

ВІДОКРЕМЛЕНИЙ СТРУКТУРНИЙ ПІДРОЗДІЛ
«ХАРКІВСЬКИЙ КОМП'ЮТЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ДОСЛІДНА РОБОТА

за технічним напрямком:

на тему: Аналітичний огляд та порівняльна характеристика сучасних електричних приладів для вимірювання неелектричних величин.



*Виконала студентка групи
МІТ-311
Лисенко Поліна Олександрівна
Керівник
Оленчук І. Я.*

Харків 2024

ЗМІСТ

| | Стор. |
|---|-------|
| Скорочення прийняті в проєкті | 3 |
| Вимірювання неелектричних величин | 4 |
| Особливості вимірювання неелектричних величин | 4 |
| Узагальнена структурна схема | 5 |
| Параметричні вимірювальні перетворювачі | 7 |
| Резистивні перетворювачі | 7 |
| Фоторезистивні перетворювачі. | 8 |
| Електрохімічні резистивні перетворювачі | 8 |
| Терморезистори | 11 |
| Тензометричні перетворювачі | 12 |
| Магніторезистивні перетворювачі | 13 |
| Ємнісні перетворювачі | 15 |
| Індуктивні перетворювачі | 19 |
| Генераторні вимірювальні перетворювачі | 19 |
| Індукційні перетворювачі | 20 |
| П'єзоелектричні перетворювачі | 20 |
| Електретні перетворювачі | 21 |
| Термоелектричні перетворювачі | 21 |
| Фотоелектричні перетворювачі | 22 |
| Принцип дії перетворювачів кутових переміщень | 23 |
| Список джерел інформації | 24 |
| Інформаційні ресурси | 25 |

Скорочення:

ЗВ – засоби вимірювання;

Е.Р.С (е.р.с) – електрорушійна сила;

ТО - термометри опору;

НСХП - функція перетворення або номінальна статична характеристика перетворювача;

ТОП - термоопори платинові;

ТОМ - термоопори мідні;

ТС - тензорезисторний сенсор;

ТКО – температурний коефіцієнт опору;

ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Швидкий розвиток автоматизованих систем контролю різних технологічних процесів, машин і механізмів, впровадження гнучких автоматизованих виробництв поставили невідкладне завдання – забезпечити такі системи вимірювальними перетворювачами неелектричних величин.

Особливості вимірювання неелектричних величин

До сенсорів, що діють у найнесприятливіших умовах контрольованого середовища і об'єкта, висуваються різні, часто суперечливі вимоги: довгочасна стабільність, висока надійність, мала похибка вимірювання, стійкість проти дії впливних величин факторів, високі статична і динамічна чутливості, незначне енергоспоживання, інформаційна, конструктивна і технологічна сумісності із мікропроцесорними системами, невисока вартість в умовах серійного виробництва.

Розширення промислових процесів, що проходять в екстремальних умовах (надвисокі і наднизькі температури, потужні електромагнітні поля, високий рівень радіації тощо), висувають перед сенсорами вимогу збереження високих метрологічних характеристик у межах жорстких умов експлуатації.

У той же час в сучасній промисловості, науці, енергетиці, на транспорті та в інших галузях народного господарства має місце надзвичайно швидке зростання кількості фізичних величин, які необхідно вимірювати (контролювати). На сучасному етапі необхідно (як свідчать роботи зі складання кадастру величин і параметрів, що підлягають вимірюванню) вміти вимірювати чи контролювати понад 2000 величин, а існуючі методи і засоби дають можливість вимірювати лише 400-500 величин. При цьому кількість неелектричних величин, які необхідно вимірювати, значно перевищує кількість вимірюваних електричних і магнітних величин.

Сучасні засоби вимірювання і системи складаються з певної кількості окремих вимірювальних перетворювачів. Існує безліч різновидів ЗВ, а кількість типів вимірювальних перетворювачів дещо обмежена. Ця тенденція зберігається і буде розвиватися в майбутньому. Однак процентне співвідношення при розподілі вимірювань різних фізичних величин буде змінюватися.

Таким чином, широкий спектр вимірюваних неелектричних величин, недостатнє вивчення методів їх вимірювання, метрологічна незабезпеченість визначають особливості вимірювання таких величин.

При вимірюванні неелектричних величин широко застосовуються електричні методи вимірювання, тобто виконується «електрифікація» таких вимірювань – перетворення неелектричної величини в електричну.

Це зумовлює наявність вимірювального перетворювача в структурі ЗВ неелектричних величин, що здійснює попереднє перетворення досліджуваної неелектричної величини у функціонально пов'язану з нею електричну величину.

Переважне використання електричних методів вимірювання неелектричних величин зумовлюється можливістю вимірювання на значній відстані від об'єкта дослідження, зручністю передавання й оброблення електричних сигналів, можливістю реєстрації величин, що змінюються як повільно, так і швидко, достатнім вивченням методів і засобів вимірювання електричних величин.

Узагальнена структурна схема

У загальному випадку прилади для вимірювання неелектричних величин конструктивно найчастіше складаються з двох самостійних вузлів: сенсора; вторинного вимірювального приладу, які можуть розміщуватися на значній відстані один від одного і з'єднуватись лініями зв'язку.

Розглянемо узагальнену структурну схему засобу вимірювання неелектричних величин на прикладі засобу вимірювання тиску (рис. 1.1, а).

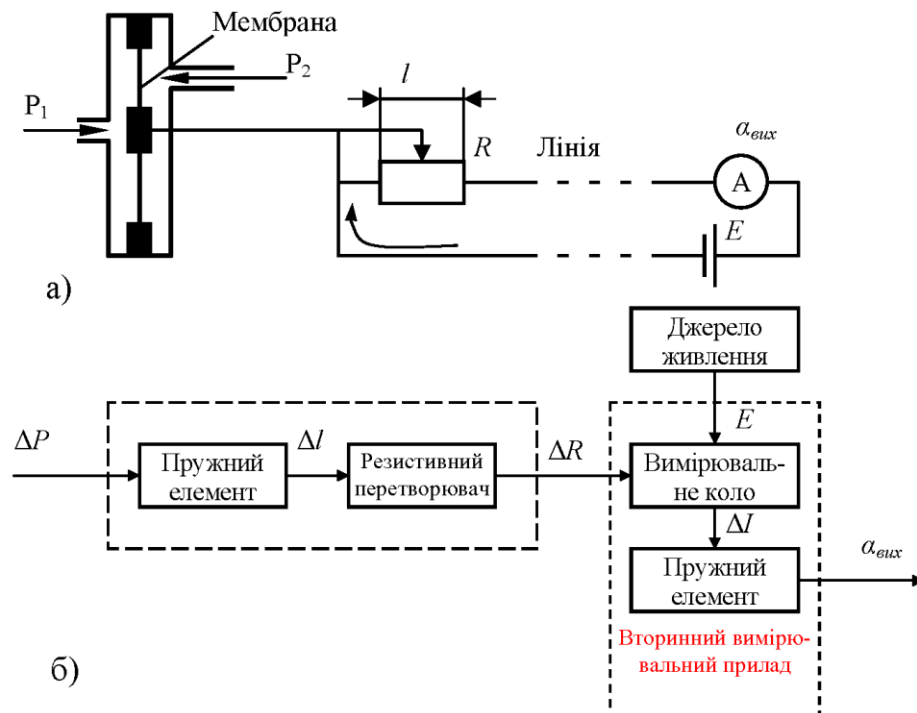


Рисунок 1.1

Деформація пружного елемента (мембрани) використовується для переміщення повзуна потенціометра. Резистивний потенціометр перетворює лінійне переміщення l у відповідну зміну опору ΔR , яка змінює струм на ΔI у лінії зв'язку, що фіксується амперметром (рис. 1.1, б). Послідовність вимірювальних перетворень у приладі можна подати у вигляді:

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

Наведена послідовність перетворень дозволяє наочніше виділити основні елементи ЗВ неелектричних величин. Основною статичною характеристикою первинних перетворювачів неелектричних величин є градуовальна. Для більшості перетворювачів неелектричних величин функція перетворення є досить нелінійною. Тому при їх використанні з електричними вимірювальними приладами, які мають лінійну статичну характеристику, виникає необхідність лінеаризації функції перетворення сенсора. Для компенсації впливу дестабілізуювальних факторів надзвичайно ефективним є використання диференціальних схем. У цих перетворювачах використовуються два чутливих елементи, в одному з яких під дією вимірюваної величини вихідна величина збільшується, а в іншому – зменшується. Результувальний вихідний сигнал формується як різниця вихідних сигналів чутливих елементів. При цьому внаслідок впливу зовнішніх факторів зміни вихідних сигналів взаємно компенсуються. При використанні сенсорів у вимірювально-інформаційних системах застосовують уніфікацію їх вихідних сигналів. Найбільш поширені уніфіковані сигнали у вигляді:

- постійного струму $0 \dots 5, 0 \dots 20, 4 \dots 20$ мА;
- напруги $0 \dots 100$ мВ, $0 \dots 10$ В, ± 5 В;
- частоти $4 \dots 8$ кГц.

Залежно від типу первинного вимірювального перетворювача і вигляду його вихідного інформативного параметра використовуються ті чи інші технічні засоби електровимірювальних приладів. У більшості випадків апаратна частина вторинних приладів для вимірювання неелектричних величин істотно не відрізняється від приладів для вимірювання електричних величин. Суттєвою відмінністю є тільки алгоритм роботи приладу, який визначається алгоритмом виконання вимірювальної процедури тієї чи іншої фізичної величини.

Оскільки вихідними інформативними параметрами перетворювачів є напруга, струм, опір, ємність або індуктивність, то вторинними вимірювальними приладами є прилади для вимірювання відповідних електричних величин. При цьому, як правило,

вторинні прилади проградуєвані з урахуванням функції перетворення сенсора в одиницях вимірюваної неелектричної величини. В цих ЗВ передбачена корекція неінформативних параметрів, що впливають як на вимірювальний перетворювач, так і на лінію зв'язку.

Оскільки основним елементом ЗВ неелектричних величин є різні вимірювальні перетворювачі, розглянемо більш детально принципи їх побудови. Залежно від енергетичних властивостей вихідного сигналу і способу його подальшого використання первинні вимірювальні перетворювачі поділяються на дві великі групи: параметричні і генераторні.

Параметричні вимірювальні перетворювачі

У параметричних вимірювальних перетворювачах неелектрична величина перетворюється у приріст параметра електричного кола (R, L, C, M), тому особливістю роботи таких перетворювачів є потреба в додатковому джерелі енергії.

Резистивні перетворювачі

Параметричні перетворювачі, в яких вихідною величиною є приріст електричного опору, називаються резистивними. До цієї групи належать реостатні перетворювачі, перетворювачі контактного опору, контактні резистивні перетворювачі, фоторезистивні, кондуктометричні (резистивні електролітичні) перетворювачі, термо- і тензорезистори, магніторезистивні. Основні характеристики цих перетворювачів наведені у табл.1. Якщо вхідною величиною є переміщення (лінійне чи кутове), використовують реостатні перетворювачі (схема 1 у табл.1), в яких повзун реостата переміщується відповідно до значень вимірюваної величини. Перетворювач складається з обмотки, намотаної на каркас, і рухомої щітки. Опір майже всіх реостатних перетворювачів змінюється не плавно, а ступінчасто. Це призводить до виникнення похибки дискретності Δ_d , яка зменшується із збільшенням кількості витків на одиницю вимірюваного переміщення.

Перетворювачі контактного опору (схема 2 у табл.1) побудовані на залежності перехідного опору між стиковими електропровідними елементами від зусиль їх стискання або деформації. Як електропровідні елементи для таких перетворювачів вико-

ристовують, наприклад, електропровідний папір, гуму та інші електропровідні матеріали з питомим об'ємним опором $\rho=10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, оскільки перехідний опір набагато більший за об'ємний опір контактувальних елементів. Одним з перших сенсорів цього типу є вугільний мікрофон.

Контактні резистивні перетворювачі (схема 3 у табл.1) використовують у тих випадках, коли немає необхідності в неперервному вимірюванні неелектричної величини, а потрібно визначити тільки досягнення заданого рівня. Вони дешеві і прості в конструктивному виконанні. Недоліком їх є спрацьовування контактів, ненадійність роботи при наявності вібрацій.

Фоторезистивні перетворювачі.

В основу будови фоторезистивних перетворювачів покладено явище внутрішнього фотоефекту. Суть внутрішнього фотоефекту полягає у переміщенні звільнених під дією світлового потоку носіїв заряду (електронів і дірок) усередині твердого тіла (без виходу назовні), що веде до зміни електропровідності тіла або виникнення фото-е.р.с.

Це явище покладено в основу побудови фоторезисторів. Рівняння перетворення фоторезисторів має вигляд:

$$G=\Phi a ,$$

де G – електропровідність; Φ – світловий потік; a – коефіцієнт нелінійності енергетичної характеристики фотопровідності.

Конструктивно фоторезистори – це нанесений на скляну пластину 1 площею від одиниць до сотень квадратних міліметрів шар напівпровідника 2 з електродами 3, що входять у нього (схема 4 у табл.1). Висока чутливість, можливість одержання значних фотострумів без застосування додаткових підсилювачів і практично необмежений строк служби визначають основну перевагу фоторезисторів. До недоліків цих перетворювачів слід віднести їх інерційність.

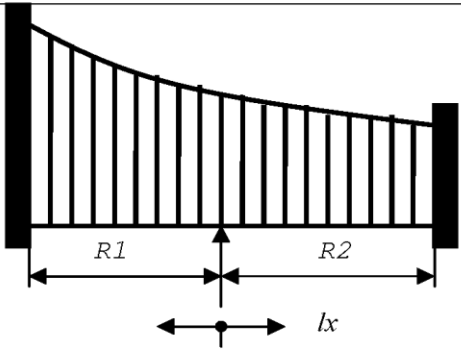
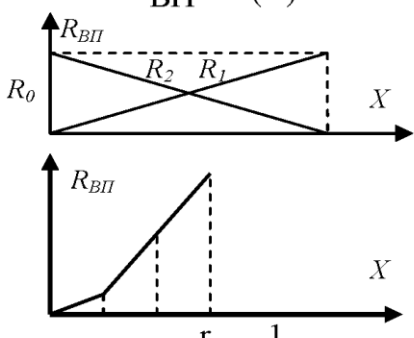
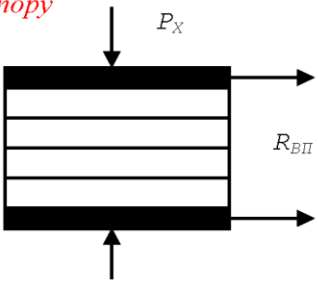

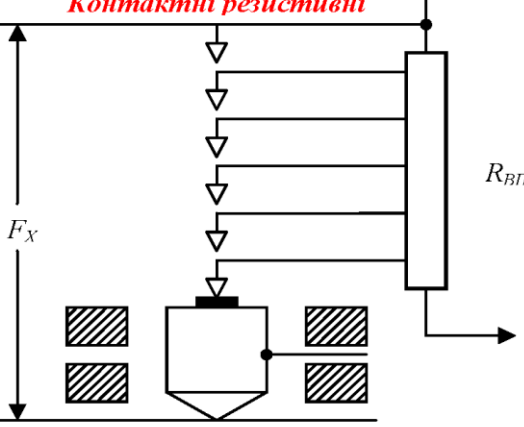
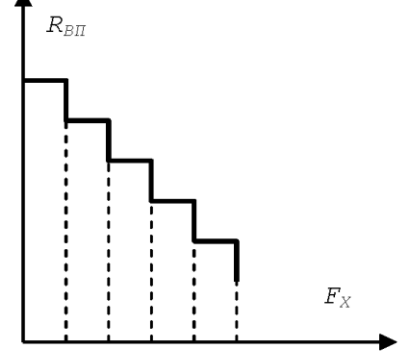
Електрохімічні резистивні перетворювачі

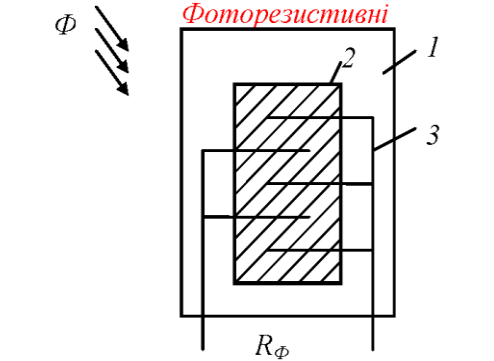
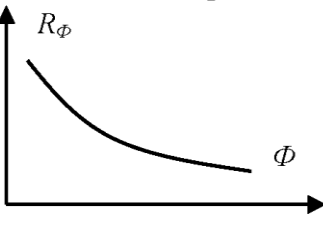
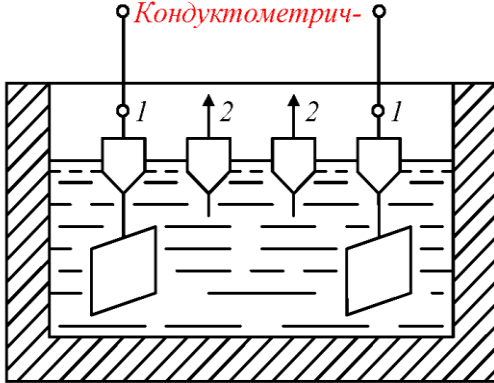
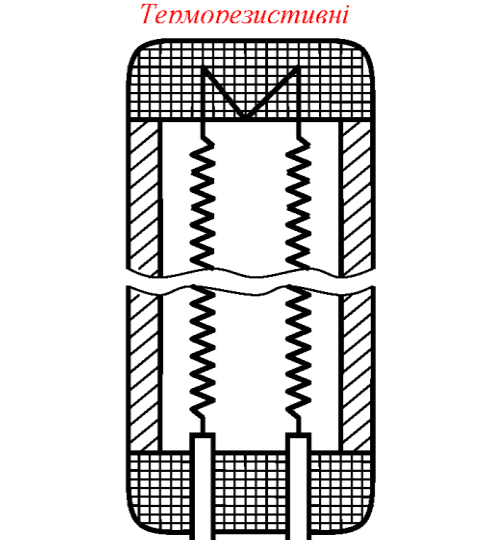
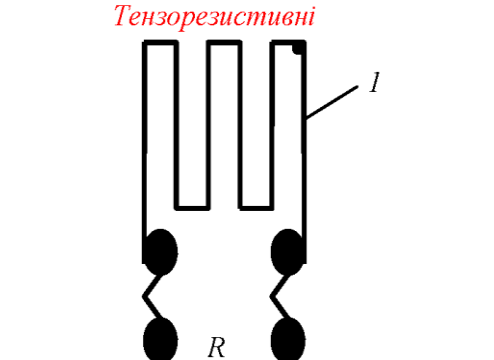
Електрохімічні резистивні перетворювачі (їх називають також кондуктометричними) базуються на використанні залежності їх опору від складу і концентрації електроліту:

$$R=K_{\Gamma}/\gamma ,$$

де K_T – коефіцієнт перетворення, що залежить від співвідношення геометричних розмірів і визначається експериментально шляхом використання стандартних розчинів із відомими значеннями провідності.

Таблиця 1 – Основні різновиди резистивних перетворювачів

| Схема | Функціональна схема перетворювача | Рівняння перетворення, метрологічні характеристики |
|-------|--|--|
| 1 | <p style="text-align: center;">2</p>  | <p style="text-align: center;">3</p> <p style="text-align: center;">$R_{ВП} = f(X)$</p>  <p style="text-align: center;">$\Delta_d = \frac{r}{2R} \cdot \frac{1}{2W}$,</p> <p style="text-align: center;">r – витків опір; W – число витків, $l_{max} \leq 1m$</p> |
| 2 | <p style="text-align: center;"><i>Контактного опору</i></p>  | <p style="text-align: center;">$R = R_0 \left(1 + \frac{k}{P_X} \right)$,</p> <p style="text-align: center;">k – коефіцієнт перетворення</p>  |
| 3 | <p style="text-align: center;"><i>Контактні резистивні</i></p>  | <p style="text-align: center;">$R = f(F_X)$</p>  <p style="text-align: center;">$F_X = (10 \text{ кН} \dots 0,5 \text{ МН})$ $\Delta = 1\%$</p> |

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
| 4 | <p style="text-align: center;"><i>Фоторезистивні</i></p>  | $R_{\Phi} = R_T - k \cdot \Phi$ <p>Φ – світловий потік; R_T – темновий опір</p>  |
| 5 | <p style="text-align: center;"><i>Кондуктометрич-</i></p>  | $R = \frac{k}{C_1 F (\bar{U}_a + \bar{U}_k)}$ <p>k – коефіцієнт перетворення; F – стала; \bar{U}_a, \bar{U}_k – відносна рухомість анаонів і катіонів</p> |
| 6 | <p style="text-align: center;"><i>Терморезистивні</i></p>  | $R_T = R_0 (1 + \alpha \cdot T)$ <p>α – температурний коефіцієнт опору</p> |
| 7 | <p style="text-align: center;"><i>Тензорезистивні</i></p>  | $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} (1 + 2 \cdot \mu) + \frac{\Delta \rho}{\rho}$ <p>R – опір тензорезистора; l – довжина дроту; ρ – питомий опір матеріалу; μ – коефіцієнт Пуассона</p> |

Такі перетворювачі використовуються, головним чином, для вимірювання питомої електропровідності електролітів, за якою визначають концентрацію. Найпростіший контактний кондуктометричний перетворювач – це два електроди, опущені 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 у табл.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.

Терморезистори.

Для вимірювання температури в різних галузях народного господарства широко застосовують терморезистори (термометри опору).

Принцип дії термометрів опору засновано на властивості речовини змінювати свій опір при зміні температури.

Для вимірювання температури термометр опору необхідно помістити в середовище, температуру якого необхідно виміряти.

ТО виготовляють у вигляді обмотки з тонкої проволочки на спеціальному каркасі із ізоляційного матеріалу. Цю обмотку прийнято називати чутливим елементом. Для захисту чутливого елемента від механічних пошкоджень його розміщують в спеціальній гільзі (схема 6, табл.1).

Для вимірювання температур в широкому діапазоні застосовують платинові термометри опору. Вони є найбільш високоточними вимірювальними перетворювачами температури. В діапазоні температур від 0 °С до 600 °С інтерполяційне рівняння перетворення платинового термометра опору має вигляд:

$$R_T = R_0 \cdot (1 + AT + BT^2),$$

де R_0 – опір того ж чутливого елемента при температурі 0 °С, Ом.

Для інтервалу температур від – 180 °С до 0 °С інтерполяційне рівняння перетворення є таким:

$$R_T = R_0 \left[1 + AT + BT^2 + CT^3(T - 100) \right],$$

де A, B, C – постійні коефіцієнти, які визначаються в точках кипіння води, сірки, кисню.

Основними нормованими характеристиками термоперетворювачів опору є:

- R_0 номінальне значення опору при $0\text{ }^\circ\text{C}$;
- R_{100}/R_0 номінальне значення відношення опору перетворювача при 100°C R_{100} до опору R_0 .

НСХП описується ще таким рівнянням перетворення:

$$R_T = R_0(1 + \alpha \cdot T),$$

де $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3}\text{ }^\circ\text{C}$ – температурний коефіцієнт опору.

Термометри опору випускаються двох типів: ТОП і ТОМ, в яких як вимірювальні перетворювачі використовують чутливі елементи відповідно з платини і міді.

Платинові термоперетворювачі опору випускаються із значеннями опору R_0 , що дорівнюють 1, 10, 50, 100 і 500 Ом,

яким відповідають НСХП - 1П, 10П, 50П, 100П і 500П,

а мідні – із значеннями опору R_0 10, 50, 100 Ом,

яким відповідають НСХП - 10М, 50М і 100М.

Тензометричні перетворювачі.

В основу принципу їх дії покладена зміна активного опору R провідника при його деформації. Широко застосовувані нині наклеювані дротяні тензорезистори (схема 7 у табл.1) – це тонкий зигзагоподібний дріт 1 (тензочутливий елемент), який наклеюється на еластичну смужку (підкладинку). Тензорезистори наклеюються на досліджуваний об'єкт так, щоб вони разом із ним зазнавали деформації стискання або розтягування.

Принципово нові можливості у розвитку ТС 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 підкладці з певною кристалографічною орієнтацією. Такі перетворювачі мають хороші пружні властивості, малу похибку гістерезису, широкий діапазон вимірюваних деформацій.

В основу принципу дії ТС покладено тензоефект у напівпровідниках. Чутливим елементом ТС є сапфірова мембрана з кремнієвими тензорезисторами.

Суть тензоефекту полягає в зміні активного опору провідників і напівпровідників при їхній механічній деформації.

Під дією інформативного параметра (зусилля) мембрана деформується, що, в свою чергу, викликає зміну опору R мостової схеми тензорезисторів, зміна опору приводить до зміни вихідної напруги тензомоста.

Для підсилення малих різниць напруги на фоні синфазної завади, яка може бути більшою за значення U , застосовують вимірювальний підсилювач. Після підсилення відбувається аналого-цифрове перетворення.

Тензорезистори всіх типів широко застосовуються при вимірюванні деформацій, зусиль, тисків, моментів тощо.

Магніторезистивні перетворювачі

Магніторезистивний ефект, тобто ефект збільшення електричного опору гальванічного елемента під дією магнітного поля, є результатом викривлення внаслідок цієї дії траєкторії руху носіїв заряду. Кількісно магніторезистивний ефект проявляється по-різному і залежить від матеріалу гальванорезистивного елемента та його форми. В провідникових матеріалах гальванорезистивний ефект проявляється слабо. Значно сильніше він проявляється в напівпровідниках.

Найбільшу відносну зміну опору в магнітному полі мають магніторезистори, виконані у формі так званого диска Корбіно. Однак цей диск має дуже малий опір (від кількох десятків Ом до одиниць Ом), що зумовлено не тільки формою перетворювача, але й властивостями матеріалів, що використовуються для магніторезистивних перетворювачів, а саме високою рухливістю носіїв струму (малим питомим електричним опором). Крім цього, навантажувальна спроможність диска Корбіно за струмом сильно обмежена. Це пояснюється високою густиною струму в зоні центрального електрода. Функція перетворення такої форми магніторезистивного перетворювача має квадратичний характер.

У магніторезисторах прямокутної форми магніторезистивний ефект проявляється слабше, ніж у перетворювачах у формі диска Корбіно. Однак вони мають значні переваги, зокрема залежність має квадратичний характер тільки в слабких магнітних полях і практично лінійна в полях, починаючи з (0,3...0,4) Тл. Електричний опір магніторезистора у формі прямокутника також невеликий і залежить від конструкції і матеріалу перетворювача, і може становити від одиниць до кількох десятків

Ом. Для збільшення електричного опору шляхом збільшення робочої довжини магніторезистора останній виконують у вигляді меандру (рис. 1.2, а).

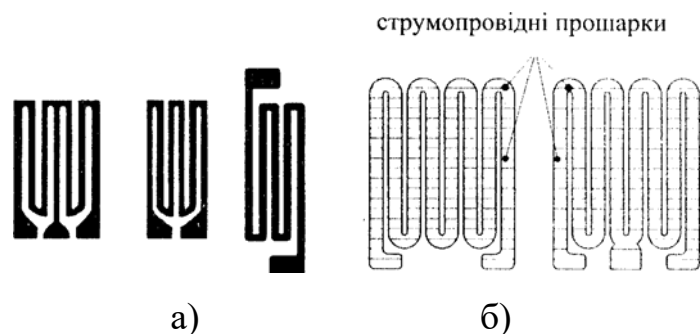


Рисунок 1.2

Для збільшення опору при одночасному збереженні високої чутливості магніторезистор виконують у вигляді ряду послідовно сполучених напівпровідникових пластин, розділених струмопровідними шарами. В цьому випадку перетворювачу надають, звичайно, також форму меандру (рис. 1.2, б).

Послідовно сполучені ділянки напівпровідника з розділювальними електропровідними шарами створюються сьогодні різними способами. Найперспективнішим є спосіб, що базується на отриманні напівпровідникової сполуки особливої структури.

Основою для створення такої сполуки може бути, наприклад, антимонід індію, що має високу рухливість носіїв. Якщо в цей матеріал додати 1,8% антимоніду нікелю, то після сплавлення при температурі (700...800) °С в атмосфері аргону або водню і наступним вирощуванням синтезованого матеріалу методом спрямованої кристалізації антимонід нікелю викристалізовується в антимоніді індію у вигляді голок діаметром близько 1 мкм і довжиною 10...50 мкм, розташованих паралельно одна одній і достатньо рівномірно на відстані від десятків мікрометрів до десятих часток міліметра.

Питома провідність антимоніду індію дорівнює приблизно $2 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, а питома провідність голок з антимоніду нікелю становить $7 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Отже, голки відіграють роль електродів з гарною електропровідністю, які розділяють основний напівпровідник на окремі зони з малим відношенням довжини до ширини. Потрібно звернути увагу на ту важливу обставину, що антимонід нікелю практично не розчиняється в затверділому антимоніді індію і не має легувальної дії на властивості останнього.

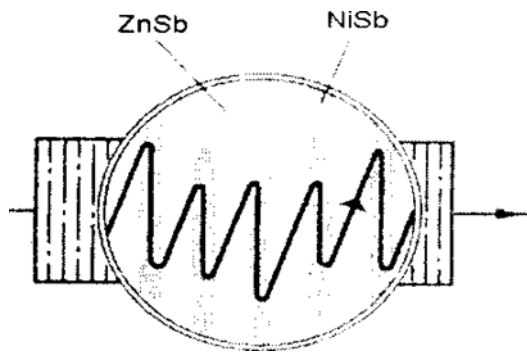


Рисунок 1.3

На рис. 1.3 наведено зріз *ZnSb/NiSb* – магніторезистора та лінії струму при дії магнітного поля.

Як і для інших напівпровідникових перетворювачів, для магніторезисторів характерною є значна температурна нестабільність опору. Так, ТКО антимоніду індію становить 1,2 %/град, а для евтектичного сплаву, легованого телуrom, ТКО може бути зменшений до (0,02...0,05) %/град. Магніторезистори мають помітну частотну залежність, яка, у свою чергу, залежить від форми магніторезистора. Зокрема, для диска Корбіно частотна залежність практично не проявляється, а для магніторезисторів прямокутної форми при зміні частоти від 0 до 10 МГц відношення R_B/R_0 зменшується приблизно на (7...10) %. Магніторезистори можуть безпосередньо використовуватись для вимірювального перетворення магнітної індукції в зміну електричного опору.

Ємнісні перетворювачі

В ємнісних перетворювачах використовується залежність ємності конденсатора від розмірів, взаємного розміщення його обкладок і діелектричної проникності середовища між ними.

В ідеальному випадку ємність плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d},$$

де $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична стала; ϵ – відносна діелектрична проникність середовища між електродами; S – площа електрода.

З цієї формули випливає, що ємність C плоского конденсатора збільшуватиметься при зростанні діелектричної проникності середовища і площі пластин S і зменшуватиметься зі збільшенням відстані між пластинами d . Отже, всі фізичні величини, які безпосередньо або через допоміжні фактори будуть впливати на зміни ϵ , S

і δ , можна виміряти за допомогою ємнісних сенсорів. Останні можуть мати найрізноманітніше конструктивне виконання: дві чи три плоскі пластини, циліндр у циліндрі тощо.

Під ємнісним сенсором розуміють систему електродів, ємність яких однозначно залежить від значення заданої фізичної величини.

Чутливість ємнісних перетворювачів з площинними електродами є лінійною функцією зміни площі взаємодії електродів і зміни діелектричної проникності середовища між ними.

Зміна діелектричної проникності. Величина ϵ 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 ϵ_1 і ϵ_2 яких відомі, то, вимірюючи результувальне значення ϵ_c (суміші), можна визначити її процентний склад. Наприклад, відносна діелектрична проникність нафти $\epsilon_n = 3$, а води $\epsilon_v = 81$. Отже, найменші домішки води у нафті будуть різко збільшувати результувальну проникність ϵ_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 ϵ цієї речовини, то за вимірною 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 для безпосереднього спостереження резервуарах.

Зрештою, ϵ 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.

Зміна відстані між пластинами. Таку відстань часто називають зазором, ємність сенсора змінюється обернено пропорційно зазору. Тому залежність в перетворювачах такого типу є нелінійною.

Це потребує 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 між пластинами не може бути великою через виникнення електричних полів розсіювання.

Однак значення може набувати дуже малих значень – десяті і соті частки міліметра.

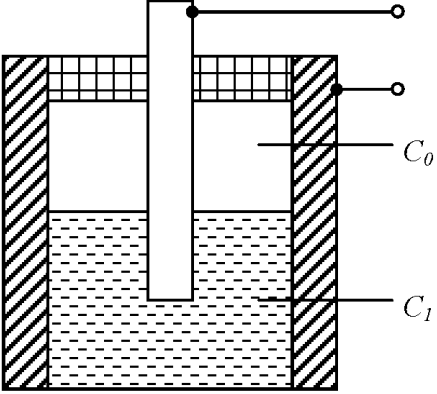
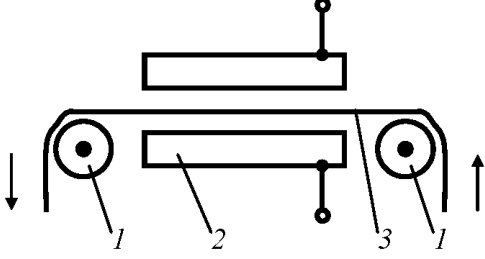
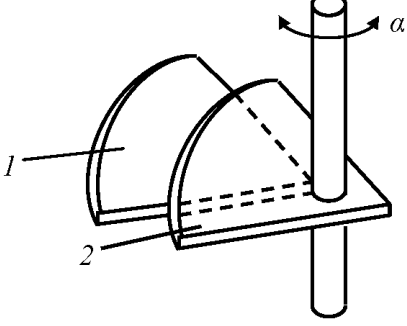
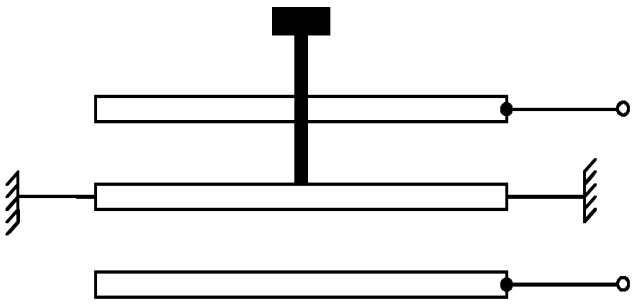
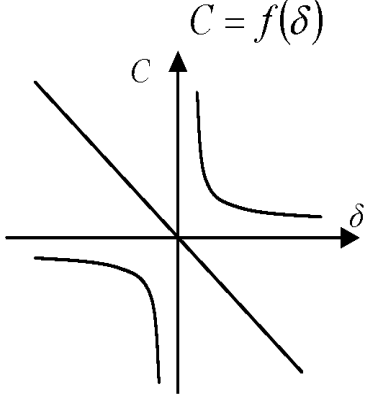
Таким чином, після зміни відстані між пластинами можна вимірювати переміщення так, як і після зміни S . Проте такі сенсори придатні для вимірювання дуже малих переміщень з дуже високими чутливістю і роздільною здатністю. Так, в Інституті електродинаміки НАН України створені дистанційні цифрові прилади 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 між пластинами сенсора також можна використати для визначення сил, моментів деформацій, зважування вантажів, вимірювання тисків і вібрацій при відповідному оснащенні сенсорів пружними елементами.

Через нелінійність функції перетворення $C = f(\delta)$ діапазон перетворень дуже вузький і не перевищує $0,1\delta_0$ (де δ_0 – максимальна відстань між електродами).

Ємнісні перетворювачі використовуються для вимірювання лінійних і кутових переміщень, рівня рідини, вологості сипких матеріалів, а сумісно з електромеханічними вимірювальними перетворювачами – для вимірювання тиску, сил, прискорення, вібрацій тощо.

Основні переваги ємнісних сенсорів – висока чутливість; відсутність рухомих деталей, які труться; простота конструкції; мала інерційність. До їх недоліків слід віднести вплив зовнішніх електричних полів, паразитних ємностей, температури і вологості.

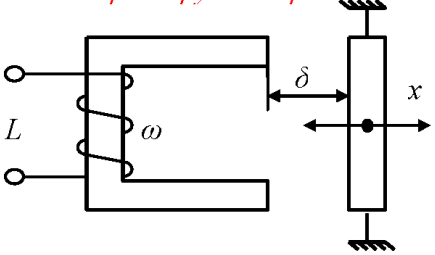
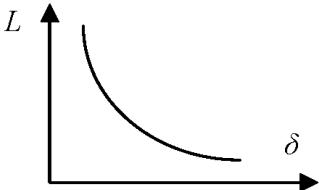
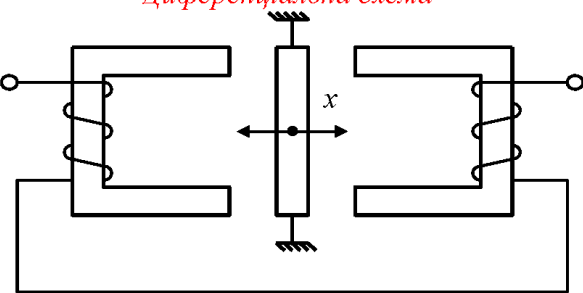
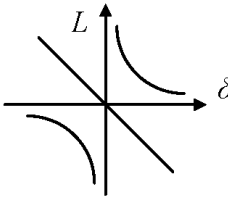
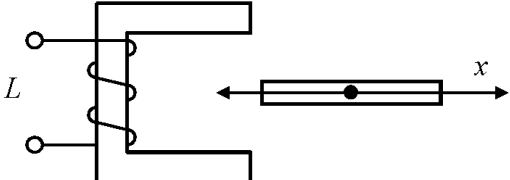
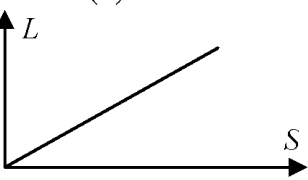
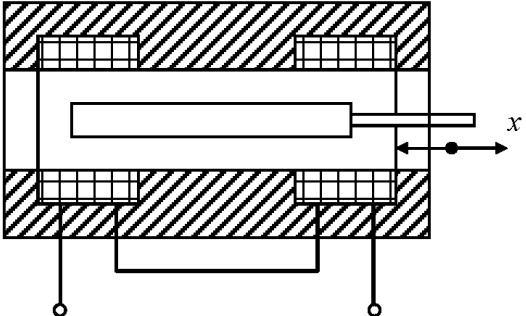
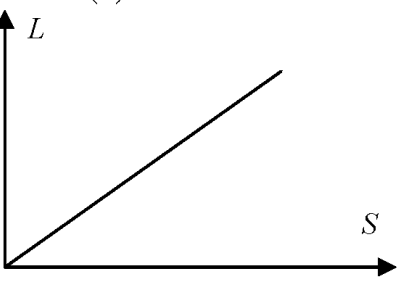
Таблиця 2 – Основні різновиди ємнісних перетворювачів

| Схема | Функціональна схема перетворювачів | Рівняння перетворення |
|-------|--|---|
| 1 | <p style="text-align: center;"><i>Ємнісний перетворювач рівня</i></p>  <p style="text-align: center;">1 – ролики; 2 – пластина конденсатора; 3 – стрічка із діелектрика.</p> | <p style="text-align: center;">3</p> $C = C_1 + C_0 = \frac{2\pi}{\ln R1/R2} [l\epsilon + (l_0 - l)\epsilon_0],$ <p>l_0 – повна довжина циліндра; l – рівень рідини; ϵ – діелектрична проникність рідини; $R1, R2$ – радіуси зовнішнього і внутрішнього циліндрів</p> |
| 2 | <p style="text-align: center;"><i>Ємнісний перетворювач товщини</i></p>  <p style="text-align: center;">1 – ролики; 2 – пластина конденсатора; 3 – стрічка із діелектрика.</p> | $C = \frac{S}{\left(\frac{\delta - \delta_d}{\epsilon_0} + \frac{\delta_d}{\epsilon_d}\right)},$ <p>δ – зазор між пластинами; S – площа пластин; δ_d – товщина стрічки; ϵ_d – діелектрична проникність стрічки</p> |
| 3 |  <p style="text-align: center;">1 – нерухома пластина; 2 – рухома пластина.</p> | <p style="text-align: center;">$C = f(\alpha)$</p> <p>Форма пластин дозволяє одержати необхідну функціональну залежність</p> |
| 4 | <p style="text-align: center;"><i>Диференціальна схема</i></p>  |  <p style="text-align: center;">$C = f(\delta)$</p> |

Індуктивні перетворювачі

В індуктивних перетворювачах із змінною довжиною повітряного зазору використовується залежність індуктивності L від довжини повітряного зазору δ .

Таблиця 3 – Основні різновиди індуктивних перетворювачів

| Схема | Функціональні схеми перетворювачів | Рівняння перетворення |
|-------|--|---|
| 1 | <p style="text-align: center;"><i>Із зміною розміру повітряного зазору</i></p>  | $L = \frac{\mu_0 \omega^2 S}{\delta}$  |
| 2 | <p style="text-align: center;"><i>Диференціальна схема</i></p>  | $L = 2\mu_0 \omega^2 S \frac{\Delta\delta}{\delta} \cdot \frac{1}{1 - (\Delta\delta/\delta)}$  |
| 3 | <p style="text-align: center;"><i>Із зміною площі S повітряного зазору</i></p>  | $L = f(S)$  |
| 4 | <p style="text-align: center;"><i>Плунжерного типу</i></p>  | $L = f(S)$  |

Генераторні вимірювальні перетворювачі

У генераторних перетворювачах вхідна величина перетворюється у вихідний сигнал, який має енергетичні властивості.

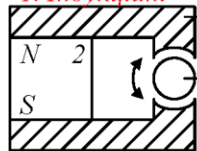
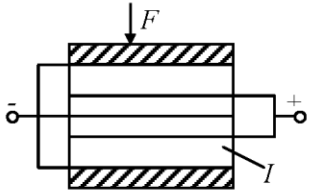
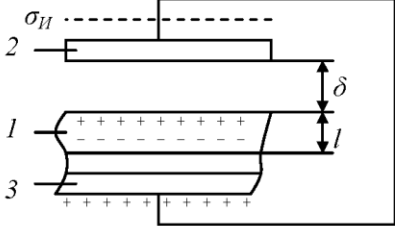
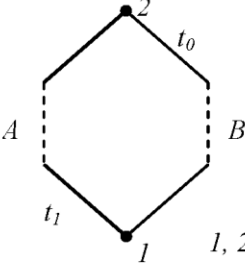
Основні різновиди генераторних перетворювачів наведені у табл.4.

Індукційні перетворювачі

Принцип роботи таких перетворювачів ґрунтується на використанні явища електромагнітної індукції (схема 1 у табл.4).

При лінійних або кутових переміщеннях вимірювальної котушки у відомому магнітному полі наведена в ній е.р.с.

Таблиця 4 – Основні різновиди генераторних перетворювачів

| Тип перетворювачів | Рівняння перетворення |
|---|---|
| <p style="color: red; text-align: center;">1. Індукційні</p>  <p style="margin-left: 100px;">1 - якір 2 - магніт 3 - котушка</p> | $e = nB\omega \sin nt$ <p style="margin-left: 20px;">n – частота обертання; ω – кількість витків котушки; B – індукція в зазорі</p> |
| <p style="color: red; text-align: center;">2. П'єзоелектричні</p>  <p style="margin-left: 100px;">F - сила I - кристал</p> | $d = q / F = CU / F$ <p style="margin-left: 20px;">q – електричний заряд; F – сила; C – ємність; U – напруга</p> |
| <p style="color: red; text-align: center;">3. Електретні</p>  | $E = \frac{Q}{\delta(C_0 + C_1)}$ <p style="margin-left: 20px;">Q – заряд електрета; δ – сумарна довжина; C₀ – ємність електрета; C₁ – ємність повітряного зазору</p> |
| <p style="color: red; text-align: center;">4. Термоелектричні</p>  <p style="margin-left: 100px;">1, 2 - спай</p> | <p style="margin-left: 20px;">Результувальна термо-е.р.с. $e_{AB} = U_{AB}(t_0) + U_{BA}(t_0) + U_B(t_0t_1) + U_A(t_0t_1),$ $U_{AB}(t_0), U_{BA}(t_0) - \text{термо-е.р.с. Зеебека}$ $U_A(t_0t_1), U_B(t_0t_1) - \text{термо-е.р.с. Томсона}$</p> |

П'єзоелектричні перетворювачі

Принцип дії п'єзоелектричних перетворювачів оснований на явищах прямого та зворотного п'єзоєфектів.

Суть прямого п'єзоєфекту полягає в електризації кристалів деяких діелектриків під дією механічних напружень, а зворотного – у виникненні механічної деформації кристала під дією електричного поля.

Особливістю п'єзоєфекту (схема 2 у табл.4) є зміна його знака, тобто при зміні

напряму механічного напруження змінюється полярність електричних зарядів і при зміні полярності електричного поля змінюється напрям механічної деформації, що зумовлює роботу п'єзоелектричних перетворювачів у динамічному режимі. До матеріалів, яким властивий п'єзо ефект, належать кварц, сегнетова сіль, а також п'єзокераміка.

Головні переваги цих перетворювачів: малі габарити, висока надійність, простота конструкції, можливість вимірювати швидкозмінювані параметри.

Їхні недоліки: неможливість вимірювати статичні величини, наявність гістерезису і нелінійності.

Електретні перетворювачі

Під електретом розуміють постійний наелектризований діелектрик із різними полюсами, що має зовнішнє електричне поле. У більш загальному випадку електрет – це діелектрик, що тривало зберігає поляризацію після віддалення зовнішнього електричного поля і створює в навколишньому просторі електричне поле.

Якщо електрет 1 розміщено між металевими пластинами 2 і 3, з'єднаними провідником (схема 3 у табл.4), то на металевих електродах буде виникати наведений заряд.

Електретні перетворювачі можуть використовуватись для вимірювання параметрів вібрацій (електретний мікрофон, телефон), але більше застосування вони знайшли для перетворення тиску навколишнього повітря.

Недолік електретних перетворювачів полягає в тому, що вони зазнають впливу температури. При нагріванні електрет втрачає свої внутрішню поляризацію і поверхневий заряд. Основним фактором, що ускладнює практичне застосування електретів, є складність одержання двох або кількох електретів із різною поверхневою густиною зарядів. І, зрештою, поверхнева густина заряду змінюється в часі, отже, електричне поле поза електретом нестабільне. У той самий час електрет має низьку вартість і просту конструкцію.

Термоелектричні перетворювачі

В основу будови термопар покладено явища Томсона і Зеєбека. Явище Томсона полягає у появі на кінцях однорідного провідника, який має температурний градієнт, деякої різниці потенціалів внаслідок того, що електрони дифундують з гарячого кінця

провідника до холодного. Е.р.с., що виникає при цьому і називається термо-е.р.с. Томсона.

Якщо скласти коло з двох різних провідників a і b (схема 4 у табл.4), то сумарна термо-е.р.с. Томсона дорівнює різниці термо-е.р.с. Томсона кожного провідника.

Явище Зеебека. При з'єднанні двох різнорідних провідників у місці їх контакту виникає контактна різниця потенціалів, зумовлена різною концентрацією носіїв заряду.

Спай термопар, який поміщають в досліджуване середовище, називають робочим або гарячим, а кінці електродів, температура яких підтримується переважно постійною, – вільними або холодними.

Чутливий елемент термоелектричного перетворювача, тобто пару термоелектродів, називають термопарою.

Матеріалами термоелектродів служать сплави хромель, копель, алюмель, вольфрамений, платинородій, а також платина, мідь і залізо. Від назви термоелектродів походить назва типу самого перетворювача, наприклад, перетворювач типу ТХА має електроди з хромелю та алюмелю.

Таблиця 5 – Характеристики термопар

| Тип термопар | Матеріали термоелектродів | Тип НСХП | Діапазон вимірювання, °С |
|--------------|--|----------|--------------------------|
| ТХА | Хромель – Алюмель | ХА(К) | -270 ... +1000 |
| ТХК | Хромель – Копель | ХК(Л) | -200 ... +600 |
| ТПП | Платинородій (10% платина) | ПП(С) | |
| ТВР | Вольфрам – реній ВРS Вольфрам – реній ВР(А)-1 | ВР(А)-1 | 0 ... 2200 |

Фотоелектричні перетворювачі

В основу будови генераторних фотоелектричних перетворювачів покладено явище зовнішнього фото ефекту. До них належать фотодіоди і фототранзистори.

Суть зовнішнього фото ефекту полягає в емісії (випусканні) електронів на поверхні фотокатода у вакуум під дією світлового потоку.

Кванти світла, що досягають фоточутливої поверхні катода, викликають емісію фотоелектронів, які під дією зовнішнього електричного поля створюють фотострум.

Фотоелектричні перетворювачі використовуються для вимірювання як світлових, так і несвітлових неелектричних величин. Прикладами використання фотоелектричних перетворювачів є швидкість обертання, кут повороту, кутова швидкість, обертальний момент та ін.

Розглянемо застосування фотоелектричних перетворювачів в сенсорах швидкості.

Принцип дії фотоелектричного сенсора швидкості ґрунтується на модуляції освітлення робочої поверхні фотоелектричного елемента числом обертів (частотою обертання n).

Із великої кількості фотоелектричних перетворювачів найбільш поширені сенсори з перериванням світлового потоку. Світловий потік спрямовується оптичною системою на обертаний диск і після переривання потрапляє на фотоелемент, який реєструє імпульс фотоструму.

Фотоелектричні перетворювачі використовуються для вимірювання частоти обертання та інших фізичних величин, функціонально пов'язаних з нею. Їхні переваги: широкий діапазон вимірювання (від 10^{-3} до 10^6 об/хв), простота конструкції, мале навантаження на об'єкт вимірювання, висока заводостійкість, практично необмежений строк служби.

Недоліки: похибка, зумовлена нерівномірним нанесенням отворів (прорізів, поділок, позначок); похибка від ексцентриситету між центром диска і віссю вала, на якому він встановлений.

Принцип дії перетворювачів кутових переміщень

Перетворювачі кутових переміщень знайшли широке застосування в електроенергетиці та електромеханіці для вимірювання кутових переміщень, кутових швидкостей та прискорень. Вони здійснюють перетворення кутового переміщення в послідовність електричних сигналів, яка містить інформацію про значення і напрямок інформативного сигналу.

Принцип дії перетворювачів кутових переміщень засновано на фотоелектричному зчитуванні растрових і кодових спряжень, реєстрації відносної величини потоку оптичного випромінювання, що пройшло через растрове спряження, як координатно-періодичної функції взаємного кутового положення регулярного растра шкали і растрів вікон аналізатора.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Клещев М. Ф. Оцінка якості та безпечності продукції : навч. посіб. / М. Ф. Клещев, Т. Д. Костиркіна, Н. Ю. Масалітіна. – Харків : НТУ «ХП», 2011. – 256 с.
2. Микийчук М. М. Метрологічне забезпечення виробництва : навч. посіб. / М. М. Микийчук. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2017. – 228 с.
3. Основи метрології та вимірювальної техніки : підручник : у 2 т. / М. М. Дорожовець, В. П. Мотало, Б. І. Стадник та ін. ; за ред. Б. І. Стадника. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – Т. 1. Основи метрології. – 532 с.
4. Основи метрології та вимірювальної техніки : підручник : у 2 т. / М. М. Дорожовець, В. П. Мотало, Б. І. Стадник та ін. ; за ред. Б. І. Стадника. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – Т. 2. Вимірювальна техніка. – 656 с.
5. Основи стандартизації та сертифікації : підручник / О. М. Величко, В. Ю. Кучерук, Т. Б. Гордієнко, В. М. Севастьянов ; за загал. ред. О. М. Величка. – Стереотип. вид. – Херсон : Олді-плюс, 2019. – 364 с.
6. Пізінцалі Л. В. Метрологія, стандартизація, системи якості. Практикум : навчальний посібник / Л. В. Пізінцалі, Н. І. Александровська, В. В. Добровольський; за заг. редакцією Л. В. Пізінцалі. – Стереотипне видання. – Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2019. – 264 с.
7. Технічне регулювання та підтвердження відповідності в Україні : підручник / С. Т. Черепков, С. І. Кондрашов, М. М. Будьонний та ін. – Харків : Вид-во «Підручник НТУ «ХП», 2010. – 440 с.
8. Топольник В. Г. Метрологія, стандартизація, сертифікація і управління якістю : навч. посіб. / В. Г. Топольник, М. А. Котляр. – Львів : Магнолія 2006, 2017. – 216 с.
9. Журнал «Метрологія для підприємства» 2020-2022 роки видання.

ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ

1. Національний науковий центр «Інститут метрології»

<http://www.metrology.kharkov.ua/index.php?id=1&L=0>

2. Реєстр затверджених типів засобів вимірювальної техніки:

<https://legalzvt.kiev.ua>

<https://data.gov.ua/dataset/a507fe14-87d0-4da3-bd25-8ffb6e7cab1e>

3. Верховна Рада України «Про метрологію та метрологічну діяльність»

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#Text>

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/117-2016-%D0%BF#Text>

4. Інтернет бібліотеки:

- <http://www.nbuv.gov.ua> - Національна бібліотека України імені Вернадського;

- <http://lib.toxy.cv.ua>. – бібліотека технічної літератури;

- <https://library.tntu.edu.ua> - бібліотека науково-технічної літератури;

- <http://www.nit.kiev.ua> - електронна бібліотека Наука та Техніка.