

Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича

Конспект лекцій з навчальної дисципліни
**“Перетворювачі та пристрої
вимірювальної техніки”**
для студентів спеціальності «Метрологія та інформа-
ційно-вимірювальна техніка» відділу Інфокомунікацій
та інженерії

Чернівці
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича
2021

Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича

Конспект лекцій з навчальної дисципліни
“Перетворювачі та пристрої вимірювальної техніки”
для студентів спеціальності «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» відділу Інфокомунікацій та інженерії

*Ухвалено Методичною радою відділу Інфокомунікацій та інженерії
(протокол № 10 від 29. 05. 2021 р.)*

Чернівці
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича
2021

Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Перетворювачі та пристрої виміральної техніки» для студентів всіх форм навчання спеціальності «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка» відділу Інфокомунікацій та інженерії. / Уклад.: О.Д. Архелюк – Чернівці.: ЧНУ імені Юрія Федьковича 2021. – 51 с.

Навчальне видання

Конспект лекцій з навчальної дисципліни

ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА ПРИСТРОЇ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Укладач: *Архелюк Олександр Дмитрович, канд. фіз.-мат. наук, доц.*

Описано курс лекцій з перетворювачів та пристроїв виміральної техніки. Наведено основні характеристики та принципи роботи датчиків. Описано принцип роботи основних типів датчиків.

Відповідальний редактор

Макимьяк Петро Петрович, докт. фіз.-мат. наук, професор.

Зміст	
Вступ	5
1. Класифікація вимірювальних перетворювачів	5
1.1. Основні поняття і визначення	5
2. Основні характеристики та принципи роботи датчиків	9
2.1. Поняття «датчик». Класифікація датчиків	9
2.2. Характеристики датчиків	16
2.2.1. Вимірювальна величина	16
2.2.2. Функція перетворення	16
2.2.3. Чутливість	17
2.2.4. Поріг чутливості	17
2.2.5. Межа перетворень	18
2.3. Метрологічні характеристики	18
2.3.1. Надійність	19
2.3.2. Експлуатаційні характеристики	20
2.4. Принципи вибору датчиків	20
3. Основні датчики	23
3.1. Класифікація ВП	23
3.2. Резистивні ВП	24
3.3. Тензорезистивні датчики	25
3.4. Терморезистивного датчики	27
3.5. Термоелектронний перетворювач (термопара)	30
3.6. Безконтактне вимірювання температури	31
3.7. Ємнісні датчики	34
3.8. Індуктивні датчики	37
3.8.1. Індуктивний датчик на дроселі	38
3.8.2. Диференціальні індуктивні датчики	40
3.8.3. Трансформаторні датчики	41
3.9. Індукційні датчики	41
3.10. П'єзоелектричні датчики	43
3.11. Оптичні датчики	44
3.11.1. Фотоелектричні датчики положення	45
3.11.2. Растрові оптичні датчики положення	45
3.11.3. Кодові оптичні датчики положення	46
Контрольні питання до курсу	49
Література	50

Вступ

Вимірювальний перетворювач — технічний засіб з нормованими метрологічними характеристиками, що служить для перетворення вимірюваної величини в іншу величину або вимірювальний сигнал, зручний для обробки, зберігання, подальших перетворень, індикації та передачі, але оператор, що не сприймається безпосередньо. ВП або входить до складу будь-якого вимірювального приладу (вимірювальної установки, вимірювальної системи та ін.), або застосовується разом із будь-яким засобом вимірювань.

1. Класифікація вимірювальних перетворювачів

1.1. Основні поняття і визначення

Вимірювальне перетворення являє собою відображення розміру однієї фізичної величини розміром іншої фізичної величини, функціонально з нею пов'язаної. Застосування вимірювальних перетворень є єдиним методом практичної побудови будь-яких вимірювальних пристроїв. Фізичною основою вимірювального перетворення є перетворення і передача енергії, зокрема перетворення одного виду енергії в інший. Існує цілий ряд причин, за якими найбільш доцільно для отримання вимірювальної інформації перетворення різних фізичних величин в електричні (струм, напруга, опір).

Найбільш істотні переваги такого перетворення:

- Зручність відтворення одиниці вимірювання. В даний час є величезна різноманітність заходів – носіїв одиниць електричних величин. Ці заходи електричних величин при високій точності відтворення одиниці вимірювання мають прийнятну вартість і придатні для використання при вирішенні найширшого кола вимірювальних завдань.

- Зручність порівняння електричних величин та в тому числі вимірюваної електричної величини і одиниці її вимірювання. Дана операція легко і з високою точністю вирішується за допомогою сучасних електронних засобів.

- Висока точність перетворень і вимірювань. Відносна похибка сучасних вимірювальних приладів та перетворювачів для вимірювання електричних величин, не перевищує часток відсотка і, як правило, є набагато меншою в порівнянні з допустимою похибкою вимірювання перетвореної в електричний сигнал вимірюваної фізичної величини.

- Простота зміни чутливості в широкому діапазоні значень вимірюваної величини. Для цього ефективно використовуються електронні підсилювачі і подільники електричних сигналів.

- Висока швидкодія вимірювання електричних сигналів. Сучасні електронні засоби дозволяють перетворювати електричні сигнали, які мають тривалість близько одиниць - десятків пікосекунд.

- Можливість автоматизації. Сучасні електричні прилади і перетворювачі дозволяють повністю виключити участь людини на всіх стадіях вимірювання.

- Зручність передачі інформації. Обумовлено відносною простотою передачі електричних сигналів по каналах дротового і бездротового зв'язку на великі відстані і без втрат вимірювальної інформації.

- Можливість дистанційних вимірювань. Останнє обумовлено в свою чергу згаданими раніше можливостями автоматизації електричних вимірювань і передачі вимірювальної інформації на великі відстані.

- Зручність зберігання інформації. Для цих цілей можуть бути використані будь-які сучасні запам'ятовуючі електронні пристрої, як оперативного, так і довготривалого характеру.

У зв'язку з вищесказаним переважна більшість засобів вимірювальної техніки будується на принципі перетворення вимірюваної фізичної величини в електричний сигнал. Таке перетворення будемо класифікувати як пряме вимірювальне перетворення. Відповідно перетворення електричних величин в неелектричні, що використовується зокрема для побудови джерел різних фізичних полів, реалізації методів вимірювання порівняння або заміщення, будемо класифікувати як зворотне вимірювальне перетворення.

Слід зауважити, що взаємозв'язок різних фізичних величин, перетворення одного виду енергії в інший або в більш загальному плані – найбільш загальні форми руху матерії, що вивчаються фізикою, можуть використовуватися для вирішення найрізноманітніших практичних задач. На одних і тих же фізичних явищах можуть будуватися як вимірювальні перетворення, так і енергетичні, призначені для перетворення потоків енергії. Наприклад, явище електромагнітної індукції використовується у вимірювальній техніці для вимірювання швидкості обертання, характеристик магнітних полів і матеріалів, а в енергетиці – для вироблення електричної енергії рідиною або газом, що обертається електричною турбіною.

Явище проникнення іонізуючих випромінювань через речовину може бути використано як для вирішення вимірювальних завдань: товщинометрії, дефектометрії, так і для впливу на біологічні об'єкти в медичних і військових цілях. Але якщо в разі енергетичних (їх ще часто називають силовими) перетворень основний інтерес представляє коефіцієнт корисної дії, що показує яка частина перетвореної енергії використовується з користю, то в разі вимірювальних перетворень на перший план виходять інші критерії ефективності перетворення: ступінь залежності результату перетворення від перетворюваної величини (коефіцієнт перетворення або чутливість), лінійність функції перетворення, інерційність перетворення, характер залежності від впливу зовнішніх факторів і т.п. Вимірювальні перетворення здійснюються за допомогою вимірювальних перетворювачів. Вимірювальний перетворювач – технічний засіб, що служить для перетворення вимірюваної величини в іншу величину або сигнал вимірювальної інформації, зручний для обробки, зберігання, подальших перетворень, індикації або передачі і має нормовані метрологічні характеристики.

Існує велика кількість класифікаційних ознак вимірювальних перетворювачів. Відзначимо тут лише ті, які є важливими для даного розділу вимірювальної техніки. Залежно від виду вихідного сигналу розрізняють генераторні і параметричні вимірювальні перетворювачі. До генераторних відносяться перетворювачі, вихідні сигнали яких мають енергетичні властивості (ЕРС, електричний струм, механічна сила, тиск). Параметричними називаються перетворювачі, в яких зміна вхідного сигналу призводить до зміни їх певних параметрів – активного опору, ємності, індуктивності, пружності і ін. Для отримання енергетичного сигналу в цих випадках потрібні додаткові джерела енергії. За місцем у функціональній схемі вимірювання розрізняють первинні вимірювальні перетворювачі, на які безпосередньо впливає величина, що перетворюється, і проміжні, які стоять в ланцюзі перетворення після первинного. Різновидами проміжних вимірювальних перетворювачів за функціональним призначенням є передавальні і масштабні перетворювачі. Передавальний вимірювальний перетворювач – вимірювальний перетворювач, призначений для дистанційної передачі сигналу вимірювальної інформації. Масштабний вимірювальний перетворювач – вимірювальний перетворювач, призначений для зміни розміру величини або вимірювального сигналу в задану кількість разів.

За характером перетворення проміжні вимірювальні перетворювачі розрізняють на: аналоговий, аналого-цифровий і цифро-аналоговий. Аналоговий вимірювальний перетворювач – вимірювальний перетворювач, що перетворює одну аналогову величину (аналоговий вимірювальний сигнал) в іншу аналогову величину (вимірювальний сигнал). Аналого-цифровий вимірювальний перетворювач – вимірювальний перетворювач, призначений для перетворення аналогового вимірювального сигналу в цифровий код. Цифро-аналоговий вимірювальний перетворювач – вимірювальний перетворювач, призначений для перетворення числового коду в аналогову величину. Відповідно до предмету розгляду даної книги в подальшому увага приділятиметься переважно первинним вимірювальним перетворювачам.

Для характеристики первинних вимірювальних перетворювачів може використовуватися термін датчик. Датчик – конструктивно відокремлений первинний вимірювальний перетворювач. В області вимірювань іонізуючих випромінювань датчик називають детектором. У ряді випадків в російськомовній літературі використовується англійський термін сенсор (від англійського sensor). За робочого положення щодо об'єкта вимірювання (контролю) вимірювальні перетворювачі ділять на прохідні, накладні і комбіновані. Складові елементи накладних перетворювачів розташовуються з одного боку об'єкта вимірювання. Прокідні перетворювачі в процесі вимірювання або охоплюють об'єкт зовні (зовнішні прохідні), або поміщаються всередині об'єкта (внутрішні прохідні), або занурюються в рідкий об'єкт (заглибні). Комбіновані перетворювачі являють собою конструкцію з

накладних і прохідних перетворювачів. Особливий різновид являють собою екранні перетворювачі, що відрізняються тим, що їх складові елементи, що створюють і сприймають фізичне поле, розділені контрольованим об'єктом. За характером залежності вихідного сигналу первинного вимірювального перетворювача від перетворюваного параметра об'єкта вимірювання розрізняють абсолютний і диференціальний вимірювальні перетворювачі.

Вихідний сигнал абсолютного вимірювального перетворювача визначається абсолютним значенням перетворюваного параметра об'єкта вимірювання (термін абсолютний тут використовується в значенні безвідносний, безумовний). Термін диференціальний походить від англійського different – різний, різницевий. Умовно можна вважати, що диференціальний вимірювальний перетворювач складається з двох однотипних абсолютних перетворювачів, на які перетворена величина впливає по-різному, а результуючий вихідний сигнал визначається різницею вихідних сигналів окремих перетворювачів. Диференціальні вимірювальні перетворювачі, а також диференціальне включення окремих абсолютних вимірювальних перетворювачів використовують для коригування функції перетворення (в тому числі з метою забезпечення нульового значення вихідного сигналу при нульовому значенні перетворюваного параметра, підвищення лінійності функції перетворення), а також компенсації впливу на результат перетворення будь-якого заважаючого фактора A .

Для системного вивчення фізичних явищ і законів, покладених в основу різних вимірювальних перетворень доцільно використовувати класифікацію вимірювальних перетворень і, відповідно, вимірювальних перетворювачів, з вигляду фізичного поля, через яке здійснюється вплив перетвореної величини на первинний вимірювальний перетворювач (рис. 1). Величина, що вимірюється, при цьому впливає на ті чи інші характеристики фізичного поля або характеристики матеріалів чи предметів в даному фізичному полі. У наступних розділах послідовно розглядаються вимірювальні перетворення в електричних, магнітних, вихорострумівих, радіохвильових, акустичних, теплових полях, полях оптичних та іонізуючих випромінювань, а також пружних деформацій.

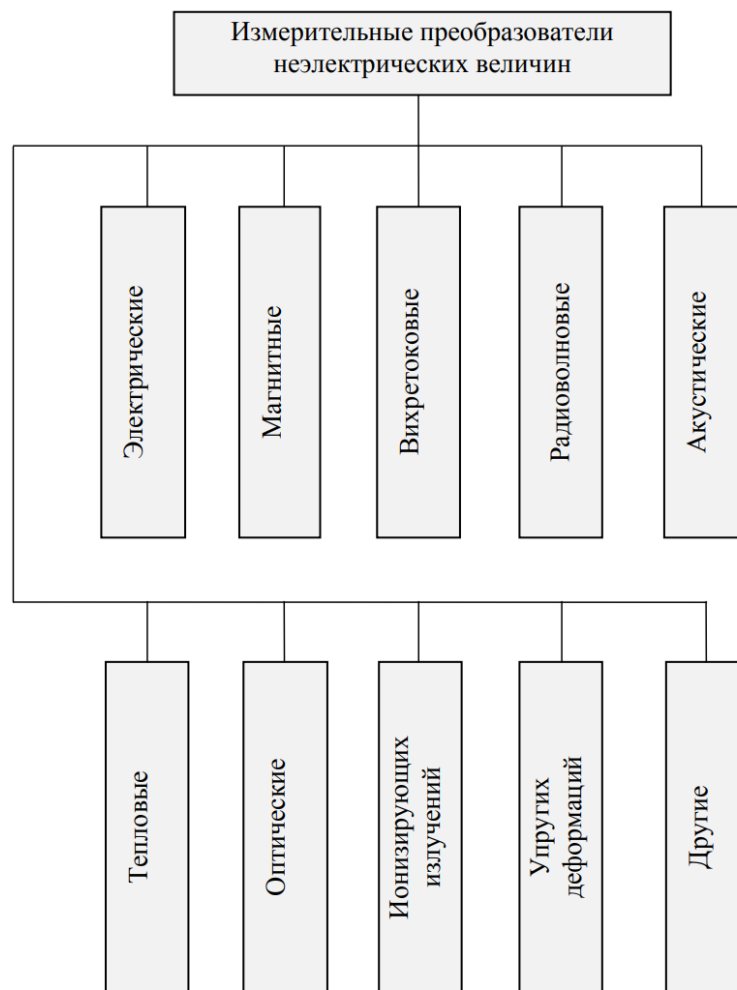


Рис. 1. Класифікація первинних вимірювальних

2. Загальні питання будови та застосування датчиків

2.1. Поняття «датчик». Класифікація датчиків

Світ датчиків надзвичайно різноманітний: 1) велике число вимірюваних фізичних величин, або параметрів досліджуваного об'єкта (температура, теплові потоки, тиск, витрати, швидкості і т.д.); 2) різноманітність фізичних залежностей, використовуваних для вимірювальних перетворень (терморезистивний, термоелектричний, фотоелектричний, п'єзоелектричний та інші ефекти); 3) різноманітність сучасних об'єктів вимірювання, які зумовлюють специфіку вимог до датчиків і вимірюваннями в цілому (ракетно-космічна техніка, авіація, суднобудування, енергетика, атомна техніка, загальнопромислові об'єкти і т.д.); різноманітність параметрів і характеристик самих датчиків (чутливість, діапазон вимірювань, швидкодія, точність, надійність, приєднувальні розміри, глибина занурення чутливого елемента і т.д.).

Будь-який новостворюваний технічний об'єкт, особливо складний, потребує експериментального відпрацювання та перевірки закладених в нього проектних рішень і розрахунків. У процесі таких випробувань саме датчикам відводиться

роль сприйняття і первинного перетворення інформації про досліджуваний об'єкт. Для цього датчики повинні найбільш точно відповідати умовам вимірювань, а вимірювальні процедури в наступних ланках інформаційно-вимірювальної системи повинні по можливості звільнити результати вимірювань від нашарувань похибок в доцільних і при цьому допустимих межах. Власні похибки датчика є результатом не тільки технічних недосконалостей, але і є теоретичною неминучістю. Помилки датчиків ніколи не можуть бути повністю виключені або зроблені нескінченно малими. Прагнення отримати більше інформації від датчика (підвищити його точність вище доцільних меж) неминуче веде або до його надзвичайної вразливості і в результаті до непрацездатності, або до такого місцевого зростання ентропії, що буде порушений сам досліджуваний процес. Тому при проектуванні датчиків стосовно конкретної вимірювальної задачі, або при виборі датчика з числа існуючих, повинна бути досягнута гармонія між метрологічними і надійнісними характеристиками датчика для даних умов вимірювань. Саме цими міркуваннями обмежується можливість забезпечення «універсальності» датчиків, до якої прагнуть проєктанти в спробах обмежити їх номенклатуру, і пояснюється досить значне представництво різноманітних «спеціальних» датчиків, що розробляються «під завдання».

Однак універсальність датчиків передбачає масовість їх використання та виготовлення і, отже, високу технологічність і таким чином, у викладеному трактуванні датчик – це самостійний, конструктивно автономний засіб вимірювань, що розміщується в місці відбору інформації, яка виконує функцію первинного перетворення вимірюваної фізичної величини в електричну або електромагнітну величину, що складається з мінімально необхідного числа ланок перетворення вимірюваної величини, яка володіє однозначною функцією перетворення і необхідними для даних цілей вимірювань взаємно узгодженими метрологічними і надійнісними характеристиками.

Такий сенс, тим самим вкладений в поняття «датчик», дозволяє одночасно забезпечити високу технологічність базових конструктивів датчиків і будувати на їх основі уніфіковані ряди датчиків, що відповідають інтересам вимірювань всього різноманіття об'єктів техніки, що в спеціальних датчиках може бути реалізовано лише в рідкісних випадках.

Незважаючи на звичність терміна «датчик», є необхідність дати змістовне визначення цього поняття. У вітчизняній і зарубіжній практиці і літературі поряд з терміном «датчик» отримали поширення терміни «первинний вимірювальний перетворювач» і «сенсор».

Головним достоїнством терміна «датчик» є лаконічність, традиційність і звичність (що втім, чимала). Термін «первинний вимірювальний перетворювач» базується на розумінні вимірювального процесу як послідовності перетворень, де датчику відводиться роль першої ланки – перетворювача фізичної вимірюваної величини у величину, придатну для подальшого перетворення або сприйняття. У

цьому сенсі термін «первинний вимірювальний перетворювач» і точний, і змістовний. Єдиним його недоліком є його деяка громіздкість.

Термін «сенсор» набув значного поширення за кордоном і є там синонімом терміна «датчик». Його походження від англійського sense – відчувати, що точніше, ніж «датчик», але менш повне і змістовне, ніж «первинний вимірювальний перетворювач». У вітчизняній офіційній термінології термін «первинний вимірювальний перетворювач» не допускається [1], а термін «сенсор» зв'язується з мікроелектронними технологіями і трактується як «вимірювальний перетворювач фізичних величин, що не вимагає обов'язкової метрологічної атестації як самостійний засіб вимірювань» [2]. У такій інтерпретації «сенсор» – це такий собі напівфабрикат датчика.

Тим часом, ці термінологічні непорозуміння легко усунути, якщо між трьома термінами поставити знак офіційної тотожності. В іншому випадку, якщо вкладати різний зміст у терміни «датчик» і «сенсор», то виникнуть неминучі труднощі при перекладах вітчизняних публікацій в зарубіжних виданнях.

Перш, ніж дамо остаточне визначення терміну «датчик», уявімо загальну картину взаємодії датчика з об'єктом вимірювання.

В принципі, датчики призначаються для вимірювань параметрів чотирьох агрегатних станів речовини: тверде тіло (метали, діелектрики, напівпровідники, композитні матеріали); рідини (кріогенні, висококиплячі, розплавлені метали); гази (спокійні гази і газові потоки при тисках від глибокого вакууму до високих тисків): плазма (низькотемпературна щільна плазма, високотемпературна розріджена).

Вимірюванням підлягають фізичні параметри різних об'єктів і конструктивних елементів і їх робочих продуктів.

Вимірювані величини можуть характеризуватися тимчасовими (стаціонарні, динамічні, безперервні, дискретні), просторовими (зосереджені, розподілені), кореляційними (незалежні, залежні) властивостями. Апріорні відомості про ці властивості дозволяють здійснити розробку нових датчиків і вибір існуючих датчиків, визначити місця їх установки, їх кількість на об'єкті вимірювання.

Переважає більшість датчиків є контактними, тобто вони встановлюються на об'єкті вимірювання в місцях безпосереднього вимірювання досліджуваних параметрів. Найважливішим фундаментальним фактом є те, що, як правило, це місця концентрованого одночасного впливу багатьох фізичних факторів. Датчик повинен бути надійно захищений від руйнівної дії цих факторів (механічна надійність), а також повинен володіти селективністю по відношенню до вимірюваного параметру і незалежністю (в межах допустимої похибки) по відношенню до всіх інших факторів (метрологічна надійність).

Процес взаємодії датчика з об'єктом вимірювань – це процес обопільний. Вимірювання коректне остільки, оскільки установка датчика на об'єкт вимірів не змінює фізичну картину досліджуваного процесу, не привносить

яких-небудь особливостей в поведінку вимірюваного параметра. Це умова необхідна, але не достатня. Вимірювання також коректні остільки, оскільки датчик здатний сприйняти і правильно відтворити дійсне поведінку вимірюваного параметра в часі.

Викладені міркування призводять до сукупності вимог до датчиків не тільки взаємосуперечливих, але навіть і взаємовиключних. У зв'язку з цим вирішення цих протиріч при проектуванні датчиків досягається призначенням тих чи інших цільових функцій і рішенням оптимізаційних завдань, які найчастіше строго аналітично не вирішуються.

Описані в загальному вигляді процеси взаємодії датчика з об'єктом вимірювання і перетворення в ньому вимірюваної величини дозволяють формалізувати узагальнену структурну схему будь-якого гіпотетичного датчика в наступному вигляді (рис. 2).

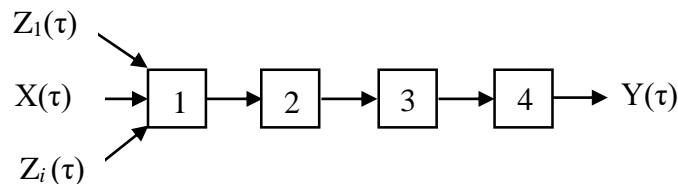


Рис. 2. Структурна схема гіпотетичного датчика: 1 – ланка сприйняття вхідного впливу і одночасного захисту датчика; 2 – ланка передачі вхідного впливу до чутливого елемента і одночасного захисту чутливого елемента; 3 – чутливий елемент - перетворювач вимірюваної величини (вже перетвореної попередніми ланками) в електричний або електромагнітний параметр датчика; 4- пристрій, що погодить (вимірювальна ланцюг) за потребою входить до складу датчика; $X(\tau)$ – величина, яка вимірюється (τ - час), вхідний вплив; $Y(\tau)$ – вихідна величина датчика; $Z_1(\tau) \dots Z_i(\tau)$ – впливають (дестабілізуючі) фактори.

Принципова можливість залежності вихідної величини датчика $Y(\tau)$ не тільки від вхідних вимірюваної величини $X(\tau)$, але і від впливаючих величин $Z_i(\tau)$ привела до поділу функції перетворення датчика на «реальну» і «номінальну». Під «реальною» розуміють функцію, яка відображатиме комбіновану залежність, а під «номінальною» – тільки залежність $Y(\tau) = F[X(\tau)]$. Зауважимо, що «реальна» функція перетворення настільки ж невизначена, як в загальному випадку невизначені самі впливаючі величини.

У конкретних реалізаціях датчиків ті чи інші ланки можуть бути відсутніми або їх функції можуть бути виражені неявно. Разом з тим може бути кілька ланок одного і того ж призначення, наприклад ланка 2. Послідовність перетворень в кожному конкретному датчику завжди конкретна, але важливо те, що вона укладається в пропоновану структурну схему.

«Номінальна» ж функція перетворення описує той процес перетворення, заради якого датчик створювався.

Кожен датчик може і повинен бути описаний оператором, що встановлює однозначний зв'язок між його вхідною – $X(\tau)$ і вихідною $Y(\tau)$ величинами. Цей оператор визначає як статичні, так і динамічні характеристики датчика.

Якщо оператор лінійний (для нього справедливий принцип суперпозиції), то такі датчики можуть називатися лінійними.

Залежно від структури фізичної моделі датчика і моделі його взаємодії з середовищем, датчики можуть розглядатися як із зосередженими параметрами (вхід представимо у вигляді точки), так і з розподіленими параметрами (вхід розподілений за деякою поверхнею). Відповідно датчики з зосередженими параметрами описуються звичайними диференціальними рівняннями, а датчики з розподіленими параметрами – рівняннями в часткових похідних або за допомогою більш складних уявлень.

Порядок рівняння визначає порядок датчика.

Датчик з зосередженими параметрами першого порядку аперіодичного типу

$$\frac{dY(\tau)}{d\tau} + aY(\tau) = bX(\tau),$$

де a і b – постійні коефіцієнти.

Таким чином, описуються численні датчики різних типів.

Датчик температури з однорідною структурою

$$\frac{dt_d(\tau)}{d\tau} + at_d(\tau) = at_1(\tau),$$

де t_d - температура датчика (однозначно визначає його вихідний параметр); $a = \alpha S / (mc)$; (α – коефіцієнт конвективного теплообміну датчика із середовищем; S – площа вимірювальної поверхні датчика; m – маса вимірювальної частини датчика; c – питома теплоємність матеріалу датчика); t_1 – вимірювана температура.

Крильчастий анемометр – датчик вимірювання швидкості потоку

$$I \frac{d\omega(\tau)}{d\tau} + \mu\omega(\tau) = b\nu^2(\tau),$$

де I – момент інерції крильчатки; ω – кутова швидкість обертання крильчатки; μ – коефіцієнт сил в'язкого тертя; b – константа датчика; ν – вимірювана швидкість потоку.

Датчик тиску мембранного типу з розділовою порожниною:

$$a \frac{dP_d(\tau)}{d\tau} + P_d(\tau) = P(\tau), \quad (1)$$

де α – константа, яка визначається обсягом порожнини, коефіцієнтом динамічної в'язкості середовища; P_D – тиск в розділовій порожнини датчика; P – вимірюваний тиск на вході в датчик.

Датчик з зосередженими параметрами другого порядку аперіодичного і коливального типу

$$dY^2 \Rightarrow d^2Y$$

$$\frac{d^2Y(\tau)}{d\tau^2} + c \frac{dY(\tau)}{d\tau} + aY(\tau) = bX(\tau). \quad (2)$$

Переважає більшість датчиків описується саме таким типом рівняння. Датчик температури в захисній оболонці (неоднорідна структура, чутливий елемент ізольований від оболонки). Оболонка вважається тонкою, однорідної, і в ній відсутні градієнти температури. У цьому випадку

$$\frac{d^2t_D(\tau)}{d\tau^2} + c \frac{dt_D(\tau)}{d\tau} + at_D(\tau) = bt_1(\tau), \quad (3)$$

де

$$c = \lambda \left(\frac{S_E}{c_E} + \frac{S_0}{c_0} \right) + \alpha_0 \frac{S_0}{c_0};$$

λ – коефіцієнт теплопровідності проміжку між чутливим елементом і оболонкою; S_E і S_0 – площі поверхні ЧЕ і оболонки; c_E і c_0 – повні теплоємності ЧЕ і оболонки; α_0 – коефіцієнт конвективного теплообміну оболонки із середовищем;

$$a = \lambda \frac{S_E}{c_E} \alpha_0 \frac{S_0}{c_0}; \quad b = \lambda \frac{S_E}{c_0} \alpha_0 \frac{S_E}{c_0};$$

Датчик вібраційних прискорень

$$m \frac{d^2X(\tau)}{d\tau^2} + k \frac{dX(\tau)}{d\tau} + \sigma X(\tau) = ma(\tau). \quad (4)$$

де m – інерційна маса датчика; k – коефіцієнт демпфірування датчика; σ – жорсткість пружного елемента; a – вимірюване прискорення.

Датчик тиску мембранного типу

$$m \frac{d^2X_D(\tau)}{d\tau^2} + k \frac{dX_D(\tau)}{d\tau} + \sigma X_D(\tau) = P_I(\tau). \quad (5)$$

де m – маса мембрани; X_D – прогин мембрани; k – коефіцієнт демпфірування коливальних мембрани; σ – жорсткість мембрани; P_I – вимірюваний тиск.

Більш повний і змістовний опис датчика може бути отримано при його розгляді як системи з розподіленими параметрами.

Датчики з розподіленими параметрами

Датчик температури будь-якої складної структури

$$\frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = a_T \nabla^2 t(x, y, z, \tau) \quad (6)$$

гранична умова (на поверхні датчика):

$$\lambda \frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial n} t_S + \alpha [t(x, y, z, \tau) t_S - t_I(\tau)] = 0$$

(Рівність теплових потоків, що підводиться і відводиться на поверхні датчика – S),

де α_T – коефіцієнт температуропровідності матеріалу датчика;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу датчика;

n – нормаль до поверхні датчика;

α – коефіцієнт конвективного теплообміну датчика із середовищем;

t_S – температура на поверхні датчика;

t_I – вимірювана температура.

Датчик тиску мембранного типу

$$E \left[\frac{\partial^2 X(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial X(r, \tau)}{\partial r} \right] + P_I(\tau) = k \frac{\partial X(r, \tau)}{\partial \tau} + m_s \frac{\partial^2 X(r, \tau)}{\partial \tau^2}$$

(7)

гранична умова:

$$X(r, \tau)|_{r=R} = 0,$$

де E – пружний коефіцієнт матеріалу мембрани; X – прогин мембрани; r – поточний радіус мембрани; k – коефіцієнт демпфірування мембрани; m_s – погонна маса поверхні мембрани; R – радіус мембрани.

Рішення рівнянь (1) – (6) з різним ступенем наближення для різних структур датчиків дозволяє для апріорно відомих умов використання створювати різноманітні датчики з прогнозованими метрологічними характеристиками.

Для загальної методології проектування датчиків видається принциповою необхідність їх обґрунтованої класифікації по істотним незалежним класифікаційними ознаками. Ця класифікація не може і не повинна претендувати на повний, докладний опис датчика, але повинна визначати його принципову належність до класифікаційної групи.

Класифікаційні ознаки:

- параметр, вимірюваний датчиком;
- агрегатний стан об'єкта вимірювання;
- принцип перетворення в чутливому елементі датчика;
- число компонент параметра (якщо параметр – величина векторна) або число параметрів, що вимірюються датчиком.

Дана загальна класифікація не тільки не виключає, але й передбачає можливість і необхідність в ряді випадків розгалуженої класифікації всередині кожного типу датчиків.

2.2. Характеристики датчиків

Кожен датчик може бути описаний безліччю характеристик, сукупність яких дозволяє порівнювати датчики між собою, цілеспрямовано вибирати датчики, найбільш відповідні конкретним завданням вимірювань, оцінювати достовірність отриманої за допомогою датчиків вимірювальної інформації.

2.2.1. Вимірювальна величина

Вимірювальна величина – є головною вказівкою на призначення датчика. При цьому необхідно обов'язкове зазначення на те, до якого агрегатного стану об'єкта вимірювань відноситься вимірювана величина (температура твердої поверхні, надзвукового газового потоку, розрідженого спокійного газу, розплавленого металу і т.д.).

Нерідко замість вимірювальної величини використовується поняття «природна вхідна величина». Зауважимо, що ці поняття не є синонімами. Як правило, групам різних вимірюваних величин може відповідати одна і та ж природна вхідна величини. Наприклад, в датчиках сили, моменту сили, деформації, тиску, тиску акустичних шумів і т.д. найчастіше природною вхідною величиною є сила, яка в датчику спочатку перетвориться в деформацію, переміщення і т.д. Природна вхідна величина, робить основний вплив на реакцію датчика на тлі інших чинників, що мають дестабілізуючий, шумовий характер.

2.2.2. Функція перетворення

Функція перетворення датчика є функціональною залежність вихідної його величини від вимірюваної величини

$$Y = f(X) \quad (1.4)$$

Залежність представляється в іменованих величинах: Y – в одиницях вихідного сигналу чи параметра датчика; X – в одиницях вимірюваної величини, наприклад $\text{Ом}/^\circ\text{C}$; mV/K і т.д. Функцію перетворення часто називають градуювальною характеристикою.

У загальному випадку, оскільки значна частина датчиків призначається для вимірювання динамічних, тобто мінливих в часі процесів, функція перетворення представляється у вигляді тимчасової залежності:

$$Y(t) = f[X(t)] \quad (1.5)$$

Як зазначалося в 1.1, цей взаємозв'язок найчастіше представляється в формі диференціальних рівнянь (звичайних або в часткових похідних) з постійними коефіцієнтами. У тих випадках, коли коефіцієнти виявити важко, вдаються до отримання функції перетворення за допомогою частотних або часових тестових впливів.

Так при впливі на датчик синусоїдального вхідного впливу з частотою $\omega = 2\pi\nu$, і отримуючи відгук датчика в необхідній смузі частот, отримують його функцію перетворення в формі амплітудно-частотної або фазової характеристики:

$$\frac{Y_m}{X_m} = f(\omega); \angle \dot{Y}_m, \angle \dot{X}_m = \varphi(\omega), \quad (8)$$

тобто в формі модуля і кутового аргументу відношення вихідної величини до вхідної.

У комплексній площині ці характеристики можуть бути об'єднані:

$$\frac{Y_m}{X_m} e^{i\varphi} = G(i\omega) = P(i\omega) + iQ(\omega), \quad (9)$$

де

$$|G(i\omega)| = Y_m/X_m = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad \varphi(\omega) = \text{arctg}(Q/P) \quad (10)$$

2.2.3. Чутливість

Чутливість датчика - відношення приросту вихідної величини датчика до збільшення його вхідної величини:

$$S = \frac{\partial Y}{\partial X}$$

Для лінійної частини функції перетворення чутливість датчика постійна. Чутливість датчика характеризує ступінь досконалості процесу перетворення в ньому вимірюваної величини.

2.2.4. Поріг чутливості

Поріг чутливості датчика – мінімальна зміна значення вхідної величини, яке можна впевнено виявити. Поріг чутливості пов'язаний як з природою самої вимірюваної величини, так і з досконалістю процесу перетворення вимірюваної величини у датчику.

Межа порога чутливості впливає з інформаційно енергетичної теорії вимірювальних пристроїв [8,9]:

$$C = W_{\text{ш}}/\eta_E \quad (11)$$

де $W_{Ш}$ – енергія шумів на вході в датчик; η_E – інформаційно енергетичний ККД датчика, що характеризує відношення корисної потужності, витраченої на перетворення інформації, до загальної потужності, витраченої на вимір.

$$C = \gamma^2 Pt, \quad (12)$$

де γ^2 – точність датчика; P – потужність, що витрачається на вимір; t – час вимірювань.

Таким чином

$$W_{Ш} = \gamma^2 Pt \eta_E \quad (13)$$

Оскільки $W_{Ш}$ – величина, яка визначається природою процесів, має порядок приблизно $3,5 \times 10^{-20}$ Дж, комбінація величин, які формують поріг чутливості датчика, також має обмеження. У найбільш досконалих датчиків η_E не перевищує $10^{-5} \dots 10^{-6}$ і відповідно поріг чутливості не менше $10^{-15} \dots 10^{-14}$ Дж.

2.2.5. Межа перетворення

Межа перетворення – максимальне значення вимірюваної величини, яке може бути виміряно без незворотних змін в датчику. На практиці верхнє значення вимірюваного діапазону має бути менше межі перетворення, по крайній мере, на 10% результату робочих впливів.

2.3. Метрологічні характеристики

Метрологічні характеристики датчика визначаються його конструктивно-технологічними особливостями, стабільністю властивостей застосованих в ньому матеріалів, особливостями процесів взаємодії датчика з вимірюваним об'єктом.

Метрологічні характеристики в свою чергу визначають характер і величини похибок вимірювання датчиком. Частина з них носить детермінований характер, можуть бути на підставі законів, за якими вони проявляються, аналітично описані і ефективно виключені з результатів вимірів. Такі похибки прийнято називати систематичними. Інша частина проявляється випадковим чином у вигляді неповторних відхилень окремих точок вимірювань, отриманих за однакових умов. Такі похибки називають випадковими. Їх обробка ведеться методами математичної статистики, і ослаблення їх впливу на невизначеність результату вимірювань також досягається методами статистики.

Якщо систематичні і випадкові похибки рівновеликі і малі за своїм вкладом в недостовірність результату вимірювання, то вони можуть разом розглядатися як випадкові похибки, обумовлені різними і багатьма факторами, і підсумовуватися за законами додавання випадкових величин.

Основні види систематичних похибок: похибки, обумовлені нелінійністю функції перетворення. При сучасних методах автоматизації обробки результатів

вимірювань ці похибки без виключаються; похибки, обумовлені варіацією функції перетворення внаслідок зміни напрямку дії вхідної величини (гістерезис). Роль цих похибок в сучасних датчиках, де практично відсутні вузли, що труться, побудованих на принципах мікромеханіки і мікроелектроніки, стає все менш істотною; похибки, обумовлені невідповідністю динамічних можливостей датчика і швидкості впливу вхідної величини (динамічні похибки). При знанні динамічних характеристик датчиків (амплітудно-частотних, фазочастотних характеристик, передавальних, перехідних, вагових функцій або спеціальних оцінок у вигляді коефіцієнта термічної інерції або постійної часу) можуть бути зроблені оцінки динамічних спотворень вимірюваного процесу; похибки, обумовлені відмінністю зовнішніх умов роботи датчика від тих, в яких визначалася його функція перетворення (ці похибки часто називають додатковими). Ці похибки повинні зводитися до мінімуму самою структурою датчика (компенсація), або вводитися у вигляді поправок; похибки, обумовлені нестабільністю функції перетворення внаслідок накопичення робочих впливів і процесів старіння.

Ці похибки проявляються у вигляді поступового, повільного сповзання функції перетворення в часі. Знання тенденції зміни дозволяє встановити міжповірочний інтервал (якщо повірки можливі).

2.3.1. Надійність

Надійність датчиків повинна розглядатися в двох аспектах: механічна надійність – ймовірність механічної міцності конструкції датчика, цілісності його конфігурації, цілісності його електричних ланцюгів, безумовної герметичності вузла ущільнення в умовах експлуатації датчика; метрологічна надійність P_{MH} – ймовірність зберігати в часі достовірності вимірювань в межах встановлених норм в заданих умовах експлуатації. У цьому випадку з позицій метрологічної надійності під відмовою треба розуміти вихід сумарної похибки датчика за допустимі межі. Очевидно, що ймовірність метрологічного відмови P_{MO} є функція часу роботи і зберігання датчика τ_p , τ_x , умов його експлуатації ξ , а також допустимих меж зміни фіксованої точки функції перетворення X_{min} , X_{max} .

$$P_{MH} = P_{MO} = f\{\tau_x, \tau_p, \xi, X_{min}, X_{max}\}$$

У цьому сенсі для періодично повіряються датчиків міжповірочний інтервал

$$\tau_{MH} = \tau_x + \tau_p$$

Метрологічна надійність є однією з найважливіших характеристик датчиків. Можна умовно встановити рівні метрологічної надійності:

$P_{MH} \geq 0,999$ - висока;

$P_{MH} \geq 0,995$ - підвищена;

$R_{MH} \geq 0,990$ - нормальна;

$R_{MH} < 0,990$ - знижена.

2.3.2. Експлуатаційні характеристики

До числа експлуатаційних характеристик датчиків можуть бути віднесені: масо-габаритні характеристики – маса, приєднувальні розміри, глибина виносу (занурення) сприймає частини датчика в середовище, спосіб прокладки кабелю і т.д. (Масо-габаритні характеристики мають особливе значення для датчиків аерокосмічного базування, малогабаритних і енергонапружених агрегатів і вузлів), електромагнітні характеристики датчиків: споживана потужність, електромагнітна сумісність, номінали використовуваних електричних напруг, міцність електроізоляції і т. д.; спеціальні експлуатаційні вимоги до датчиків: стійкість в агресивних середовищах, міцність при швидкісному напорі, іскро- та вибухобезпека, стійкість до радіоактивних випромінювань, стійкість і міцність при ударах і вібраціях.

2.4. Принципи вибору датчиків

В основі вибору датчика для забезпечення тих чи інших вимірів лежить принцип максимальної відповідності вимог вимірювань і можливостей (характеристик) датчика.

Адекватний вибір вимагає апріорних знань, як про об'єкт вимірювань, так і про датчики, з числа яких повинен бути зроблений вибір. Якщо необхідної відповідності досягти не вдається, то потрібно переконатися, що вимоги до датчика є принципово реалізованими, тобто НЕ суперечать природі речей. При наявності такої впевненості приступають до розробки (замовлення) відсутнього датчика.

Послідовність логічних кроків в реалізації принципу максимальної відповідності вимог і можливостей схематично зводиться до наступного.

- Проводиться обґрунтування вибору місць вимірювань параметра на об'єкті.

- З числа відомих датчиків для вимірювання даного параметра вибираються датчики, розміщення яких за геометричними приєднувальними розмірами можливе.

- З вибраних датчиків, відбираються працездатні в експлуатаційних умовах (механічна надійність).

- Для динамічних вимірювань параметрів відбираються датчики за динамічними характеристиками на відповідність динаміці вимірюваного параметра.

- Відбір датчиків за принципом системної сумісності.

- Принципи перетворення в датчиках

1. Формулюються вихідні дані, принципово окреслюють область пошуку. До їх числа відносяться очікуваний діапазон зміни вимірюваного параметра і агрегатний стан об'єкта вимірювання, наприклад:

- вміст газової фази в криогенній рідині 0 ... 100%;
- температура рідкого водню -255 ... -250 ° С;
- температура повітря -50 ... +150 ° С;
- тиск у зовнішній атмосфері космічного апарату $1,3 \times 10^{-2}$... $1,3 \times 10^{-6}$ Па і т.д.

Результатом цього кроку є констатація наявності, як правило, великої області (сукупності) датчиків певного призначення, заснованих на різних принципах перетворення, діапазон роботи яких включає в себе необхідний діапазон вимірювань.

З кожним наступним кроком можливості вибору будуть скорочуватися, так як буде звужуватися область пошуку. Загальним об'єднувчим мотивом на всіх етапах вибору необхідного датчика є несуперечливе виконання вимог даного виміру.

2. Проводиться обґрунтування вибору місць вимірювань параметра на об'єкті. Тут може бути кілька важливих міркувань – екстремальність параметра в даному місці; представництво даного місця для опису загальної картини процесів на об'єкті; кореляція даного параметра в даному місці з іншими параметрами, вимірювання яких намічається, і т.д.

Важливе значення має доступність даного місця для розміщення датчика. На цьому кроці доцільний розгляд альтернативних реалізацій вимірювання необхідного параметра в даному місці. Наприклад, нехай необхідно виміряти температуру потоку криогенної рідини в магістралі малого діаметра при високому тиску. Аналіз може привести до небажаного порушення цілісності магістралі і приварювання до неї штуцера для розміщення датчика. Крім того, може виявитися небажаним створення гідравлічних втрат на занурюваній в потік частини датчика. Значить, може розглядатися альтернативне вимірювання температури на зовнішній стінці магістралі, і завдання вимірювання температури рідини модифікується в задачу ідентифікації температури рідини по вимірюваній температурі зовнішньої стінки магістралі.

Однак будемо виходити далі з того, що місце вибрано і прямий вимір можливий.

3. Із числа відомих датчиків для вимірювання даного параметра вибираються датчики, розміщення яких за геометричними приєднувальними розмірами можливе. При цьому вибираються датчики, що мають потрібну глибину занурення чутливого елемента, а також, виходячи з міркувань локальності або осереднення вимірюваного параметра, вибирають датчики з чутливими елементами із зосередженими в потрібній області параметрами.

4. З вибраних датчиків, відбираються працездатні в експлуатаційних умовах (механічна надійність). При цьому необхідно враховувати як загальні кліматичні (температура навколишнього середовища, тиск, вологість і т.д.), механічні (вібрації, удари, лінійні і кутові прискорення і т.д.), так і всю сукупність спеціальних вимог (агресивність середовища, швидкість набігаючого потоку, температура і

тиск середовища, циклічність і багаторазовість впливів, проникаюча радіація і т.д.).

Необхідно розуміти, що сукупний вплив усіх чинників на датчик істотно жорсткіший, ніж роздільний вплив кожного фактора. Датчик повинен володіти, принаймні, 25% запасом міцності по відношенню до всієї сукупності впливів протягом усього часу експлуатації.

Для квазістатичних датчиків реальні показники можуть відрізнятися. Відбираються датчики, що забезпечують необхідну точність (стабільність функції перетворення в допустимих межах) в умовах експлуатації (метрологічна надійність) *. На цій стадії відбираються датчики, принцип перетворення в яких забезпечує необхідну метрологічну якість. При цьому можуть виявитися конкурентоспроможними кілька принципів перетворення. Але може виявитися, що, жоден з принципів перетворення не підходить по точності. У цьому випадку може бути зроблена спроба використання найкращих варіантів з наступною необхідністю корекції результатів вимірювань. Для цього потрібне знання функцій впливу і необхідна інформація про поведінку дестабілізуючих факторів в процесі вимірювань.

6. Для динамічних вимірювань параметрів відбираються датчики по динамічним характеристикам на відповідність динаміці вимірюваного параметра. Динамічна похибка відібраних датчиків повинна відповідати допустимим значенням. У разі невідповідності повинна бути розглянута можливість запровадження коригуючих поправок в результат вимірювань. Процедура введення поправок передбачає апріорні знання про динаміку процесу і динамічні характеристики обраного датчика. Іноді лімітуючим фактором є короткочасність досліджуваного процесу.

Разом з тим точність і динамічність датчика знаходиться в постійному протиріччі з його механічною та метрологічною надійністю. У боротьбі за виживання датчика нерідко доводиться жертвувати його швидкодією і точністю.

7. Відбір датчиків за принципом системної сумісності. Якщо в результаті відбору за попередніми пунктами залишаються ще альтернативні варіанти датчиків, то останнім міркуванням для вибору є принцип системної сумісності. У сучасній техніці вимірювання, як правило, проводяться, як багатопараметричні, колективні, тоді окремі вимірювальні засоби (датчики, комутатори, підсилювачі, пристрої мультиплексування, самописці так далі) комплектуються в інформаційно-вимірювальні системи (ІВС). Однак стосовно вибору датчиків вкрай бажаною є єдність принципу перетворення у використовуваних датчиках.

3. Основні датчики

3.1. Класифікація ВП

Вимірювальні перетворювачі можна ділити на групи за різними класифікаційними ознаками.

1. По виду вихідних сигналів. Рис. 1. (ГОСТ, ГСП).

2. В залежності від виду контрольованої неелектричної величини датчики діляться на групи:

- а) датчики механічних величин;
- б) датчики теплових величин;
- в) датчики оптичних величин і т.д.

Перетворення здійснюється за схемою: вимірювана величина – механічне переміщення – електрична величина.

3. За фізичним явищем, на якому заснована робота чутливого елемента. Залежно від принципу перетворення датчики діляться на дві групи:

а) **параметричні** або пасивні датчики, в яких зміна контрольованої величини X супроводжується зміною опору датчика (активного, індуктивного, ємнісного). При цьому наявність стороннього джерела енергії є обов'язковою умовою роботи параметричного датчика.

б) **генераторні** або активні датчики, в яких зміна контрольованої величини X супроводжується зміною ЕРС на виході датчика, виникнення ЕРС може відбуватися за рахунок термоелектрики, п'єзоефекту і т.д.

Генераторні датчики не вимагають додаткового джерела енергії, тому потужність вихідного сигналу завжди менше потужності вхідного сигналу.

Табл. 1. Класифікація датчиків

Параметричні	Генераторні
Потенціометричні (R - V)	Термоелектронні (Т - V)
Тензорезистивні (R - V)	П'єзоелектричні (P - V)
Індуктивні (wL - V)	Індукційні (L - V)
Ємнісні ($1 / wC$ - V)	Трансформаторні (B - V)
Фотоелектричні (F - V)	Фотоелектричні (F - V)
Кодові	Радіаційні

Датчики здійснюють первинне перетворення фізико-хімічної величини, як правило, в будь-який електричний параметр: напруга, струм, опір, ємність, індуктивність. Тому датчики ще називають первинними перетворювачами. Подальший вимір електричних параметрів здійснюється добре відомими стандартними методами.

3.2. Резистивні ВП

Потенціометричні ВП перетворюють механічні переміщення в зміни опору реостата. За призначенням датчики бувають лінійних і кутових переміщень. Потенціометричний датчик являє собою реостат, включений за схемою потенціометра. При переміщенні рухомого контакту під впливом контрольованої величини X відбувається зміна опору датчика. Залежно від закону зміни опору розрізняють лінійні і функціональні потенціометри, а в залежності від схеми включення полярні і реверсивні.

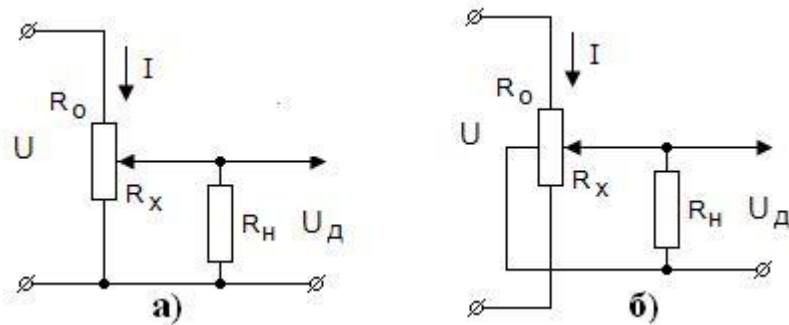


Рис. 3. Потенціометричні датчики: а) полярний, б) реверсивний

Виведемо основні співвідношення для лінійного потенціометра. Введемо позначення R_0 повний опір потенціометра, R_x опір при заданому положенні движка, R_H опір навантаження; тоді для переміщення движка X , для коефіцієнта навантаження α , маємо:

$$x = R_x/R_0; \alpha = R_x/R_H;$$

Напруга на виході потенціометра (U_d) визначиться за формулою: Рис. 2.

$$U_d = I \cdot \frac{R_H \cdot R_x}{R_H + R_x} = \frac{\frac{R_H \cdot R_x}{R_H + R_x} U_0}{(R - R_x) + \frac{R_H \cdot R_x}{R_H + R_x}} = U \frac{x}{1 + \alpha x - \alpha x^2}$$

$$f(\alpha, x) = \frac{U_d}{U_0} = \frac{x}{1 + \alpha x - \alpha x^2}$$

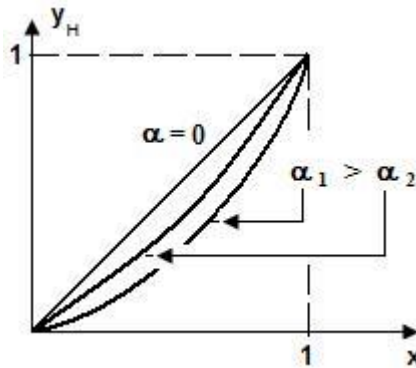


Рис. 4. Характеристика потенціометричного датчика

Якщо $R_H \gg R_0$, то $\alpha \rightarrow 0$, при цьому струмом в навантаженні можна знехтувати і $I = f(x)$ стає лінійною:

Якщо $R_H \gg R_0$ не дотримується, то необхідно або враховувати похибку, викликану нелінійністю характеристики, або робочу ділянку необхідно обмежити. Похибка від неузгодженості опорів потенціометра і навантаження зростає при збільшенні коефіцієнта навантаження, причому при малих переміщеннях движка вона незначна. У дротяного потенціометра є помилка через ступінчастість його характеристики.

Найбільше значення похибка лінійного потенціометра має при знаходженні движка в середньому положенні, тобто при $X = L/2$.

$$\delta_{max} R / (R + 4R_H) = \alpha / (\alpha + 4)$$

Передаточна функція потенціометричного датчика на низьких а) і на високих б) частотах:

$$W_{пост} = K$$

$$W_{змін}(LR) = \frac{K}{Tp + 1}$$

Переваги потенціометричних датчиків: простота конструкції, можливість отримання досить прямолінійні характеристики, стабільність характеристик, значна величина вихідного сигналу.

Недоліки: знижена надійність, знос, контактний опір, відносно великі переміщення і мала швидкість движка, дискретність.

3.3. Тензорезистивні датчики

Для зміни зусиль і деформацій в деталях і конструкціях різних пристроїв застосовуються тензометричні або тензорезистивні датчики. Тензоефект – зміна активного опору провідників при механічній деформації матеріалу. Величина тензоефекта залежить від орієнтації сили і виду матеріалу.

Тензочутливість K_T – це відношення величини відносної зміни його опору до відносного зміни лінійного розміру дроту:

$$K_T = \frac{\delta R}{\delta l} = \rho_1 + \rho_2 = \frac{\delta \rho}{\delta l} + (1 + 2\mu)$$

де R – опір проводу, l – початкова довжина ділянки дроту, що деформується, $1 + 2\mu$ – характеризує зміну геометричних розмірів, μ - коефіцієнт Пуассона, $m = \frac{\delta \rho}{\delta l}$ – коефіцієнт зміни питомого опору матеріалу зі зміною його геометричних розмірів.

Типи тензорезистивних датчиків: дровові, фольгові, плівкові і напівпровідникові (тензоліти).

Дровові тензометричні датчики

Дровові тензодатчики засновані на зміні опору константанового дроту діаметром 0,01 - 0,05 мм, складеного у вигляді петлеподібної решітки між склеєними смужками тонкого паперу. Сам датчик приклеюється до деталі, деформацію якої потрібно виміряти. Зміна опору датчика відбувається при розтягуванні або стисненні, а також при зміні питомої опору дроту під впливом механічної напруги. Для дровяних тензодатчиків виконаних з константанового дроту $m = 2$, $R = 2000$ Ом, деформація не більше 0,3%, база – 5-30 мм, максимальна температура 500 ° С. Фольгові тензодатчики виготовляються з тонких смужок фольги товщиною 4-12 мікрон, методом фототравлення, і можуть мати довільну форму решітки, наприклад розетку. Робочий струм $I = 200$ мА, опір $R = 30$ -250 Ом.

Переваги тензодатчиків: простота конструкції, відсутність гістерезису, безінерційність, стабільність.

Недоліки: мала чутливість, температурна похибка.

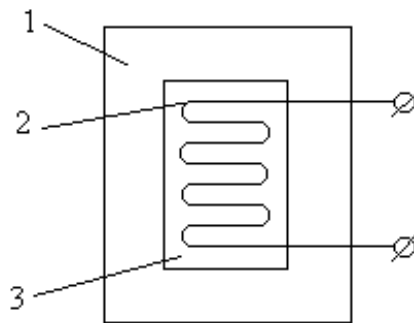


Рис. 5. Дровяний тензометричний датчик: 1 – деталь, 2 – папір, 3 – константановий дріт

Напівпровідникові тензодатчики є пластинами, різної форми, до яких приєднані металеві виходи, які наклеєні на поверхню деталі. Вони виконуються з термоізольованих або кристалічних напівпровідникових матеріалів.

Переваги: висока тензочутливість, компактність, мала похибка (до 0,1%), швидкодія, великий термін служби.

Недоліки: обмежений температурний діапазон без зовнішньої компенсації, наявність гістерезису, крихкість.

Для компенсації нелінійності використовують мостову схему, в якій для термокомпенсації використовують в одному з плечей моста паралельний терморезистор з іншим ТКС за знаком (рис. 6). Область застосування тензодатчиків: вимір зосереджених сил, моментів і т. д., вимір тисків, вимір прискорення. Особливо поширені датчики тиску з термокомпенсацією, виконані за технологією «кремній на сапфірі».

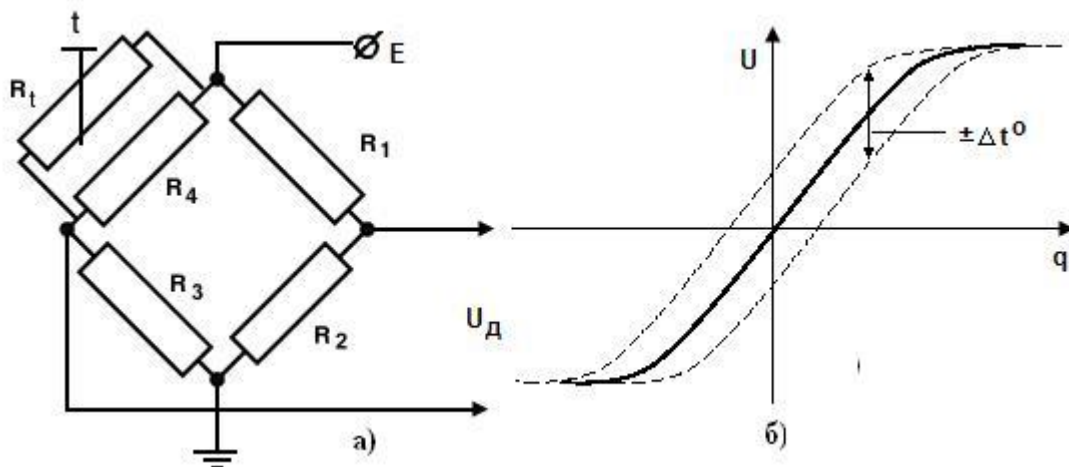


Рис. 6. Мостовий тензорезистивного датчик: а) – схема, б) – характеристика

3.4. Терморезистивні датчики

Терморезистивні датчики (термоопори) мають властивість змінювати свій електричний опір при зміні температури. Вони, застосовуються для вимірювання неелектричних величин (температури, швидкості, концентрації, щільності вакууму і т.п.), що характеризують газове або рідке середовище, в діапазоні температур від -250 до $+1000$ °С. Терморезистори виготовляються з металів і напівпровідників.

1. Металеві термоопори є чутливими елементами в термометрах опорів. Вони виготовляються з міді, платини, заліза, нікелю. Сплави металів не застосовуються, так як при додаванні в чистий метал домішки порушується стабільність характеристики, зменшується температурний коефіцієнт опору, що характеризує чутливість терморезистора до змін температури.

Якість терморезистора характеризується його чутливістю до зміни температури і визначається температурним коефіцієнтом опору α , що представляє собою відносну зміну опору $\Delta R / R$ на одиницю приросту температури Δt :

залежність опору від температури $R_{\Theta} = R_0(1 + \alpha\Theta - \beta\Theta^2)$, при малому β : $\alpha \approx (\Delta R/R)/\Delta t$.

Матеріали терморезисторів повинні мати великий і постійний температурний коефіцієнт опору, великий питомий опір. Їх фізичні і хімічні властивості повинні бути стійкі при високих температурах.

Найкращий матеріал для виготовлення металевих терморезисторів – платина, з якої виготовляють як технічні, так і зразкові і еталонні датчики, придатні для вимірювання температур в діапазоні від -200 до $+500$ °С. Функція перетворення платинового терморезистора нелінійна і зазвичай апроксимується квадратичним тричленом. Параметри: $a = 4 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $b = 6 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$.

Функція перетворення мідного терморезистора лінійна і $a = 4,3 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Мідні терморезистори застосовують в діапазоні температур від -50 до $+150$ °С. Основні параметри найбільш поширених терморезисторів і позначення їх градувань по ГОСТ 6651-84 наведені в табл. 2.

Табл. 2

Термометри опору платинові			Термометри опору мідні		
Опір при °С (R ₀)	Градууються	Діапазон вимірювання, °С	Опір при °С (R ₀)	Градууються	Діапазон вимірювання, °С
10	10П	Від -200 до +750	10	10М	Від -50 до 200
50	50П	Від -260 до +1000	50	50М	Від -50 до 200
100	100П	Від +260 до +1000	100	100М	Від -200 до 200

Конструкція термометра опору наведена на рис. 7.



Рис. 7. Конструкція термометра опору

Термометр опору має чутливий елемент у вигляді тонкого дроту 2 (діаметр 0,05 мм), намотаний на каркас 1 (пластину з слюди) і поміщений в захисний чохол 3. Використовуються три або чотири дроти для компенсації температурних коливань навколишнього середовища. Номінальні функції перетворення (статичні характеристики) мідних і платинових терморезисторів і їх похибка визначаються ГОСТ 6651-84.

Залізні і нікелеві терморезистори займають проміжне місце, як більш дешеві, ніж платина і більш стійкі, ніж мідь. Вони працюють в діапазоні температур від +100 до +150° С.

Переваги термометрів опору: стабільність, лінійність, великий діапазон, дешевизна (мідь).

Недоліки : великі габарити, велика інерційність, мала величина R, окислюваність (мідь).

3.5. Напівпровідникові терморезистори (термістори)

Термістори виготовляються із суміші оксидів різних металів (наприклад, CuO, CoO, MnO). Величина електричного опору термістора різко зменшується при збільшенні температури Чутливість терморезисторів до зміни температури значно вище, ніж у металевих. Так при підвищенні температури від 0 до +100 ° С опір міді збільшується всього на 43%, а у термісторів опір R_Q зменшується в 20-70 разів, в залежності від величини його температурного коефіцієнта опору

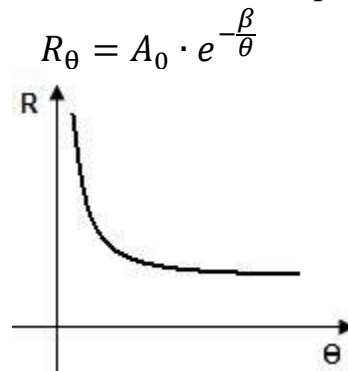


Рис. 8. Характеристика термістора

Температурний коефіцієнт опору термістора $\chi = -\frac{\beta}{\theta^2}$ приблизно в 6-10 разів більше, ніж у металевих терморезисторів, для термісторів ($\chi = 40 \cdot 10^{-3}$ 1/град).

Деякі типи термісторів працюють в діапазоні температур від -100 до +500 ° С і вище. Термістори знаходять широке застосування для компенсації температурних похибок у вимірювальних схемах, і в якості датчиків для вимірювання різних неелектричних величин, що впливають на відведення тепла від терморезистора (рис. 9).

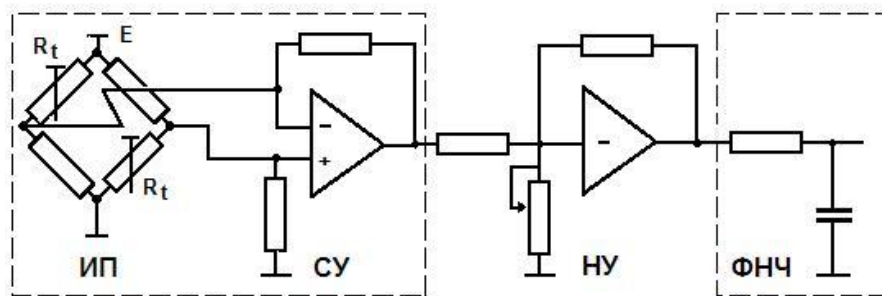


Рис. 9. Схема вимірювання на основі термістора

Конструктивно термістори виготовляються у вигляді маленьких стержнів (довжиною 12 мм і діаметром 1,8 мм), шайб, дисків і намистин.

Переваги: набагато більше ТКС, набагато менше розмір і інерційність, можливість роботи в релейному режимі.

Недоліки: більш вузький робочий діапазон, нелінійність, великий розкид значень.

3.5. Термоелектронний перетворювач (термопара)

Якщо два різних метали з'єднати кінцями і помістити місця їх спаїв в середовища з різними температурами, то в контурі з цих провідників виникає ЕРС (термоЕРС). Це ефект Зеєбека.

Ланцюг, складений з двох різнорідних металів, називається **термопарою**, а ЕРС, що виникає при нагріванні спаю називається термоелектрорушійною силою. Провідники – це термоелектроди, стики – спай. Спай температура якого, підтримується постійною, називається **холодним**, а спай, дотичний з вимірюваним середовищем, – **гарячим**. За величиною термоЕРС можна судити про різницю температур $t_0 - t_1$

$$E(t_0, t_1) = E(t_0 - t_1); \Delta t = -50..2500^{\circ}\text{C}$$

При цьому якщо відома температура холодного спаю t_0 , то можна визначити температуру гарячого спаю t_1 :

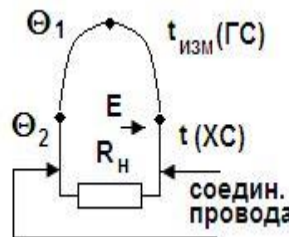


Рис. 10. Термопара

У табл. 3 наведені найбільш широко використовувані термопари (ГОСТ 6616-84) і їх основні характеристики (ГОСТ 3044-84). Маркування ХА, ХК, ПП, ПР, ВР; на Заході – А, S, К, N, Н.

Табл. 3

Тип термопари	Матеріал термоелектродів	Позначення градування	Діапазон вимірювання при тривалому вимірі, °С
ТХК	Хромель-копель	ХК (L)	-200 ... + 600
ТХА	Хромель-алюмель	ХА (K)	-200 ... +1000
ТПП	Платинородій (10%) - платина	ПП (S)	0 ... + 1300
ТВР	Вольфрамрений (5%) - вольфрамрений (20%)	ВР (A)	0 ... 2200

Чутливість термопар різна і лежить в діапазоні від 10 мкВ / 0° С (ПП) до 70 мкВ / 0° С (ХК). Напруга до 100мВ називається малою. Малі напруги вимагають спеціальних схем підключення посилення і корекції (не вибухонебезпечні).

Номинальна функція перетворення термопар зі стандартним градуювання за дається градуювальною таблицею. Вона визначає залежність ЕРС $E(t, t_0)$ термопар від змінною температури t при температурі вільних спаїв $t_0 = 0$ °С. Одним з джерел похибки термопар є невідповідність температури вільних кінців термопар температурі, при якій було зроблене градуювання. Якщо в умовах вимірювання температура вільних спаїв t не дорівнює температурі t_0 , то ЕРС термопар $E(t, t_0)$ відрізняються від ЕРС $E(t, t_0)$, яка потрібна для визначення температури за стандартного градуювання і необхідне введення поправки.

Похибка стандартних термопар $d = 0,1..0,2\%$.

Передавальна функція термопар:

$$W(p) = \frac{Ke^{-\varphi}}{Tp + 1}$$

Переваги: великий діапазон, стабільність, надійність.

Недоліки: табличне градуювання, слабкий сигнал і низька чутливість, велика інерційність, необхідність фіксації температури холодного спаю.

2.6. Безконтактне вимірювання температури

Про температуру нагрітого тіла можна судити на підставі вимірювання параметрів його теплового випромінювання, що представляє собою електромагнітні хвилі різної довжини. Термометри, дія яких заснована на вимірі теплового випромінювання, називають пірометрами. Вони дозволяють контролювати температуру від 100 до 6000° С і вище. Одним з головних достоїнств даних пристроїв є відсутність впливу вимірювача на температурне поле нагрітого тіла, так як в процесі вимірювання вони не вступають в безпосередній контакт один з одним. Тому дані методи отримали назву безконтактних. Спектр нагрітого тіла має виражений максимум, де λ_{max} підкоряється закону Стефана-Больцмана $\lambda_{max} = f(T^4)$ (рис.11).

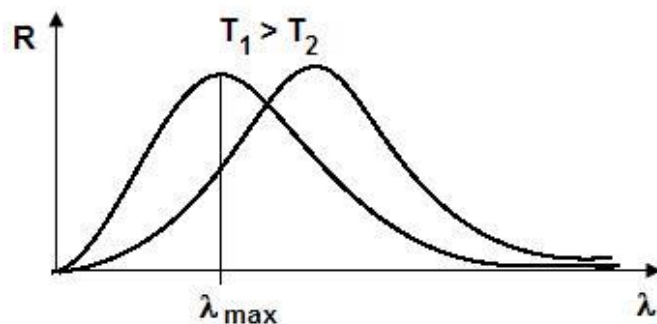


Рис. 11. Спектр нагрітого тіла

Розрізняються радіаційну, яскравісну, колірну температури. Радіаційною температурою реального тіла T_p називають температуру, при якій повна потужність абсолютно чорного тіла (АЧТ) дорівнює повній енергії випромінювання даного тіла при дійсній температурі T_d .

Яскравісною температурою реального тіла T_y називають температуру, при якій щільність потоку спектрального випромінювання АЧТ дорівнює щільності потоку спектрального випромінювання реального тіла для тієї ж довжини хвилі (або вузького інтервалу спектру) при дійсній температурі T_d .

Колірною температурою реального тіла T_k називають температуру, при якій відношення щільності потоків випромінювання АЧТ для двох довжин хвиль λ_1 і λ_2 дорівнює відношенню густини потоків випромінювань реального тіла для тих же довжин хвиль при дійсній температурі T_d .

На підставі законів випромінювання розроблені пірометри наступних типів:

- пірометр сумарного випромінювання (ПСВ) – вимірюється повна енергія випромінювання;
- пірометр часткового випромінювання (ПЧВ) – вимірюється енергія в обмеженому фільтром (або приймачем) ділянці спектру;
- пірометри спектрального відношення (ПСО) – вимірюється відношення енергії фіксованих ділянок спектра.

Пірометри часткового випромінювання. До даного типу пірометрів, що вимірюють температуру яскравості об'єкта, відносяться монохроматичні оптичні пірометри і фотоелектричні пірометри, що вимірюють енергію потоку у вузькому діапазоні довжин хвиль. Принцип дії оптичного пірометра із «зникаючою» ниткою заснований на порівнянні яскравості об'єкта вимірювання і градуйованого джерела випромінювання в певній довжині хвилі.

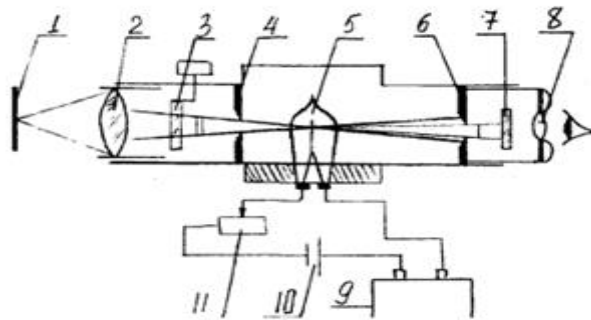


Рис. 12. Яскравісний оптичний пірометр

Зображення випромінювача 1 лінзою 2 і діафрагмою 4 об'єктива пірометра фокусується в площині нитки розжарювання лампи 5. Оператор через діафрагму 6 лінзу 8 окуляра і червоний світлофільтр 7 на тлі розпеченого тіла бачить нитку лампи. Переміщуючи повзунок реостата 11, оператор змінює силу струму, що проходить через лампу, і домагається зрівнювання яскравості нитки і яскравості

випромінювача. Якщо яскравість нитки менше яскравості тіла, то вона на його тлі виглядає чорною смужкою, при більшій температурі нитки вона буде виглядати, як світла дуга на більш темному тлі. У разі рівного розподілу яскравості випромінювача і нитки остання «зникає» з поля зору оператора. Цей момент свідчить про рівність яскравості температур об'єкта вимірювання і нитки лампи. Живлення лампи здійснюється за допомогою батареї 10. Прилад 9, що фіксує силу струму, яка протікає у вимірювальному колі, ° С.

Даний тип пірометрів дозволяє вимірювати температуру від 700 до 8000 ° С. Для оптичних пірометрів промислового застосування в інтервалі температур 1200 – 2000 ° С основна допустима похибка вимірювання складає ± 20 ° С. На точність вимірювання впливають невизначеність і змінність спектрального ступеня чорноти, можлива зміна інтенсивності випромінювання за рахунок ослаблення в проміжному середовищі, а так само за рахунок відображення сторонніх променів.

Пірометри спектрального відношення вимірюють колірну температуру об'єкта по відношенню інтенсивностей випромінювання в двох певних ділянках спектра, кожна з яких характеризується ефективною довжиною хвилі λ_1, λ_2 . ПСО використовуються для вимірювання температур твердого та розплавленого металу в широкому інтервалі температур від 300 до 2200° С і мають клас точності 1 і 1.5 (в залежності від межі вимірювання). Дані пірометри мають в 3-5 разів меншу методичну похибку, пов'язану зі зміною ступеня чорноти випромінювача. На їх показання значно менше впливають поглинання проміжного середовища. Однак в тих випадках, коли об'єкт характеризується селективним випромінюванням (ступінь чорноти при одній і тій же температурі різко змінюється з довжиною хвилі), похибка ПСО може бути вище похибки пірометрів випромінювання інших типів. ПСО більш складні і менш надійні, ніж інші прилади.

Фотоелектричні *пірометри часткового випромінювання* забезпечують безперервне автоматичне вимірювання та реєстрацію температури. Їх принцип дії заснований на використанні залежності інтенсивності випромінювання від температури у вузькому інтервалі довжин хвиль спектра. Як приймачі в даних пристроях використовуються фотодіоди, фотоопори, фотоелементи та фотопомножувачі. Ці пірометри, містять стабільне джерело випромінювання, при чому фотоприймач служить лише індикатором рівності яркостей даного джерела і об'єкта. У фотоелектричних пірометрах з межами вимірювання від 500 до 1100° С застосовують киснево-цезієвий фотоелемент, а в приладах зі шкалою 800 – 4000° С вакуумний сурмяно-цезієвий.

Пірометри сумарного випромінювання вимірюють радіаційну температуру тіла, тому їх часто називають радіаційними. Принцип дії даних вимірювачів температури заснований на використанні закону Стефана-Больцмана. Однак в разі застосування оптичних систем в ПСВ визначення температури ведеться по щіль-

ності інтегрального випромінювання не в усьому інтервалі довжин хвиль, а значно меншому: для скла робочий спектральний діапазон становить 0.4 – 2.5, а для плавленого кварцу 0.4 – 4 мкм.

Датчик пірометра виконується у вигляді телескопа, лінза об'єктива якого фокусується на термочутливому приймачі випромінювання нагрітого тіла. Як термочутливий елемент використовуються термопари, термобатареї, болометри (металеві та напівпровідникові), біметалічні спіралі і т. п.

Робочі кінці термопар поглинають падаючу енергію і нагріваються. Вільні кінці знаходяться поза зоною потоку випромінювання і мають температуру корпусу телескопа. В результаті виникнення перепаду температур термобатарея розвиває термо-ЕРС, пропорційну температурі робочих спаїв, а отже, і температурі об'єкта вимірювання. Градування пірометрів проводиться при температурі корпусу 20 ± 2 °С, тому підвищення заданої температури призводить до зменшення перепаду температур в термопарах приймача випромінювання і до появи значних додаткових похибок. Так, при температурі корпусу 40 °С додаткова похибка (при інших рівних умовах) складе ± 4 °С.

Вид матеріалу лінзи визначає інтервал вимірюваних температур і градувальну характеристику. Скло з флюориту забезпечує можливість вимірювання низьких температур починаючи з 100 °С, кварцове скло використовується для температури 400 - 1500 °С, а оптичне скло для температур 950 °С і вище.

ПСВ вимірюють температуру від 100 до 3500 °С. Основна допустима похибка технічних промислових пірометрів зростає зі збільшенням верхньої межі вимірювання і для температур 1000, 2000 і 3000 °С становить відповідно ± 12 ; ± 20 і ± 35 °С

2.7. Ємнісні датчики

Ємнісні датчики відносяться до датчиків параметричного типу, в яких зміна контрольованої величини викликає зміна ємнісного опору датчика. Ємність конденсатора залежить від форми і геометричних розмірів електродів, від діелектричної проникності і від відстані між обкладинками. У різних датчиках може змінюватися один із зазначених параметрів. За допомогою ємнісних датчиків вимірюють геометричні розміри виробів, вологість ізоляційних матеріалів і визначають склад ізоляційного матеріалу. Вони набули поширення також в телемеханіці - для перетворення механічного переміщення в зміна електричної ємності конденсатора.

Найчастіше ємнісний датчик являє собою плоский конденсатор, що складається з двох або більше пластин, між якими міститься діелектрик.

Ємність плоскопаралельного конденсатора дорівнює:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 \cdot S}{\delta},$$

де $\epsilon_{\text{про}}$ - абсолютна діелектрична проникність вакууму,

($\epsilon_{\text{про}} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ ф / м}$);

ϵ_r - відносна діелектрична проникність між обкладинками;

S - площа перекриття обох пластин, см^2 ;

d - зазор між пластинами, мм.

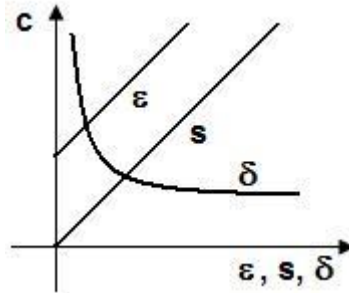


Рис. 13. Залежність ємності конденсатора від його параметрів

Кожну з величин можна прийняти за вхідні (інші параметри залишаються постійними) і отримати відповідний тип датчика зі змінною ємністю на виході.

Переваги ємнісних датчиків : висока чутливість, мала вага і габарити простота конструкції.

Недоліки : необхідність посилення знімається сигналу, необхідність ретельної екранування датчика, застосування високочастотного джерела.

Застосування ємнісних датчиків:

- 1) вимір малих переміщень;
- 2) контроль кутових переміщень;
- 3) передача показань стрілочних вимірювальних приладів;
- 4) використання в якості паливоміри;
- 5) вимірювань товщини матеріалів;
- 6) вимір рівнів рідин;
- 7) вимір швидкостей;
- 8) вимір тисків

Датчик кутових переміщень **п** рименяється для перетворення кутових переміщень в зміну ємності (рис 14). Робоча площа (заштрихована) залежить від угла повороту а рухомий пластини 1. Для збільшення ємності застосовується кілька пластин.

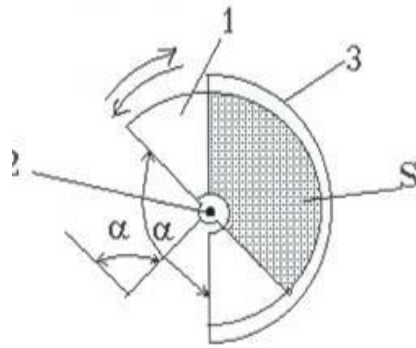


Рис. 14. Датчик кутових переміщень. 1, 3 - пластини; 2 - вал.

Датчик для вимірювання рівня рідини використовуються в якості ємнісного топливомера, за допомогою якого можна виміряти рівні струмопровідних рідин (гасу, бензолу, масла і ін.), Причому датчиком топливомера може служити циліндричний або плоский конденсатор, що поміщається всередину паливного бака (рис 15).

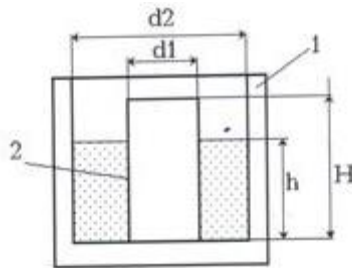


Рис. 15. Датчик для вимірювання рівня рідини: 1 - резервуар; 2 - електрод

Датчик для вимірювання переміщення показаний на рис. 16.

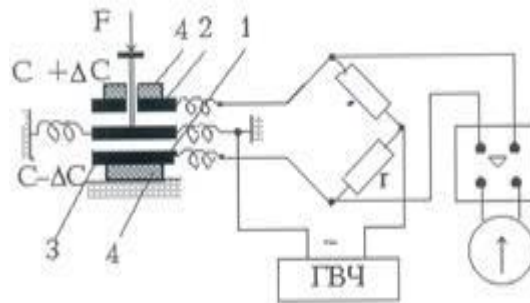


Рис. 16. Мостова схема для вимірювання переміщення

При відсутності механічного впливу F обкладка 1 займає симетричне положення, при цьому ємності двох половин конденсатора C_{1-3} і C_{1-4} однакові і рівні C . При впливі вимірюваної неелектричної величини (механічної) F обкладка 1 переміщається, а ємності верхньої і нижньої частин датчика отримують приріст з різними знаками: $C_{1-3} = C + \Delta C$ і $C_{1-4} = C - \Delta C$.

3.8. Індуктивні датчики

3.8.1. Індуктивний датчик на дроселі

Індуктивні датчики відносяться до класу параметричних. Індуктивні датчики засновані на зміні індуктивного опору електромагнітного дроселя при переміщенні однієї з рухомих частин (зазвичай якоря). Їх застосовують для вимірювання малих кутових і лінійних переміщень.

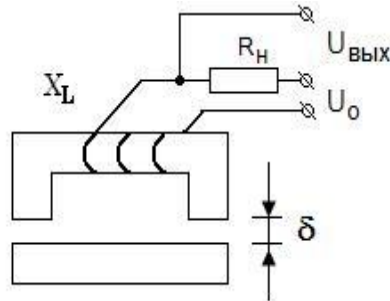


Рис. 17. Схема індуктивного датчика для вимірювання переміщення

Індуктивний датчик на малюнку є дросель зі змінним повітряним зазором між якорем і сердечником, на якому розташована обмотка, включена послідовно з навантаженням R_n . Такий датчик має високу чутливість і реагує на зміну зазору d в діапазоні 0,1-0,5 мкм. При вимірюванні великих переміщень використовують датчики зі змінною площею зазора або розімкнутого магнітного ланцюгом.

При малому зазорі розсіювання мало, тому $L \approx \frac{l}{\delta}$; звідси індуктивного опору дроселя - $xL = K \cdot \omega / \delta$; для дроселя виконується співвідношення $xL \gg R_\delta$.

Вихідна напруга датчика:

$$|U_{\text{вых}}| = \frac{U_0 \cdot R_H}{|Z|} = \frac{U \cdot R_H}{\sqrt{R_c^2 + (xL)^2}} \approx \frac{U \cdot l_H}{xL} \approx K_1 \delta$$

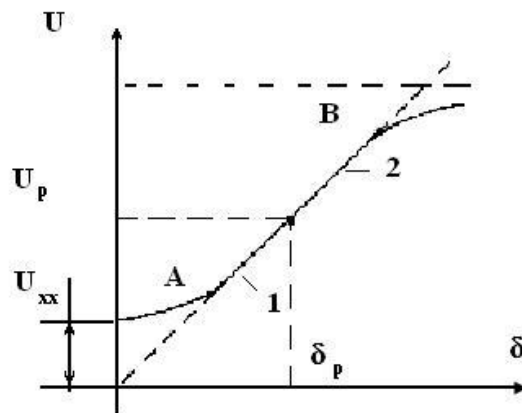


Рис. 18. Характеристика індуктивного датчика

На рис. 18 показана статична характеристика датчика. $A = B$ - робочу ділянку. Особливості характеристики:

1. характеристика має 2 нелінійних ділянках (верхній і нижній загини);
2. нижня ділянка обумовлений тим, що при дуже малих зазорах магнітне опір сердечника і якоря того ж порядку, що і опір зазору і нехтувати ними не можна;
3. верхню ділянку обумовлений наявністю активного опору обмотки, який обмежує наростання струму в ланцюзі. Активні опору стають порівнянними з індуктивним при великих зазорах.

Чутливість датчика. $S_g = 1/\delta_{\text{во}} \text{ (1/м)}$,

де $\delta_{\text{во}}$ - початковий повітряний зазор, що характеризує вибір робочої точки.

Переваги: Простота і міцність конструкцій, надійність в роботі (тому що відсутні ковзні контакт), можливість підключення до джерел промислової частоти, відносно велика величина потужності на виході перетворювача (кілька десятків ват), тому можна підключати контрольний прилад безпосередньо перетворювача

Недоліки : Ток в навантаженні залежить від амплітуди і частоти напруги живлення; можливість роботи тільки на відносно низьких частотах до 3000 - 5000 Гц, тому що на високих різко зростають втрати в сталі на перемагнічування і вихрові струми; необхідно встановлювати початковий повітряний зазор і, отже, початковий струм I ; значна нелінійність; є напруга холостого ходу.

3.8.2. Диференціальні індуктивні датчики

Диференціальні індуктивні датчики (ДІД) представляють собою сукупність двох нереверсивними датчиків. Виконуються у вигляді системи, що складається з двох магнітопроводів із загальним якорем і двома котушками (рис 19).

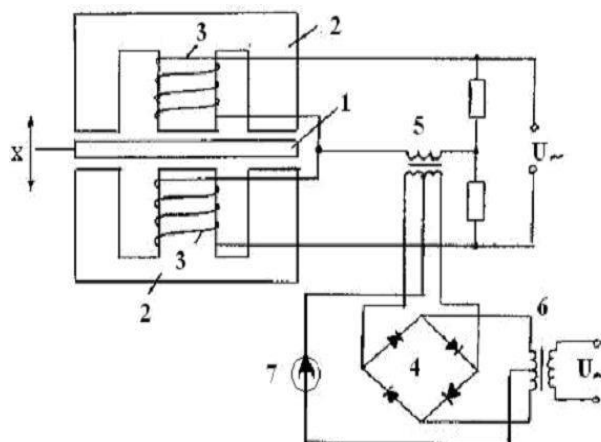


Рис. 19. Диференціальний індуктивний датчик з фазочутливим випрямлячем. Елементи схеми ДІД: 1 - якорь; 2 - сердечники; 3 - котушки; 4 - випрямляч; 5 - вимірювальна обмотка; 6 - трансформатор живлення; 7 - вимірювальний прилад.

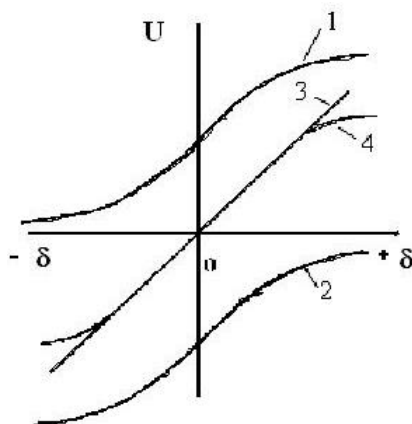


Рис. 20. Характеристика ДІД: 1 і 2 - характеристики нереверсивними датчиків; 4 - характеристика ДІД

При використанні фазочувствительного випрямних схем можна отримати реверсивну характеристику з нульовою відміткою по середині шкали. При симетричному положенні якоря в обмотках повітряні зазори однакові, індуктивні опору однакові, значить і величини струмів в котушці однакові $I_1 = I_2$. В результаті результуючий струм $I_{рез} = 0$. різностной магнітний потік не створюється, в вимірювальній обмотці ЕРС НЕ індуктируется.

При зміщенні якоря від нейтрального положення магнітне опір від однієї з обмоток, наприклад, збільшується, інший зменшується, в осерді створюється різницевої магнітний потік, в вимірювальній обмотці наводиться змінний ЕРС, фаза залежить від напрямку зсуву. ЕРС подається на випрямляч, прилад показує величину і напрямок зсуву якоря. Розглянуті ДІД застосовуються для вимірювання переміщення порядку часткою і десятих часток міліметра. Мінімально можливе повітряний зазор $\delta_{во}$ по конструктивним умовам вибирається близько 0,2 - 0,5 мм.

Переваги ДІД:

- великий лінійної ділянку, робоче переміщення збільшується до $\Delta\delta = (0.3 - 0.4) \cdot \delta_0$;
- чутливість схеми в 2 рази більше;
- великий коефіцієнт підсилення;
- (компенсуються похибки) від тяжіння, коливань напруги живлення і температури навколишнього середовища

Недоліки : Велика інерційність, великі розміри, невелика ккд.

3.8.3. Трансформаторні датчики

Це - датчики генераторного типу. Принцип дії трансформаторних датчиків заснований на зміні індуктивності котушок при переміщенні якоря.

Особливість трансформаторних датчиків - відсутня електрична зв'язок між ланцюгом харчування (збудження) і вимірювальною ланцюгом, це дозволяє отримати будь-яку напругу на виході навантаження незалежно від величини напруги джерела живлення.

Найбільшого поширення набули диференціальні трансформаторні датчики (ДТД), що представляють собою 2 трансформатора із загальним рухомих якорем (рис. 14).

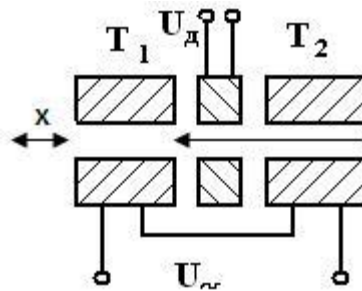


Рис. 21. Диференціальний трансформаторний датчик

При симетричному положенні якоря в вихідній обмотці від обмоток T_1 і T_2 наводяться однакові і протилежні за знаком ЕРС.

При зміщенні якоря від нейтрального положення ЕРС від однієї з обмоток, збільшується, а інший зменшується, на виході створюється різниця ЕРС, фаза якої залежить від напрямку зсуву.

8.4. Магнітопружні датчики

Принцип дії Магнітопружний датчика заснований на явищі зміни магнітної проникності ферромагнітних матеріалів в залежності від величини механічних напружень, що виникають в них. Якщо до сердечника докласти стискує, розтягують, згинальні, скручують зусилля, то під дії цих зусиль відбудеться зміна магнітної проникності μ - сердечника, що викликає зміна магнітного опору R_m сердечника, при цьому змінюється індуктивність котушки, вміщеній на сердечник і її повний опір.

Магнітоупругих датчики можуть бути індуктивними, трансформаторними та індукційними, тобто в якості вихідної величини можуть бути зміни індуктивності і взаєміндуктивності і виконуються як з суцільного матеріалу, так і з набраних сердечників. Ці датчики мають високу чутливість, але необхідно компенсувати температурну похибку і похибки через гистерезиса.

Поряд з магнітопружним ефектом існує магніострикційний ефект; це явище зворотнє Магнітопружний ефекту полягає в тому, що зовнішнє магнітне поле викликає механічні деформації феромагнітного матеріалу.

3.9. Індукційні датчики

Індукційними датчиками зазвичай є електричні машини, що працюють в генераторному режимі. Є електричні машини спеціального виконання: сельсини, синусно-косинусні трансформатори (ВТ); вони будуть розглянуті нижче. Є спеціальні датчики: резольвера і індуктосіни.

Індуктосін є машиною, що складається з двох ізоляційних дисків, на суміжних поверхнях яких нанесені друковані обмотки. Останні представляють струмопровідні пластини, з'єднані по черзі то у центрі, то у периферії. Зрозуміло, число таких пластин повинно бути парним (рис. 15).

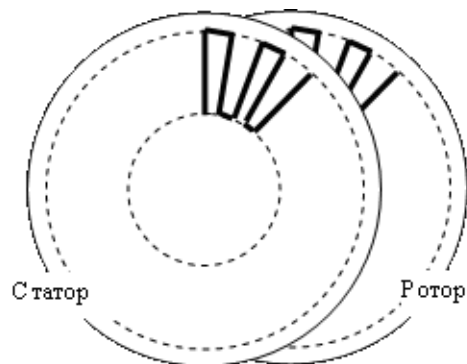


Рис. 22. Індуктосін

Диски розташовані співвісно паралельно і можуть повертатися одна відносно іншої. Муздрамтеатру індуктосін не має. Зазор між дисками дуже малий - 0, 1 мм. Синусоїдальну залежність взаємної індуктивності між статором і ротором досягають шляхом вибору певного співвідношення ширини провідника до полюсного поділу, скося провідників, скорочення кроку обмотки. Частота напруги живлення індуктосіна $10 \div 100$ кГц. Однак, не дивлячись на невеликий зазор, коефіцієнт передачі напруги становить всього $0,005 \div 0,01$. Проте, при харчуванні обмотки статора змінним струмом в роторі індукується ЕРС, величина якої є функцією кута повороту ротора. Похибка синхронно-стежить системи з індуктосіном дуже маленька - кілька кутових секунд. Витісняються цифровими датчиками (енкодер).

Індукційні датчики дуже широко застосовуються як елементи автомобільної автоматики. На їх основі були створені різні прилади - від найпростіших, які реєструють лінійні переміщення, до складних, таких як системи запалювання з цифровим керуванням, системи упорскування палива, антиблокувальні системи управління гальмами і т.п.

У найпростішому випадку датчик складається з котушки з обмоткою, сердечника з магнітомягкого заліза і магніту. Ці три компоненти складають статор датчика. З статором взаємодіє ротор у вигляді зубчастого диска або зубчастої рейки з кількістю зубців, що визначаються умовами застосування датчика (рис. 23).

При обертанні ротора, в обмотці статора виникає змінне напруження. Когда один з зубців ротора наближається до обмотки, напруга в ній швидко зростає і, при збігу з середньою лінією обмотки, досягає максимуму, потім, при видаленні зуба, швидко змінює знак і збільшується в протилежному напрямку до максимуму.

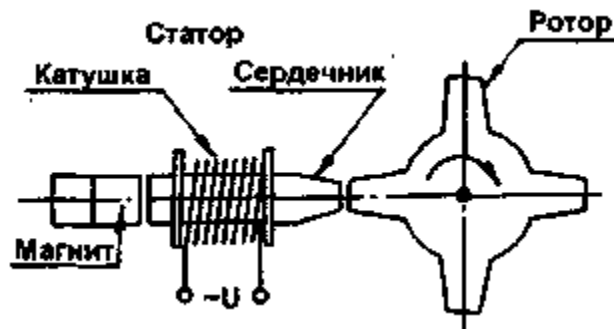


Рис. 23. Індукційний датчик оборотів

На що наводиться графіку (рис. 16) чітко видно велику крутість зміни напруги, тому перехід між двома максимумами може бути використаний для управління електронними системами.

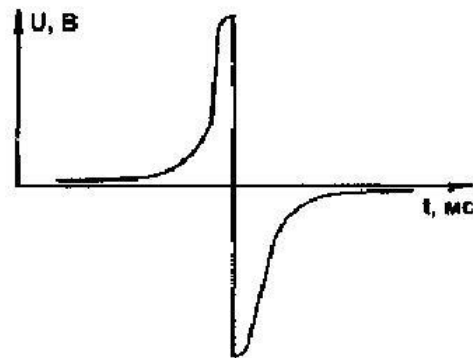


Рис. 24. Характеристика датчик оборотів

Величина напруги, що виробляється датчиком, залежить від частоти обертання ротора, числа витків котушки і величини магнітного потоку, створюваного постійним магнітом. Оскільки дві останні величини постійні, величина індукційного напруги досягає максимуму при максимальній частоті обертання. При конструюванні слід приділяти особливу увагу посиленню імпульсів при малій частоті проходження.

3.10. П'єзоелектричні датчики

П'єзоелектричні датчики відносяться до датчиків генераторного типу.

Розрізняють прямий і зворотний п'єзоелектричний ефект. Прямий ефект полягає в тому, що на гранях деяких кристалів при їх стисненні або розтягуванні з'являються електричні заряди, подібні поляризаційним.

Прямий п'єзоелектричний ефект використовується для вимірювання швидко протікають динамічних процесів - тиску в стовбурах збрядь при пострілі, тиску газів в двигунах внутрішнього згорання, тиску звукових коливань. Велике застосування одержали п'єзоелектричні адаптери (звукосниматели), манометри, вібратори, вимірювачі прискорень (акселерометри) і багато інших пристроїв.

Зворотний п'єзоелектричний ефект полягає в тому, що при внесенні пьезокристалла в електричне поле, силові лінії якого збігаються з напрямом п'єзоелектричної осі, відбувається зміна геометричних розмірів кристалла (стиснення або розтягнення).

Матеріали п'єзокристал : кварц, сегнетова сіль, титанат барію, турмалін, метаніобат свинцю і барію. Матеріали відрізняються величиною п'єзоелектричної постійної ($K_0 = 2 * 10^{-12} - 150 * 10^{-12} \text{ к / н}$) та іншими параметрами. На рис. 17 показано пристрій п'єзоелектричного датчика.

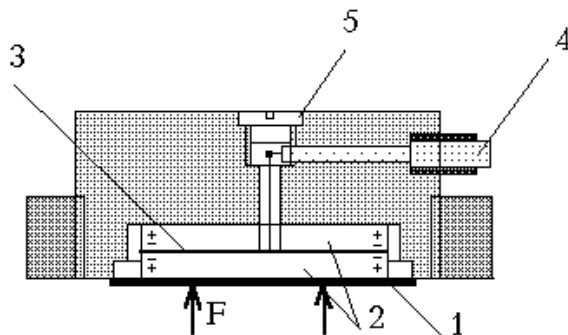


Рис. 25. Пристрій п'єзоелектричного датчика

На рис. 25 позначені: 1 - мембрана, яка сприймає зусилля, 2 - з'єднані паралельно пластини п'єзокристал, 3 - латунна фольга, 4 - екранований сигнальний кабель і 5 - пробка, що закриває монтажний отвір.

Переваги: малі габарити, можливість вимірювання швидкозмінних навантажень, надійність і простота конструкції

Недоліки: Різні у різних матеріалів: у кварцу мала п'єзоелектричний постійна, у інших температурна залежність.

Ультразвукові датчики застосовуються в гідроакустиці і в промисловості, при дефектоскопії деталей, а також в ряді приладів - витратомірів, газоаналізаторах і ін. Їх основою служить акустична система, до складу якої входять ультразвукові приймачі на основі п'єзокерамічних елементів ..

Області застосування п'єзоелектричних датчиків :

- 1) вимір вібрацій;
- 2) вимір тисків;
- 3) вимір зусиль;
- 4) вимір зосереджених сил;
- 5) вимір прискорень.

3.11. Оптичні датчики

Схема будь-якого оптичного датчика складається з наступних елементів: джерела випромінювання (І), приймача випромінювання (П), середовища передачі (М), організованого оптичного каналу (ОК) і об'єкта. Вимірюваний параметр об'єкта змінює характеристику оптичного каналу, яка вимірюється приймачем.

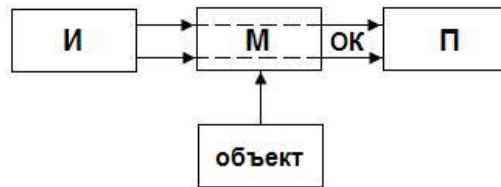


Рис. 26. Схема оптичного датчика

Всі оптичні датчики можна поділити на три групи:

1. датчики наявності і відсутності,
2. датчики положення і переміщення,
3. датчики параметра середовища, що впливає на прозорість / поглинання.

Прикладом датчиків першої групи є датчики серії АЗ. Оптичні датчики серії АЗ функціонують за трьома принципами і діляться на три типи:

Відображають оптичні вимикачі, які випромінюють і приймають відбитий від об'єкта світло, що знаходиться в зоні дії датчика. Як тільки вловлюється певна світлова енергія, на виході встановлюється відповідний логічний рівень. Величина дистанції від датчика до об'єкта залежить від розмірів улавливаемого предмета, від його кольору, шорсткості і т.д. і може досягати 2 м. Конструктивно випромінювач і приймач виконані в одному корпусі.

Відображають від световозвращателей, які випромінюють і приймають світло, відбите від спеціального відбивача (рефлектора) і при перериванні променя об'єктом видається вихідний сигнал. Дальність дії залежить від стану середовища (пил, дим і т.д.) і може досягати 5 м. Конструктивно випромінювач і приймач виконані в одному корпусі.

Датчики наскрізного типу, які мають роздільні конструктивно джерело світла і приймач, розташовані співвісно один навпроти одного. Будь-який предмет потрапляє в зону світлового потоку перериває його і викликає зміна вихідного логічного рівня. Дальність дії може досягати 20 м.

3.11.1. Фотоелектричні датчики положення

Сучасні оптичні датчики положення (ОДП) забезпечують найбільш високу роздільну здатність, надійність і точність, ОДП володіють і іншими достоїнствами. Для них характерна незалежність метрологічних параметрів від навантаження, а також висока перешкодозахищеність.

Основою ОДП є оптична система, що включає джерело світла, що кодує елемент (диск або лінійка) і блок фотоприймачів. Як джерела світла використовуються оптронні пари і освітлювачі у вигляді ламп розжарення з вольфрамовою ниткою. Для забезпечення рівномірної освітленості області кодує елемента застосовуються колімаційна лінза. Найвідповідальнішим вузлом ОДП, найбільшою мірою визначає його характеристики, є кодує диск, на якому з високою точністю фотоспособом виконана маска. Тип маски визначає спосіб кодування.

Зазвичай використовують кодує диски, на доріжках яких по колу розміщується до 2500 оптичних сегментів. Якщо ж використовувати лампи зі спеціальною тонкою ниткою розжарювання, то на диску з діаметром 100 мм можна розрізати понад 5000 таких сегментів.

ОДП класифікуються за двома основними ознаками.

За формою вихідного сигналу: відносні (накопичують) і абсолютні.

За способом кодування: растрові, імпульсні і кодові.

Накопичують (циклічні) перетворювачі використовують датчик і рахункову систему, підсумовує окремі збільшення, а також репер (мітку), щодо якого ці збільшення підсумовуються.

Датчики абсолютних значень не містять репера і виконуються або одношкальними, або у вигляді систем грубого і точного відліку.

3.11.2. Растрові оптичні датчики положення

Растрові оптичні датчики (РОДП) призначені для перетворення лінійних і кутових переміщень в цифровий код на основі використання растрової решітки. Растрові решітки модулюють світловий потік на шляху від джерела світла до приймача. Конструктивно растрові ґрати - це прозора пластина, на яку нанесено велику кількість непрозорих штрихів різної форми, зазвичай рівновіддалених і паралельних.

Для вимірювання лінійних переміщень зазвичай використовуються сполучення двох плоских паралельних растрів, а для вимірювання кутових - сполучення радіальних растрів.

РОДП включає блок освітлювача, що створює паралельний пучок світла, растрове сполучення з рухомого (вимірювального) і нерухомого (індикаторного) растрів, блок фотоприймачів і електронний блок обробки. Блок обробки складається з логічної схеми і реверсивного лічильника, що використовується як накопичується суматора (рис. 27).

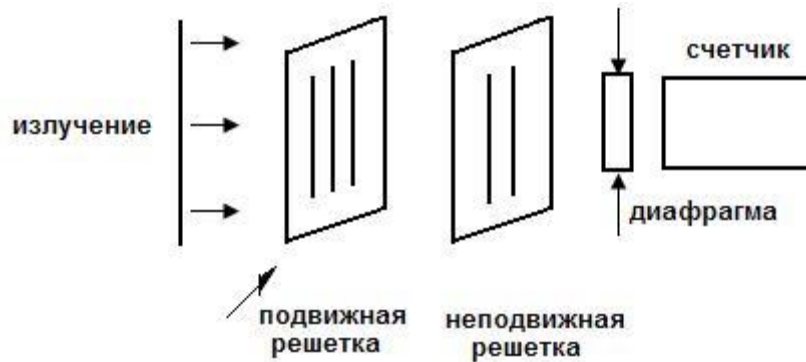


Рис. 27. Схема реєстрового оптичного датчика

Діафрагма скануючої головки містить чотири щілини, розміщені так, що вихідні сигнали фотоприймачів зрушені на чверть періоду вимірювальної решітки. Кількість імпульсів визначає величину переміщення, а логічна схема визначає напрямок переміщення, використовуючи послідовність надходження імпульсів.

Точність РОДП визначається мінімальною відстанню між растрами шкал (кроком) і кількістю растрових смуг на 1 мм / рад. Це відстань досягає у кращих датчиків 3 ... 5 мкм, а кількість смуг - 1000 на 1 мм. Роздільна здатність лінійних РОДП становить 1 ... 2 мкм.

До достоїнств РОДП відносяться проста і технологічна конструкція, а також малі розміри і маса.

До недоліків накопичення помилок від збоїв і перешкод в ланцюгах реверсивного лічильника, втрата інформації про переміщення при відмові в ланцюзі харчування, а також необхідність періодичного визначення нульового відліку (для отримання достовірного абсолютного значення вимірюваного переміщення).

3.11.3. Кодові оптичні датчики положення

Розглянуті раніше датчики формують вихідний сигнал у вигляді послідовності імпульсів. Однак в більшості випадків ДПП є елементами цифрових систем управління, що вимагає перетворення вихідного сигналу в цифрову форму. Саме такий сигнал формується в кодових фотоелектричних датчиках (КОДП). Оптичні системи КОДП і РОДП побудовані схожим чином, а кодує шкала КОДП є скляне підставу з нанесеною на ній кодовою маскою. Маска виконана у вигляді декількох (зазвичай до 20) доріжок з прозорими і непрозорими сегментами. Кількість доріжок, як правило, визначає розрядність вихідного двійкового коду. У момент знімання інформації промінь, проходячи через прозорі сегменти кодових доріжок шкали і обмежує щелеву діафрагму, висвітлює фотоприймачи (фотодіодні лінійки) (рис. 28).

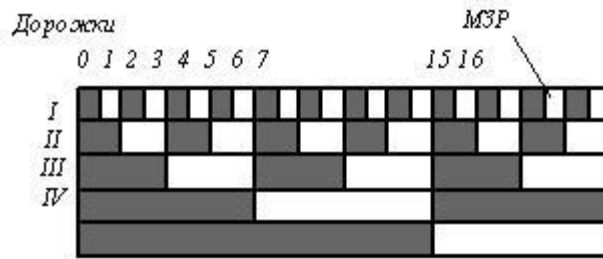


Рис. 28. Вид кодової маски

Відсутність сигналу з фотоприймача відповідає бінарного нулю, наявність - двійковій одиниці. В результаті кожному переміщенню відповідає певна комбінація двійкових одиниць і нулів, що є його цифровим кодом.

Вид конструктивної схеми КОДП визначається, головним чином, числом розрядів шкали і способом кодування та зчитування. У КОДП, найбільш часто використовуються дві схеми: КОДП з прямим двійковим кодом і КОДП з кодом Грея.

Шкали з прямим двійковим кодом є оптичними рейки або диски, розділені на рівновеликі майданчики - смуги для рейок і сектора - для дисків, на яких записані бінарні слова, відповідні прямому двійкового коду. Число майданчиків N визначає роздільну здатність КОДП: $D_a = L / N$ або $D_a = 360^\circ / N$. (Тут L - довжина рейки).



Рис. 29. Шкала з прямим двійковим кодом

Незважаючи на простоту кодування і зчитування шкалами зі звичайним двійковим кодом притаманний великий недолік, пов'язаний з появою неправдивих кодів. Ця особливість обумовлена неможливістю виготовлення ідеальних шкал і проявляється під час руху шкали, в момент зміни «1» на «0» або «0» на «1» одночасно в декількох розрядах. Так, при зміні коду 7 на 8, тобто 0111 на 1000 відбувається заміна значень відразу в чотирьох розрядах. Якщо ж, випадково (через похибки шкали), наприклад, у 2 розряді, не відбувається зміна «1» на «0», тоді замість значення «8» буде лічено «10» (1010). Істотно, що величина помилки перевищує ціну поділки шкали, що дорівнює одному молодшому значущій розряду (МЗР). Імовірність виникнення неоднозначності зчитування інформації в КОДП особливо велика при високих швидкостях руху шкали.

Для усунення неоднозначності зчитування застосовуються спеціальні методи зчитування і спеціальні коди. Більшість що випускаються промислово КОДП використовують код Грея, при якому помилка зчитування не перевищує величини МЗР, незалежно від того, в якому з розрядів сталася помилка. Недоліком датчиків, що використовують шкали з кодом Грея, є необхідність подальшої дешифрування кодів Грея в стандартний двійковий код.

Для перетворення числа із двійкового коду в код Грея використовують вираз:

$$g_k = b_{k+1} \dot{\wedge} b_k (\text{mod } 2),$$

де число в двійковому коді, представлено, як $B = b_n b_{n-1} \dots b_2 b_1$, а в коді Грея як $G = g_n g_{n-1} \dots g_2 g_1$.

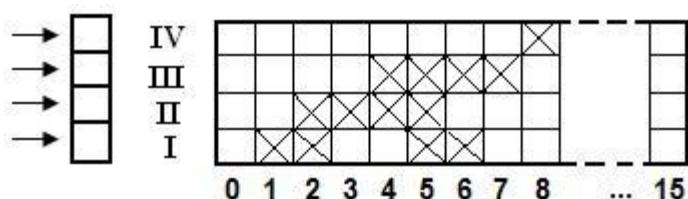


Рис. 30. Шкала з кодом Грея

Промислово випускаються одношкальні і двухшкальні КОДП. Найсучасніші датчики першого типу мають 12 ... 16 розрядну шкалу, двухшкальні КОДП містять дві 7 ... 9 розрядних шкали. І та й інша схеми дозволяють отримати 16 розрядний двійковий код і гарантувати роздільну здатність до 20 ".

Деякі моделі КОДП представлені в табл. 5.

Табл. 5. Приклади промислових КОДП

Модель	n, розряд	K, шкал	N, про	D _a , '	w, об / хв	Æ, мм	l, мм	m, кг
ППК-15	15	2	16	10,5	900	50	160	0,8
ROC 717	17	1		0,2				0,6
TSI-200	20	2		0,5		70	75	0,4

В даний час всі найсучасніші системи вимірювання переміщень будуються на основі КОДП. Їх гідності пов'язані з можливістю безпосереднього отримання двійкового коду і високою точністю вимірювань. Недоліки цих датчиків обумовлені технологічною складністю і високою вартістю, а також значними габаритами.

Контрольні питання до курсу:

1. Наведіть класифікація вимірювальних перетворювачів.
2. Назвіть основні поняття і визначення.
3. Які основні характеристики та принципи роботи датчиків?
4. Що таке «датчик»?
5. Класифікуйте датчики.
6. Які ви знаєте характеристики датчиків?
7. Що таке вимірювальна величина?
8. Опишіть функцію перетворення.
9. Що таке чутливість датчика?
10. Що таке поріг чутливості?
11. Що таке межа перетворень ?
12. Опишіть метрологічні характеристики.
13. Ведіть поняття надійності датчиків.
14. Які ви знаєте експлуатаційні характеристики?
15. Які ви знаєте принципи вибору датчиків?
16. Які ви знаєте основні датчики?
17. Класифікуйте вимірювальні перетворювачі.
18. Опишіть резистивні вимірювальні перетворювачі.
19. Опишіть резистивні датчики.
20. Опишіть терморезистивного датчики.
21. Як влаштований і працює термоелектронний перетворювач (термопара)?
22. Як забезпечити безконтактне вимірювання температури?
23. Опишіть ємнісні датчики.
24. Що таке індуктивні датчики і принципи їх роботи?
25. Що таке індуктивний датчик на дроселі і як він працює?
26. Опишіть диференціальні індуктивні датчики.
27. Опишіть яка будова і як працюють трансформаторні датчики.
28. Опишіть яка будова і як працюють індукційні датчики.
29. Опишіть яка будова і як працюють п'єзоелектричні датчики.
30. Опишіть яка будова і як працюють оптичні датчики.
31. Опишіть яка будова і як працюють фотоелектричні датчики положення.
32. Опишіть яка будова і як працюють растрові оптичні датчики положення.
33. Опишіть яка будова і як працюють кодові оптичні датчики положення.

Список рекомендованої літератури:

1. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин: Підруч. для студ. / Є. С. Поліщук; Держ. ун-т «Львів. політехніка». — Л., 2018. — 359 с.
2. Вимірювальні перетворювачі (сенсори): підручник / В. М. Ванько, Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець та ін. ; за ред. Є. С. Поліщука ; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львів. політехніка». — Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2017. — 584 с. : іл. — Режим доступу: . — Тит. арк. парал. англ. — Бібліогр.: с. 577—580 (88 назв). — ISBN 978-617-607-777-0
3. Бриндли К. Измерительные преобразователи. Справочное пособие. Перевод с английского Сычева Е. И. М.: «Энергоатомиздат», 1991. — 144 с. ISBN 5-283-02509-8
4. Левшина Е. С, Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин (Измерительные преобразователи). — Л.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Ревин В.Т. Преобразование и преобразователи измерительной информации: Учебное пособие. В 5 ч. Ч. 1 — Мн.: БГУИР, 2002. — 70 с.: ил.
6. Ревин В.Т. Преобразование и преобразователи измерительной информации: Учебное пособие. В 5 ч. Ч. 2 — Мн.: БГУИР, 2003. — 103 с.: ил.
7. Ревин В.Т. Преобразование и преобразователи измерительной информации: Учебное пособие. В 5 ч. Ч. 3 — Мн.: БГУИР, 2004. — 86 с.: ил.
8. Ревин В.Т. Преобразование и преобразователи измерительной информации: Учебное пособие. В 5 ч. Ч. 4 — Мн.: БГУИР, 2004. — 91 с.: ил.
9. Ревин В.Т. Преобразование и преобразователи измерительной информации: Учебное пособие. В 5 ч. Ч. 5 — Мн.: БГУИР, 2005. — 96 с.: ил.
10. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учеб. пособие для вузов./Под общ. ред. Н.Н.Евтихиева. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 352 с.: ил.
11. Основы метрологии и электрические измерения: Учебник для вузов/Под ред. Е.М.Душина. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. - 480 с.: ил.
12. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин (Измерительные преобразователи). Учеб. пособие для вузов. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. - 320 с.: ил.
13. Датчики теплофизических и механических параметров: Справочник в 3-х томах. Под общей ред. Коптева Ю.Н. — М.ИПРЖР, 1998.
14. Васюра А. С. Елементи та пристрої систем управління і автоматики. Віниця.: ВДТУ, 1999. — 157 с.
15. Дубовой Н. Д. Автоматические многофункциональные измерительные преобразователи. М.: «Радио и Связь», 1989. — 256 с. ISBN 5-256-00296-1

