

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ЖИТОМИРСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
АГРОЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Войцицький А.П., Нездвецька І.В.

**КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ
ПРИЛАДИ З ОСНОВАМИ МЕТРОЛОГІЇ**

Навчальний посібник

**ЖИТОМИР
2015**

УДК 621.38
ББК 32.85
В 65

*Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Житомирського
національного агроекологічного університету
(протокол № 9 від 6.052015р.)*

Рецензенти:

Безвесильна О.М. – д.т.н., професор кафедри приладобудування НТУУ «Київський політехнічний інститут»;

Гришук Р.В. – д.т.н., с.н.с., начальник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова Державного університету телекомунікацій;

Грабар І.Г. – д.т.н., професор кафедри процесів машин, машин і обладнання Житомирського національного агроекологічного університету »;

В-65 Войцицький А. П. Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології навч. посібник: / А.П. Войцицький, І. В. Нездвєцька.– Житомир: ЖНАЕУ , 2015.– 344 с.

В навчальному посібнику розглядаються засоби та способи вимірювань електричних, магнітних, неелектричних величин, методи оцінки точності результатів вимірювань.

Для студентів напряму підготовки “Енергетика та електротехнічні системи в агропромисловому комплексі”.

УДК 621.38

© Войцицький А. П.
© Нездвєцька І. В.

Роздруковано з оригіналу-макета замовника

АБРЕВІАТУРИ І СКОРОЧЕННЯ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач
ВНДІМ – Всесоюзний науково-дослідний інститут метрології
ВОК – вимірювально-обчислювальний комплекс
ВС – вимірювальні сигнали
ГВЧ – генератор високої частоти
ГНЧ – генератор низької частоти
ГКМВ – Генеральна конференція з мір і ваги
ГОСТ – міждержавний стандарт СНД
ГСЗУ –галузевий стандартний зразок України
ДК – Державний класифікатор
ДНДІ – Державний науково-дослідний інститут
ДСВ – Державна система забезпечення єдності вимірювання
ДСЗУ – Державний стандартний зразок України
ДСІ –Державна система забезпечення єдності і рівнозначності вимірювання
ДСТУ – Державний стандарт України
ДСТУП – Державний стандарт України пробний
ЕН – Європейська організація зі стандартизації
ЄАС – Європейська асоціація відповідності
ЄОЯ –Європейська організація з якості
ЄС – Європейський Союз
ЄСКД – Єдина система конструкторської документації
ЄСТД – Єдина система технологічної документації
ЗВ – засоби вимірювань
ЗВТ – технічний засіб вимірювання
ІВС – інформаційно-вимірювальна система
ІЕС (МЕК) – Міжнародна електротехнічна комісія
ISO – Міжнародна організація зі стандартизації
ISO/IEC – Міжнародні спільні стандарти
ККЕ – Консультативний комітет з електротехніки
МАГАТЕ –Міжнародне агентство з атомної енергії
МБМВ – Міжнародне бюро мір і ваги
МБЧ – Міжнародне бюро часу

МВВ – методика виконання вимірювань
МДРС – Міждержавна Рада стандартизації
МКМВ – Міжнародний комітет мір і ваги
МКРБ – Модульна координація розмірів у будівництві
МКРО – Міжнародна комісія з радіологічних одиниць
МОЗМ – Міжнародна організація законодавчої метрології
МС – Міжнародні стандарти
МСЗ – Міждержавні стандартні зразки
НД – нормативні документи
НПС – навколишнє природне середовище
ОП – операційний підсилювач
ОС – Орган із сертифікації
ОСТ – Обов’язків загальнодержавний стандарт
ПМД – правила міждержавної стандартизації
ПК – персональний комп’ютер
ПП – промислове підприємство
ПрДК – Проектний державний класифікатор
ПрДСТУ – Проектний державний стандарт України
САК – системи автоматичного контролю
СЕН – Європейський комітет стандартизації
СЗ – стандартний зразок
СЗП – стандартний зразок підприємства
СЗУ – стандартний зразок України
СІ – Міжнародна система одиниць фізичних величин
СТД – система технічної діагностики
СОУ – стандарт організації
СУНС – Система управління навколишнім середовищем
ТЗ – технічне замовлення
ТК – технічний комітет
ТУ – технічні умови
ТУУ – технічні умови, що не є стандартом
УкрНДІСС – Український науково-дослідний інститут стандартизації та сертифікації
УкрЦСМ – Український центр стандартизації метрології
УНС – Управління навколишнім середовищем
ФВ – фізична величина

ХДНДІ – Харківський державний науково-дослідний інститут

ЦАП – цифро аналоговий перетворювач

ЦВП – цифровий вимірювальний прилад

ЦОВМ – Центральний орган виконавчої влади у сфері метрології

ЦОЙМ – орган управління на проведення державних випробувань та повірку засобів вимірювальної техніки

ПЕРЕДМОВА

Засоби вимірювальної техніки є обов'язковим елементом будь-якого процесу вимірювання. Більш того, вони значною мірою визначають його якість, оскільки саме ЗВТ забезпечують зберігання одиниць вимірювань і їх порівняння з розміром вимірюваної величини, тобто виконання основних вимірювальних операцій. Проте в ряді практичних випадків для здійснення вимірювального експерименту, крім ЗВТ, необхідні й інші технічні засоби, які забезпечують, зокрема, підтримання умов виконання вимірювань, збирання, зберігання і передавання вимірювальної інформації, виконання обчислень тощо.

На теперішній час *вимірювальна техніка* – це величезний парк різноманітних ЗВТ з різними технічними і метрологічними характеристиками.

Особливо важливими для процесу вимірювання є метрологічні характеристики, тому що вони впливають на результат і похибку вимірювання. Всі метрологічні характеристики ЗВТ підлягають нормуванню, під яким розуміють завдання номінальних значень і границь допустимих відхилень реальних метрологічних характеристик ЗВТ від номінальних значень.

Засоби вимірювальної техніки можна використовувати для виконання вимірювань тільки за умови, коли відомі їхні метрологічні характеристики. Ця вимога настільки важлива, що вона введена у визначення засобу вимірювальної техніки.

Вимірювальні прилади є найбільш розповсюдженим видом ЗВ. У систему їх класифікації покладені такі основні ознаки: рід вимірюваної фізичної величини, призначення, елементна база, спосіб одержання значення вимірюваної величини, спосіб обробки вимірювальної інформації, захищеність від впливу зовнішніх умов.

Сучасні методи і засоби вимірювальної техніки вимірювань сформувалася на загальних фізичних, хімічних, математичних законах, виробляючи з їх залученням власний інструментарій дослідження. Функції науково-теоретичної,

законодавчої та прикладної метрології взаємопов'язані і спрямовані на забезпечення єдності та точності вимірювань.

З підвищенням точності вимірювань і розширенням їх діапазону, тобто з розвитком метрології, усе більше параметрів можна було уніфікувати, стандартизувати, встановити для них обов'язкові норми і вимоги.

Великий вклад у становлення сучасної метрології як науки внесли вітчизняні вчені: Б. С. Якобі, В. Я. Струве, А. Я. Купфер, В. С. Глухов, Д. І. Менделєєв, Н. Г. Єгоров, Л. В. Залуцький, Л. І. Кременчуцький, Б. І. Руденко, І. П. Глибін та ін.

Особливо слід підкреслити значну роль Д. І. Менделєєва у розвитку метрології. Його роботи з вимірювання маси і температури, а також щодо впровадження метричної системи залишаються актуальними і сьогодні.

Найбільшого розмаїття електровимірювальних приладів досягнуто в енергетиці. Без застосування електровимірювальних приладів була б неможливою робота сучасних електричних станцій, де нормальна дія кожного енергоблоку може підтримуватись персоналом лише на основі аналізу інформації, що надходить від багатьох десятків (а іноді й сотень) приладів, які контролюють безліч параметрів енергоблоку. При цьому чи не найбільша частина цих електричних приладів контролює неелектричні величини.

Навчальна дисципліна “Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології” (КВПзОМ) належить до спеціальних профільюючих дисциплін і забезпечує формування знань та вмінь фахівців з метрології та вимірювань, необхідних для кваліфікованого метрологічного обслуговування сільськогосподарського виробництва. Ця навчальна дисципліна є базовою в структурі професійно орієнтованих дисциплін для підготовки фахівців ОКР Бакалавр напряму підготовки 6.100101 “Енергетика та електротехнічні системи в агропромисловому комплексі”.

Науковою основою цієї навчальної дисципліни є метрологія та теорія інформації. Технічною базою електричних вимірювань служать електричні засоби вимірювальної техніки. Основні завдання навчальної дисципліни впливають із її ролі в системі підготовки фахівців ОКР Бакалавр напряму “Енергетика

та електротехнічні системи в агропромисловому комплексі”, визначеної інструктивним листом Міносвіти України “Про покращення вивчення у ВНЗ основ метрології та стандартизації”.

Мета навчального посібника – надати знань студентам з теоретичних й правових основ метрології та практичного використання вимірювальної техніки.

ЧАСТИНА 2

КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИБАДИ



Розділ 1

ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ

Засоби вимірювань. Загальні уявлення
Вимірювальні прилади
Вимірювальні перетворювачі

1.1. Засоби вимірювань. Загальні уявлення

Засіб вимірювань (ЗВ) – засіб вимірювальної техніки, який реалізує процедуру вимірювань, має нормовані метрологічні характеристики, котрий відтворює та (або) зберігає одиницю фізичної величини, розмір якої приймається сталим в межах визначеної похибки протягом визначеного інтервалу часу. За конструктивним виконанням засоби вимірювань поділяються на:

- міри фізичних величин;
- вимірювальні прилади;
- вимірювальні перетворювачі;
- вимірювальне устаткування;
- інформаційно-вимірювальні системи;
- вимірювально-обчислювальні комплекси.

Міра фізичної величини – засіб вимірювальної техніки, призначений для відтворення та зберігання однієї або декількох відомих значень фізичної величини.

Міри фізичної величин поділяються:

- за принципом вимірювання;
- за призначенням;
- за родом фізичної величини.

За принципом вимірювання:

- *Однозначна міра* – міра, що відтворює одне значення фізичної величини (наприклад, гиря масою 1 кг).

- *Багатозначна міра* – міра, що відтворює декілька значень фізичної величини (наприклад, лінійка, електричний конденсатор змінної ємності, змінний електричний опір).

- *Магазин мір* – тобто набори мір, у яких вони об'єднані в єдине конструктивне ціле із пристроєм для їхнього з'єднання в різних варіантах сполучень (магазин опорів, магазин індуктивностей).

- *Зразкова речовина* – зразкова міра у вигляді речовини з визначеними властивостями, що відтворюються при дотриманні умов виготовлення, затверджених у специфікації на цю міру, наприклад чисті гази (водень, кисень), чисті метали (срібло, платина та ін.).

- *Стандартний зразок* – міра у вигляді речовини, за допомогою якої розмір фізичної величини відтворюється як властивість або як склад речовини, з якого виготовлений стандартний зразок, наприклад, стандартний зразок властивостей легованої сталі чи феромагнітного матеріалу визначеної марки.

За призначенням:

Еталони займають чільне місце серед мір, мають найвищу точність і призначені для відтворення та зберігання одиниць фізичних величин з метою передачі їх розміру зразковим мірам.

- *Зразкові міри* передають розмір фізичних величин робочим мірам, які призначені для визначення метрологічних характеристик засобів вимірювання.

- *Зразкові засоби вимірювань* – це затверджені в установленому порядку міри, вимірювальні прилади або ж вимірювальні перетворювачі, які призначені для перевірки та градуювання за ними інших засобів вимірювальної техніки.

- *Робочі засоби вимірювань* призначені для вимірювань, не зв'язаних із передачею величини одиниць фізичних величин. У цій групі виділяють точніші засоби вимірювань – лабораторні і менш точні – технічні.

За родом фізичної величини поділяються:

- *міри електричного опору* – вимірювальні котушки опору (однозначні) і магазини опорів (багатозначні);
- *міри індуктивності* та взаємної індуктивності, що називають вимірювальними котушками індуктивності, випускаються з класами точності від 0,5 до 0,05;
- *вимірювальні конденсатори* як однозначні міри ємності та магазини конденсаторів як багатозначні міри. Вимірювальні конденсатори мають клас точності від 0,005 до 1;
- *стабілізовані джерела живлення* знайшли широке застосування останнім часом як міри ЕРС та напруги, клас точності яких може досягати значення 0,0001;
- *вимірювальні генератори* – це джерела змінного струму і напруги заданої форми. Частота і напруга вимірювальних генераторів регулюються в заданому діапазоні із заданою точністю;
- *калібратори напруги і струму* – це стабілізовані джерела струму і напруги, на виході яких можна отримати калібровані, тобто заздалегідь відомі значення із заданою точністю та ін.

Еталони одиниць фізичної величини

Еталон (одиниці фізичної величини) – засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці фізичної величини та передавання її розміру відповідним засобам вимірювальної техніки, що стоять нижче за повірочною схемою, офіційно затверджений як еталон.

Усі основні одиниці фізичних величин відтворюються з найвищою точністю за допомогою міжнародних еталонів відповідних одиниць і зберігаються у Міжнародному бюро мір та ваги у спеціальних лабораторіях у місті Севр поблизу Парижа. Програмою діяльності цього бюро передбачені систематичні зіставлення національних еталонів провідних метрологічних лабораторій різних держав з міжнародними еталонами та між собою. Основне призначення еталонів – бути

матеріальною базою для відтворення та збереження одиниць фізичних величин.

Класифікація еталонів:

Первинний еталон – еталон, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці фізичної величини найвищою в країні (у порівнянні з іншими еталонами тієї ж одиниці) точністю.

Спеціальний еталон – еталон, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці в особливих умовах і замінює в цих умовах первинний еталон. Застосовуються для відтворення одиниць в особливих умовах, коли пряма передача розміру одиниці від еталонів технічно неможлива із заданою точністю (високий тиск, температура, частота тощо).

Державний еталон – первинний або спеціальний еталон, затверджений офіційно як державний. Державні еталони є основою технічної бази державної метрологічної системи. В Україні статус державних еталонів надається первинним еталонам, створення і вдосконалення яких здійснюється відповідно до державних науково-технічних програм, які розробляються ЦОВМ, з метою забезпечення потреб життєдіяльності людини, економіки і оборони України та інших сфер.

Вторинний еталон – еталон, якому передається розмір одиниці фізичної величини від первинного або спеціального еталона.

Еталон-копія – вторинний еталон, який призначається для передавання розміру одиниці фізичної величини робочим еталонам (зразковим з вимірювальної техніки).

Еталон передавання – вторинний еталон, що призначається для взаємного звіряння еталонів, які за тих чи інших обставин не можуть бути звірені безпосередньо.

Еталон-свідок – вторинний еталон, призначений для перевірки збереження державного еталона та для заміни його у разі псування або втрати. Він має найвищу серед вторинних еталонів точність та використовується тільки тоді, коли державний еталон не можна відтворити.

Робочий еталон – еталон, призначений для передачі розміру фізичної величини зразковим засобам вимірювальної техніки, а в окремих випадках – робочим засобам вимірювальної техніки.

1.2. Вимірювальні прилади

Вимірювальний прилад – це засіб вимірювань, в якому створюється візуальний сигнал вимірюваної інформації. Основне призначення вимірювальних приладів – візуальний показ контрольованого параметра за допомогою індикаторного пристрою, реєстрація його значення на різних носіях, вироблення сигналу поточного значення для системи регулювання. Виділяють показуючі і реєструючі вимірювальні прилади.

Вимірювальні прилади класифікують: за способом подання вимірювальної інформації – показуючі і реєструючі. *Показуючий прилад* (рис. 1.1) – допускає тільки відлічування показів значень вимірюваної величини. Розрізняють амперметри, вольтметри, манометри, термометри, лічильники води та газу та ін.



Рис. 1.1. Амперметр

Реєструючий вимірювальний прилад (рис. 1.2) – прилад, у якому передбачена реєстрація показів. Реєстрація значень може здійснюватися в аналоговій або цифровій формах. До них відносяться – самописні й друкуючі прилади.



Рис. 1.2. Прилад реєстрації атмосферного тиску

Реєстрацію значень в цифрових формах можна віднести цифрові прилади, які здатні запам'ятовувати вимірювальну інформацію.

За видом вимірювання – аналогові (безперервні) і цифрові (дискретні). В аналогових приладах вимірювальна інформація перетворюється за допомогою аналогових електронних пристроїв: вимірювальних підсилювачів, функціональних перетворювачів інформації тощо. Вихідний сигнал таких приладів є неперервною функцією вимірювальної величини і відображається за допомогою шкали та покажчика.

Приведене, згідно з ДСТУ 2681, визначення цифрового вимірювального приладу базується на формі подання результату вимірювання, тобто особливість цифрових вимірювальних приладів (ЦВП) полягає в тому, що результат вимірювання відбивається на шкалі пристрої у вигляді числа, як правило, десяткового, або символів.

За видом енергії, що використовується – електричні, пневматичні і гідравлічні прилади.

За застосуванням й конструктивним виконанням – стаціонарні, щитові, панельні, переносні.

За видом перетворення вимірювальної величини – електричні та неелектричні. Прилади для вимірювання неелектричних величин конструктивно складаються з двох самостійних пристроїв – первинного вимірювального перетворювача і вторинного вимірювального пристрою.

Вторинний вимірювальний пристрій – елемент вимірювальної інформаційної системи, який показує або реєструє значення вимірюваних величин.

Вимірювальні прилади характеризуються наступними параметрами:

- *Діапазон вимірювань* – метрологічна характеристика, що визначає інтервал значень вимірюваної величини, в межах якого пронормовані похибки засобу вимірювань.

- *Поріг чутливості* – найменше значення вимірюваної величини, яка може бути виявлена засобом вимірювань. Чутливість пов'язує зміну значення вимірюваного параметра з відповідною йому зміною показів приладу.

- *Точність* – ступінь збігання показів вимірювального приладу з істинними значеннями вимірюваних величин. Чим менша ця різниця, тим більша точність приладу (див. клас точності).

- *Стабільність* – здатність засобу вимірювальної техніки зберігати свої метрологічні характеристики в заданих границях протягом заданого інтервалу часу.

1.3. Вимірювальні перетворювачі

Вимірювальний перетворювач – вимірювальний пристрій, призначений для формування на своєму виході сигналу, що функціонально зв'язаний із сигналом вимірюваної інформації на вході у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення, обробки та збереження. Вимірювальна операція, яка здійснюється вимірювальним перетворювачем носить назву «вимірювальне перетворення».

На відміну від вимірювального приладу, сигнал на виході вимірювального перетворювача (вихідна величина) безпосередньо не сприймається спостерігачем. Обов'язкова умова вимірювального перетворення – збереження у вихідному сигналі інформації про кількісне значення вимірюваної величини через забезпечення функціональної залежності (переважно, лінійної) між вимірюваною величиною та сигналом на виході. У структурі давача (датчика) зазвичай виділяють вимірювальний перетворювач, що безпосередньо пов'язаний з вимірюваною величиною.

Первинним вимірювальним перетворювачем, або чутливим елементом, називається перетворювач, який першим взаємодіє з об'єктом вимірювання і видає сигнал вимірювальної інформації. Первинний вимірювальний перетворювач у значній мірі визначає основні технічні характеристики давача.

Основні характеристики вимірювальних перетворювачів:

- номінальна статична характеристика перетворення (градувальна характеристика) – залежність між інформативними параметрами вхідного і вихідного сигналів;

- коефіцієнт перетворення – коефіцієнт пропорційності лінійної залежності вхідного і вихідного сигналів;
- чутливість – відношення приросту вихідного сигналу до відповідного йому приросту вхідного сигналу (для випадку лінійної залежності чутливість збігається з коефіцієнтом перетворення);
- діапазон вимірювань – різниця граничних величин, що обмежують діапазон вимірюваної величини у якому робота вимірювального перетворювача задовольняє поставленим вимогам.

Принцип роботи вимірювального перетворювача може базуватись на використанні практично будь-яких фізичних явищ. Задача полягає в розробці на основі цих явищ принципів дії перетворювачів і доведення їх до конкретних методів та конструкцій, що забезпечували б, у першу чергу, необхідні метрологічні характеристики в заданих умовах застосування. У зв'язку з широким використанням передачі сигналів у вигляді електричних величин класифікація перетворювачів за видом сигналу може бути зведена до наступних видів:

- перетворення електричних величин в електричні (подільники напруги і струму, вимірювальні трансформатори, вимірювальні підсилювачі струму і напруги);
- перетворення неелектричних величин в електричні (термопар, терморезистори, тензорезистори, фотоелементи, реостати, ємнісні та індуктивні датчики переміщення і т.д.);
- перетворення електричних величин в неелектричні (механізми електровимірювальних приладів, що перетворюють величину сили струму чи напруги у відхилення стрілки чи світлового променя, датчики ультразвукових витратомірів тощо.

Параметричні перетворювачі

До параметричних перетворювачів відносяться: резистивні, індуктивні, трансформаторні і ємнісні перетворювачі. Їх широко використовують для перетворення неелектричних

величин (переміщення, зусилля, тиску, температури та ін.) у електричні величини (напругу, струм, частоту та ін.).

Резистивні. Як приклад, на рис. 1.3 зображений електрохімічний резистивний перетворювач. Такі перетворювачі використовуються головним чином для вимірювання концентрації розчинів електролітів. Найпростіший резистивний перетворювач містить два електроди, які опущені в досліджуваний розчин.

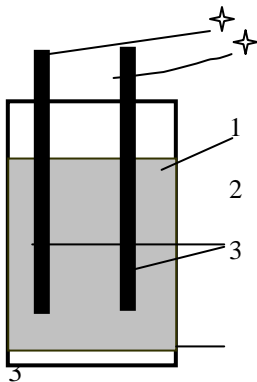


Рис. 1.3. Лабораторний контактний електрохімічний перетворювач:
1 - розчин, 2- електроди, 3 - посудина.

Потенціометричні лінійні перетворювачі. Лінійний потенціометричний перетворювач (ПП) має лінійну статичну характеристику в режимі холостого ходу (рис. 1.4)

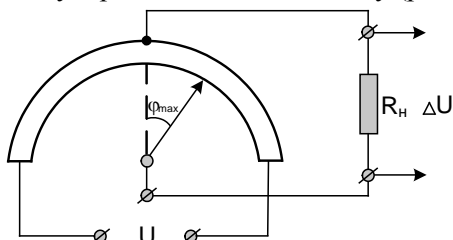


Рис. 1.4. Схема лінійного ПП

Нехай задано вихідні параметри для розрахунку: напругу живлення U і максимальний кут повороту движка (щітки) φ_{\max} .

Кут обмотки ПП $\varphi_{об}$ має задовольняти співвідношенню $\varphi_{об} > 2\varphi_{max}$ (максимальний кут повороту движка). Для ПП з лінійним переміщенням движка $l > 2x$.

Чутливість ПП з кутовим переміщенням движка становить:

$$S = \frac{\Delta u}{\Delta \varphi} = \frac{u}{\varphi_{ia}}. \quad (1.1)$$

Для ПП з лінійним переміщенням движка $S = \frac{\Delta u}{\Delta l} = \frac{u}{l}$,

звідки можна отримати значення крутості характеристики ПП. Опір обмотки ПП лінійним переміщенням движка:

$$R = \frac{\rho \cdot l_{\omega} \cdot \omega}{q \cdot 10^3}, \quad (1.2)$$

де ρ – питомий опір проводу обмотки. Ом·мм²/м; l_{ω} – середня довжина одного витка, мм; ω – число витків обмотки на каркасі; q – площа поперечного перерізу проводу обмотки, мм².

Як приклад розглянемо ПП для сигналізації зміни тиску. Принципову схему сигналізатора зображено на рис. 1.5. Мембрана використовується як чутливий елемент і дає переміщення движка $\Delta l = 1$ мм при зміні тиску наприклад на 0,1 ат.

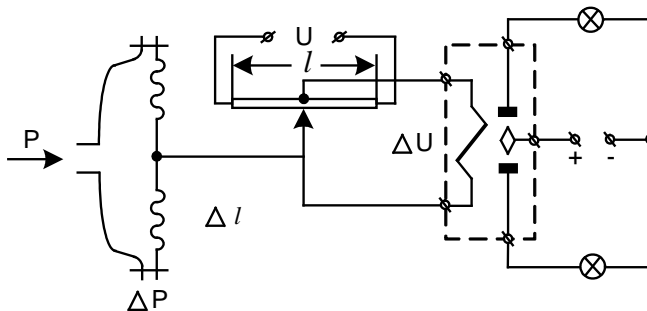


Рис. 1.5. Потенціометричний перетворювач для сигналізації зміни тиску

Ємнісний перетворювач. Для перетворення зміни ємності у відповідні зміни сили струму, напруги або частоти найчастіше застосовують мостову схему вмикання ЄП (рис.1.6).

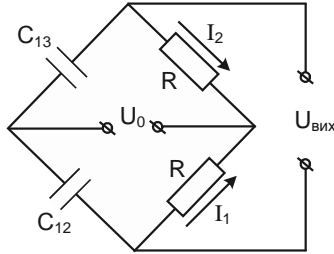


Рис. 1.6. Мостова схема ввімкнення ЄП

За середнього положення рухомої пластини – $C_{12} = C_{13}$, тобто приріст $\Delta = 0$, міст збалансований і напруга на його виході дорівнює нулю.

Опір ЄП визначається за формулою:

$$R_c = \frac{1}{2\pi fC}, \quad (1.3)$$

де C – ємність ЄП, Ф; f – частота живлення ЄП, Гц.

Величина зворотного впливу ЄП визначається силою електростатичного притягання між пластинами, H .

$$F_e = \frac{dW_e}{d\delta} = \frac{d}{d\delta} \left(\frac{CU_0^2}{2} \right) = \frac{U_0^2}{2} \frac{dC}{d\delta}, \quad (1.4)$$

де W_e – енергія електростатичного поля, Дж; $\Delta\delta$ – зазор, м; C – ємність, Ф; U_0 – напруга джерела живлення, В.

При $C, \delta = const$ – $F_e = U^2/2 \cdot C/\delta$.

Індуктивні перетворювачі. Індукційними перетворювачами можуть бути безпосередньо виміряні різні механічні величини: лінійні і кутові переміщення, рівень швидкості чи прискорення деталей, що рухається, деформація деталей, їхні розміри.

До переваг індуктивних перетворювачів відносяться: простота конструкції і надійність у роботі; відносно велика потужність на виході, що дає можливість безпосередньо до перетворювача підключати вимірювальний прилад; можливість живлення від мережі промислової частоти.

Деякі найбільш типові конструктивні схеми представлені в табл. 1.1. Для схеми 1 (табл. 1.1.) можна записати:

$$L = \frac{W^2}{R_M + R_\delta}. \quad (1.4)$$

Коли магнітний опір повітряного зазору значно більше магнітного опору магнітопроводу, тобто $R_M \ll R_\delta$, то залежність індуктивності L від величини зазору δ прийме вигляд:

$$L = \frac{W^2}{R_\delta} = \frac{W^2 \mu_0 S}{2\delta},$$

де W – кількість витків в обмотці перетворювача, шт.; δ – зазор, м; μ_0 – магнітна проникність металевого осереддя перетворювача, Гн/м, S – площа перерізу дротини магнітопроводу, м².

Залежність індуктивності L перетворювача від зазору істотно нелінійна (δ у знаменнику) і задовільна лінійність має місце за умови що $\Delta\delta \ll \delta$.

Генераторні перетворювачі

Генераторні перетворювачі – перетворюють вхідні величини в електрорушійну силу. Вони не потребують енергії додаткових джерел живлення, оскільки використовують енергію вхідного сигналу.

Найбільшого поширення набули індукційні, термоелектричні, п'єзоелектричні, фотоелектричні перетворювачі тощо. У якості генераторного перетворювача на рис. 1.7. зображений фотогальванічний перетворювач.

Напругу холостого ходу визначають за формулою:

$$U_{xx} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_\delta}{I_0} + 1\right), \quad (1.5)$$

де I_δ – фотострум, А; I_0 – тепловий струм, А.

Таблиця 1.1

Конструктивні схеми індуктивних перетворювачів

№ п/п	Перетворювач	Схема	Рекомендовані межі робочого ходу, мм
1	Із змінним зазором		0,001÷1
2	Із змінною площею		0,1÷8
3	На Ш-подібних сердечниках		0,001÷2
4	Диференційний		0,001÷1
5	Диференційний циліндричного типу		0,1÷6
6	Диференційний соленоїдного типу		4÷30
7	Із профільованим диском		Любі
8	Диференційний з профільованим диском		Любі

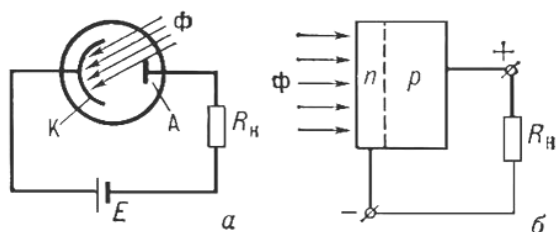


Рис. 1.7. Структура фотоелемента:

а) лампового; б) напівпровідникового; Φ – фотони світлового випромінювання; А – анод; К – катод; n – область з електронною провідністю; p – область з дірковою провідністю.

Фотоелементи використовують для реєстрації світлових потоків, контролю різних величин за допомогою світла, а також в якості джерела живлення (сонячні батареї). Деякий тип фотоелементів (кремнієві) можна застосувати для вимірювання температури в межах від 350 до 2000 °С.

Термоелектричні перетворювачі. Принцип дії термоелектричного перетворювача (термопари) ґрунтується на використанні термоелектричного ефекту, суть якого полягає у виникненні термоелектричної рушійної сили (термо-ЕРС) в колі, що складається з двох різнорідних (А, Б) провідників або напівпровідників, які називаються термоэлектродами. У термопар термо-ЕРС виникає за наявності різниці температур місць з'єднання різнорідних провідників (рис. 1.8). Для металевих пар за невеликої різниці температур рівняння термо-ЕРС:

$$E_{ав} = e(t_1 - t_2) \quad , \quad (1.6)$$

де t_1 і t_2 – температура спаїв; e – константа даної пари провідників, В/град.

Термоелектричні перетворювачі застосовують для вимірювання та контролю температури, як всередині, так і на поверхні об'єктів дослідження (наприклад, для вимірювання температури ґрунту, водного розчину, температури димових газів на виході топки котла тощо).

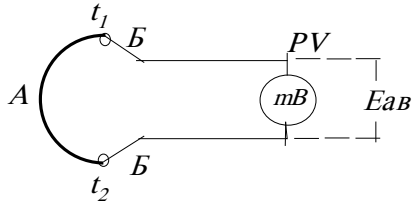


Рис. 1.8. Термопара з вимірювальним приладом

Іонізаційні перетворювачі. Іонізаційні перетворювачі основані на явищі іонізації чи люмінесценції деяких речовин під дією іонізуючого випромінювання. Якщо камеру, в якій знаходиться газ, піддати опроміненню, наприклад γ -променями, то між електродами потече струм I (рис. 1.9).

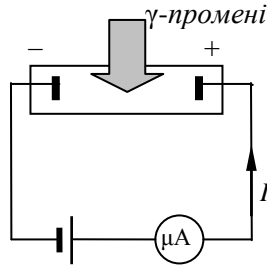


Рис. 1.9. Схема іонізаційного перетворювача

Цей струм буде залежати від прикладеної до електродів напруги, від щільності та складу газового середовища, розмірів камери і електродів, властивостей і інтенсивності іонізуючого випромінювання, тощо. Ці властивості можна використовувати для вимірювання різних неелектричних величин: щільності та складу газового та рідкого середовища; геометричних розмірів; інтенсивності випромінювання радіонуклідів, тощо.

В якості іонізуючих агентів використовують α -, β - і γ -промені радіоактивних речовин, рентгенівські промені і нейтронне випромінювання. Випромінювання характеризується за своєю іонізуючою і проникаючою здатністю. *Іонізуюча здатність* випромінювання визначається питомою іонізацією, тобто числом пар іонів, що утворюються в одиниці об'єму, маси середовища або на одиниці довжини шляху.

Для вимірювання ступеня іонізації використовують наступні перетворювачі: іонізаційні камери та іонізаційні лічильники. Принцип дії яких відповідає різним ділянкам вольт-амперної характеристики газового проміжку між двома електродами. На рис. 1.10 зображена залежність струму I камери, з постійним складом газу від прикладеної напруги U і інтенсивності опромінювання γ .

На ділянці А струм збільшується прямопропорційно напрузі, потім ріст його сповільнюється і на ділянці Б досягає насичення. Це вказує на те, що всі іони, які утворюються в камері, досягають електродів.

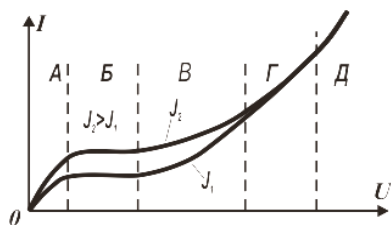


Рис. 1.10. Вольт-амперна характеристик іонізаційного перетворювача

На ділянці В іонізаційний струм знову починає зростати, що викликається вторинною іонізацією при зіткненні первинних електронів і іонів з нейтральними молекулами. При подальшому збільшенні напруги (ділянка Г) іонізаційний струм перестає залежати від початкової іонізації, і настає безперервний розряд (ділянка Д), який вже не залежить від впливу радіаційного опромінення. Ділянка А і Б вольт-амперної характеристики описують дію іонізаційних камер, а ділянки В і Г – іонізаційних лічильників.

Для реєстрації окремих часток, а також вимірювання незначних γ -випромінювань широко застосовують так звані газорозрядні лічильники Гейгера-Мюллера (рис. 1.11). При іонізації газу в ланцюгу лічильника виникає імпульсний струм,

число імпульсів підраховується цифровим лічильником після їх перетворення в нормуючі цифрові сигнали.

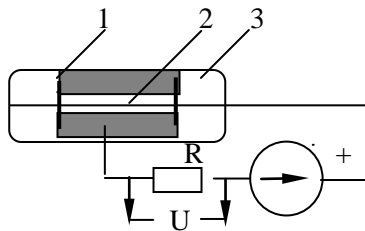


Рис. 1.11. Газорозрядний лічильник (Гейгера-Мюлера):
1 – металевий циліндр; 2 – вольфрамовий дріт; 3 – скляний циліндр.

П'єзоелектричні перетворювачі

Робота п'єзоелектричних перетворювачів основана на використанні п'єзоелектричного ефекту, що представляє собою здатність деяких матеріалів утворювати при механічному напруженні (від латинського *piezo* – стискаю) електричні заряди. Розрізняють прямий і зворотний п'єзоелектричний ефект.

Прямий п'єзоелектричний ефект оснований на появі електричних зарядів на гранях деяких діелектриків під впливом механічних напруг. При зникненні напруг діелектрик знову приходиться у не наелектризований стан. Подібні діелектрики називаються п'єзоелектричними.

Зворотний п'єзоелектричний ефект полягає в тому, що в п'єзоелектриків, що розташовуються в електричне поле, відбувається зміна геометричних розмірів.

Кількісно п'єзоэффект оцінюється п'єзомодулем H , що встановлює пропорційність між виникаючим зарядом Q , і накладеною силою P :

$$Q = dP. \quad (1.7)$$

Слід зазначити, що значення п'єзомодуля для монокристалічних п'єзоелектриків залежить від взаємної орієнтації кристалографічних осей, напрямку дії сил і граней, з яких знімають заряд.

На практиці для побудови п'єзоперетворювачів з монокристала п'єзоелектрика вирізують елемент у вигляді

шайби, чи пластинки диска таким чином, щоб найкращим способом використовувати властивості монокристала. При цьому представляється можливим так орієнтувати п'єзоелемент щодо осей кристала, що в одному випадку заряд буде залежати тільки від прикладеної сили і не буде залежати від геометричних розмірів елемента, в іншому на заряд буде впливати значення п'єзоелемента.

При практичному використанні звичайно вимірюють не заряд, а напругу на конденсаторі C , утворену струмо'земними гранями елемента п'єзоелектрика:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{dP}{C}. \quad (1.8)$$

При механічному впливі на п'єзоелемент на його електродах, згідно (1.8), виникає напруга.

Для виміру цієї напруги до п'єзоперетворювача підключають підсилювально-реєструєму апаратуру. Еквівалентна сила п'єзоперетворювача, зображена на рис. 1.12, на якому C_0 – ємність між електродами п'єзоелемента (ємність перетворювача); C_{ex} – ємність кабелю і вхідна ємність підсилювача; R_0 – опір перетворювача з урахуванням опору витoku по поверхні п'єзоелемента й опору ізоляції; R_{ex} – вхідний опір підсилювача.

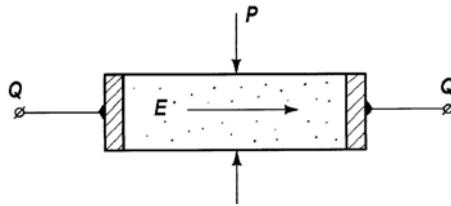


Рис. 1.12. Схема навантаження і включення п'єзокерамічних елементів

У подальших розділах також будуть частково розглядатися принципи роботи перетворювачів неелектричних величин в електричні.