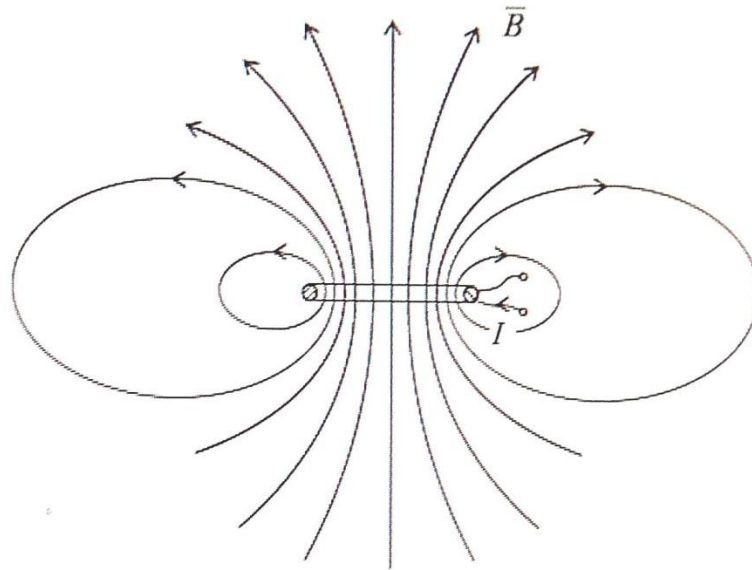


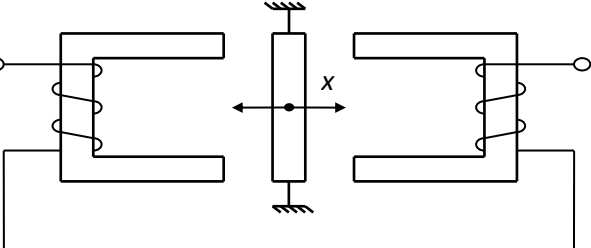
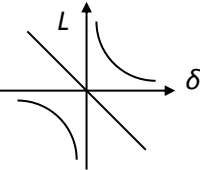
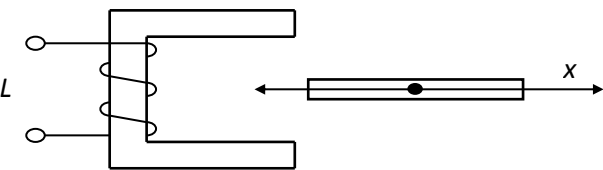
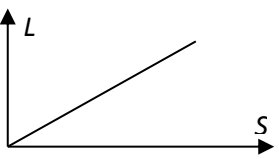
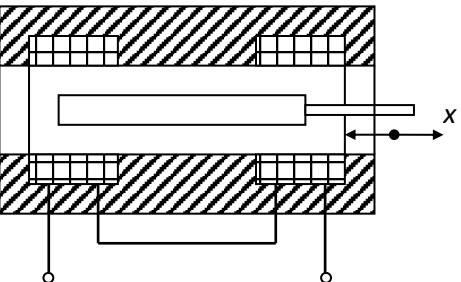
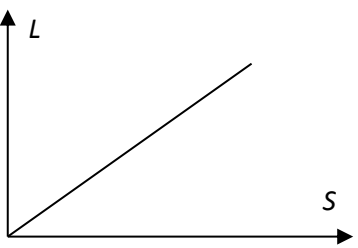
Рис. 5.41. Магнітне поле обмотки із струмом

В індуктивному перетворювачі при взаємному переміщенні його частин змінюється опір магнітного кола, а разом з ним і величина індуктивності обмотки цього перетворювача. Чим більшим буде магнітний опір, тим меншою стане величина індуктивності обмотки, а відтак, і її реактивний опір.

Основні різновиди індуктивних перетворювачів наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3. Основні різновиди індуктивних перетворювачів

Схема	Функціональні схеми перетворювачів	Рівняння перетворення
1	<p>Із зміною розміру повітряного зазору</p>	$L = \frac{\mu_0 \omega^2 S}{\delta}$

2	<p style="text-align: center;">Диференціальна схема</p> 	$L = 2\mu_0\omega^2S \frac{\Delta\delta}{\delta} \cdot \frac{1}{1 - (\Delta\delta/\delta)}$ 
3	<p style="text-align: center;">Із зміною площі S повітряного зазору</p> 	$L = f(S)$ 
4	<p style="text-align: center;">Плунжерного типу</p> 	$L = f(S)$ 

Індуктивність перетворювача багато в чому залежить від феромагнітного матеріалу, який вводиться в магнітне поле контуру.

Індуктивний перетворювач з феромагнітним осердям показаний на рис. 5.42. Зміна його індуктивності відбувається при зміні положення осердя, і вхідною величиною перетворювача є переміщення. Індуктивність обмотки залежить від її форми, розмірів, числа витків, діаметра дроту, способу намотування, а також від магнітних властивостей оточуючого обмотку середовища.

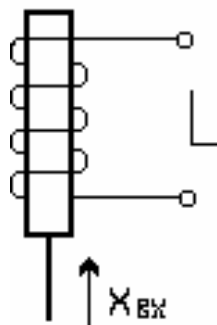


Рис. 5.42. Індуктивний перетворювач

Вимірюване механічне переміщення  $x_{вх}$  на вході датчика викликає зміну параметрів магнітного та електричного ланцюгів, що в свою чергу викликає зміну вихідної величини — електричного струму  $I$ .

Функція перетворення індуктивного перетворювача:

$$L = f(x),$$

де  $x$  – переміщення.

Індуктивність соленоїда (рис.4.10) визначається виразом:

$$L = \mu \omega^2 \frac{\pi D_{сер}^2}{4l} k_1 = \mu \omega^2 S_{сер} \cdot \frac{k_1}{l} \quad (5.39)$$

де  $D_{сер}$  - діаметр середнього витка обмотки;  $l$  - довжина соленоїда;  $\mu$  - магнітна проникність середовища;  $\omega$  - число витків обмотки;  $k_1$  - множник, що залежить від співвідношення геометричних розмірів  $l$  і  $D_{сер}$ .

Аналіз (5.39) показує, що індуктивність багатовиткової обмотки пропорційна квадрату числа витків  $\omega^2$ , площі середнього витка обмотки  $S_{сер} = \frac{\pi D_{сер}^2}{4}$  і магнітній проникності  $\mu$  середовища. Зі збільшенням довжини обмотки індуктивність зменшується (для довгого соленоїда за обернено пропорційним законом).

Якщо обмотка має жорстку конструкцію і поблизу неї відсутні феромагнетики, то індуктивність такої обмотки постійна. Багатовиткові обмотки без феромагнітних сердечників (магнітопроводів) знайшли застосування в різних електронних пристроях, проте їх використання безпосередньо для вимірювальних перетворень обмежене, головним чином, завданням перетворення (вимірювання) магнітної проникності середовища.

Широке ж застосування для індуктивного перетворення мають обмотки з феромагнітними осердями різної конструкції. В цьому випадку індуктивність може змінюватися при зміні форми або розмірів обмотки, переміщенні оточуючих феромагнітних матеріалів, або при зміні їх магнітної проникності (наприклад, через залежності магнітної проникності від напруженості магнітного поля).

На рис 5.43 показана обмотка із замкнутим феромагнітним осердям постійного перетину. Особливість такого магнітного кола

полягає в тому, що практично весь магнітний потік, створюваний електричним струмом  $I$  обмотки, замикається по магнітопроводу, магнітна проникність якого на кілька порядків перевищує магнітну проникність повітря. В даному випадку магнітними потоками розсіювання (що замикаються не по магнітопроводу, а по повітря) можна знехтувати, а магнітне поле в магнітопроводі вважати однорідним. Останнє, як правило, справедливо для постійного і низькочастотного електричного струму.

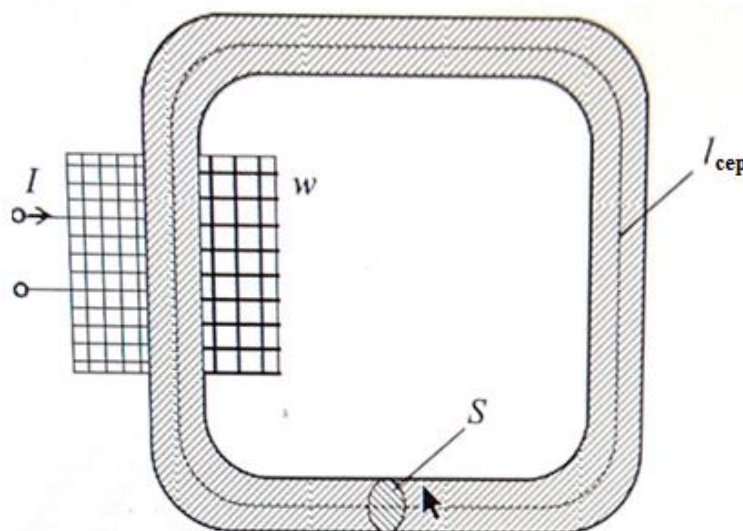


Рис. 5.43. Обмотка із замкненим феромагнітним осердям (магнітопроводом)

Індуктивність обмотки із замкненим феромагнітним магнітопроводом сталого перетину визначається виразом:

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{w\Phi}{I} = \frac{w^2 S B}{l_{\text{сер}} H} = w^2 \frac{S\mu}{l_{\text{сер}}} = \frac{w^2}{R_M} \quad (5.40)$$

де  $l_{\text{сер}}$  – довжина середньої силової лінії;  $w$  – число витків обмотки;  $\mu$  – магнітна проникність матеріалу магнітопроводу;  $S$  – площа поперечного перетину магнітопроводу;  $B$  – індукція в магнітопроводі;  $H$  – напруженість магнітного поля в магнітопроводі.

Величина

$$R_M = \frac{l_{\text{сер}}}{S \cdot \mu} \quad (5.41)$$

називається **магнітним опором** магнітопроводу. Одиницею вимірювання магнітного опору в системі СІ є ампер на вебер (А/Вб).

Таким чином, індуктивність обмотки прямо пропорційна квадрату числа витків і обернено пропорційна магнітному опору магнітопроводу. Магнітний опір магнітопроводу прямо пропорційний довжині середньої силової лінії і обернено пропорційний площі поперечного перерізу магнітопроводу і магнітної проникності його матеріалу. За формулою (5.40) видно, що на значення індуктивності котушки впливають тільки такі вимірювані величини, які можуть бути перетворені в зміну магнітного опору магнітного кола перетворювача.

Залежність індуктивності обмотки від геометричних і магнітних властивостей всіх ділянок магнітного кола дозволяє отримувати вимірювальну інформацію про будь-який з цих параметрів (наприклад, про довжину повітряного зазору або магнітну проникність матеріалу).

На рис. 5.44 зображений найпоширеніший індуктивний перетворювач з малим повітряним зазором  $\delta$ , що змінюються під дією вимірюваної величини  $P$  (сила, тиск, лінійне переміщення). Внаслідок зміни зазору змінюється магнітний опір магнітного кола, а отже, і індуктивність обмотки 2, одягненої на осердя і включеної в ланцюг змінного струму. Індуктивність цієї обмотки

$$L = \frac{w^2}{R_M} = \frac{\omega^2}{R_{M.ст} + R_\delta} = \frac{\omega^2}{R_{M.ст} + \frac{2\delta}{\mu_0 S}}, \quad (5.42)$$

де  $w$  - число витків котушки;  $R_M$  - повний опір магнітного кола;  $R_{M.ст}$  - магнітний опір ділянок зі сталі;  $R_\delta$  - магнітний опір повітряних зазорів;  $S$  - площа повітряного зазору;  $\mu_0$  - магнітна постійна,  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м.



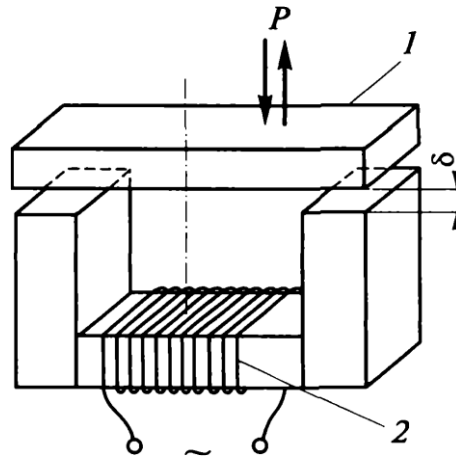


Рис. 5.44. Індуктивний перетворювач:  
1 — осердя; 2 — обмотка

Таким чином, у даного перетворювача вхідною величиною є переміщення рухомої частини осердя 1, а вихідною - зміна індуктивності обмотки. Зміна індуктивного опору котушки веде до зміни її повного опору  $Z$ . Отже, виникає функціональна залежність між вимірюваною механічною величиною  $P$  і електричним опором  $Z$  перетворювача:  $z = f(P)$  і  $\Delta Z = f(\Delta P)$ .

Розглянемо принцип дії найпростішого (одинарного) індуктивного датчика на одному осерді, зображеного на рис. 5.45. На осерді 1 розташовується обмотка 3, яка підключається до джерела змінного струму через опір навантаження (опір вимірювального приладу) 4. Струм  $I$  в обмотці 3 збуджує змінний магнітний потік  $\Phi$

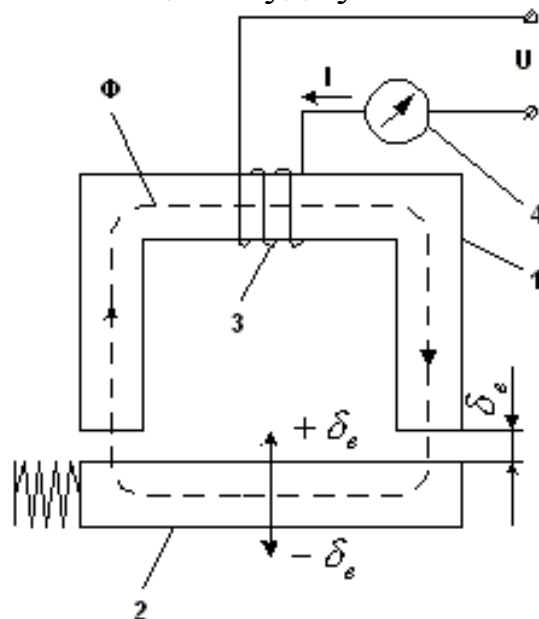


Рис. 5.45. Найпростіший (одинарний) індуктивний датчик: 1 — осердя; 2 — рухомий якор; 3 — обмотка; 4 — вимірювальний прилад

Між полюсами осердя і рухомим якорем 2 є повітряний зазор  $\delta$ . Сердечник 1 і якір 2 утворюють магнітопровід датчика. Змінний магнітний потік  $\Phi$  проходить через них і через два повітряних зазори  $\delta$ , що входять в магнітний ланцюг датчика. Якір механічно пов'язується з об'єктом, переміщення якого необхідно контролювати, і який в процесі роботи зміщується щодо осердя у напрямках, указаних стрілками.

Фізика процесу перетворення (механічного переміщення в електричний сигнал) полягає в тому, що внаслідок переміщення якоря і зміни величини повітряного зазору змінюються магнітний опір магнітного ланцюга датчика і, отже, індуктивний і повний опір обмотки. Відповідно (при постійній напрузі живлення) зміниться величина струму  $I$ , яка вимірюється приладом 4, що одночасно є навантаженням даної схеми. У підсумку приходимо до висновку, що вихідна величина — струм  $I$  залежить від вхідної величини — довжини повітряного зазору  $\delta$ , тобто  $I = f(\delta)$ . Ця залежність називається вихідною характеристикою датчика.

Наведені співвідношення (5.39), (5.40) показують, що індуктивність можна змінити наступним чином (рис. 5.45):

- впливаючи на зазор  $\delta$ , тобто збільшуючи або зменшуючи  $l_{\text{сер}}$ ;
- варіюючи площу  $S$  перекриття магнітопровода і якоря в повітряному проміжку;
- збільшуючи або зменшуючи втрати в магнітопроводі.

Зазначених змін можна досягти (рис. 5.45), наприклад, переміщенням якоря вгору-вниз ( $\delta \uparrow \rightarrow L \downarrow$ ), вправо-вліво ( $S \downarrow \rightarrow L \downarrow$ ), введенням немагнітної металевої пластини в повітряний зазор ( $S \downarrow \rightarrow L \downarrow$ ), впливом сили на замкнутий магнітопровід.

Графічно залежності індуктивності від площі перекриття ( $L = f(S)$ ), і від величина зазору ( $L = f(\delta)$ ) представлені на рис. 5.46.

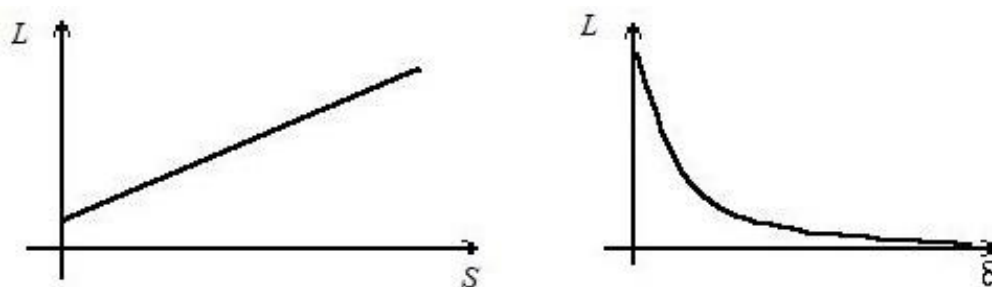


Рис. 5.46. Графіки залежностей  $L = f(S)$ ,  $L = f(\delta)$ .

Видно, що залежність  $L = f(S)$  має лінійний характер і зазвичай використовується для вимірювання великих переміщень (від одиниць до десятків см). Залежність  $L = f(\delta)$  має гіперболічний вид і застосовується для контролю за малими переміщеннями (в мікрометрах).

На рис. 5.47 показано два різновиди індуктивних перетворювачів.

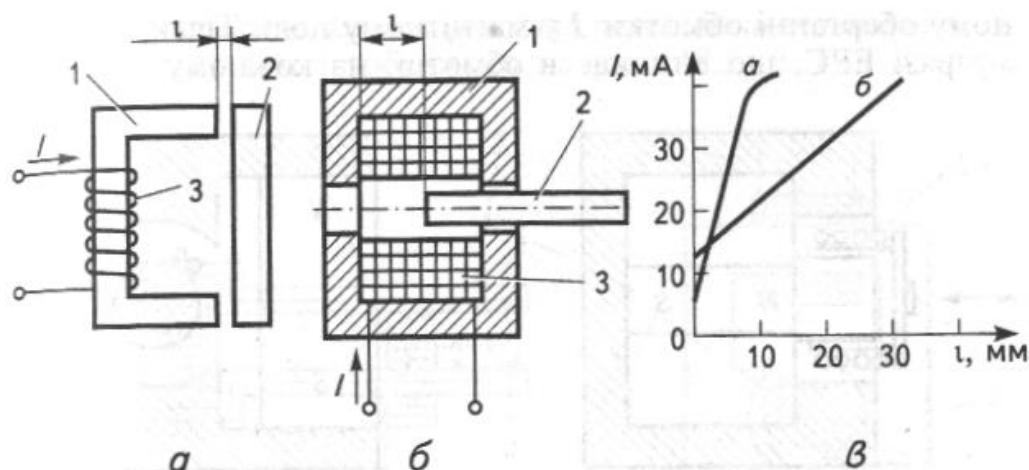


Рис. 5.47. Індуктивні перетворювачі (а, б) та графік (в) залежності струму, що протікає в катушці перетворювача від повітряного зазору в магнітній системі:

1- осердя; 2 – якор; 3 - катушка індуктивності

Для перетворення **малих переміщень** в зручну для електричного вимірювання величину застосовують перетворювачі зі змінюваним повітряним зазором у вигляді підкови з обмоткою 3 і якорем 2 (рис. 5.47,а), який жорстко пов'язаний з переміщуваною деталлю. Будь-яке переміщення якоря призводить до зміни струму  $I$  в обмотці (рис. 5.47, в, крива а), що дозволяє при незмінній змінній напрузі та стабільній частоті проградувати шкалу електровимірювального приладу в одиницях вимірювання, наприклад в мікрометрах (мкм).

Перетворювач, зображений на рис. 5.47, а, можна застосовувати для вимірювання відносно малих переміщень — від сотих часток міліметра до 5...10 мм.

Для перетворення **значних переміщень** в електричну величину використовують перетворювач з рухомим феромагнітним магнітопроводом, що рухається поступально (рис. 5.47,б). Оскільки положення магнітопровода визначає індуктивність перетворювача (рис. 5.47, в, крива б), а отже, і його повний опір, то при стабілізованій напрузі джерела електричної енергії змінної напруги незмінної частоти, що живить ланцюг перетворювача, можна по струму судити про переміщення деталі, механічно пов'язаної з магнітопроводом. Шкалу приладу градуують у відповідних одиницях виміру, наприклад в міліметрах (мм).

Перетворювач, зображений на рис. 5.47,б, здатний вимірювати величини переміщення його рухомої частини 2 до 100...120 мм.

Якщо відстань 1 у обох перетворювачів зменшується, то зменшується величина магнітного опору їхніх магнітних систем і збільшується величина індуктивності обмоток 3 цих перетворювачів. Якщо обмотки 3 через прилад, що вимірює струм, приєднати до джерела змінного струму з відомою і незмінною величиною напруги, то за величиною струму, яку показує прилад, можна мати уявлення про величину 1, що є між рухомими частинами перетворювачів і кінцевим їхнім положенням.

На рис. 5.47, в показано (орієнтовно) залежність між величиною струму котушок перетворювачів від відстаней 1. При значних величинах 1, де величина індуктивності котушок найменша, бо визначається лише величинами магнітних опорів розсіювання магнітних потоків у повітрі, переміщення рухомих частин перетворювачів (якорів) майже не впливає на величини струмів котушок. Звичайно, для перетворювачів такі відстані слід визнати неробочими.

Подібні перетворювачі працюють на частотах 50 Гц (найчастіше), і при підвищених частотах — 400...1000 Гц. При підвищених частотах індуктивні перетворювачі бувають меншими за розмірами ніж ті, що працюють на частоті 50 Гц.

Індуктивний перетворювач (рис. 5.47,а,б) заснований на зміні індуктивності обмотки 1 електромагнітного дроселя в залежності від повітряного зазору  $\delta$  між осердям 2 і якорем 3. Вхідним впливом є переміщення якоря 3, а вихідною величиною - індуктивність  $L$ , або вихідний опір  $x = \omega L$ .

Якщо знехтувати опором магнітопроводу, незначним порівняно з магнітним опором зазору, а також втратою потужності в магнітопроводі, то одержимо

$$L = \frac{\mu_0 \omega^2 S}{l},$$

де  $\mu_0$  - магнітна постійна,  $\omega$  - число витків котушки,  $S$  - ефективна площа повітряного зазору;  $l$  - довжина зазору.

Як наслідок, індуктивний перетворювач із змінною довжиною повітряного зазору є нелінійним перетворювачем; залежність  $L$  від довжини зазору  $l$  близька до гіперболічної. З достатнім для практики рівнем наближення можна вважати його лінійним лише при малих відносних змінах довжини повітряного зазору  $\frac{\Delta l}{l}$ . У реальних конструкціях перетворювачів відносна зміна зазору  $\frac{\Delta l}{l} = 0,1 \dots 0,15$  при нелінійності характеристики 1-3%. Тому такі перетворювачі застосовуються для перетворень невеликих переміщень (0,01...10 мм).

На практиці зазвичай вимірюють не індуктивність і опір, а струм, що протікає по котушці, який дорівнює

$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U 2l}{\omega^2 \mu_0 S w}.$$

де  $U$  - напруга, прикладена до котушки;

$\omega = 2\pi f$  - частота напруги джерела живлення;

$w$  - число витків котушки;

$S$  – площа поперечного перерізу сталевго осердя.

$\mu_0$  - магнітна постійна.

На практиці, як правило, такі датчики застосовуються в тих випадках, коли необхідно ступеневе релейне управління, наприклад, в якості безконтактних датчиків положення, кінцевих вимикачів, допоміжних механізмів прокатних верстатів, візків (при проходженні сталевго осі візка над магнітопроводом спрацьовує реле), датчиків положення кабін ліфтів тощо. Конструктивно датчик виконують таким чином, щоб його якір переміщався не в площині магнітопроводу, а паралельно цій площині.

На рис. 5.48 в якості прикладів ілюструється використання вимірювального перетворення для вимірювання товщини

немагнітного покриття на феромагнітній пластині, поперечного розміру феромагнітного стрижня, переміщення феромагнітного предмета.

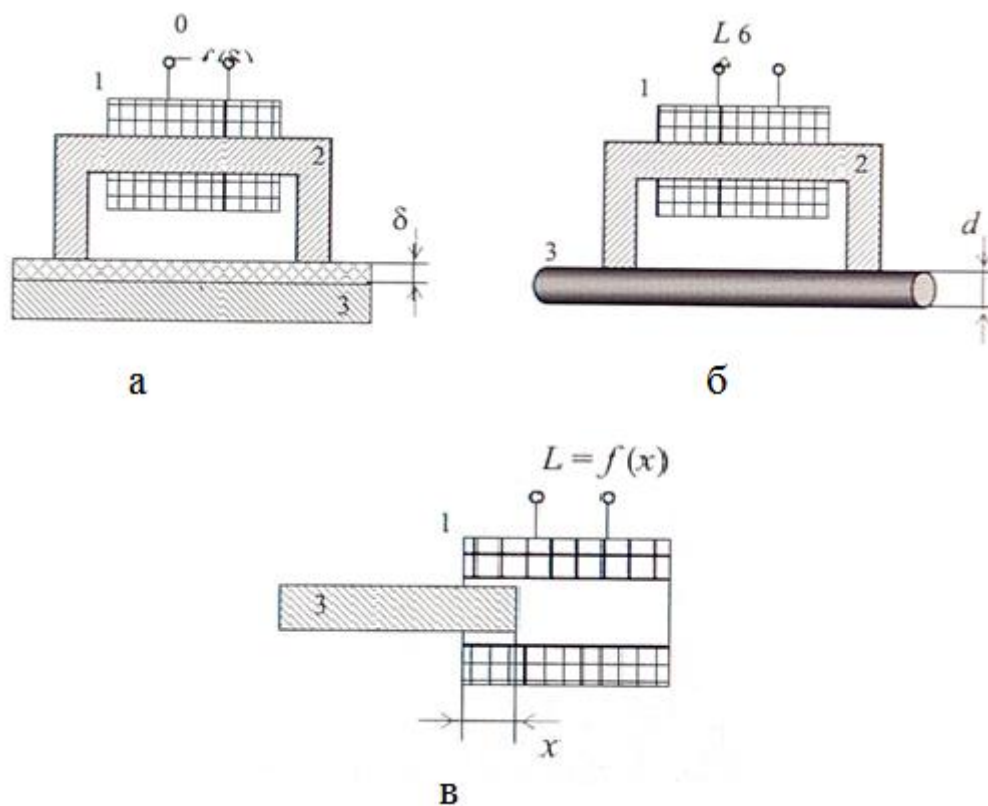


Рис. 5.48. Приклади практичного використання індуктивного вимірювального перетворення для вимірювання товщини немагнітного покриття феромагнітної пластини (а), діаметра феромагнітного стрижня (б), переміщення феромагнітного предмета (в): 1 – обмотка; 2 – магнітопровід; 3 – феромагнітний об'єкт

У порівнянні з іншими перетворювачами переміщення індуктивні вимірювальні перетворювачі мають наступні **переваги**:

1. простота виготовлення і міцність конструкції;
2. дешевизна;
3. надійність в роботі (відсутність ковзних контактів);
4. можливість отримання великої вихідної потужності (до 5 В·А), що дає можливість підключати контрольний прилад безпосередньо до перетворювача;
5. значний по потужності вихідний сигнал;
5. можливість роботи від промислової мережі з частотою 50 Гц;
6. значна чутливість і великий коефіцієнт підсилення.

До **недоліків** цих перетворювачів можна віднести:

1. зворотний вплив індуктивних вимірювальних перетворювачів на досліджуваний об'єкт (вплив електромагніту),
2. вплив на результати вимірювань коливань напруги і частоти напруги живлення;
3. можливість роботи лише на змінному струмі;
4. інерційність;
5. невелика ділянка лінійності вихідної величини;
6. наявність струму холостого ходу;
7. температурна похибка;
8. неточне виготовлення обмоток, не завжди правильний вибір матеріалів.

**Індуктивні датчики** використовуються на відносно низьких частотах (до 3000-5000 Гц), так як на високих частотах різко зростають втрати в сталі на перемагнічування і вихрові струми.

На основі індуктивних вимірювальних перетворювачів випускається велика кількість вимірювальних засобів, наприклад, індуктивний мікрометр, індуктивний товщиномір, індуктивний манометр тощо.

Індуктивні перетворювачі широко застосовуються в основному для вимірювання лінійних і кутових переміщень. Існують індуктивні рівнеміри, віброметри, акселерометри та ін.

За допомогою індуктивних датчиків можна:

- контролювати механічні переміщення, механічні сили, температуру, властивості магнітних матеріалів;
- визначати наявність дефектів або небажаність домішок в тілах матеріалів;
- контролювати діаметр сталевого дроту, товщину немагнітних покриттів на сталі, рух рідини і газів в резервуарах тощо.

Конструктивно індуктивні перетворювачі можуть виконуватися одинарними і диференціальними.

На практиці, внаслідок своїх недоліків, одиночний індуктивний перетворювач застосовується дуже рідко. В основному використовується **диференціальний індуктивний перетворювач**.

### 5.13.2. Диференціальні індуктивні перетворювачі

Індуктивний перетворювач є електромагнітом, і тому якір в індуктивному перетворювачі (рис. 5.45) зазнає притягання з боку

електромагніту. Причому сила притягання нелінійно залежить від переміщення якоря.

Цей недолік в значній мірі усувається в диференціальних індуктивних вимірювальних перетворювачах, у яких з переміщенням якоря збільшується індуктивність у однієї котушки і зменшується в іншій. Сили тяжіння, що діють на якор з боку двох електромагнітів, приблизно дорівнюють одна одній і взаємно врівноважуються.

Диференціальний вимірювальний перетворювач має більш високу чутливість, ніж звичайний вимірювальний перетворювач, меншу похибку функції перетворення і меншу похибку від впливаючих величин.

**Диференціальний індуктивний перетворювач** - це перетворювач, що складається з двох однакових одинарних індуктивних перетворювачів і одним загальним рухливим якорем 1, розташованим симетрично щодо обох магнітопроводів з повітряним зазором однакової довжини (рис. 5.49), у яких лінійне переміщення якоря з його середнього положення однаково змінює обидва повітряних зазору, але з різними знаками, що порушує рівновагу попередньо врівноваженого моста змінного струму з чотирьох обмоток. Це дає можливість судити про переміщення якоря за струмом вимірювальної діагоналі моста, якщо він отримує живлення стабілізованою змінною напругою незмінної частоти.

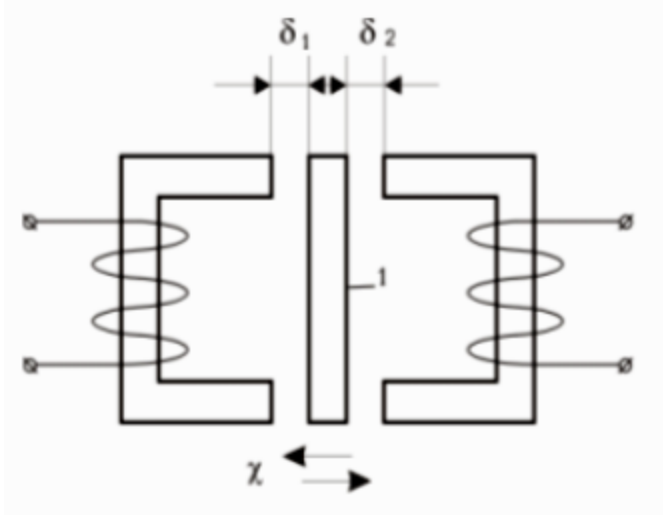


Рис. 5.49. Диференціальний індуктивний перетворювач

У цих перетворювачах магнітопровід набирається з пластин електротехнічної сталі. У середньому положенні якоря 1 повітряні зазори дорівнюють  $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$  і індуктивності обох обмоток будуть



рівні між собою:  $L_1 = L_2$ . Це забезпечує рівність струмів у обох обмотках. При переміщенні якоря індуктивність однієї обмотки зростає, а індуктивність іншої зменшується.

Зазвичай диференціальний перетворювач включається в мостову нерівноважну схему, два плеча якої утворюються опорами котушок  $Z_1$  і  $Z_2$  перетворювача, а два інших плеча утворені активними опорами  $Z_3$  і  $Z_4$  (рис. 5.50).

На рис. 5.50 показана схема двотактного індуктивного перетворювача, вхідний сигнал якого  $x$  - переміщення якоря відносно середнього положення, а вихідний - напруга  $U_{\text{вих}}$ .

Перетворювач складається з рухомого якоря 1, двох нерухомих сердечників 2, на яких намотані обмотки 3. Вихідні обмотки індуктивних перетворювачів включені зустрічно. При переміщенні рухомого якоря зазор у одного перетворювача збільшується, а іншого зменшується. В сумі вони компенсують один одного. Відповідно струм в котушці одного перетворювача збільшується, а у іншого зменшується.

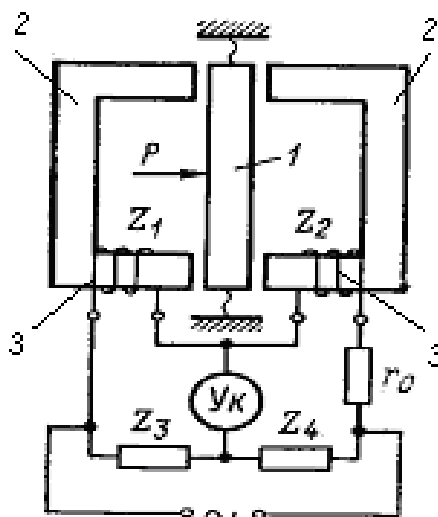


Рис. 5.50. Схема диференціального індуктивного перетворювача зі змінним повітряним проміжком:  
1 – якор; 2 – осердя; 3 - обмотка

У рівноважному стані моста, тобто при  $I_1 = I_2$ , струм у вимірвальній діагоналі моста не протікає. При зсуві якоря від

нейтралі, у вимірювальній діагоналі потече струм, величина якого буде залежати від величини вимірюваного переміщення  $x$ , прикладеного до якоря. Завдяки використанню цих ланцюгів поліпшується лінійність функції перетворення, у два рази зростає чутливість і зменшується сила притягання якоря.

Фаза вихідної напруги змінюється на  $180^\circ$  при проходженні якорем нейтрального положення.

Якщо знехтувати магнітним опором сталевго осердя, який значно менший магнітного опору повітряних проміжків, і активним опором котушки, то струм у котушці можна вважати пропорційним величині повітряного проміжку:

$$I = kl, \quad (5.43)$$

де  $k = \frac{U \cdot 10^7}{0,2\pi\omega W^2 S}$ ;  $l$  — значення повітряного зазору;  $U$  - напруга,

прикладена до котушки;  $\omega$  - частота напруги живлення;  $W$  - число витків котушки;  $S$  - площа поперечного перерізу сталевго осердя.

При переміщенні якоря, наприклад, вліво (вверх) на значення  $x$  відносно середнього положення зміняться величини повітряних проміжків і згідно з формулою (3.14) зміняться і струми в котушках, а саме:  $I_1 = k(l - x)$  і  $I_2 = k(l + x)$ , де  $I_1$  і  $I_2$  - струми в котушках  $Z_1$  і  $Z_2$  відповідно. Струми  $I_1$  і  $I_2$  зумовлять розбаланс моста і вихідна напруга

$$U_{\text{вих}} = I_1 Z - I_2 Z = 2kZx \quad (\text{при } Z_3 = Z_4) \quad (5.44)$$

При переміщенні якоря вправо (вниз) вихідна напруга також буде визначатися рівнянням (5.44), але фаза її зміниться на  $180^\circ$ .

Перетворювачі зі змінними повітряними проміжками використовують для вимірювання переміщень від декількох мікронів до декількох міліметрів. Для вимірювання великих переміщень використовують трансформаторні перетворювачі, робота яких побудована на зміні взаємної індуктивності двох котушок.

На точність роботи індуктивних перетворювачів впливає зміна температури, під дією якої змінюється активний опір обмотки, змінюються розміри повітряних зазорів, а також величини магнітної

проникності  $\mu$ . На точність роботи впливають коливання напруги живлення і частоти. Практично похибка диференціальних індуктивних перетворювачів становить 0,1 ... 1,5%.

Диференціальні перетворювачі в поєднанні з відповідним вимірювальним ланцюгом (зазвичай мостовою схемою) мають більш високу чутливість, меншу нелінійність характеристики перетворення, зазнають меншого впливу зовнішнього середовища та понижене результуюче зусилля на якір з боку електромагніта, ніж недиференціальні перетворювачі.

**Преваги диференціальних індуктивних перетворювачів:** збільшення лінійної ділянки перетворювача, відсутність струму холостого ходу, знаочутливість вихідної характеристики, температурна компенсація, простота і надійність.

**Недоліки:** вплив амплітуди і частоти живлячої напруги на похибки.

### 5.13.3. Взаємоіндуктивні (трансформаторні) перетворювачі

Трансформаторні перетворювачі набули значного поширення у вимірювальних системах. Вони являють собою трансформатори, у яких під впливом вхідного сигналу змінюються взаємні індуктивності обмоток, що призводить до зміни вторинної вихідної напруги.

Як відомо, вторинна напруга  $U$  трансформатора залежить від напруги джерела живлення  $U_{\text{жив}}$  первинної котушки, кількості витків первинної  $w_1$  і вторинної  $w_2$  котушок, магнітного потоку  $\Phi$ , що пронизує котушки, і електричного опору  $R$ , на який замкнена вторинна обмотка. Якщо  $U_{\text{жив}}$ ,  $w_1$ ,  $w_2$  та  $R$  – незмінні, то можна вважати, що  $U$  однозначно залежить тільки від магнітного потоку  $\Phi$ , який для котушки з феромагнітним магнітопроводом обернено пропорційний магнітному опору  $R_M$ .

Принцип дії трансформаторних перетворювачів ґрунтується на взаємоіндуктивному вимірювальному перетворенні, яке, в свою чергу, засноване на залежності взаємної індуктивності обмоток від параметрів обмоток і магнітного кола, в яке включені обмотки, а також від взаємного положення обмоток.

Взаємна індуктивність - величина, що характеризує магнітний зв'язок двох або більше електричних контурів (обмоток). Чисельно взаємна індуктивність  $M_{12}$  двох обмоток:  $w_1$ , в якій протікає

електричний струм  $I_1$ , і  $w_2$ , що знаходиться в магнітному полі електричного струму першої обмотки (рис. 5.51), дорівнює відношенню потокозчеплення  $\Psi_{12}$  магнітного поля електричного струму першої обмотки з другою обмоткою і сили струму першої обмотки:

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{I_1}. \quad (5.45)$$

Якщо електричний струм протікає по другій обмотці рис. 5.51, то взаємна індуктивність  $M_{21}$  визначається виразом:

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{I_2}. \quad (5.46)$$

де  $I_1$  - ток другої обмотки;  $\Psi_{21}$  - потокозчеплення магнітного поля електричного струму другої обмотки з першої обмоткою.

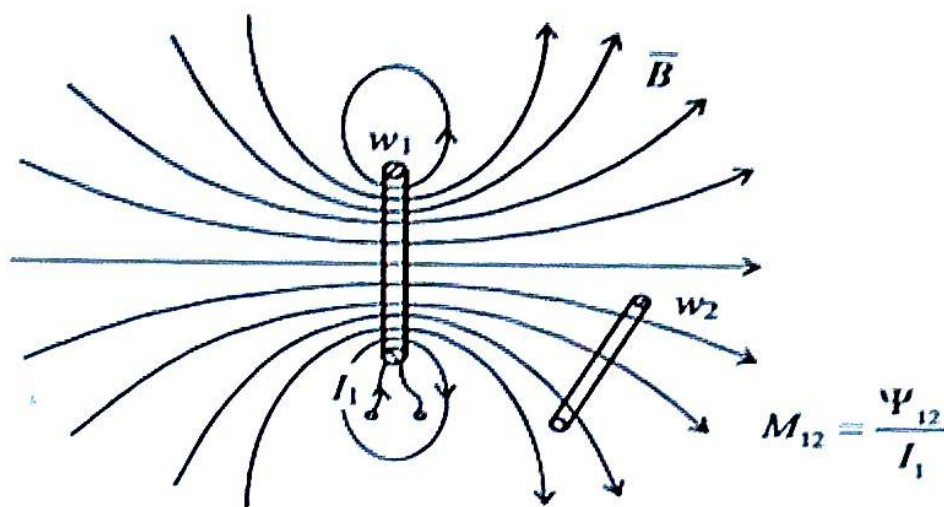


Рис. 5.51. Обмотка  $w_2$  в магнітному полі електричного струму обмотки  $w_1$

Важливо відзначити, що  $M_{21} = M_{12}$ .

**Трансформаторний (взаємноіндуктивний) перетворювач** являє собою пристрій, який містить дві системи обмоток з магнітопроводом і рухливим якорем, зв'язаним із вимірюваним переміщенням. Вхідне переміщення змінює величину індуктивного

зв'язку між двома системами обмоток, одна з яких (первинна) живиться змінним струмом, а з іншої (вторинної) знімається вихідний сигнал.

Величина зміни вихідного сигналу залежить від зміни індуктивного зв'язку між системами обмоток, що змінюється за рахунок переміщення якоря під дією перетворюваної величини. Таким чином, під впливом вимірюваного переміщення змінюється взаємна індуктивність, що приводить до зміни вихідної напруги.

Очевидно, що взаємна індуктивність обмоток визначається не тільки інтенсивністю і розподілом в просторі магнітного поля обмотки зі струмом, але залежить від взаємного розташування обмоток (відстані між обмотками та їх орієнтації в просторі).

Взаємна індуктивність обмоток, як і власна індуктивність, залежить від форми і розмірів обмоток, числа витків, геометричних і магнітних характеристик магнітного ланцюга, в який включені обмотки, магнітної проникності навколишнього середовища. Характер цієї залежності від зазначених факторів, по суті, той же, що і для власної індуктивності.

Розглянемо більш загальну конструкцію взаємоіндуктивного перетворювача, представлену на рис. 5.52.

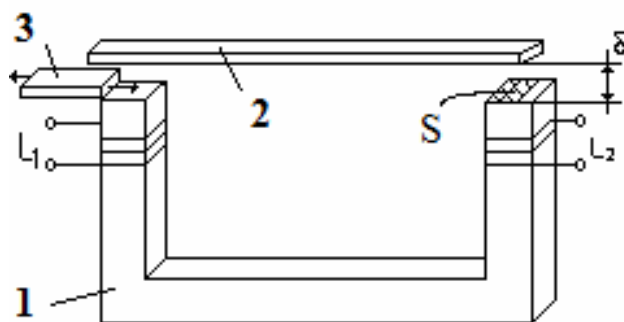


Рис. 5.52. Індуктивний перетворювач

1 - магнітопровід, 2 - якорі, 3 - діамагнітна пластина; S – площа перерізу магнітопровода;  $\delta$  – повітряний зазор;  $L_1$  і  $L_2$  – обмотки.

Індуктивність  $i$ -обмотки, що розташована на магнітопроводі, визначається виразом (5.40):

$$L_i = \frac{w^2}{r_M}$$

Взаємоіндуктивність двох обмоток  $w_1$  і  $w_2$ , розташованих на одному і тому ж магнітопроводі, може бути записана як

$$M_{12} = \frac{w_1 w_2}{r_M} \quad (5.47)$$

де  $w_1$  – кількість витків первинної обмотки;  $w_2$  – кількість витків вторинної обмотки.

Виходячи з устрою трансформаторного перетворювача (рис 5.52), взаємну індуктивність можна змінювати так само, як і індуктивність, а саме:

- змінюючи зазор  $\delta$ ;
- збільшуючи або зменшуючи втрати в магнітопроводі;
- змінюючи площу  $S$  перекриття магнітопровода і якора в повітряному проміжку;

Крім названих вище впливаючих факторів взаємна індуктивність залежить також від взаємного положення обмоток, що може бути використано в вимірювальних системах визначення місця розташування і орієнтації об'єктів в просторі.

**Ефективне значення** електрорушійної сили (ЕРС), що наводиться у вторинній обмотці потоком первинної обмотки, дорівнює

$$E_2 = w_2 \Phi_M \omega, \quad (5.48)$$

де  $\omega = 2\pi f$  - кутова частота живлячого струму;

$w_2$  - число витків вторинної обмотки;

$\Phi_M$  - амплітудне значення магнітного потоку, що пронизує вихідну (вторинну) обмотку, Вб.

Функція перетворення трансформаторного перетворювача:  $E_2 = f(x)$ .

**Діюче значення** ЕРС, що наводиться у вторинній обмотці потоком первинної обмотки, дорівнює

$$E_2 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \Phi_M w_2 = 4,44 \Phi_M f w_2 \quad (5.49)$$

Розрізняють два види трансформаторних перетворювачів: з магнітним опором, що змінюється, і нерухомою обмоткою, та з постійним магнітним опором, але з рухомою обмоткою. За аналогією з індуктивними датчиками дані датчики можуть бути нормальними і диференціальними.

Перетворювачі першого виду конструктивно аналогічні індуктивним перетворювачам і відрізняються тим, що замість однієї обмотки мають дві обмотки. Так, наприклад, перетворювач (рис. 5.53, а) складається з П-подібного магнітопроводу 1, рухомого якоря 2 і двох обмоток  $w_1$  і  $w_2$ .

На первинну обмотку  $w_1$  цього перетворювача подається від джерела живлення змінна напруга  $U_1$ . ЕРС  $E_2$ , що наводиться у вторинній обмотці, запишеться у вигляді

$$E_2 = \omega \frac{w_1}{w_2} \cdot \frac{F}{R_M} = f(x) \quad (5.50)$$

де  $\omega$  - кутова частота;  $w_1$  - число витків первинної обмотки;  $w_2$  - число витків вторинної обмотки;  $F$  - магніторушійна сила;  $R_M$  - магнітний опір;  $x$  - координата осердя.

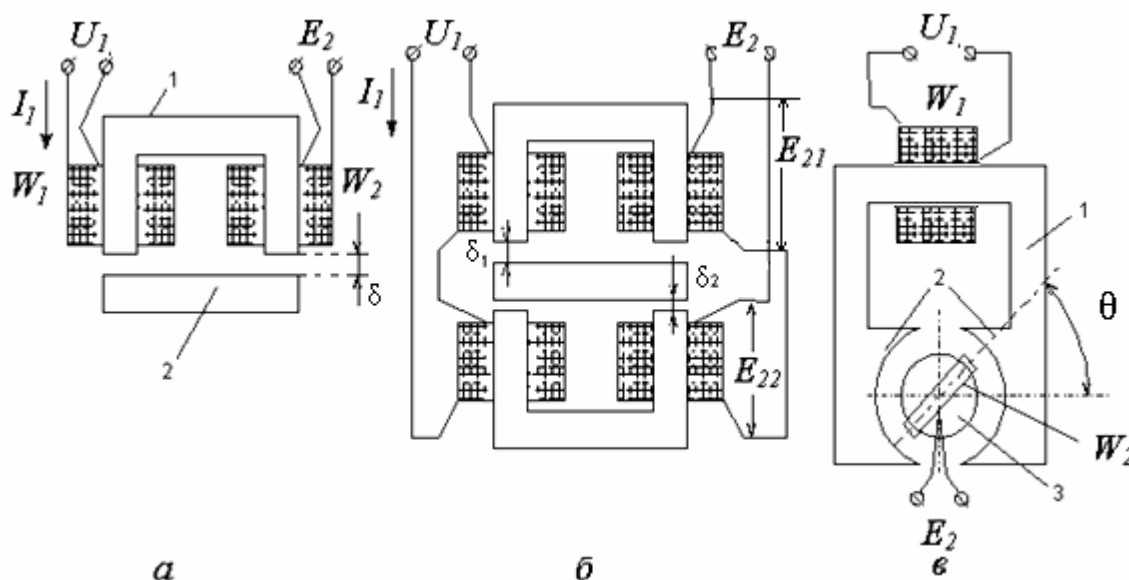


Рис. 5.53. Види трансформаторних перетворювачів: а – із змінним магнітним опором і нерухомою обмоткою; б – з постійним магнітним опором і рухомою обмоткою; в – феродинамічний трансформаторний перетворювач

Вимірюване лінійне переміщення  $x$  переміщує яркір, що викликає зміну повітряного зазору  $\delta$ . Зміна  $\delta$  в свою чергу змінює магнітний опір  $R_M$  і взаємну індуктивність  $M$ .

При цьому змінюється вторинна індуктивність ЕРС

$$E_2 = w_2 \frac{d\Phi}{dt} \frac{\omega w_1 I_1 w_2}{R_M + \frac{\delta}{\mu_0 S}}, \quad (5.51)$$

де  $w_1$  і  $w_2$  – кількість витків намагнічувальної (первинної) та вимірювальної (вторинної) обмоток;  $I_1$  – намагнічувальний струм;  $\delta$  та  $S$  – довжина та площа повітряного проміжку;  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота;  $R_M$  – магнітний опір;  $\mu_0$  – магнітна постійна.

Таким чином, вихідна ЕРС  $E_2$  розглянутого перетворювача залежить від положення його сердечника, тобто датчик перетворює переміщення сердечника в ЕРС  $E_2$  (чим ближче сердечник до магнітопроводу, тим  $E_2$  більше; чим далі сердечник від магнітопроводу, тим  $E_2$  менше). Графік залежності  $E_2 = f(x)$  наведений на рис. 5.54, а.

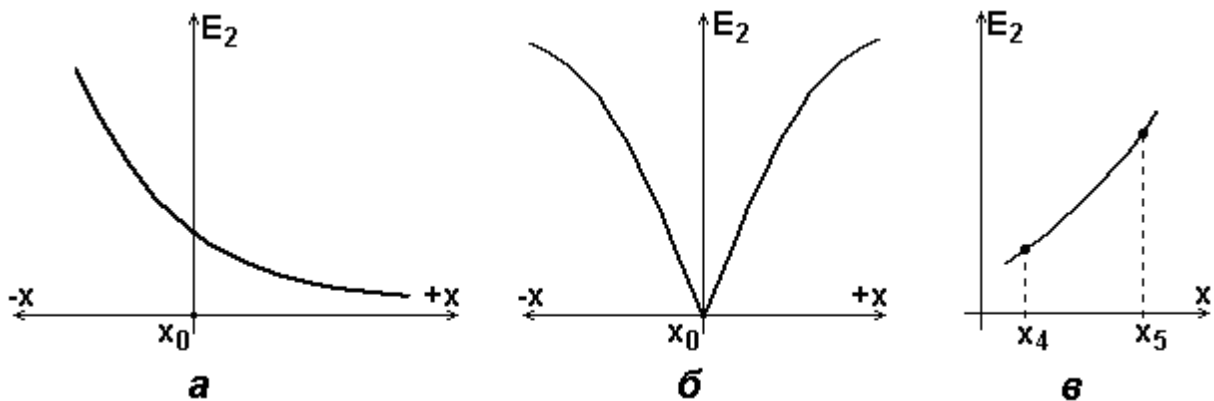


Рис. 5.54. Графіки статичних характеристик перетворення трансформаторних датчиків:

- а - для датчика нормального виконання (рис. 5.53, а); б - для датчика диференціального виконання (рис. 5.53, б); в - для датчика з рухомою котушкою (рис. 5.53, в)



Залежність  $E_2 = f(\delta)$  таких взаємноіндуктивних перетворювачів є нелінійною. Іншим недоліком даного перетворювача є залежність намагнічувального струму  $I_1$  від переміщення якоря. Якщо первинну обмотку підключити до джерела з постійною амплітудою  $U_1$ , то при зменшенні, наприклад, повітряного зазору  $\delta$ , зростає індуктивність первинної обмотки  $L_1$  і її опір  $Z_1 = j\omega L_1$ , що веде до зменшення струму  $I_1$  і вторинної ЕРС  $E_2$ .

Крім цього, на виході вимірювальної обмотки діє  $E_2$  при відсутності вхідної дії, значення якої відповідає початковому проміжку  $\delta_0$ .

Ці недоліки значно зменшені в диференціальному взаємноіндуктивному перетворювачі (рис. 5.53, б).

У цього перетворювача первинні обмотки з'єднані послідовно і підключені до джерела змінної напруги з постійним значенням  $U_1$ , а вторинні – включені зустрічно.

На первинну обмотку  $w_1$  цього датчика подається змінна напруга  $U_1$ . У вторинній обмотці  $w'_2$  наводяться дві ЕРС:  $E_{21}$  і  $E_{22}$ . Завдяки зустрічному включенню вторинних обмоток вихідна ЕРС  $E_2$  запишеться у вигляді

$$E_2 = E_{21} - E_{22} = f(x), \quad (5.52)$$

де  $x$  - координата осердя датчика.

При переміщенні якоря опір однієї первинної обмотки зростає, а опір іншої первинної обмотки на стільки ж зменшується. Взагалі ж, опір первинного ланцюга залишається без зміни, а струм  $I_1$  – сталим.

Очевидно, що при деякому середньому положенні осердя  $E_{21} = E_{22}$  і  $E_2 = 0$ . При переміщенні осердя «вгору» (в бік «+x») ЕРС  $E_{21}$  стає більше ЕРС  $E_{22}$  і  $E_2 \neq 0$ . При переміщенні осердя «вниз» (в бік «-x») ЕРС  $E_{22}$  стає більше ЕРС  $E_{21}$  і  $E_2 \neq 0$ . Графік залежності  $E_2 = f(x)$  наведено на рис. 5.54, б.

Крім цього, взаємноіндуктивні диференціальні перетворювачі мають нульовий вихідний сигнал при відсутності вхідної дії, мають лінійну функцію перетворення і значно більшу чутливість.

Для перетворення кутових переміщень широке застосування знайшли феродинамічні трансформаторні перетворювачі (рис. 5.53, в). Вони належать до перетворювачів з постійним магнітним опором і рухомою обмоткою.

Феродинамічний перетворювач складається з П-подібного магнітопроводу 1 з полюсними наконечниками 2. На магнітопроводі 1 знаходиться обмотка збудження  $w_1$ . Між полюсними наконечниками вставляється циліндричне феромагнітне осердя 3, на якому розміщена вторинна обмотка  $w_2$ . Циліндричне осердя разом з обмоткою  $w_2$  може повертатися під дією вимірюваного кутового переміщення навколо своєї осі в радіальному магнітному полі.

Повітряний зазор між осердям і полюсними наконечниками однаковий, також однакова в повітряному зазорі і магнітна індукція. Обмотка збудження  $w_1$  включається в ланцюг змінної напруги з частотою  $\omega$  і створює магнітний потік. Частина його проходить через обмотку  $w_2$  і наводить у ній ЕРС  $E_2$ . ЕРС  $E_2$ , що наводиться в рухомій котушці, залежить від взаємної індуктивності між обмоткою цієї котушки (що є вторинною) і обмоткою первинної котушки, на яку подається змінна напруга живлення  $U_1$ .

При повороті обмотки  $w_2$  вихідна напруга  $E_2$  змінюється відповідно до виразу

$$E_2 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \psi = 2 \frac{\omega}{\sqrt{2}} B l w_2 R_p \theta \quad (5.53)$$

де  $\psi$  – потокозчеплення обмотки  $w_2$ ;  $B$  – амплітудне значення індукції в зазорі;  $l$  – активна довжина проводу обмотки  $w_2$ , що перетинається магнітним полем;  $R_p$  – середній радіус обмотки  $w_2$ ;  $w_2$  – число витків обмотки;  $\theta$  – кут повороту обмотки  $w_2$ ;  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота напруги  $U_1$ .

Якщо  $\omega$  і  $B$  зберігаються постійними, то значення ЕРС, що наводиться в обмотці  $w_2$ , пропорційне її куту повороту:

$$E_2 = K \cdot \theta, \quad (5.54)$$

де  $K$  – чутливість перетворювача.

Графік залежності  $E_2 = f(x)$  для даного датчика наведений на рис. 5.54, в. (де  $x = \theta$ ).

Причини похибок трансформаторних перетворювачів зі змінним магнітним опором аналогічні причинам похибок індуктивних перетворювачів. Аналогічні також методи їхнього зменшення. При збільшенні температури змінюється магнітна проникність магнітопроводу, а також зростає активний опір магнітних обмоток. Це зменшує первинний струм  $I_1$  і вихідну напругу  $E_2$ .

Трансформаторні датчики застосовують в тих же областях, що і індуктивні, тобто для вимірювання лінійних і кутових переміщень, а також для вимірювання фізичних величин, які можуть бути перетворені в лінійне або кутове переміщення (наприклад, для вимірювання тиску, витрати, сили тощо).

Трансформаторні датчики мають багато спільного з індуктивними датчиками (область застосування, переваги, недоліки, конструкція і т. д.), але мають і ряд переваг перед індуктивними датчиками.

Їх **переваги** перед останніми:

- можливість вимірювання великих лінійних переміщень;
- відсутність необхідності у використанні вимірювальних схем;
- відсутність гальванічного зв'язку між ланцюгами виходу і живлення.

До **недоліків** трансформаторних датчиків слід віднести:

- наявність температурних похибок,
- наявність похибок від впливу зовнішніх електромагнітних полів і феромагнітних тіл.

Існує навіть ряд виконань трансформаторних датчиків, що реагують на наближення феромагнітних тіл, і забезпечених схемою з релейним виходом (реле близькості).

#### 5.14. Магнітопружні перетворювачі

Магнітопружні перетворювачі є різновидом електромагнітних перетворювачів. Їх дія заснована на використанні **магнітопружного ефекту**, сутність якого полягає в зміні магнітних властивостей (магнітної проникності  $\mu$  та інших властивостей феромагнітних матеріалів) під дією механічних пружних деформацій (розтягуючих, стискаючих, вигинаючих, скручуючих). Інша назва магнітопружного

ефекту - ефект Віллари, на прізвище італійського фізика Е. Віллари, який відкрив його в 1865 році.

Зміна магнітної проникності феромагнітного осердя викликає зміну магнітного опору  $R_M$  для магнітного потоку в осерді. Зміна ж  $R_M$  веде до зміни повного електричного опору  $Z$  котушки, що знаходиться на осерді. Таким чином, в магнітопружному перетворювачі ми маємо наступну ланцюг перетворень:

$$F \rightarrow \sigma \rightarrow \mu \rightarrow R_M \rightarrow Z$$

Магнітопружний ефект пояснюється тим, що при дії механічних напружень змінюється доменна структура феромагнетика - відбувається зміщення кордонів доменів і зміна напрямків їх векторів намагніченості, тобто ті ж процеси, що і при намагнічуванні феромагнетика. При збігу спрямованості згаданих процесів, що відбуваються в результаті механічної деформації і намагнічування, має місце зростання магнітної проникності, в іншому випадку - її зменшення.

Явище магнітної пружності є зворотним: феромагнітне тіло, внесене в магнітне поле, змінює свої розміри, інакше кажучи, зовнішнє магнітне поле викликає механічні деформації феромагнітного тіла. Явища, що виникають внаслідок залежності між механічними і магнітними станами феромагнітних тіл, називають **магнітострикційними** (від магніт і латинського *strictio* - стиснення, натягування; відкритий англійським вченим Д. Джоулем в 1842 році). Пояснюється наявністю при намагнічуванні феромагнетиків процесів зсуву кордонів між доменами і повороту магнітних моментів доменів по полю, що призводить до зміни енергетичного стану кристалічної решітки і проявляється в зміні рівноважних відстаней між її вузлами. В результаті атоми зміщуються, відбувається деформація решітки. Відносне подовження зразків з деяких феромагнетиків (Fe, Ni, Co, Gd, Tb, Dy і їх сплавів) досягає порядку  $10^{-5} \dots 10^{-2}$ .

Під чисельним значенням магнітострикції розуміють відносну зміну  $\Delta l/l = \lambda$  довжини  $l$  стрижня, обумовлену впливом зовнішнього магнітного поля. Досвід показує, що магнітострикційні явища не однозначні. У одних феромагнітних тіл магнітострикція позитивна, тобто їх розміри збільшуються в напрямку магнітного поля, у інших - негативна, тобто розміри тіл зменшуються в напрямку магнітного

поля. Величина магнітострикції та її знак залежать від матеріалу магнітного ланцюга, його температури, термообробки, напруженості магнітного поля. Характер залежності магнітострикції  $\lambda$  від напруженості магнітного поля  $H$  для різних феромагнітних матеріалів показаний на рис. 5.55.

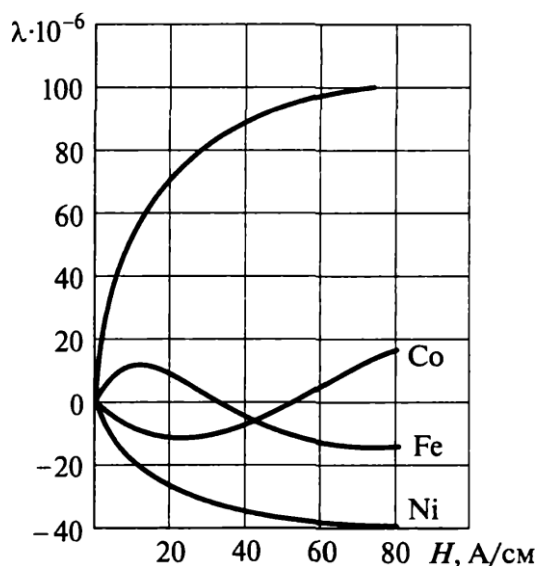


Рис. 5.55. Залежності магнітострикції  $\lambda$  від напруженості магнітного поля  $H$  для деяких феромагнітних матеріалів

Магнітопружний ефект також не однозначний. Для одного і того ж матеріалу під впливом механічної напруги магнітна проникність в слабких полях може зростати, а в сильних - спадати. В якості ілюстрації на рис. 5.56 наведені криві зміни магнітної індукції  $B$  в залежності від механічного навантаження  $P$  для дроту з м'якої сталі при різних значеннях напруженості магнітного поля  $H$ .

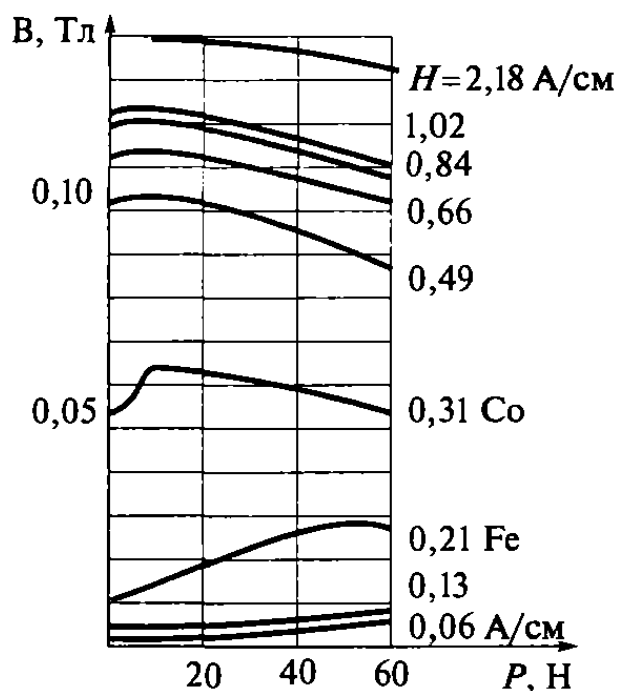


Рис. 5.56. Залежності магнітної індукції  $B$  від механічного навантаження  $P$  для дроту з м'якої сталі при різних значеннях напруженості магнітного поля  $H$

У тих випадках, коли магнітопружні перетворювачі використовуються для вимірювання деформації  $\Delta l$  деталей, тобто коли природною вхідною величиною є переміщення, чутливість магнітопружних перетворювачів можна охарактеризувати (подібно тензорезисторам) коефіцієнтом відносної тензочутливості  $k_\mu$ .

Отже, основною характеристикою матеріалу з точки зору його магнітопружних властивостей є коефіцієнт магнітопружної чутливості, який визначається як відношення відносної зміни магнітної проникності до відносної деформації -  $k_\mu$  або до механічної напруги -  $k_\sigma$ :

$$k_\mu = \frac{\Delta\mu/\mu}{\Delta l/l}; \quad k_\sigma = \frac{\Delta\mu/\mu}{\sigma}, \quad (5.55)$$

де  $\Delta\mu/\mu$  - відносна зміна магнітної проникності;  $\Delta l/l$  - відносна зміна довжини феромагнітного об'єкта;  $\sigma$  - механічне напруження.

Зазвичай внаслідок масивності магнітного ланцюга магнітопружний перетворювач в якості природної вхідної величини сприймає силу, що впливає на нього. В цьому випадку відносною магнітопружною чутливістю матеріалу називають відносну зміну

магнітної проникності  $\Delta\mu/\mu$ , зумовлену одиницею механічної напруги  $\sigma$ , тобто коефіцієнт  $k_\sigma$ . Дану чутливість вимірюють у відсотках на 1 Н/мм<sup>2</sup>.

На рис. 5.57, а зображено тензометричний магнітопружний перетворювач індуктивного типу, в якому в якості осердя 2 і обмотки котушки 1 використовується дріт з пермаллою. На рис. 5.57, б показаний перетворювач, виконаний з тонкого листа пермаллою, що наклеюється на випробувану деталь.

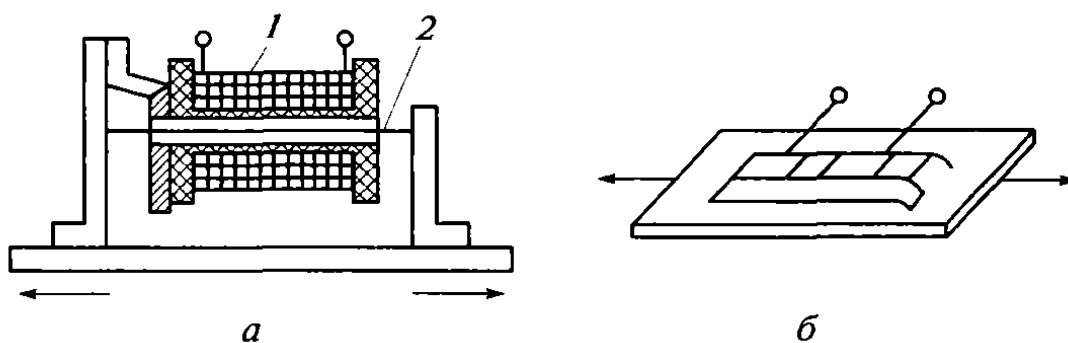


Рис. 5.57. Тензометричні магнітопружні перетворювачі індуктивного типу:

а – роз'ємної конструкції; б - з тонкого листа пермаллою;  
1 - котушка; 2 - осердя

Оскільки величини  $\Delta l/l$  і  $\sigma$  пов'язані між собою законом Гука ( $\sigma = E \Delta l/l$ , де  $E$  - модуль Юнга), то величини  $k_\mu$  і  $k_\sigma$  пов'язані між собою співвідношенням:

$$k_\mu = E k_\sigma, \quad (5.56)$$

Для перетворення змін магнітної проникності матеріалу під дією деформації в електричний сигнал використовуються індуктивне (рис. 5.58,а) або взаємоіндуктивне (рис. 5.58,б) вимірювальні перетворення.

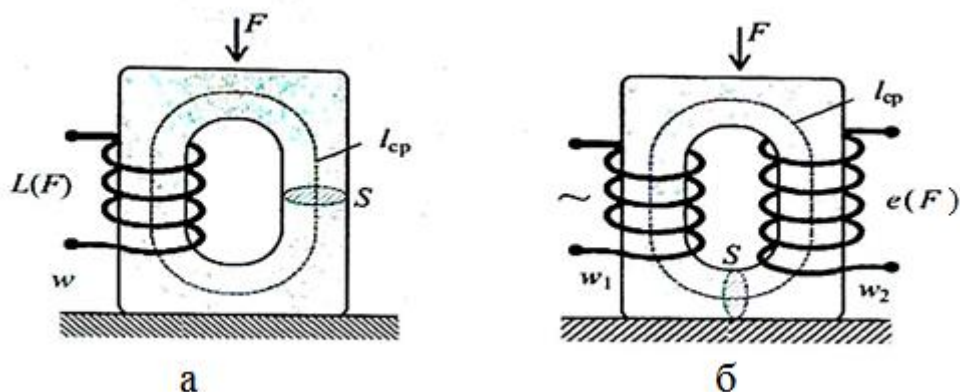


Рис. 5.58. Перетворення в електричний сигнал змін магнітних властивостей феромагнітного осердя з використанням індуктивного (а) і взаємодуктивного (б) вимірювальних перетворень

Згідно (5.47) індуктивність обмотки із замкнутим магнітопроводом сталого перетину (рис. 5.58, а) визначається виразом:

$$L = w^2 \frac{S\mu}{l_{\text{сер}}} \quad (5.57)$$

де  $w$  - число витків обмотки;  $S$  - площа поперечного перерізу магнітопроводу;  $l_{\text{сер}}$  - довжина середньої силової лінії;  $\mu = \mu_0\mu_r$  - магнітна проникність матеріалу магнітопроводу.

При деформації магнітопроводу під дією сили  $F$  відбувається не тільки зміна магнітної проникності феромагнетика в результаті прояву магнітопружного ефекту, а й зміна його геометричних розмірів. Зміна індуктивності в результаті деформації магнітопроводу знаходиться диференціюванням (5.56):

$$\Delta L = \frac{\partial L}{\partial \mu} \Delta \mu + \frac{\partial L}{\partial S} \Delta S + \frac{\partial L}{\partial l_{\text{сер}}} \Delta l_{\text{сер}} = L \left( \frac{\Delta \mu}{\mu} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta l_{\text{сер}}}{l_{\text{сер}}} \right), \quad (5.58)$$

де  $\Delta S$  - зміна площі поперечного перерізу магнітопроводу;  $\Delta l_{\text{сер}}$  - зміна довжини середньої силової лінії;  $\Delta \mu$  - зміна магнітної проникності матеріалу магнітопроводу.

Для феромагнітних сердечників з матеріалів з яскраво вираженими магнітопружними властивостями можна прийняти, що  $\frac{\Delta \mu}{\mu} \gg \frac{\Delta l_{\text{сер}}}{l_{\text{сер}}}$  і  $\frac{\Delta \mu}{\mu} \gg \frac{\Delta S}{S}$ . З урахуванням цього:



$$\Delta L \approx L \frac{\Delta \mu}{\partial \mu} = L k_{\mu} \frac{\Delta l_{\text{сер}}}{l_{\text{сер}}} = L k_{\sigma} \sigma. \quad (5.59)$$

Аналогічним чином можна показати, що для варіанту взаємоіндуктивного вимірювального перетворення (рис.5.58, б) зміна взаємної індуктивності, яка визначається диференціюванням (5.47) описується виразом:

$$\Delta M = \frac{\partial M}{\partial \mu} \Delta \mu + \frac{\partial M}{\partial S} \Delta S + \frac{\partial M}{\partial l_{\text{сер}}} \Delta l_{\text{сер}} = M \left( \frac{\Delta \mu}{\mu} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta l_{\text{сер}}}{l_{\text{сер}}} \right); \quad (5.60)$$

$$\Delta M \approx M \frac{\Delta \mu}{\partial \mu} = M k_{\mu} \frac{\Delta l_{\text{сер}}}{l_{\text{сер}}} = M k_{\sigma} \sigma$$

Магнітний ланцюг магнітопружних перетворювачів найчастіше виконують з суцільного матеріалу. Теорія феромагнетизму дає теоретичні співвідношення, що дозволяють обґрунтовано підійти до вибору матеріалу магнітопружного перетворювача.

Магнітоупружні вимірювальні перетворювачі застосовуються для перетворення (вимірювання) великих сил і високих тисків (понад 10 Н/мм<sup>2</sup>), механічних напруг і деформацій в машинах і спорудах. При використанні магнітопружних перетворювачів для вимірювання сили межа вимірювання приладу визначається площею магнітопружного перетворювача. Дані перетворювачі деформуються під дією сили дуже незначно (при  $l = 50$  мм  $\Delta l \leq 10$  мкм), мають високу жорсткість і власну частоту до 20 ... 50 кГц. Допустимі напруги в матеріалі магнітопружного перетворювача не повинні перевищувати 40 Н/мм<sup>2</sup>. Зворотне магнітопружне перетворення (магнітострикція) застосовується для збудження акустичних хвиль, створення ліній затримки в акустиці і електромеханічних фільтрів.

## РОЗДІЛ 6. ГЕНЕРАТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

**Генераторні перетворювачі (датчики)** характеризуються тим, що в них здійснюється перетворення різних видів енергії в електричну (генерування електричної енергії під впливом вимірюваної неелектричної величини).

До генераторних можна віднести наступні типи датчиків:

1) **термоелектричні датчики (термопари)**, засновані на залежності термоЕРС термопар від різниці температур їх робочих і вільних кінців;

2) **індукційні датчики**, засновані на явищі електромагнітної індукції;

3) **п'єзоелектричні датчики**, засновані на використанні прямого п'єзоелектричного ефекту, що полягає в поляризації деяких матеріалів (кварцу, турмаліну, п'єзокераміки та ін.) при їх деформації;

4) **фотоелектричні датчики**, засновані на залежності ЕРС фотоелементів від їх освітленості;

5) **гальванічні датчики**, засновані на залежності ЕРС гальванічного елемента від складу і концентрації розчинів електролітів;

6) **електрокінетичні датчики**, засновані на явищі електрокінетичного потенціалу, що виникає при вимушеному протіканні полярної рідини через пористу стінку.

Наведений перелік типів датчиків не охоплює, звичайно, всіх типів і всіх можливих модифікацій датчиків одного типу. Наведено лише найбільш поширені типи датчиків.

### 6.1. Термоелектричні перетворювачі

Термоелектричні перетворювачі відносяться до типу теплових перетворювачів.

Принцип дії термоелектричних вимірювальних перетворювачів заснований на термоелектричному ефекті, відкритому німецьким фізиком Т. Зеєбеком в 1821 році, згідно з яким у колі, складеному з двох різнорідних провідників А і В, кінці з'єднання яких знаходяться при різних температурах  $T_0$  і  $T_1$ , (рис. 6.1.) виникає електричний струм, пропорційний ЕРС, званої **термоелектрорушійною силою** (термо-ЕРС). ЕРС  $e_3(T)$  в місці контакту двох різнорідних провідників (рис.8.8), є функцією температури контакту  $T$ .



Рис. 6.1. Термоелектричний перетворювач

Подібний ланцюг (рис 6.1) називається **термоелектричним перетворювачем**, або **термопарою**; провідники, що утворюють термопару, - термоелектродами, а місця їх з'єднання - спаями. Якщо один спай термопари (так званий робочий, гарячий) помістити в середовище з температурою  $T_1$  яку потрібно виміряти, а температуру іншого спаю (так званого вільного, холодного) підтримувати постійною  $T_0 = \text{const}$ , то ЕРС виявляється функцією температури робочого спаю:

$$E_{AB}(T_1, T_0) = f(T_1) - f(T_0) = f(T_1)$$

Останній вираз покладено в основу вимірювання температури за допомогою термопар.

Спай термопари, що поміщається у досліджуване середовище, називають **робочим**, або гарячим, а спай, температура якого підтримується, як правило, постійною, - **вільним**, або холодним.

Вхідною величиною термопари є температура  $T_1$  робочого спаю, а вихідною – термо-ЕРС, яку термопара розвиває при постійній температурі  $T_0$  неробочого спаю.

При малих різницях температур спаїв можна прийняти, що термо-ЕРС  $E_{AB}$  прямо пропорційна різниці температур:

$$E_{AB} = k(T_1 - T_0) = k\Delta T, \quad (6.1)$$

де  $k$  - коефіцієнт термо-ЕРС (питома термо-ЕРС), різний для різних сполучень металів.

У широкому діапазоні різниць температур коефіцієнт термо-ЕРС визначається рівнянням другого порядку:

$$k = k_0 + k_1\Delta T + k_2(\Delta T)^2 \quad (6.2)$$

де  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  - коефіцієнти, що залежать від роду контактуючих металів.

У таблиці 6.1. наведені орієнтовні значення коефіцієнта термо-ЕРС для деяких металів по відношенню до свинцю.

Таблиця 6.1. Значення  $k$  для ряду металів по відношенню до свинцю

Матеріал	K, мкВ/К	Матеріал	K, мкВ/К
Сурьма	+43	Олово	-0,2
Залізо	+15	Алюміній	-0,4
Вольфрам	+3,6	Платина	-4,4
Мідь	+3,2	Натрій	-6,5
Цинк	+3,1	Нікель	-20,8
Золото	+2,9	Константан	-38
Свинець	0,0	Вісмут	-68,0

Термопара, характеризується залежністю  $E = f(T)$  при  $T_0 = \text{const}$ , яка визначається експериментально і називається **номінальною статичною характеристикою** (НСХ) перетворення. Вона приводиться для різних термопар у вигляді табличних значень, також повідомляються межі допустимих відхилень термо-ЕРС від НСХ в різних діапазонах вимірюваних температур

Виходячи із загальних міркувань, виникнення термо-ерс  $E(T)$  в замкнутому електричному колі з двох провідників А і В (рис.6.1) при різних температурах  $T_0$  і  $T_1$  їх з'єднань (спаїв) пояснюється сумарною дією двох термоелектричних ефектів: явищем Томсона і явищем Зеебека.

Явище, відкрите в 1856 році англійським фізиком В. Томсоном, полягає у встановленні на кінцях провідника, що має температурний градієнт (рис. 6.2), деякої різниці потенціалів  $e_T(\Delta T)$ . Для випадку

однорідного провідника величина ЕРС  $e_T(\Delta T)$  прямо пропорційна різниці температур  $\Delta T = T_1 - T_0$  :

$$e_T(\Delta T) = \Psi_T(\Delta T), \quad (6.3)$$

де  $\Psi_T$  - коефіцієнт Томсона для даного матеріалу провідника.

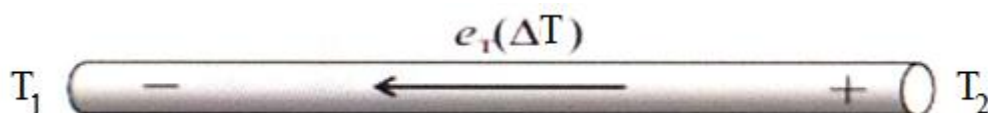


Рис.6.2. Виникнення у провіднику ЕРС Томсона при різній температурі його кінців  $T_1 < T_2$ .

Причиною виникнення ЕРС Томсона є дифузія електронів від більш нагрітого кінця до холодного.

Сутність явища, відкритого в 1821 році німецьким фізиком Т. Зеебеком, полягає у виникненні в місці контакту двох різнорідних провідників (рис.5.4) ЕРС  $e_3(T)$ , що є функцією температури контакту  $T$ . Тому в літературі (особливо іноземній) прямий термоелектричний ефект часто називають ефектом Зеебека.

У першому наближенні контактна ЕРС Зеебека прямо пропорційна температурі контакту:

$$e_3(T) = \Psi_3(T), \quad (6.4)$$

де  $\Psi_3$  - коефіцієнт, що залежить від контактуючих матеріалів.

У малому діапазоні зміни температури можна вважати, що  $\Psi_3$  практично не залежить від температури. У широкому ж діапазоні зміни температури слід враховувати деяку нелінійність залежності (6.4).

Виникнення контактної ЕРС пояснюється різною енергією виходу електронів для різних матеріалів. У разі якщо енергія виходу електронів з матеріалу провідника А більше енергії виходу електронів з матеріалу провідника В, число електронів  $n_{AB}$ , що перейшли з А в В, буде менше числа електронів  $n_{BA}$ , які перейшли з В в А. В результаті провідник А придбає негативний потенціал щодо провідника В.

Сумарна термо-ерс в електричному колі рис. 6.1 дорівнює алгебраїчній сумі всіх ЕРС, що виникають в спаях різнорідних металів внаслідок різної роботи виходу електронів в різних металах при різній температурі:

$$E_{AB} = e_{TB}(\Delta T) - e_{TA}(\Delta T) + e_3(T_1) - e_3(T_0), \quad (6.5)$$

де  $e_{TA}(\Delta T)$  і  $e_{TB}(\Delta T)$  – ЕРС Томсона, що виникають відповідно в провідниках А і В;  $e_3(T_1)$  і  $e_3(T_0)$  – ЕРС Зеебека, що виникають відповідно в першому і другому спаях. Знаки доданків враховують різні напрямки ЕРС.

Включення в електричне коло рис. 6.1 додаткових провідників за умови рівності температур їх кінців не викликає зміни сумарної термо-ЕРС  $E_{AB}$ . Це дає можливість включення в електричний ланцюг вимірювача ЕРС без внесення спотворення одержуваної вимірювальної інформації.

Включити вимірювач (показчик) в ланцюг термопари можна за двома схемами (рис. 6.3, б, в). Щоб включення в ланцюг термопари показчика Пк не змінило значення термо-ЕРС, місця з'єднання показчика з термоелектродами повинні мати однакову температуру.

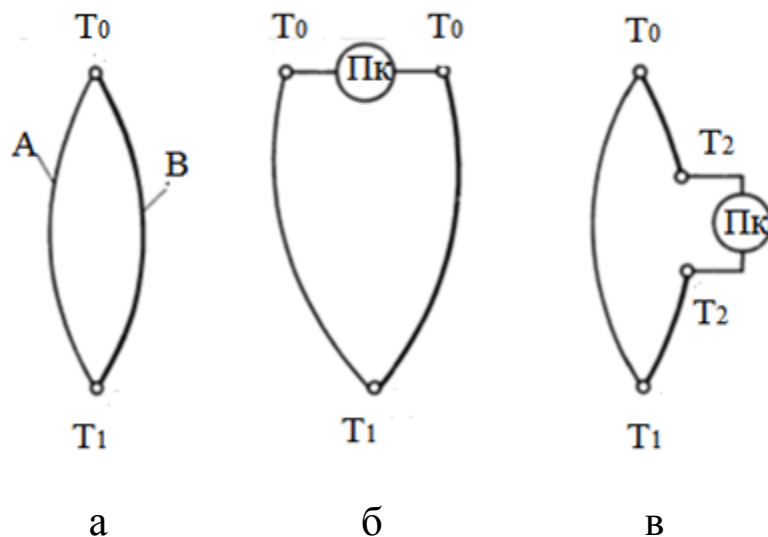


Рис. 6.3. Термоелектричні перетворювачі:

а - конструктивна схема; б, в - схеми включення показчика

У будь-якої пари однорідних провідників значення термо-ЕРС залежить тільки від природи провідників і від температури спаїв і не залежить від розподілу температури уздовж провідників. Термоелектричний контур можна розімкнути в будь-якому місці і

включити в нього один або кілька різнорідних провідників. Якщо всі нові сполуки знаходяться при однаковій температурі, то не виникає ніяких паразитних термо-ЕРС.

### **Матеріали, що застосовуються для термопар.**

У вимірювальній техніці термопари набули широкого поширення для вимірювання температур. Як електроди термопари можуть бути використані чисті метали, сплави і напівпровідники. Чутливість термопар з чистих металів становить одиниці мікрвольт на градус Цельсія, зі сплавів - десятки мікрвольт на градус Цельсія, з напівпровідників - сотні і навіть тисячі мікрвольт на градус Цельсія.

Для вимірювання температур до  $1100^{\circ}\text{C}$  використовують термопари в основному з неблагородних металів; понад  $1100$  і до  $1600^{\circ}\text{C}$  - термопари з благородних металів платинової групи; більше  $1600^{\circ}\text{C}$  - з жаротривких матеріалів (вольфрам молібден). Напрямок термо-ЕРС залежить лише від природи матеріалів, з яких виготовлені термоелектроди. Позитивним називають той термоелектрод, у напрямку до якого струм йде через робочий спай термопари.

В таблиці 6.2 наведені значення термо-ЕРС, які розвиваються різними термоелектродами в парі з платиною при температурі робочого спаю  $100^{\circ}\text{C}$  і температурі вільних неробочих спаїв  $0^{\circ}\text{C}$ .

Таблиця 6.2. Значення термо-ЕРС деяких матеріалів в парі з платиною

Матеріал	Термо-ЕРС, мВ	Матеріал	Термо-ЕРС, мВ
Кремній	+0,44	Ртуть	0,00
Хромель	+2,40	Паладій	-0,57
Ніхром	+2,20	Цинк	-0,75
Залізо	+1,80	Нікель	-1,50
Вольфрам	+0,80	Алюмель	-1,70
Мідь	+0,76	Константан	-3,40
Золото	+0,75	Копель	-4,50
Платинородій(10%родію)	+0,64	Вісмут	-7,70
Графіт	+0,32	Молібденіт	-104

Наведені дані дозволяють визначити термо-ЕРС термоелектричного перетворювача (складеного з будь-якої пари термоелектродів) як алгебраїчну різницю значень термо-ЕРС, що розвиваються відповідними термоелектродними матеріалами в парі з платиною. При конструюванні термопар прагнуть поєднувати термоелектроди, один з яких розвиває з платиною найбільшу позитивну термо-ЕРС, а інший - негативну. Необхідно також враховувати придатність того чи іншого термоелектрода для використання в заданих умовах вимірювання (вплив на термоелектроди середовища, температури тощо).

Оскільки залежність термо-ЕРС від температури в широкому діапазоні значень температури зазвичай нелінійна, то наведені дані не можна поширювати на більш високі температури. Важливо і те, що термо-ЕРС, що розвиваються термоелектронами, в значній мірі залежать від найменших домішок, механічної і термічної обробки (загартування, отжиг).

Для перетворень високих температур (понад 1300 °С) розроблені термоперетворювачі на основі тугоплавких металів іридію, вольфраму, молібдену, танталу, ніобію, а також на основі вуглецевих і графітових волокон.

Найбільшого поширення в практиці знайшли термопари платинородій - платина, хромель-алюмель, хромель-копель, вольфрам-молібден, борид - карбід цирконію.

Серед термопар з неблагородних металів стандартними і найбільш поширеними є чотири термопари, основні характеристики яких наведені в табл. 6.3.

Таблиця 6.3. Термопари з благородних металів

Термопара	Термо-ЕРС, мВ При $t=100^{\circ}\text{C}$ , $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$	Верхня границя вимірюваної температури, $^{\circ}\text{C}$	
		При довготривалому вимірюванні	При короткочасному вимірюванні
Мідь-копель	4,75	350	500
Залізо-копель	5,75	600	800
Хромель-копель	6,90	600	800
Хромель- алюмель	4,10	1100	1250



### Вимірювальні ланцюги термоперетворювачів.

Вимірювальні ланцюги термоелектричних перетворювачів можуть бути найрізноманітнішими. Найпростіший вимірювальний ланцюг (рис. 6.4, а) має ряд недоліків. Зокрема, при вимірюванні термо-ЕРС порівняно низькоомним мілівольтметром значний вплив на результат вимірювання може чинити опір з'єднувальних ліній, а також опір матеріалу чутливого елемента (термопари).

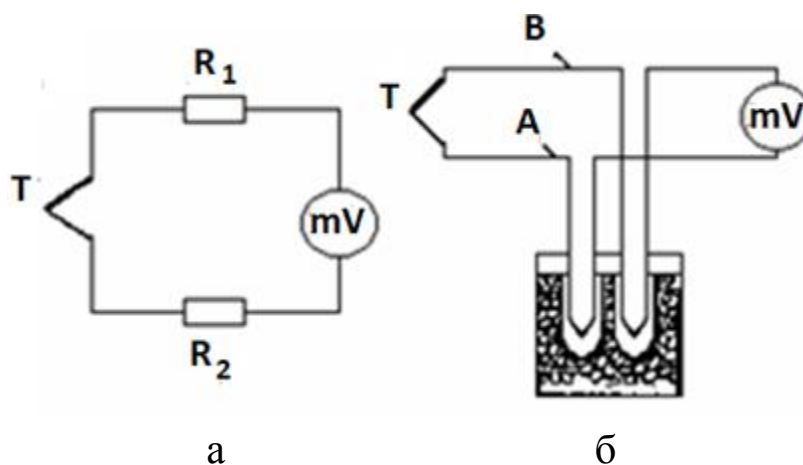


Рис. 6.4. Вимірювальні ланцюги термоелектричних перетворювачів  
а – найпростіша схема, б – схема с термостатуванням  
 $R_1, R_2$  – опір з'єднувальних ліній

Градуювання термопар здійснюється при температурі вільних кінців, що дорівнює нулю. Якщо в процесі вимірювання температура вільних кінців відрізняється від нуля, то виникають додаткові похибки, усунути які можна шляхом термостатування вільних кінців (рис. 6.4, б). Слід зазначити, що термоелектроди не завжди вдається зробити досить довгими, щоб можна було здійснити термостатування вільних кінців. Окрім того, для термопар з благородних металів робити довгими термоелектроди економічно недоцільно. У цих випадках використовують так звані подовжувальні термоелектроди А і В (рис. 6.4, б), що йдуть від затискачів в голівці термопари до місця знаходження вільних кінців в термостаті.

Матеріали подовжувальних термоелектродів повинні бути термоелектрично ідентичні основній термопарі в діапазоні температур від 0 до 200 °С, і місця їх приєднання до основних термоелектродів повинні мати однакову температуру. При виконанні зазначених умов термо-ЕРС, що вимірюється, практично не буде

залежати від температури місць приєднання подовжувальних проводів до основної термопари.

### **Конструкція термопар.**

Конструктивно термопари виконуються у вигляді трубчатого чохла, що містить у собі термоелектроди и клемову головку. Матеріалом для чохлів слугують хімічно стійкі тугоплавкі метали и металеві сполуки. Найбільш часто використовують сталь 1X18H9T (до 800 °С) и X27 (до 1300 °С), фарфор, кварц, окис алюмінію (до 1600 °С) та ін.

Конструкцію термопар промислового типу, що застосовуються для вимірювання температур в печах, соляних ваннах, газоходах, розглянемо на прикладі термопари з неблагородних металів, зображеної на рис. 6.5. Ця термопара, розміщується в складовій захисній трубі з рухомим фланцем для її кріплення. Робочий спай 9 термопари ізольований від труби фарфоровим (порцеляновим) наконечником 8. Термоелектроди ізольовані намистою 6. Захисна труба складається з робочої 7 і неробочої 4 ділянок.

Пересувний фланець 5 кріпиться до труби гвинтом. Головка термопари має литий корпус 3 з кришкою 11, закріпленою гвинтами 1. У голівці гвинтами укріплені порцелянові колодки 2 з незакріпленими зажимами 10. Вони дозволяють термоелектродам подовжуватися під впливом температури без виникнення механічних напруг, що ведуть до швидкого руйнування термоелектродів.

Основним питанням при конструюванні термопар промислового типу є вибір матеріалу захисної труби (арматури) та ізоляції. Захисна арматура термопари повинна захищати її від впливу гарячих хімічно агресивних газів, які швидко руйнують термопару. Тому арматура повинна бути газонепроникною, добре проводити теплоту, бути механічно стійкою і жаротривкою. При температурах до 600°С зазвичай застосовують сталеві труби без шва; при температурах до 1100°С - захисні труби з легованих сталей. Для термопар з благородних металів часто використовують кварцові або порцелянові труби. В якості ізоляції термоелектродів один від одного застосовують азбест (при температурах до 300°С), порцелянові трубки або намисто (до 1300, ... 1400°С), кварцові трубки або намисто (до 2000, ... 2500°С) . У лабораторних умовах при вимірюванні низьких температур використовують теплостійку гуму (при

температурах до 150°C), шовк (до 100 ... 120 °C), емаль (до 150 ... 200°C).

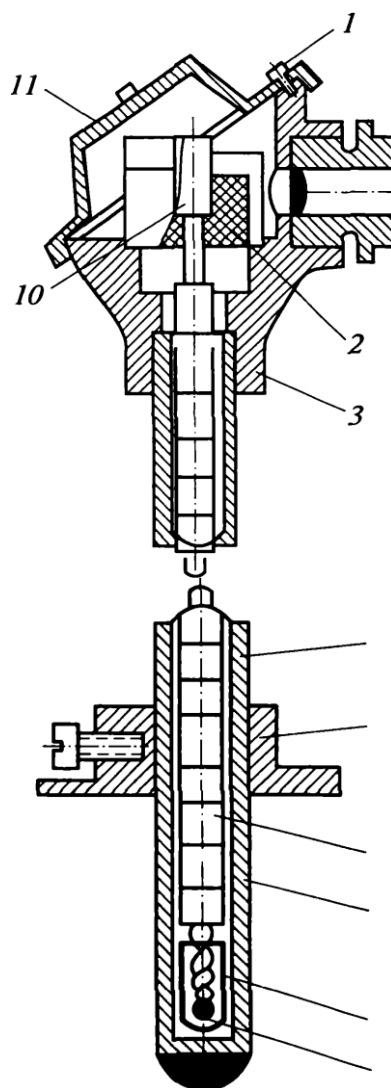


Рис. 6.5. Термопара промислового типу:

1 - гвинти; 2 - порцелянові колодки; 3 - корпус; 4, 7 - відповідно неробоча і робоча ділянки; 5 - пересувний фланець; 6 - намиста; 8 - фарфоровий наконечник; 9- робочий спай; 10 затискачі; 11 - кришка

Термоелектроди термопар, що поміщаються в захисну трубу, зазвичай виконують жорсткими, з'єднуючи їх з іншими елементами вимірювального ланцюга гнучкими проводами. З'єднувальні дроти, що йдуть від затискачів в голівці термопар до місця знаходження неробочого спаю, називаються подовжувальними електродами. Подовжувальні електроди в необхідному діапазоні температур повинні мати таку ж термо-ЕРС, як і електроди основної термопар.

Місця приєднання подовжувальних термоелектродів до основних термоелектродів в голівці термопар повинні мати однакову температуру. При невиконанні цих умов виникає похибка вимірювання. Подовжувальні термоелектроди для термопар з неблагородних металів виконують з тих же матеріалів, що і основні термоелектроди. Наприклад, для термопар платинородій - платіна застосовують подовжувальні термоелектроди з міді, що утворюють термопару, термоідентичну термопарі платинородій - платіна в межах до 150 °С.

Велике значення при вимірюванні температури за допомогою термопар має їх інерційність, яка визначається як час, за який покази термопар при перенесенні із середовища з кімнатною температурою (15 ... 20 °С) в середовище з температурою 100 °С досягають 97 ... 98°С. Для зменшення інерційності необхідно забезпечити хороший тепловий контакт між робочим спаєм термопар і середовищем, температура якого вимірюється.

Крім похибки від теплових втрат при монтажі та експлуатації термопар можуть виникати похибки від паразитних термо-ЕРС. Паразитні термо-ЕРС з'являються через наявність неоднорідностей в матеріалах, з яких складається електричне коло термопар, при наявності градієнта температури вздовж цього кола.

Неоднорідності в електродах термопар можуть виникати як при виготовленні дроту, так і при виготовленні термопар внаслідок її деформації. Паразитні термо-ЕРС, обумовлені неоднорідностями, що з'явилися в процесі виготовлення дроту і термопар, враховують під час градування. Неоднорідності, що виникли в термопарі після градування, спричиняють похибки при вимірюванні.

Термоелектричне вимірювальне перетворення може бути використано не тільки для перетворення температури в електричний сигнал, але і для отримання інформації про хімічний склад контактують металів (в цьому випадку повинна бути відома різниця температур спаїв).

Термоелектричне вимірювальне перетворення є зворотним в тому сенсі, що якщо через електричний ланцюг, що складається з двох різнорідних провідників або напівпровідників, пропустити електричний струм, то тепло буде виділятися в одному спаї і поглинатися в іншому. Цей ефект відкритий в 1834 році французьким фізиком Ж. Пельтьє і носить його ім'я (ефект Пельтьє).

Суть ефекту Пельтьє полягає у наступному. При протіканні електричного струму через спай різнорідних провідників спай нагрівається при одному напрямку струму і охолоджується при іншому напрямку струму.

Кількість теплоти  $Q$ , що виділяється або поглинається, прямо пропорційна силі струму  $I$ , що протікає:

$$Q_{\text{п}} = P \cdot I$$

де  $P$  - коефіцієнт Пельтьє, рівний  $P = T\Delta\alpha$ . Тут  $T$  - абсолютна температура;  $\Delta\alpha$  - різниця термоелектричних коефіцієнтів провідників. Причому, нагрівання або охолодження спаю залежить від напрямку струму через спай.

Ефект Пельтьє пояснюється тим, що середня енергія носіїв струму в різних провідниках різна. При переході з одного провідника в інший електрони або передають надлишкову енергію атомам, або поповнюють нестачу енергії. У першому випадку поблизу контакту виділяється, а в другому випадку поглинається теплота (теплота Пельтьє). Зокрема енергія вільних електронів напівпровідника значно вище енергії вільних електронів металу. Тому при переході електронів з напівпровідника в метал електрони віддають свою надлишкову енергію і спай нагрівається. При протилежному напрямку струму з металу в напівпровідник необхідна для такого переходу енергія поповнюється за рахунок енергії теплових коливань решітки і спай охолоджується. Вихідним джерелом енергії в обох випадках є джерело електричного струму.

Отже, нагрівання або охолодження спаю прямо пропорційні струму і невеликі, але все ж таки зниження температури спаю, наприклад, достатньо для побудови мікрохолодильників, які можуть використовуватися при охолодженні транзисторів, інтегральних мікросхем і тому подібних пристроїв. У вимірювальних цілях зворотний термоелектричний ефект практично не використовується, але враховувати його необхідно (він призводить до додаткових похибок). Для зведення похибок від цього ефекту до мінімуму треба зменшити вимірювальний струм через термопару та її спай. Це досягається використанням вимірювальних приладів з великим вхідним опором або приладів компенсаційного типу.

На рис. 6.6 показано використання термоелектричного перетворення для визначення хімічного складу і структурного стану

металу. Отримання інформації в даному випадку ґрунтується на залежності термо-ЕРС в електричному колі з різнорідних металів від хімічного складу контактуючих матеріалів.

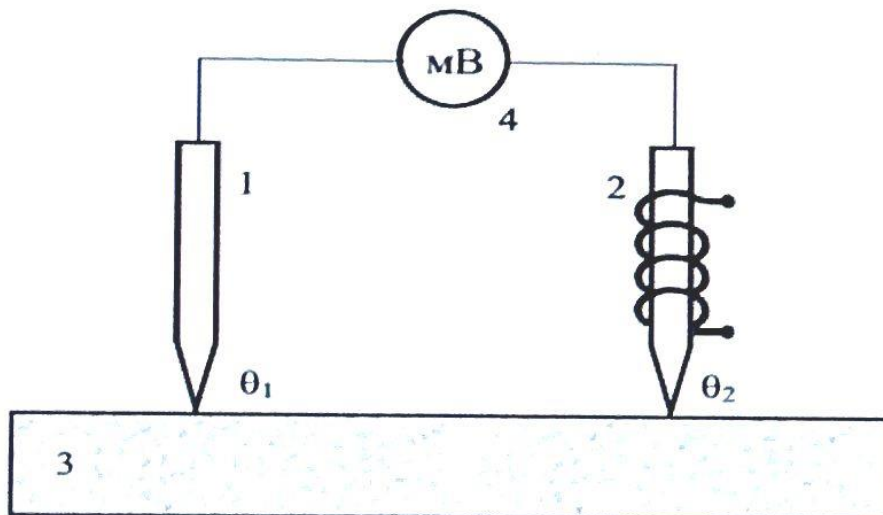


Рис. 6.6. Визначення хімічного складу і структурного стану матеріалу металевого об'єкта на основі вимірювання термо-ЕРС:

1 - холодний електрод; 2 - гарячий електрод; 3 - досліджуваний об'єкт; 4 - вимірювач ЕРС (вольтметр)

На досліджуваний метал встановлюються два однакових електрода. Один з електродів нагрівається електричною спіраллю. При цьому підтримується постійною різниця температур холодного і гарячого електродів. При малих різницях температур можна вважати, що термо-ЕРС прямо пропорційна різниці температур  $\Delta\theta$ :

$$e_{\theta} = k\Delta\theta,$$

де  $k$  – коефіцієнт термо-ЕРС (питома термо-ЕРС), різний для різних сполучень металів.

У цьому випадку ЕРС, що виникає в електричному колі, буде визначатися хімічним складом і структурним станом контактуючого з електродами досліджуваного металевого об'єкта.

## 6.2. П'єзоелектричні перетворювачі

П'єзоелектричне вимірювальне перетворення засноване на використанні прямого і зворотного п'єзоелектричних ефектів (п'єзоефектів). Ці ефекти спостерігаються в ряді діелектриків: природних кристалах, таких як кварц ( $\text{SiO}_2$ ), поляризованих керамічних матеріалах і деяких полімерах, наприклад, полівініліденфториді. Матеріали, що володіють п'єзоелектричними властивостями, називаються **п'єзоелектриками**. Сутність прямого п'єзоєфекту полягає в електричній поляризації п'єзоелектриків, яка проявляється появою електричних зарядів на їх поверхні під дією механічної деформації.

П'єзоєфект є зворотним фізичним явищем. Зворотний п'єзоєфект полягає у виникненні в п'єзоелектриках механічної напруги або деформації під дією електричної поляризації.

Принцип дії чутливих п'єзоелектричних перетворювачів заснований на використанні властивості деяких природних кристалічних речовин і штучних текстур утворювати на своїх гранях електростатичні заряди, тобто електролізуватися, під дією пружних механічних деформацій (прямий п'єзоєфект) і деформуватися в електричному полі (зворотний п'єзоєфект).

Вхідною величиною п'єзоелектричних перетворювачів є сила, тиск, а вихідною величиною - заряд.

П'єзоєфект володіє «знакочутливістю», тобто заряди змінюють знак при заміні стискання розтягуванням і змінюється знак деформації при зміні напрямку електричного поля.

Фізична природа п'єзоєфекту може бути пояснена на прикладі відомого п'єзоелектричного кристала - кварцу. На рис.6.7 наведено елементарну комірку кристалу кварца.

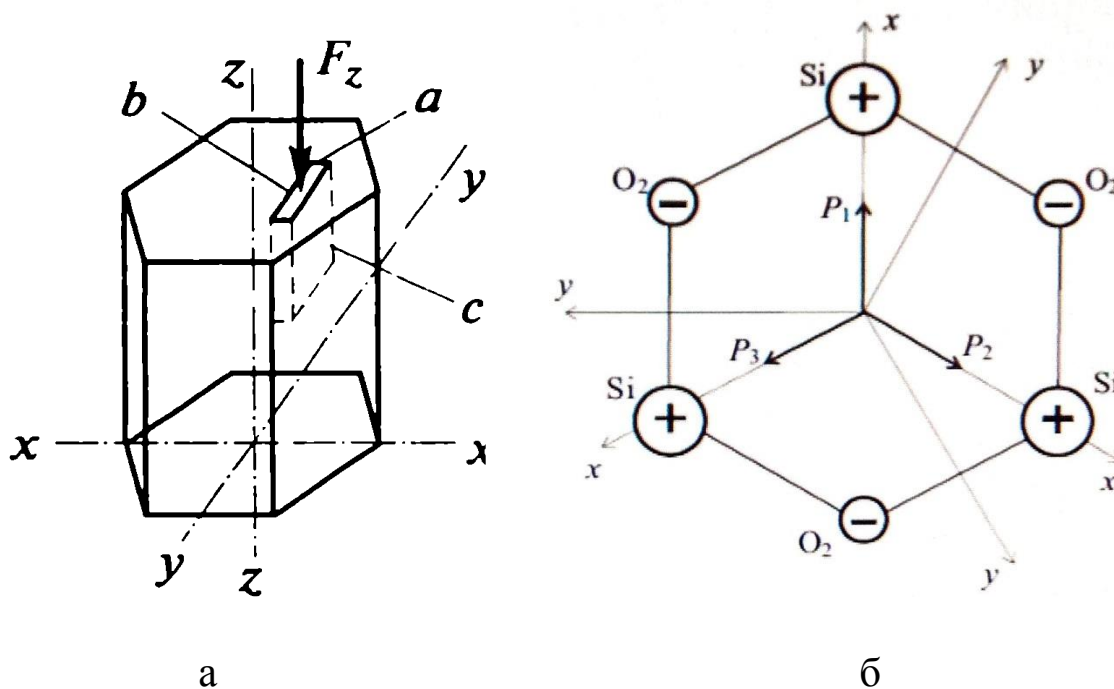


Рис. 6.7. Елементарна комірка кристалічної структури кварцу (а) та її переріз площиною, перпендикулярною вісі  $z$  (б)

У кристалах кварцу прийнято розрізняти три головні осі: оптичну  $z$ , електричну  $x$  і механічну  $y$  (рис. 6.7).

Поздовжня вісь кристала  $z$  називається оптичною; вісь, що проходить через ребра призми - електричною віссю  $x$ . Нейтральною або механічною віссю  $y$  називається вісь, що проходить через середини протилежних граней. Вирізаний з кристалу кварцу прямокутний паралелепіпед, грані якого перпендикулярні осям  $y$  і  $x$ , володіє п'єзоелектричними властивостями (рис 6.7,а).

Елементарна комірка кристалічної структури кварцу являє собою правильну шестигранну призму, у вершинах якої по чергово розташовані три позитивних іона кремнію  $\text{Si}^+$  і три негативних іона кисню  $\text{O}_2^-$  (рис. 6.7, б). Кожна з пар згаданих різнойменних зарядів утворює електричний диполь, що характеризується відповідним дипольним моментом  $P_1, P_2, P_3$ . У недеформованому стані всі дипольні моменти рівні за модулем і спрямовані під кутами  $120^\circ$  один до одного. Сума всіх трьох дипольних моментів  $P_\Sigma$  дорівнює нулю. Тому комірка кварцу в недеформованому стані є електрично нейтральною.

Розглянемо принцип дії кварцового п'єзоелектричного перетворювача. На рис. 6.8 схематично показана структура



п'єзоелектричного перетворювача (п'єзоелемента), що представляє собою кристал 1 у формі прямокутного паралелепіпеда, грані якого паралельні осях  $x$ ,  $y$  і  $z$ . Протилежні грані кристала мають електроди 2 для збору електричних зарядів.

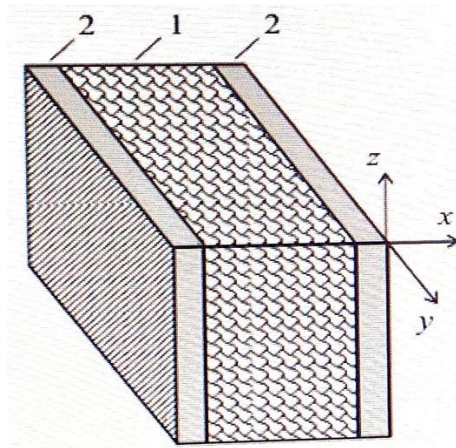


Рис.6.8. П'єзоелемент на основі кварцу: 1 – кристал; 2 - електроди

У недеформованому стані п'єзоелемент в цілому, як і окремі елементарні комірочки, що його складають, є електрично нейтральним. Електричні поля всіх його зарядів врівноважують один одного, проявом чого є відсутність зарядів на електродах п'єзоелемента.

Якщо до п'єзоелемента прикласти механічне зусилля в напрямку осі  $x$ , то в результаті деформації елементарних комірок їх нейтральність порушується. При цьому рівнодіюча дипольних моментів буде відмінною від нуля, що призводить до виникнення на електродах п'єзоелемента поляризаційних зарядів, які мають різні знаки при різних напрямках деформації (рис. 6.9). Це означає, що п'єзоэффект володіє знакочутливістю, що проявляється в зміні знаків заряду на певних гранях при заміні стиснення розтягуванням і навпаки. Значення поляризаційного заряду  $q$  пов'язано із значенням прикладеної сили  $F$  прямо пропорційною залежністю:

$$q = d \cdot F \quad (6.6)$$

де  $d$  – п'єзоелектричний модуль (п'єзомодуль)

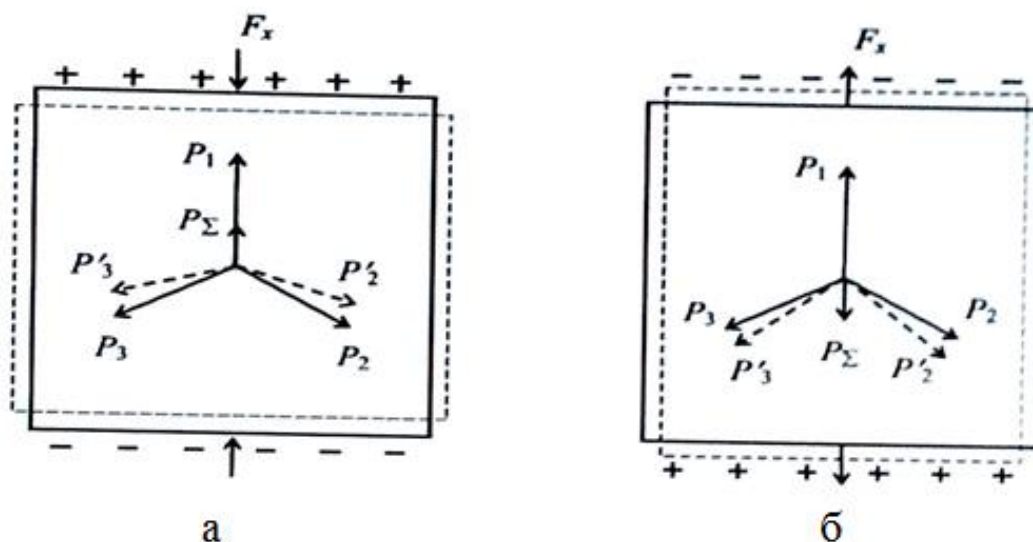


Рис. 6.9. Деформація стискання (а) и розтягнення (б) п'єзоелемента на основі кварца вздовж електричної вісі.

Вирізаний з кристалу кварца прямокутний паралелепіпед, грані якого перпендикулярні осям  $x$  і  $y$ , володіє наступними п'єзoeлектричними властивостями (рис. 6.10):

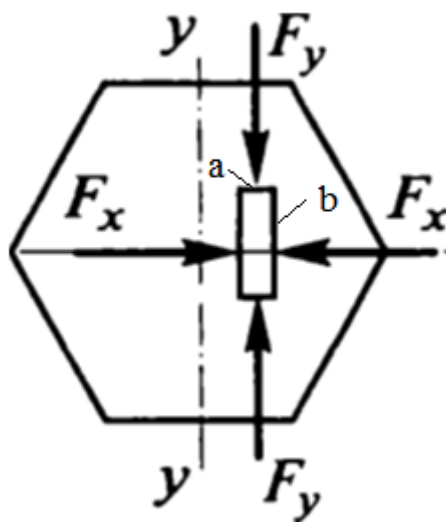


Рис. 6.10. П'єзоелемент, вирізаний з кристалу кварца

1) при дії сили  $F_x$ , спрямованої уздовж електричної осі  $x$ , на гранях, перпендикулярних до цієї осі, з'являються електричні заряди. Це так званий **поздовжній п'єзоэффект**;

2) при дії сили  $F_y$ , спрямованої вздовж механічної осі  $y$ , заряди з'являються також на гранях, перпендикулярних до осі  $x$  – це **поперечний п'єзоэффект**;

3) при дії сили  $F_z$ , спрямованої вздовж оптичної осі  $z$  (перпендикулярно до площини рисунка), а також при деформації всестороннього сжатия пьезоэффект не наблюдается тобто заряди не виникають.

Величина зарядів, що виникають на гранях, перпендикулярних до осі  $x$  кристала, під дією сили  $F_x$  не залежить від геометричних розмірів кристала і дорівнює

$$q = d \cdot F_x \quad (6.7)$$

де  $d$  - п'єзоелектричний модуль.

Величина зарядів, що виникають під дією сили  $F_y$  залежить від геометричних розмірів кристала і має протилежний знак:

$$q = -d \cdot F_y \frac{b}{a} \quad (6.8)$$

де  $b$  і  $a$  – ширина і товщина п'єзоелемента відповідно (рис. 6.10).

З формули (6.8) видно, що в разі потреби можна підвищити чутливість п'єзоелектрика, збільшивши відношення  $\frac{b}{a}$ .

У випадку розтягуючих зусиль уздовж осей  $x$  і  $y$  заряди, що виникають, будуть мати знаки, протилежні випадку стискаючих зусиль.

Якщо паралелепіпед вирізаний не вздовж осей, а під кутом до них, заряди, що виникають, будуть менше.

П'єзоелектричний перетворювач схематично зображений на рис. 6.11.

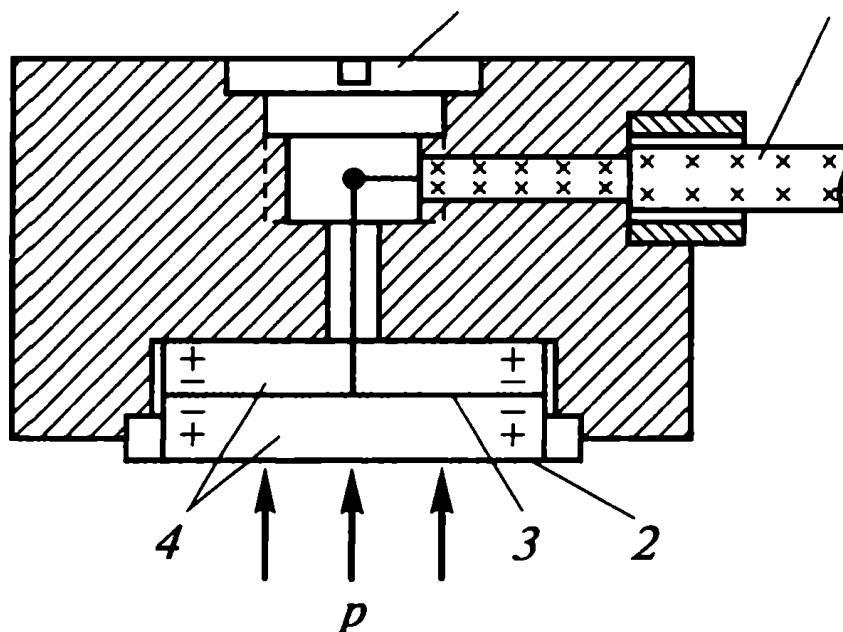


Рис. 6.11. П'єзоелектричний перетворювач:  
1 - кабель; 2 - мембрана; 3 - латунна фольга; 4 - кварцові пластини;  
5 - пробка

Тиск  $p$ , що вимірюється, діє на мембрану 2, яка є одночасно дном корпусу перетворювача. Кварцові пластини 4 з'єднані паралельно. Зовнішні обкладинки кварцових пластин заземлені, а середня обкладинка ізолювана від корпусу самим кварцом, питомий опір якого великий (при температурі  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\rho = 1 \cdot 10^{12}\text{ Ом} \cdot \text{м}$ ).

Сигнал з кварцових пластин знімається за допомогою латунної фольги 3 і по кабелю 1 подається на вхід вимірювального підсилювача. Для зручності з'єднання виводу від фольги з внутрішньої жилою кабеля в корпусі перетворювача передбачено отвір, який закривається пробкою 5.

Заряд, що виникає на гранях п'єзоелемента під дією сили  $P$ , зберігається лише при відсутності витоків, тобто при нескінченно великому вхідному опорі вимірювального ланцюга. Практично ця умова нездійсненна, а тому п'єзоелектричні перетворювачі для вимірювання статичних сил не застосовуються.

При дії динамічних, тобто змінних в часі, сил кількість електрики на гранях весь час поповнюється і стає можливим споживання струму вимірювальним ланцюгом. Проте вимога до величини вхідного опорі вимірювального ланцюга залишається жорсткою, так як вихідна потужність п'єзоелектричних перетворювачів дуже мала. До виходу перетворювача повинен бути

підключений підсилювач з можливо великим вхідним опором ( $10^{10} \dots 10^{13} \text{ Ом}$ ).

**Зворотний п'єзоефект** пояснюється, як і прямий, будовою елементарних комірок кристала кварцу. У відсутності зовнішнього електричного поля має місце рівновага всіх сил взаємодії електричних зарядів (рис. 6.8, а). При наявності зовнішнього електричного поля, створюваного різницею електричних потенціалів електродів (наявністю на електродах зарядів) ця рівновага порушується, і комірка під дією неврівноважених сил деформується. Деформуюча сила, що при цьому виникає, пов'язана з величиною електричного заряду на парі граней співвідношенням (6.7).

Значення п'єзомодулей для прямого і зворотного п'єзоефектів однакові.

Як матеріал для виготовлення п'єзоелектричних перетворювачів найчастіше застосовують кварц, який має низьку температурну чутливість і володіє великим модулем пружності ( $81 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ ). Це дозволяє здійснювати вимірювання при дуже малих переміщеннях.

Кварц є природним п'єзоелектричним кристалом. Основними його перевагами з точки зору використання для вимірювальних перетворень є стійкість до впливів температури і вологості, механічна міцність. Кварц має незначний коефіцієнт розширення, його п'єзомодуль мало залежить від температури в широкому діапазоні її зміни.

Окрім кварцу п'єзоефект виникає в кристалах турмаліну, сегнетової солі (калійно - натрієва сіль винної кислоти), титанату барія, цирконату свинцю та деяких інших речовин.

Характеристики п'єзодатчиків і значення коефіцієнтів, що пов'язують електричні та механічні параметри, залежать від матеріалу використаного п'єзоелемента, від його розмірів і від типу зрізу. Від типу зрізу залежить також характер впливу на п'єзоелемент (поздовжнє, поперечне, кручення, згин), на яке він реагує найбільшою мірою. Характеристики деяких матеріалів наведені в табл. 6.4.

Таблиця 6.4. Характеристики деяких п'єзоматеріалів

Матеріал	$\epsilon$	$d$ , $10^{-12}$ Кл/Н	$R_m$ , $10^3$ Ом·м	$F_d$ , $10^6$ Н/м <sup>2</sup>	Допустима температура, °С
Кварц	4,5	2,3	>1000	98	550
Турмалін	6,6	2,4	>100	-	-
Кераміка А	1700	190	>100	80	70
Кераміка В	1200	115040	>100	80	70
TCL 1	1400		>30	-	70

В якості п'єзоелектричного матеріалу використовують також штучно поляризовану кераміку, виготовлену на основі титанату барію і титанату цирконата свинцю. П'єзоелектричні властивості п'єзокераміка набуває після поляризації в сильному електричному полі в процесі повільного нагрівання та охолодження. Перевагою п'єзокераміки є високий коефіцієнт перетворення (відносно великі значення п'єзомодулей), недоліком - нелінійність коефіцієнта перетворення (залежність його значення від значення перетворюваної величини).

Вельми перспективними п'єзоелектричними матеріалами є також п'єзоелектричні плівки - напівкристалічний полімер, який представляє собою шарову структуру з аморфними зонами. П'єзоелектричні плівки мають унікальні властивості: широкий частотний діапазон ( $10^{-3}$  ...  $10^9$  Гц), великий динамічний діапазон, висока пружна піддатливість і механічна міцність, висока вихідна напруга, висока електрична міцність. Недолік - малий температурний діапазон використання і зберігання.

Близьким до п'єзоелектричного за фізичною природою є **піроелектричний ефект**, сутність якого полягає в поляризації діелектрика внаслідок нагрівання. Подібно описаним вище п'єзоелектрикам піроелектрики можна розглядати як сукупність впорядковано розташованих електричних диполів. Нагрівання піроелектрика призводить в результаті теплового розширення до його деформації і прояву п'єзоефекту. Крім того, появи поляризаційних зарядів сприяє теплова деформація (подовження) і порушення первісної орієнтації окремих диполів.

На рис. 6.12 схематично показана структура піроелектричного перетворювача, що представляє собою прямокутний паралелепіпед 1 з піроелектричного матеріалу, протилежні грані якого мають електроди 2 для збору індукованих теплом електричних зарядів. Електрод, який піддається впливу теплового потоку 3, покритий теплопоглинаючим шаром 4.

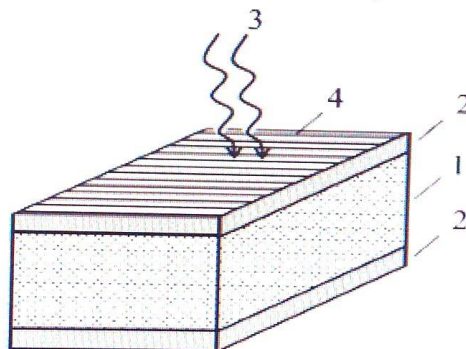


Рис. 6.12. Піроелектричний перетворювач: 1 - піроелектричний матеріал; 2 - електроди; 3 - тепловий потік; 4 - теплопоглинаючий шар.

Різниця потенціалів  $U$ , що виникає в результаті прояву піроефекту, пов'язана зі зміною  $\Delta T$  температури кристала виразом:

$$U = \frac{p_{\text{п}} h}{\varepsilon} \Delta T \quad (6.9)$$

де  $p_{\text{п}}$  - піроелектричний коефіцієнт;  $h$  - товщина кристалу;  $\varepsilon$  - діелектрична проникність матеріалу.

Яскраво вираженими піроелектриками є кристали турмаліну і сегнетової солі, цирконат-титанат свинцю, трігліцин сульфат, танталат літію.

Область застосування п'єзоелектричного вимірювального перетворення досить широка. Чутливі п'єзоелектричні елементи дозволяють контролювати швидкоплинні процеси, оскільки заряди утворюються практично безінерційно.

Області застосування п'єзоелектричних перетворювачів наступні:

1. Перетворювачі, що використовують прямий п'єзоэффект, застосовуються для перетворення в електричний сигнал таких фізичних величин як сила, тиск, прискорення.

2. Перетворювачі, що використовують зворотний п'єзоефект, застосовуються в якості джерел акустичних хвиль, зворотних перетворювачів в приладах урівноваження, п'єзоелектричних реле, виконавчих елементів автоматичних систем.

3. Перетворювачі, що використовують одночасно прямий і зворотний п'єзоефекти, - п'єзорезонатори, що мають максимальний коефіцієнт перетворення енергії на резонансній частоті і який різко зменшується на інших частотах, застосовуються в якості вузькосмугових фільтрів електричних сигналів. П'єзорезонатори на основі кварцу завдяки високій стабільності характеристик останнього використовуються, зокрема, для побудови еталонних генераторів і таймерів.

4. Перетворювачі, що використовують піроефект, застосовуються для вимірювання теплового потоку випромінювання.

**Перевагами** п'єзоперетворювачів є широкий діапазон робочих температур, мінімальні пружні деформації, дуже широкий діапазон вимірювань, висока чутливість. До їх **недоліків** слід віднести необхідність забезпечення дуже високого опору ізоляції вимірювальних ланцюгів, а також непридатність перетворювачів для статичних вимірювань.

### 6.3. Індукційні перетворювачі

Індукційні перетворювачі є різновидом електромагнітних перетворювачів. Принцип дії індукційних перетворювачів ґрунтується на використанні явища електромагнітної індукції, суть якого полягає у виникненні в замкнутому провідному контурі, що пронизується змінним в часі магнітним потоком  $\Phi$ , ЕРС індукції  $e$ . Відповідно до закону електромагнітної індукції ЕРС, індукована в котушці з  $w$  витків, дорівнює

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = - \frac{d(w \Phi)}{dt} = -w \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.10)$$

де  $\Psi = \omega \cdot \Phi$  - потозчеплення з контуром;  $\Phi$  - магнітний потік;  $w$  - кількість витків обмотки

Електричний струм, званий струмом ЕРС, називається індукційним. Електромагнітна індукція відкрита англійським вченим



М. Фарадеєм в 1831 році і незалежно від нього американським вченим Дж. Генрі в 1832 р

Згідно (6.10) ЕРС індукції прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку. Знак мінус у правій частині виразу визначає напрямок індукційного струму відповідно до правила Ленца, згідно з яким індукційний струм в контурі спрямований так, що створюваний ним магнітний потік прагне перешкоджати тій зміні магнітного потоку, що викликає даний струм (наслідок закону збереження енергії).

Таким чином, вихідною величиною індукційного перетворювача є індукована ЕРС, а вхідною - швидкість зміни потозчеплення  $\frac{d\Psi}{dt}$ . В індукційних перетворювачах швидкість швидкість зміни вимірюваної величини перетворюється в індуковану ЕРС. Як правило, в даних перетворювачах вхідною величиною є швидкість механічного переміщення. Тому вони можуть застосовуватися тільки для вимірювання швидкості лінійних і кутових переміщень.

У загальному випадку індукційний перетворювач являє собою котушку з осердям, яка характеризується деяким узагальненим параметром  $Y$ , пов'язаним, в тому числі, с площею поперечного перерізу котушки. ЕРС в котушці може індукуватися як в результаті зміни в часі зовнішнього магнітного поля, так і зміни в часі параметра  $Y$  перетворювача. Якщо перетворювач знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією  $B$ , то в його обмотці, яка має  $w$  витків, наводиться ЕРС

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -w\frac{d\Phi}{dt} = -w\left(Y\frac{dB}{dt} + B\frac{dY}{dt}\right) \quad (6.11)$$

Параметр  $Y$  є функцією чотирьох параметрів  $\alpha$ ,  $S$ ,  $\mu'$ ,  $N$ :

$$Y = \frac{S\mu'}{[1+N(\mu'-1)]\cos\alpha} \quad (6.12)$$

де  $\alpha$  - кут між магнітною віссю перетворювача, що збігається з нормаллю до площини обмотки, і вектором магнітної індукції  $B$ ;  $S$  - площа поперечного перерізу котушки;  $\mu'$  - магнітна проникність середовища;  $N$  - коефіцієнт розмагнічування осердя, який визначається формою і співвідношенням розмірів осердя.

У загальному випадку

$$e = -wS \frac{d(B \cos \alpha)}{dt} \quad (6.13)$$

Розглянемо найбільш поширені випадки індукційного перетворення.

1. Нерухома індукційна обмотка в змінному гармонійному магнітному полі. В цьому випадку  $\alpha = \text{const}$  і  $B = B_m \sin \omega t$ . Тут  $B_m$  - амплітуда індукції магнітного поля;  $\omega$  - кутова частота магнітного поля. Диференціюванням за формулою (6.13) отримуємо:

$$e = - \omega w S \cos \alpha \cdot B_m \sin \omega t$$

Аналіз цього виразу показує, що ЕРС індукції в разі гармонійного магнітного поля також змінюється за гармонійним законом. Амплітуда ЕРС дорівнює добутку  $\omega w S \cos \alpha \cdot B_m$ , а фаза ЕРС відстає від фази індукції на кут  $90^\circ$ . Залежність амплітуди ЕРС індукції від параметрів гармонійного магнітного поля (амплітуди індукції, частоти, орієнтації силових ліній щодо обмотки) і фази ЕРС від фази індукції магнітного поля дозволяє на основі вимірювання ЕРС індукції отримувати вимірювальну інформацію про ці параметри.

2. Нерухома індукційна обмотка в постійному магнітному полі. Якщо помістити індукційну обмотку в постійне магнітне поле, то при відсутності руху обмотки не буде змін магнітного потоку через обмотку (швидкість зміни магнітного потоку дорівнює нулю) і відповідно ЕРС індукції в цьому випадку теж буде дорівнювати нулю.

3. Обмотка, що обертається в постійному магнітному полі. При використанні індукційного вимірювального перетворення для вимірювання постійних магнітних полів застосовується обертання індукційної обмотки відносно вісі симетрії обмотки, що лежить в площині її середнього витка (рис. 6.13). В цьому випадку  $B = B_0$ , а  $\alpha = \omega t$ . Тут  $B_0$  - значення індукції магнітного поля;  $\omega$  - кутова частота обертання. Використовуючи (6.13) отримуємо:

$$e = \omega w S B_0 \sin \omega t \quad (6.14)$$

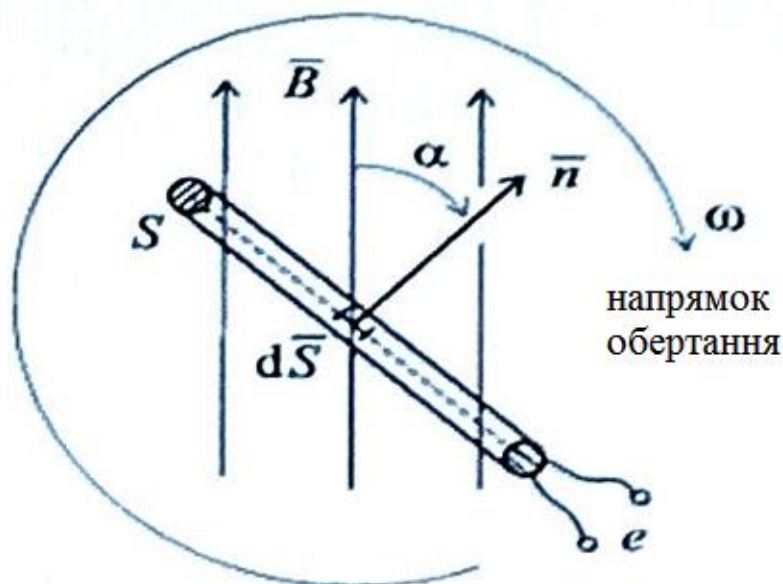


Рис.6.13. Індукційна обмотка, що обертається в постійному магнітному полі

Як видно з (6.14) ЕРС індукційної обмотки, що обертається в постійному магнітному полі з кутовою частотою  $\omega$ , має гармонійний характер. Амплітуда ЕРС прямо пропорційна індукції магнітного поля  $B_0$  і частоті обертання  $\omega = 2\pi f$ . Тому індукційні перетворювачі можуть застосовуватися для вимірювання характеристик постійних магнітних полів (при відомій частоті обертання), а також частоти обертання (при відомій індукції магнітного поля).

4. Індукційна обмотка в магнітному полі, що змінюється в часі за невідомим законом. Причиною зміни значення індукції в зоні знаходження обмотки може бути як власне зміна магнітного поля в часі, так і переміщення обмотки в неоднорідному магнітному полі.

Припустимо, що в інтервалі часу від  $t_1$  до  $t_2$  відбулася зміна індукції магнітного поля від  $B_1$  до  $B_2$ . Якщо закон зміни індукції магнітного поля  $B(t)$  – невідомий, то використання для визначення характеристик магнітного поля описаного вище підходу для випадку гармонійного характеру його зміни неможливо.

Оскільки ЕРС індукції згідно (6.13) є функцією похідною від індукції, то знаходження індукції магнітного поля здійснюється інтегруванням ЕРС в інтервалі часу від  $t_1$  до  $t_2$ :

$$\int_{t_1}^{t_2} e(t) dt = -wS \int_{B_1}^{B_2} dB = -wS(B_2 - B_1), \quad (6.15)$$

де  $e(t)$ - закон зміни в часі ЕРС індукції.

Таким чином, значення інтегралу від ЕРС індукції  $e(t)$  за часовий проміжок від  $t_1$  до  $t_2$  прямо пропорційне зміні значення індукції магнітного поля за цей же проміжок часу.

5. Для контуру, окремі ділянки  $dl$  якого лінійно переміщуються в магнітному полі зі швидкістю  $V$ , змінюючи площу потোকзчеплення з контуром,

$$e = \int V B dl$$

6. Для відрізка довжиною  $l$ , що рухається в однорідному магнітному полі зі швидкістю  $V$  так, що напрями векторів  $B$  і  $V$  взаємно перпендикулярні,

$$e = V B l$$

Індукційні перетворювачі широко застосовуються для вимірювання параметрів магнітних полів, частоти обертання, параметрів вібрації і сейсмічних коливань, витрати рідких речовин.

За принципом дії індукційні перетворювачі можна розділити на дві групи.

В перетворювачах першої групи індукована ЕРС наводиться в котушці внаслідок лінійних (рис. 6.14) або кутових (рис. 6.15) коливань котушки в зазорі магніту. При своєму переміщенні витки котушки перетинають під прямим кутом лінії магнітного поля і в них індукується ЕРС.

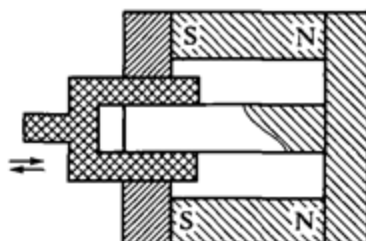


Рис. 6.14. Індукційний перетворювач з лінійним переміщенням котушки

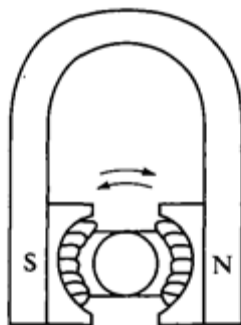


Рис. 6.15. Індукційний перетворювач з кутовим переміщенням котушки

Якщо лінійне переміщення  $\Delta l$  є деякою функцією часу, тобто  $\Delta l = f(t)$ , то миттєве значення ЕРС дорівнює

$$e = w \cdot B \cdot l_a \frac{df(t)}{dt} \quad (6.16)$$

де  $w$  - число витків котушки;  $B$  - індукція в зазорі;  $l_a$  - активна довжина витка.

В перетворювачах другої групи індукована ЕРС наводиться шляхом зміни магнітного потоку внаслідок коливань повного магнітного опору магнітного кола, які створюються найчастіше зміною повітряного зазору в цьому колі.

На рис. 6.16 зображена схема датчика з індукційним перетворювачем для вимірювання частоти обертання.

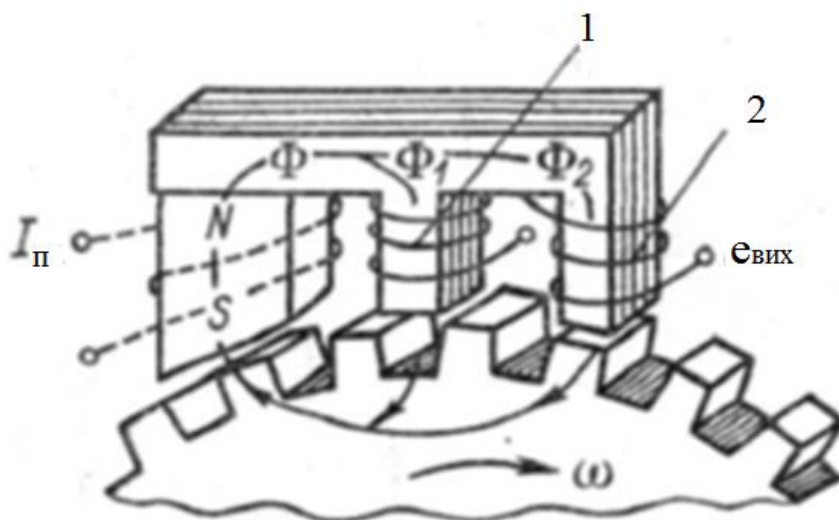


Рис. 6.16. Схема пристрою індукційного перетворювача частоти із зубчатим ротором:

1,2 - полюси магнітопроводу,  $e_{\text{вих}}$  - індукована ЕРС;  $\omega$  - кутова частота обертання ротора;  $I_{\text{п}}$  - постійний струм

При обертанні ротора відбувається перерозподіл магнітного потоку постійного магніту: збільшується потік через полюс магнітопроводу, під яким проходить зубець ротора, і зменшується потік через полюс, під яким проходить паз ротора. Потік постійного магніту залишається при цьому незмінним, так як повний магнітний опір для сумарного потоку залишається майже незмінним. Таким чином, в частині магнітопроводу, утвореній полюсами 1 і 2 та ротором, за рахунок зміни розмагнічування полюсів при обертанні ротора з'являється змінна складова магнітного потоку, і в котушці індукується ЕРС, частота якої визначається частотою обертання і числом зубців ротора.

На рис. 6.17 наведено можливі конструктивні схеми індукційних перетворювачів

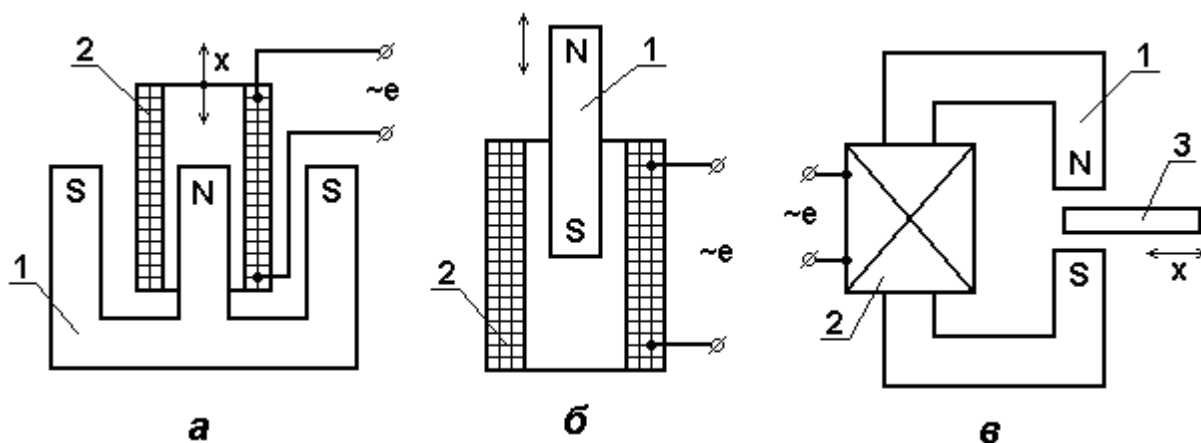


Рис. 6.17. Схеми індукційних датчиків:

1 - постійний магніт; 2 - котушка з числом витків  $w$ ; 3 - осердя з магнітом'якого матеріалу

В датчиках, зображених на рис.6.17,а,б магнітний опір на шляху магнітного потоку залишається незмінним, а ЕРС наводиться в котушці за рахунок її переміщення (рис. 6.17, а) або за рахунок переміщення постійного магніту (рис. 6.17, б).

В датчиках зображених на рис. 6.17,в як котушка, так і постійний магніт нерухомі, а індукована ЕРС наводиться за рахунок зміни повного магнітного опору магнітного кола внаслідок переміщення осердя 3.

Індукційні перетворювачі широко застосовуються в різних типах тахометрів – пристроїв для вимірювання швидкості.

Тахометри з амплітудною модуляцією зазвичай виконуються з індукційним перетворювачем (генератором постійного або змінного струму), вихідною величиною яких є ЕРС. Частотні тахометри (з частотною модуляцією) є найбільш простими і точними. Як зразкового відрізка шляху в них використовується шлях, що проходиться за повний оборот ( $360^\circ$ ). Вимірником в таких тахометрах може служити герцметр. Індукційні перетворювачі найчастіше використовуються в частотних датчиках тахометрів. Вони прості, надійні, дають велику вихідну потужність. До недоліків відносяться: необхідність безпосереднього доступу до валу; залежність амплітуди вихідного сигналу від частоти обертання, що ускладнює вимірювання малих швидкостей; створюваний магнітом гальмівний момент.

На рис. 6.18 показана принципова конструктивна схема тахометра з індукційним перетворювачем. Магніт гнучким валом пов'язаний з випробуваним об'єктом. В поле магніту, що обертається

з кутовою швидкістю  $\omega$ , розташований металевий диск 7, закріплений на валу 3. На цьому ж валу закріплені один кінець пружини 4 з фосфористої бронзи і стрілка 2, кут повороту якої є вихідною величиною приладу. При обертанні магніт захоплює за собою диск. Під дією крутного моменту пружина, що має протидіючий момент, закручується на кут, прямо пропорційний вимірюваній швидкості.

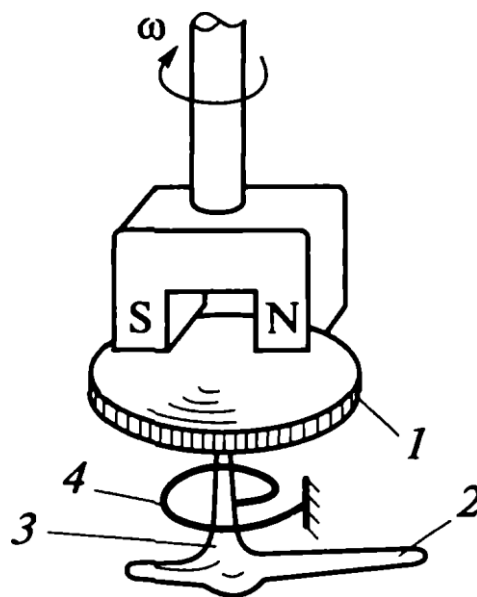


Рис. 6.18. Тахометр з індукційним перетворювачем:  
1 - металевий диск; 2 - стрілка; 3 - вал; 4 - пружина

Індукційні перетворювачі використовуються також для вимірювання об'ємної витрати рідини або газу, що протікає по трубопроводу. На рис. 6.19 показана конструктивна схема турбинного крильчатого тахометричного датчика. Датчик являє собою відрізок труби, в якому встановлена невелика осьова турбина. Під дією потоку рідини в трубі ротор турбини обертається з частотою, яка доходить до  $250 \text{ с}^{-1}$ . Частота обертання ротора перетворюється в частоту електричних коливань (для цього може використовуватися будь-який з описаних раніше індукційних перетворювачів). Похибка датчиків такого типу може досягати 0,35%. Вона цілком визначається похибкою перетворення витрати рідини в частоту обертання ротора турбини і залежить від сил опору обертанню ротора, що виникають через тертя в підшипниках, в'язкості рідини і гальмівного моменту індукційного перетворювача.



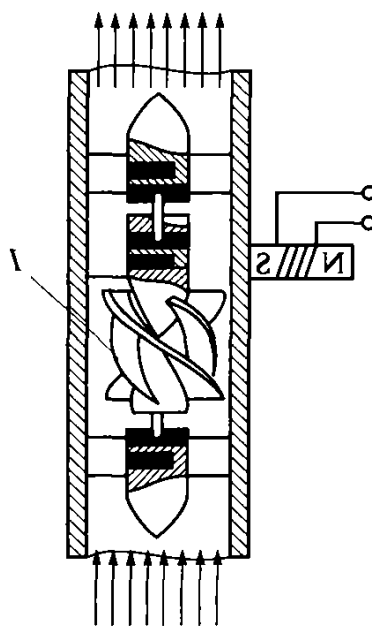


Рис. 6.19. Турбинний крильчастий тахометричний датчик:  
1 - осьова турбіна

Частотні датчики витратомірів можуть працювати як з аналоговим вимірювальним пристроєм (типу конденсаторного частотоміра), так і з цифровим. Результуюча похибка в першому випадку становить 1 ... 2%, у другому - може бути менше 0,5%.

Індукційні перетворювачі можуть також використовуватися для вимірювання крутного моменту.

#### 6.4. Магнітомодуляційні перетворювачі

Магнітомодуляційне вимірювальне перетворення засноване на прояві нелінійних властивостей феромагнетиків при їх намагнічуванні одночасно в полях різних частот.

**Магнітомодуляційними** називаються перетворювачі, дія яких заснована на зміні магнітного стану феромагнітного матеріалу при одночасному намагнічуванні в постійному і змінному полях. Модуляція магнітним потоком можлива за рахунок нелінійних властивостей магнітного ланцюга

На відміну від **пасивних** індукційних перетворювачів магнітомодуляційні (ферозондові перетворювачі) є пристроями **активного** типу. Процеси, що в них відбуваються, завжди пов'язані із взаємодією мінімум двох магнітних полів - зовнішнього

вимірюваного і допоміжного поля збудження, що створюється за рахунок протікання електричного струму в одній з обмоток. Завдяки цьому з'являється можливість перетворення в електричний сигнал на основі явища електромагнітної індукції характеристик постійних магнітних полів без використання описаного в попередньому розділі механічного обертання індукційної вимірювальної обмотки.

Назву магнітомодуляційне дане перетворення отримало з огляду на те, що наявність постійного магнітного поля викликає зміну магнітної проникності ферромагнетика і, як наслідок, зміну форми (модуляцію) періодичних сигналів  $B(t)$  і  $e(t)$  (де  $B(t)$  - зміна в часі індукції магнітного поля,  $e(t)$  - зміна в часі ЕРС індукції), що змінюються з частотою змінного магнітного поля

Основне використання магнітомодуляційних перетворювачів - вимірювання постійних і низькочастотних магнітних полів. Це одні з найбільш чутливих магнітних перетворювачів. Поріг їх чутливості складає порядку  $10^{-4} \dots 10^{-5}$  А/м ( $10^{-10} \dots 10^{-11}$  Тл). Основні області використання: пошук корисних копалин, вивчення просторово-часової структури поля Землі і планет, орієнтування та визначення місцезнаходження різних рухливих об'єктів в полі Землі, контроль якості електротехнічних сталей і інших матеріалів і виробів, контроль залишкової намагніченості, реєстрація магнітних міток.

Магнітомодуляційні перетворювачі широко використовуються в обчислювальній техніці як логічні елементи і запам'ятовуючі пристрої. У вимірювальній техніці ММП застосовуються для вимірювання напруженості постійного магнітного поля (феррозонди), для перетворення постійного струму в змінний зі зменшенням абсолютного значення струму (вимірювальні трансформатори постійного струму), для перетворення постійного струму в змінний зі збільшенням абсолютного значення струму (магнітні підсилювачі), для вимірювання переміщення об'єкта, з яким зв'язується рухома частина перетворювача, що несе постійний магніт (магнітомодуляційні перетворювачі переміщення).

## **6.5. Гальваномагнітні перетворювачі**

Гальваномагнітне вимірювальне перетворення засноване на використанні гальваномагнітних явищ, пов'язаних з дією магнітного поля на електричні (гальванічні) властивості провідників і напівпровідників, по яких протікає електричний струм.

Принцип дії гальваноманітних перетворювачів ґрунтується на фізичних ефектах, що виникають в твердих тілах, які знаходяться в магнітному полі, при русі в них заряджених частинок. Найбільшого значення набувають поперечні гальваноманітні явища, коли силові лінії магнітного поля перпендикулярні напрямку електричного струму. До них відносяться ефект Хола і магніторезистивний ефект (ефект Гаусса). Обидва ефекти обумовлені зміною траєкторії руху заряджених частинок в магнітному полі. Вони виникають одночасно і пов'язані між собою так, що кожен з них призводить до послаблення іншого. Вибираючи певним чином конструкцію і склад матеріалу перетворювача, можна підсилити один з ефектів і послабити інший, створюючи таким чином перетворювачі Хола, або магніторезистивні перетворювачі.

Ефект Хола полягає у виникненні поперечної різниці потенціалів (ЕРС Хола) на бічних гранях пластини, а ефект Гаусса, або магніторезистивний ефект, проявляється в зміні електричного опору пластини.

Сутність ефекту Хола (відкритий у 1879 р. американським вченим Е. Холлом) полягає в наступному (рис. 6.20). Якщо через провідну пластинку пропускати струм  $I$ , а перпендикулярно до пластинки (і напрямку струму) направити магнітне поле  $B$ , то в напрямку, перпендикулярному до напрямку струму (і напрямку магнітного поля) на пластинці з'явиться напруга:

$$U_h = \frac{R_h \cdot B \cdot I \sin \alpha}{d}, \quad (6.17)$$

де  $R_h$  - коефіцієнт Хола, який залежить від матеріалу провідника;  $B$  - індукція магнітного поля;  $I$  - струм у провіднику;  $\alpha$  - кут між напрямком струму і вектором індукції магнітного поля (якщо  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\sin \alpha = 1$ );  $d$  - товщина матеріалу.

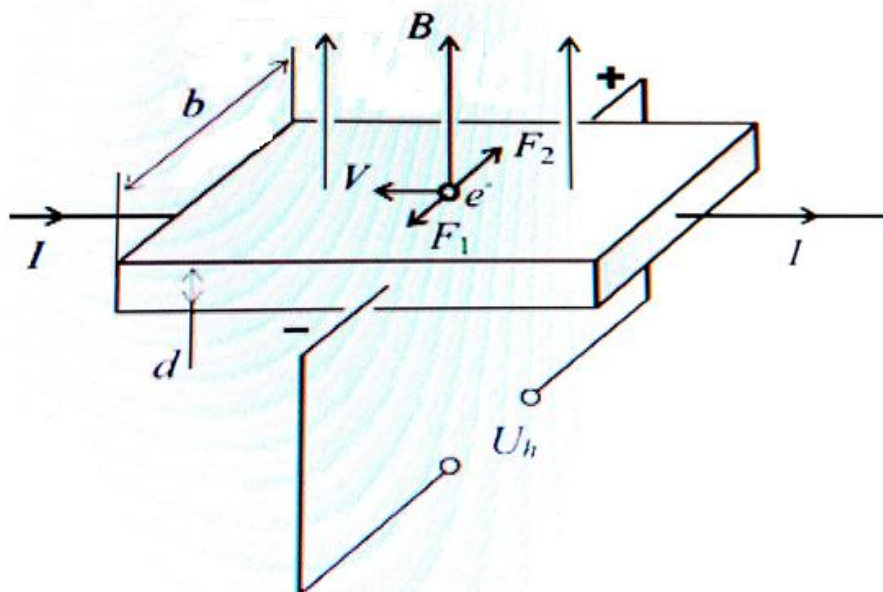


Рис. 6.20. Пластинка зі струмом в поперечному магнітному полі

Фізична природа ефекту Хола наступна.

Електричне поле - це електромагнітне поле, що характеризується впливом на електрично заряджену частинку з силою, пропорційною заряду частинки. Силовий вплив електричного поля на заряджені частинки є основною властивістю цього поля. Відповідно основною характеристикою електричного поля є вектор напруженості електричного поля  $\vec{E}$ , який визначається силою  $\vec{F}$ , з якою поле діє на заряд  $q$ , що знаходиться в полі. Напрямок вектора  $\vec{E}$  збігається з напрямком сили  $\vec{F}$ , що діє на позитивний заряд:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (6.18)$$

Ефект Холла пояснюється взаємодією з магнітним полем рухомих носіїв заряду (електронів). На рис 6.19 показана пластинка, по якій протікає електричний струм силою  $I$ . Пластинка знаходиться в поперечному магнітному полі з індукцією  $B$ . В магнітному полі на електрони, що рухаються зі швидкістю  $V$ , діє сила Лоренца  $F_1$ , напрямком якої перпендикулярний напрямкам векторів швидкості електрона і індукції магнітного поля. Модуль сили знаходиться за формулою:

$$F_1 = e^-V B$$

де  $e^-$  - заряд електрона.

Дія сили з боку магнітного поля призводить до відхилення рухомих електронів від прямолінійної траєкторії, паралельної осі пластинки, в сторону однієї з бічних граней (для випадку, показаного на рис 6.19 - в бік ближньої грані). В результаті на цій бічній грані відбувається накопичення негативних зарядів і в результаті чого виникає електричне поле (поле Хола). З боку електричного поля, що виникло, на електрони буде діяти сила  $F_2$ , напрямком якої протилежний напрямку сили  $F_1$ .

Будемо вважати поле Хола в межах пластинки однорідним. Модуль сили, що діє на електрон з боку електричного поля, відповідно до (6.18) може бути знайдений за формулою:

$$F_1 = e^- \cdot E_h \quad (6.19)$$

Таким чином, на рухомі електрони діють дві сили в протилежних напрямках. Процес відхилення електронів і накопичення зарядів на бічних гранях триватиме до тих пір, поки дія електричного поля Хола на заряди не зрівноважує дію сили Лоренца. Умова рівноваги матиме вигляд:

$$E_h = V \cdot B \quad (6.20)$$

Швидкість руху електронів може бути виражена через силу струму. Сила струму - заряд, що проходить через переріз провідника за одиницю часу, може бути знайдена як добуток площі поперечного перерізу провідника і сумарного заряду всіх електронів, що перетинають в одиницю часу цей переріз. Оскільки перший співмножник дорівнює добутку ширини пластинки  $b$  та її висоти  $d$ , а другий - добутку заряду електрона  $e^-$ , об'ємної концентрації електронів  $n$  і їх швидкості  $V$ , то співвідношення, що пов'язує силу струму і швидкість електрона, має вигляд:

$$I = e^- n b d V \quad (6.21)$$

Різниця потенціалів  $U_h$  протилежних граней (ЕРС Холла) з урахуванням однорідності електричного поля може бути визначена на підставі наступного співвідношення:

$$U_h = E_h b = VBb = \frac{IBb}{e^{-n}bd} = \frac{R_h}{d} IB \quad (6.22)$$

де  $R_h = \frac{1}{e^{-n}}$  - коефіцієнт Хола, що залежить від природи речовини пластинки.

Таким чином, знак напруги Хола  $U_h$  залежить від знаку основних носіїв заряду, а її значення прямо пропорційне добутку двох вхідних величин – струму  $I$  і магнітної індукції  $B$  і обернено пропорційне концентрації носіїв заряду  $n$ . Відповідно датчики Холла можна використовувати для вимірювання струму  $I$  при відомій магнітній індукції  $B$  або магнітної індукції  $B$  при відомому значенні струму  $I$ . При постійних в часі  $I$  і  $B$  ЕРС Хола також є постійною. Якщо ж одна з вхідних величин ( $B$  або  $I$ ) змінна, то ЕРС Холла буде також змінною величиною з тією ж частотою, що і вхідна величина.

Для провідників через високу концентрацію електронів  $n \approx 10^{23} \frac{1}{\text{см}^3}$  і незначну їх рухливість  $U = (1-10) \frac{\text{см}^2}{\text{В}\cdot\text{с}}$  коефіцієнт Хола має дуже мале значення ( $R_h \approx 10^{-3} \frac{\text{см}^3}{\text{КЛ}}$ ). Тому ЕРС Хола  $U_h$  у металів, які знаходяться навіть у сильному магнітному полі, незначна (частки мікрвольт). Для напівпровідників через малу концентрацію носіїв заряду і їх значну рухливість значення цього коефіцієнта на багато порядків більше ( $R_h \approx 10^5 \frac{\text{см}^3}{\text{КЛ}}$ ). Тому вони, як правило, використовуються в якості матеріалів для перетворювачів Холла. В напівпровідниках ЕРС Хола на декілька порядків більша, ніж у металах і досягає десятків мілівольт.

Особливо сильно ефект Хола проявляється в германії (Ge), кремнії (Si) і в напівпровідниках, що складаються з елементів III і V груп періодичної системи. Постійні Хола для напівпровідникових матеріалів мають порядок  $R_h = (10^{-2}-10^{-4}) \text{ м}^3/(\text{А}\cdot\text{с})$ , в той час як для чистих металів -  $(10^{-9}-10^{-12}) \text{ м}^3/(\text{А}\cdot\text{с})$ . Наприклад, для міді  $R_h = 6 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{А}\cdot\text{с})$ .

До матеріалу перетворювача висувають такі вимоги:

- наявність одного виду провідності, краще n-типу (для збереження одного знака сили, що діє на заряди, і використання більшої напруги виходу в порівнянні з провідниками з р-провідністю);

- мала концентрація носіїв заряду  $n$  і велика їх рухливість  $U$  (вихідна напруга обернено пропорційна концентрації і прямо пропорційна рухливості носіїв заряду);

Датчик повинен мати максимальну чутливість і потужність на виході. Опір датчика має якнайменше залежати від температури.

Кристалічні перетворювачі Хола виконуються у вигляді тонких пластинок ( $d = 0,01 \dots 0,02$  мм), які вирізають з монокристалів і шліфуванням доводять до необхідної товщини. Розміри  $l$  (довжина) і  $b$  (ширина) поверхонь датчиків Хола складають одиниці міліметрів. Виводи закріплюються на бічних гранях шляхом пайки або зварювання. Струмові електроди виконуються по ширині поперечних граней, що забезпечує рівномірний розподіл вхідного струму по перетину перетворювача. Електроди, з яких знімається напруга Хола розташовані в центральній частині поздовжніх граней. Вихідна величина ЕРС пропорційна добутку двох вхідних величин - струму і магнітної індукції (рис. 6.20).

Хорошими метрологічними характеристиками володіють перетворювачі Хола з тонких полікристалічних плівок арсеніду індію  $\text{InAs}$  і антимоніда індію  $\text{InSb}$  на скляних підкладках і перетворювачі на основі гетероепітаксійних структур тих же матеріалів  $\text{InSb}$  і  $\text{GaAs}$  на підкладках з напівізолюючого арсеніду галію. Чутливий елемент таких датчиків виконується у вигляді тонкої плівки товщиною 5-10 мкм, мінімальні розміри якої досягають  $0,2 \times 0,05$  мм.

До основних характеристик датчиків Хола відносяться:

Гальванометрична чутливість датчиків Хола при  $\alpha = 90^\circ$  з виразу (6.17) дорівнює

$$S_{\text{ВІ}} = \frac{R_h}{d},$$

що для різних типів датчиків Хола складає  $(0,3 \dots 10)$  В/(А·Тл).

Чутливість датчиків Хола до магнітної індукції при  $I = \text{const}$  ( $I = 50 \dots 200$  мА) дорівнює  $S_{\text{В}} = \frac{R_h \cdot I}{d}$  і становить приблизно  $(0,03 \dots 1)$  В/Тл.

Чутливість до струму визначається при індукції  $B = 1$  Тл як  $S_I = R_h \frac{B}{d}$  і знаходиться межах  $(0,3 \dots 50)$  В/А.

Метрологічні властивості датчиків Хола, особливо його похибки, пояснюються рядом причин:

по-перше, похибки датчиків Хола пов'язані з нестабільністю струму, що пропускається через пластину, для зменшення впливу якої потрібна його стабілізація;

по-друге, наявність власного магнітного поля породжує похибку через його вплив на вимірюване магнітне поле. Конструктивно зменшення цієї складової похибки забезпечується створенням такого витка проводів, підводять струм, щоб він мав мінімальну площу і спеціальне розташування;

по-третє, у датчиків Хола проявляється нелінійність функції перетворення при впливі сильних магнітних полів, так як  $S_{ВІ}$  залежить від магнітної індукції. Методом корекції є лінеаризація цієї функції;

по-четверте, температурна похибка датчиків Хола, що виникає через самонагрів, зовнішню температуру навколишнього середовища, термо-ЕРС, ефект Пельтьє, і яка зменшується спеціальними способами.

Аналіз основних метрологічних характеристик перетворювачів Хола показує, що основна похибка більшості приладів, в яких використовуються перетворювачі Хола, становить 0,5-1,0%. Тільки при застосуванні складних методів корекції можна знизити похибку вимірювання до 0,1–0,2% при роботі в вузькому діапазоні температур.

Основне застосування перетворювачів Хола - вимірювання постійних, змінних та імпульсних магнітних полів, а також визначення характеристик феромагнітних матеріалів. Вони можуть бути використані для вимірювань ряду інших фізичних величин, які легко перетворюються в зміну магнітної індукції (електричні струми, кутові і лінійні переміщення та ін.) Магнітна чутливість в залежності від матеріалу і режиму роботи перетворювача складає 0,05 ... 1 В/Тл.

Крім того, перетворювачі Хола застосовуються:

1. для вимірювання великих значень струму, наприклад, 1000 А, причому безконтактним способом. В основу методу покладена властивість електричного струму утворювати магнітне поле. Фактично вимірюється індукція магнітного поля, яка потім перетворюється в струм, що його утворює;

2. для вимірювання кутів. Якщо магнітне поле утворює певний кут з напрямком струму, то ЕРС Хола буде залежати від цього кута, тобто визначатися перпендикулярною до струму складовою індукції.



Це дає можливість вимірювання кутів привести до вимірювань напруги і використовувати у системах автоматичного рерулювання;

3. як захисні вимикачі електроустановок від перевантажень. Датчик Хола поміщується в магнітне поле лінії живлення установки. При перевантаженнях струм живлення, а разом з ним індукція магнітного поля і холівська напруга різко зростають. Коли холівська напруга перевищує певну межу, спрацьовує електронна система, і установка знеструмлюється;

4. в безконтактних електронних системах запалювання двигунів внутрішнього згорання. Діамагнітна пластина (як правило мідна) обертається синхронно з колінчатим валом. Пластина екранує датчик Холла від магнітного поля, тому холівська ЕРС не виникає. В пластині зроблені отвори, через які в певні моменти датчик зазнає дії магнітного поля. У ці моменти виникає імпульс холівської напруги, який в подальшому використовується електронною системою для подачі високої напруги на свічку запалювання відповідного циліндра;

5. в якості вимірювальних перетворювачів електричних величин, для перемноження електричних сигналів, в тому числі для вимірювання електричної потужності. У цих випадках одна з електричних вхідних величин перетворюється в силу електричного струму, а інша за допомогою електромагнітного перетворювача - в магнітну індукцію. Електромагнітний перетворювач забезпечує при цьому гальванічну розв'язку ланцюгів.

Ефект Хола використовується також в безконтактних перемикаючих приладах. В даний час датчики на основі ефекту Хола знаходять надзвичайно широке застосування при розв'язанні різних завдань, серед яких - визначення положення різних рухомих частин механізмів і пристроїв, вимірювання їх швидкостей і прискорень.

Переваги перетворювачів Хола: простота конструкції, відсутність тертя, можливість вимірювання як постійних, так і змінних струмів (магнітних полів), малі розміри, що забезпечує їм хорошу просторову роздільну здатність.

Недоліки: порівняно велика залежність ЕРС Холла від температури залишкова напруга, похибка лінійності, похибка від виникнення власного магнітного поля перетворювача, нестабільність, перепад температур, який залежить від наявності домішок.

## 6.6. Магніторезистивні перетворювачі

Принцип дії магніторезистивних перетворювачів ґрунтується на використанні магніторезистивного ефекту (ефекту Гауса).

**Магніторезистивний ефект** (ефект Гаусса) полягає в зміні електричного опору твердих провідників під дією зовнішнього магнітного поля. Ця зміна обумовлена збільшенням питомого електричного опору провідного матеріалу під дією магнітного поля. Причина магніторезистивного ефекту, як і у випадку ефекту Хола, полягає у викривленні траєкторій руху носіїв заряду під дією магнітного поля. Кількісно ефект залежить від матеріалу гальваноманітного елемента та його форми.

В магніторезисторах використовується ефект зміни електричного опору при внесенні його в магнітне поле. Реєструється індукція (напруженість) магнітного поля в зазорі, або, пересуваючи магніторезистор в полі постійного магніту або електромагніту, можна змінювати опір або інші характеристики резистора (напруга, струм). Отже, вхідними сигналами магніторезистивного перетворювача є індукція магнітного поля і величини, що викликають її зміну (переміщення, швидкість і прискорення), а вихідними - зміна активного опору.

Магніторезистори, засновані на ефекті Гауса, змінюють свій електричний опір  $R$  під дією магнітного поля  $B$  відповідно до залежності:

$$\frac{\Delta R}{R} = A \cdot B^m$$

де  $A$  - коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу перетворювача і його конструкції;  $m$  – деяке додатне число. Зміна опору не пов'язана з напрямком (поляристю) поля. Ця залежність в загальному вигляді нелінійна: в слабких полях з магнітною індукцією,  $B \leq 0,3$  Тл,  $m \approx 2$ . А в сильних полях, при  $B > 0,3$  Тл, значення  $m = 1$ , і вихідна характеристика лінійна. Ця обставина зумовила застосування магніторезисторів для вимірювання сильних магнітних полів. Зазвичай вони включаються в мостові схеми.

У провідникових матеріалах магніторезистивний ефект проявляється слабо. Відносна зміна питомого електричного опору  $\Delta\rho/\rho_0$  в магнітному полі з індукцією  $B=1$ Тл для хороших провідників становить близько  $10^{-4}$ . Виняток становить вісмут, для якого

$\Delta\rho/\rho_0 \approx 2$  при  $B=3\text{Тл}$ . Тут  $\rho_0$  - значення питомого електричного опору при відсутності магнітного поля.

Значно сильніше магніторезистивний ефект проявляється в напівпровідниках, для яких при  $B = 1\text{Тл}$  зміна питомого електричного опору становить  $\Delta\rho/\rho_0 \approx 10^{-2} \dots 10$  і істотно залежить від температури і наявності домішок. Найбільше застосування в якості матеріалу для магніторезисторів мають антимонід індію ( $\text{InSb}$ ) і арсенід індію ( $\text{InAs}$ ).

Ступень прояву магніторезистивного ефекту дуже суттєво залежить від форми магніторезистора. Якщо магніторезистор являє собою пластинку довжиною  $l$  і шириною  $b$  (рис. 6.21), то в залежності від співвідношення  $l$  і  $b$  відносна зміна електричного опору при одному і тому ж значенні індукції магнітного поля буде різною.

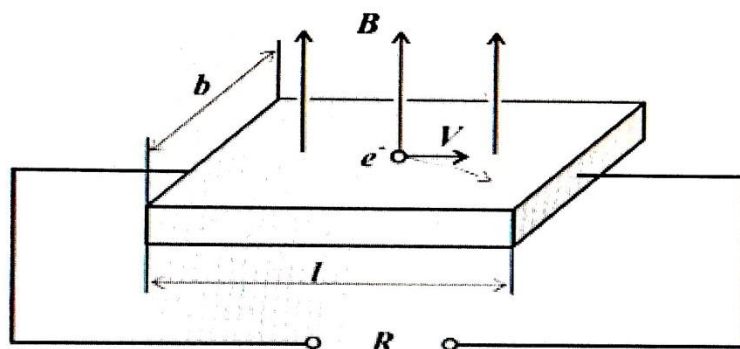


Рис. 6.21. Електропровідна пластинка в поперечному магнітному полі

Залежність питомого електричного опору магніторезистора від індукції поперечного магнітного поля описується виразом:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{k_1 B^2}{1+k_2 B^2} \quad (6.23)$$

де  $k_1$  - коефіцієнт, що залежить від форми магніторезистора;  $k_2$  - коефіцієнт, що залежить від матеріалу магніторезистора.

Приблизний вид залежності  $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$  ( $B$ ) показаний на рис. 6.22. Для слабких магнітних полів (зазвичай для  $B < 0,2 \dots 0,4$  Тл) залежність  $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$  ( $B$ ) має квадратичний характер, а для сильних магнітних полів – лінійний

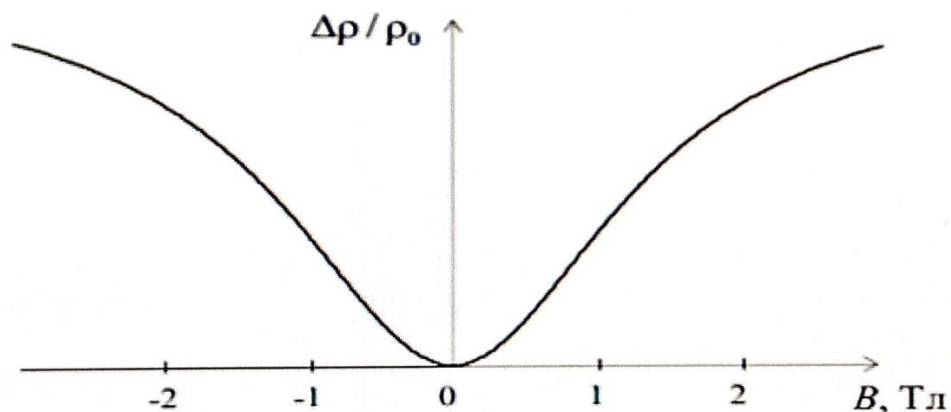


Рис. 6.22. Характер залежності зміни електричного опору магніторезистора від індукції магнітного поля

Основна область використання магніторезисторів - вимірювання магнітних полів. Якщо застосування перетворювачів Хола більш ефективно для області слабких полів, то в області сильних магнітних полів доцільно використання магніторезисторів.

### 6.7. Інтелектуальні датчики

Інтелектуальним датчиком вважається первинний перетворювач, що виконує одну (або кілька) з наступних функцій:

1. лінеаризація, масштабування, калібрування, нормалізація,
2. фільтрація, стискання, усунення помилок, статистична
3. обробка, коригування нульового рівня, самодіагностика,
4. обробка результатів вимірювань.

#### Структура інтелектуальних датчиків.

До складу датчика входять два взаємопов'язані блоки: чутливий елемент (сенсор) і перетворювач. Останній складається з програмованого мікропроцесора з оперативним і постійним модулями пам'яті, аналого-цифрового перетворювача, мережевого контролера зв'язку з типовими польовими мережами. І сенсор, і перетворювач датчика, як правило, мають кілька варіантів виконання, розрахованих на різні властивості вимірюваного і навколишнього середовищ.

Різні варіанти виконання сенсора обумовлені чинниками: різними методами сприйняття вимірюваних величин; різними з'єднаннями сенсора з об'єктом вимірювання (фланцеве, вафельне,

різьбове); різними типами корпусу сенсора, обумовленими тиском, температурою, перешкодами в місці вимірювання; різними матеріалами корпусу сенсора (для звичайного, хімічно агресивного, абразивного, вибухонебезпечного, гігієнічного середовищ).

Різні варіанти виконання перетворювача обумовлені: живленням від внутрішнього або зовнішнього джерела; різними видами вихідних сигналів і комунікаційних зв'язків з польовими мережами; різним виконанням для захисту від можливих перешкод і властивостей навколишнього середовища.

Більшість виробників комплектують датчики, поєднуючи різні варіанти сенсорів з різними варіантами перетворювачів, розрахованих на роботу з даною серією сенсорів. Завдяки цьому вдається найбільш точно і повно задовольнити окремі конкретні вимоги до приладу. У той же час подібна раціональна з технічної точки зору побудова датчиків зазвичай не дозволяє оцінити вартість приладу без детального аналізу обраних варіантів складових його блоків.

Останнім часом набули поширення мультисенсорні датчики. Їх особливість полягає в тому, що до одного перетворювача підключається ряд сенсорів, що сприймають різні або однотипні величини. Так, датчик витрати газу складається з трьох сенсорів: перепаду тиску на звуженні, абсолютного тиску та температури в місці звуження. За показами всіх трьох сенсорів перетворювач обчислює витрату газу. Баготозонні (багатоточкові) датчики температури можуть мати в своєму складі понад 10 температурних чутливих елементів. Перетворювач за їхніми показами обчислює профіль температури в об'єкті або певну функцію від ряду температурних сенсорів (наприклад, середню температуру об'єкта).

#### **Функції, що реалізуються в інтелектуальних датчиках.**

Крім звичайних функцій сприйняття шуканої величини і перетворення сигналу сучасні інтелектуальні датчики виконують ряд інших функцій, які істотно розширюють їх можливості і поліпшують їх технічні характеристики.

#### **Функції перетворення.**

Датчик перетворює електричну величину на виході сенсора (зазвичай подану у вигляді низьковольтного аналогового, частотного або імпульсного сигналу) і здійснює її вимірювання. При цьому він виконує корекцію вихідного значення за супутніми поточними показниками стану вимірюваного середовища (наприклад, за його температурою і (або) тиском), якщо покази датчика залежать і від

них. У приладі здійснюються необхідні перетворення вимірювальної інформації, а саме: підсилення сигналів сенсора, стандартизація діапазонів вихідних аналогових сигналів, лінеаризація і фільтрація, розрахунок вихідних значень за заданими алгоритмами, аналого-цифрове перетворення значень вимірюваної величини.

### **Функції самодіагностики.**

В процесі роботи датчики виконують аналіз своєї роботи, а саме: при виникненні різних збоїв, порушень і несправностей фіксують місце їх виникнення і причину, визначають вихід похибки приладу за встановлене значення, аналізують роботу бази даних датчика, розглядають правильність обліку чинників, які коригують вихідні покази датчика. Датчик може видавати оператору до 30 різних повідомлень, які конкретизують поточні особливості його роботи і значно полегшують і прискорюють його обслуговування (при необхідності втручання співробітників в його роботу). Зазвичай інформація, яка видається датчиком про окремі його несправності, поділяється на два типи:

- некритична інформація, коли датчик вимагає певного обслуговування, але вимірювані їм значення можуть використовуватися для управління;
- критична інформація, коли вихідні дані датчика невірні і або потрібне негайне втручання оператора для припинення використання його показів, або сам датчик встановлює на своєму виході постійне безпечне для управління процесом значення і повідомляє про необхідність термінового обслуговування приладу.

### **Інформаційні функції.**

Датчики зберігають у своїй пам'яті і за дистанційного запитом користувача видають всі дані, що визначають властивості, характеристики, параметри даного конкретного приладу: його тип, заводський номер, технічні показники, можливі діапазони вимірювання, встановлену шкалу, задані параметри налаштування сенсора, працюючу версію програмного забезпечення, архів проведених метрологічних повірок, термін проведення наступної повірки датчика тощо. Крім того, датчики можуть мати архів поточних вимірюваних і обчислюваних ними значень величин за заданий інтервал часу.

### **Функції конфігурації.**

Можливо дистанційне формування або модифікація користувачем основних настроювальних параметрів датчика:

установка нуля приладу, вибір заданого діапазону вимірювання, фільтрація поточних значень, вибір одиниць вимірювання, в яких датчик повинен видавати інформацію і тому подібні дії.

### **Функції форматування.**

Передбачені автоматичний аналіз змін вимірюваної величини і поточного стану середовища вимірювання: визначення виходів значень вимірюваної величини за задані норми, видача різних повідомлень про зміни значень вимірюваної величини, перевірка знаходження в допустимих діапазонах параметрів вимірюваного середовища. Всі ці функції дистанційно налаштовуються користувачем.

### **Керуючі функції.**

Останнім часом все більш значну кількість додаткових функцій, безпосередньо пов'язаних з управлінням технологічним процесом, стали покладати на інтелектуальні датчики (особливо при їх використанні з польової мережею Foundation Fieldbus). Для реалізації цих функцій в пам'ять мікропроцесора датчика вводиться відповідний набір типових програмних модулів, а їх ініціація і параметризація проводяться дистанційно оператором за допомогою найпростішого графічного конфігуратора. В якості типових програмних модулів використовуються найпростіші арифметичні і логічні елементи, таймер, елемент чистого запізнювання, інтегратор, регулятори P, I, PI, PD, PID, за допомогою яких легко створюються конкретні алгоритми регулювання різних видів, блокувальні залежності, алгоритми змішування та інші алгоритми управління технологічними процесами.

Один або кілька датчиків у сукупності з підсилюючими й перетворюючими пристроями утворюють **інформаційну систему** (рис. 6.23). Інформаційна (інформаційно-сенсорна) система призначена для інтегральної оцінки спостережуваного процесу або явища з метою визначення його стану й формування відповідного повідомлення. У загальному випадку вона являє собою сукупність функціонально об'єднаних вимірювальних, обчислювальних і інших допоміжних засобів для одержання вимірювальної інформації, її перетворення й обробки для надання в необхідному виді. В інформаційній системі сигнали, що надходять із датчиків, після попереднього підсилення й перетворення в цифрову форму надходять на мікро-ЕОМ, де виконується інтегральна оцінка процесу. Далі

формується повідомлення на верхній рівень інформаційної системи або в систему керування.

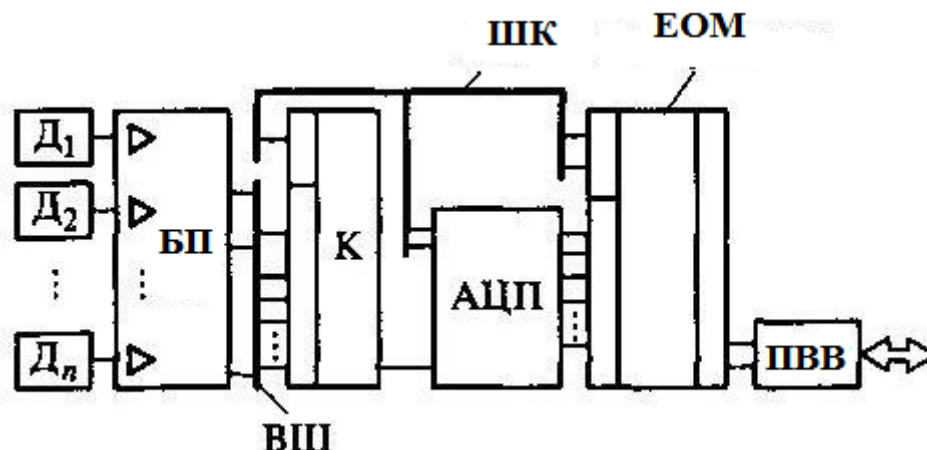


Рис. 6.23 - Приклад функціональної схеми інформаційної системи:  $D_1 \dots D_n$  - датчики; БП - блок підсилювачів; К - комутатор; ШК - шина керування; ПВВ - пристрій введення-виводу; АЦП - аналого-цифровий перетворювач; ВШ - внутрішня шина; ЕОМ – електронно-обчислювальна машина

## 6.8. Тенденції розвитку датчикобудування

Тенденції в розвитку побудови датчиків підпорядковані основним вимогам, які пред'являються до сучасних засобів вимірювань: висока точність і надійність, взаємозамінність окремих вузлів і елементів, самоналаштування, стійкість до зовнішніх впливів, малі габарити тощо.

Для реалізації перерахованих вимог постійно вдосконалюється технологія виготовлення датчиків і використовуються нові принципи їх побудови. Все ширше в датчикобудуванні застосовується інтегральна мікросхемна технологія, все частіше датчики виготовляються з використанням р-п - переходів, монокристалів, тонких плівок. Застосування, наприклад, напівпровідникових матеріалів дозволяє в ряді випадків значно збільшити чутливість і швидкодію датчиків, а також зменшити їх габарити і вагу. Удосконалення технології та отримання нових напівпровідників на основі, наприклад, кремнію і арсеніду галію дозволить в подальшому поліпшити також і інші характеристики датчиків (стабільність, повторюваність характеристик, стійкість, взаємозамінність тощо).



Великі можливості має використання принципово нових (за своїми властивостями) матеріалів. До таких матеріалів, крім уже згаданих, можна віднести класичні надпровідники і високотемпературні надпровідники (ВТНП). Відзначимо, що класична надпровідність відкрита голандським фізиком Камерлінг-Оннес в 1911р. і проявляється при температурах, близьких до температури абсолютного нуля (наприклад, при температурі рідкого гелію). В силу цього практичне використання даних матеріалів утруднено. Більш перспективні високотемпературні надпровідники. Високотемпературна надпровідність, відкрита в 1986 р., проявляється при температурах близьких до температури рідкого азоту. Наприклад, матеріал  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  переходить в надпровідний стан при температурі близько 90 К (-183<sup>0</sup>С). Графіки залежностей  $R = f(T)$  для цього матеріалу наведені на рис. 6.24.

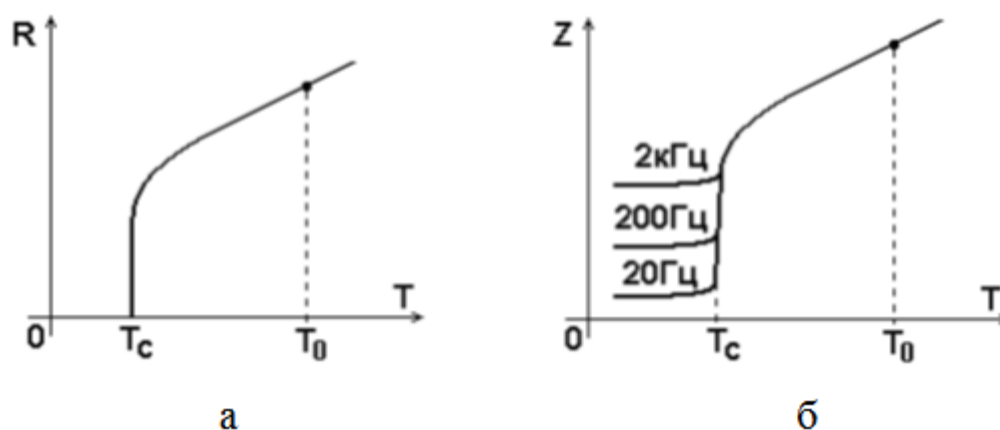


Рис. 6.24. Графіки залежностей  $R = f(T)$  і  $Z = f(T)$  для матеріалу  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ :

а - вимірювання на постійному струмі; б - вимірювання на змінному струмі

На рис. 6.24 прийняті наступні позначення: R – електричний опір; T - абсолютна температура в кельвінах (К); T<sub>0</sub> - початкова (кімнатна) температура (T<sub>0</sub> = 373К); T<sub>c</sub> - критична температура, при якій досліджуваний матеріал переходить в надпровідний стан.

Відзначимо, що характер розглянутих залежностей істотно змінюється при переході від постійного струму (рис. 6.24, а) до змінного (рис. 6.24, б). Якщо на постійному струмі при температурі T<sub>c</sub> розглянутий матеріал переходить в надпровідний стан, то на

змінному струмі цього не відбувається. На змінному струмі слід розглядати повний опір  $Z = R + jX$ , де  $R$  - активна складова, а  $X$  - реактивна складова повного опору. На змінному струмі також є «надпровідний перехід» при температурі матеріалу  $T_C$ , але надпровідність не настає. За рахунок реактивної складової при  $T_C$  (і більш низьких температурах) завжди є «залишковий опір». Причому значення залишкового опору зростає із зростанням частоти змінного струму, що протікає по досліджуваному матеріалу (рис. 6.24,б). Описані високотемпературні надпровідники завдяки їх унікальним властивостям цілком можуть бути основою для побудови датчиків нового покоління з новими, притаманними тільки їм, характеристиками.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гольдштейн А.Е. Физические основы измерительных преобразований: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехн. университета, 2008. – 253 с.
2. Демина Л.Н. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 292 с.
3. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учеб. Пособие для вузов. / Н.Н.Евтихеев, Я.А.Купершмидт, В.Ф.Папуловский, В.Н. Скугоров; Под общ.ред. Н.Н.Евтихеева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
4. Земляков В.В., Панич А.Е. Физические основы получения информации. Учеб. пособие. Ростов-на-Дону, 2010. – 132 с.
5. Кондрашкова Г.А., Бондаренкова И.В., Черникова А.В. Средства измерений физических величин: учебное пособие/СПбГТУРП. – СПб., 2013. – 82 с.
6. Левшина Е. С, Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). Учеб. пособие для вузов. — Л.; Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. — 320 с.
7. Логинов В.Н. Электрические измерения механических величин. – М.: «Энергия», 1976. – 104 с.
8. Миронов Э.Г. Методы и средства измерений. Учеб. пособие. – Екатеринбург: Уральский гос. техн. университет, 2009. – 462 с.
9. Раннев Г. Г. Измерительные информационные системы: учебник для студ. высш. учеб. Заведений / Г. Г. Раннев. — М. Издательский центр «Академия», 2010. — 336 с.
10. Сошинов А. Г. Преобразователи неэлектрических величин: Учеб. пособие. – Волгоград: РПК “Политехник”, 2002. – 36 с.
11. Сюрдо А. И. Физические основы измерений: учебное пособие. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 143 с.
12. Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин. – М.: Госэнергоиздат, 1954. – 292 с.
13. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шаропова, Е.С. Полищука. – М.: Техносфера, 2012. – 624 с.
14. Шикалов В.С. Технологічні вимірювання: Навчальний посібник. – К.: Кондор, 2005. – 200 с.
15. Пастушенков А.Г. Измерительные преобразователи. Часть 1.

Гальваномагнитные и индукционные преобразователя. Учебное пособие. – Тверь: Тверской гос. ун-т, 2001, - 95 с.

16. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин: Методы измерений: Учеб. Пособие для вузов. – Л: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.

17. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / Є.С. Поліщук, М.М.Дорожовець, В.О Яцук, В.М. Ванько, Т.Г. Бойко; за ред. проф. Є.С. Поліщука. – Львів:Видавництво «Бескид Біт», 2003. – 544 с.

18. Николаева Е.В. Физические основы получения информации: Измерительные преобразователи. Принципы измерения физических величин: учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007.- 96 с.

19. Бурштинський М.В., Хай М.В., Харчишин Б.М. Давачі. – Львів: ТзОВ «Простір М», 2013. – 184 с.