

ЛЕКЦІЯ 2

Розділ 1. Теоретичні основи вимірювань та вимірювальні засоби

Тема 1.1: Фізичні величини і похибки вимірювань

Лекція 2. Вимірювання фізичних величин як складова наукових досліджень

План

1. Поняття про вимірювання фізичних величин
2. Класифікація вимірювань.
3. Види вимірювань

1. Поняття про вимірювання фізичних величин

Вимірювання полягає в порівнянні вимірюваної величини з деяким її значенням, прийнятим за одиницю. При цьому будь-яке вимірювання здійснюють обов'язково шляхом виконання фізичного експерименту, в якому взаємодіють об'єкт вимірювання і засоби вимірювальної техніки, а також, за необхідності, шляхом виконання певних обчислювальних процедур над отриманими результатами. Вимірювання можна характеризувати, враховуючи їхні різні ознаки. Якість отримуваних результатів значною мірою залежить від застосовуваних принципів, методів, методик та видів вимірювань.

Принцип вимірювання - це фізичний закон, ефект, явище, на яких ґрунтується вимірювання, тобто наукова основа вимірювання.

За фізичним принципом, покладеним в основу вимірювання, а також залежно від галузі науки і технології розрізняють електричні, магнітні, механічні, акустичні, оптичні, квантові, хімічні та інші вимірювання.

Метод вимірювання - це загальна логічна послідовність операцій з засобами вимірювальної техніки, що виконують при здійсненні вимірювань за певним принципом.

Один і той самий метод вимірювання можна застосовувати для вимірювання різних величин. Конкретна назва методу може залежати від принципу вимірювання.

Методика вимірювань, або інакше - **вимірювальна процедура** – це послідовність операцій, які необхідно виконати з конкретними ЗВТ для вимірювання заданою точністю певної величини за певним методом та принципом вимірювання. Методика вимірювання стосується вимірювання конкретної величини. Методику вимірювання зазвичай оформляють у вигляді спеціального документа, який іноді називають "Методика виконання вимірювань (МВВ)". У цьому документі детально регламентують застосовувані засоби вимірювальної техніки, їхню підготовку до виконання вимірювань, умови вимірювань, самі вимірювальні операції, спосіб опрацювання результатів та їхнє подання. Оператор може виконувати вимірювання за методикою без залучення додаткових засобів і використання додаткової інформації.

2. Класифікація вимірювань

Загалом кожне вимірювання передбачає порівняння величини з одиницею, яка відтворюється мірою. Отже, в кожному вимірюванні явно чи неявно присутня міра, і тому залежно від наявності під час вимірювання міри як окремого засобу вимірювальної техніки, виділяють різні методи вимірювання.

За способом порівняння з мірою розрізняють такі методи вимірювань: безпосереднього оцінювання, порівняння з мірою та комбіновані.

За способом отримання результату розрізняють прямі та непрямі вимірювання, а останні розділяють на опосередковані, сумісні та сукупні вимірювання.

За кількістю опрацьовуваних первинних результатів розрізняють разові (однократні) та багаторазові (багатократні) вимірювання.

За характером взаємодії ЗВТ з об'єктом дослідження розрізняють контактні та безконтактні вимірювання.

За характером зміни величин та показів вимірювальних засобів розрізняють статичні та динамічні вимірювання.

За докладністю оцінювання точності результатів вимірювань розрізняють технічні, лабораторні (науково-дослідні) та метрологічні (еталонні, прецизійні) вимірювання.

Класифікація методів вимірювань Методи безпосереднього оцінювання

Методи безпосереднього оцінювання - це методи вимірювань, що ґрунтуються на застосуванні засобів вимірювань (приладів, систем, каналів чи установок) і за потреби - і вимірювальних перетворювачів, а значення вимірюваної величини визначають за їхніми показами

$$x = X_{\text{п.}}$$

Наприклад, вимірювання сили електричного струму амперметром чи температури - термометром. Це метод безпосереднього оцінювання, оскільки за показом амперметра ми безпосередньо визначаємо силу вимірюваного струму в колі, за показом термометра - температуру в певному місці об'єкта.

До методів безпосереднього оцінювання належать також вимірювання, під час яких разом з вимірювальними приладами використовують вимірювальні перетворювачі. Зокрема, вимірювання сили струму за допомогою амперметра і вимірювального трансформатора струму, що застосовується для розширення границь вимірювання амперметра, належить до методу безпосереднього оцінювання. Таким методом вимірювання є вимірювання температури за допомогою термоелектричного перетворювача та вторинного мілівольтметра, якщо шкалу останнього проградуєвано в одиницях температури.

В методах безпосереднього оцінювання наявність міри та операції порівняння обов'язкові. Однак у випадку засобів вимірювань, зокрема вимірювальних приладів, міра не є незалежним засобом вимірювальної техніки зі своїми нормованими метрологічними характеристиками, а тільки

складовою частиною, елементом приладу. Характеристики такої міри (як елемента приладу) враховано під час нормування метрологічних характеристик приладу як цілого. Під час вимірювання і подальшого опрацювання результатів, зокрема оцінювання точності результату вимірювання, експериментатор не враховує характеристики міри, а користується характеристиками всього приладу.

Метод порівняння з мірою

Це методи, які ґрунтуються на *обов'язковому використанні міри та пристрою порівняння* (компаратора) як окремих ЗВТ і, за необхідності вимірювальних перетворювачів, а значення вимірюваної величини встановлюють при відновленні спрацюванні компаратора. Порівнюють вимірювану величину з мірою двома методами:

- шляхом зіставлення значень міри і вимірюваної величини за один раз;
- шляхом зрівноважування вимірюваної величини послідовним значеннями міри.

На завершальному етапі зрівноважування забезпечується взаємна компенсація ефектів дії на компаратор як вимірюваної величини, так і величини, відтворюваної мірою, то такий метод часто називають *компенсаційним методом вимірювання*.

Крім того, оскільки результируючий ефект дії на компаратор обох величин у разі зрівноважування доводять до нуля, то цей метод ще називають *нульовим методом вимірювання*.

Іноді ще застосовують назву "*метод протиставлення*", оскільки вимірювану величину ніби протиставляють вихідній величині міри.

Однак, за своєю суттю і *компенсаційний метод*, і *нульовий метод*, і *метод протиставлення* - це різні назви, що відображають різні аспекти *методу порівняння з мірою*. Основна особливість методів порівняння з мірою - використання в процесі вимірювання міри як засобу вимірювальної техніки. Її показ, а також інші метрологічні характеристики безпосередньо

враховують під час визначення результату вимірювання й оцінювання його якості.

Якщо вихідна величина міри і вимірювана величина однорідні, то кажуть, що здійснено вимірювання *методом безпосереднього порівняння з мірою*. реалізацією цього методу вимірювання досягають *найвищої точності вимірювання*, що визначається лише *точністю міри та компаратора*.

Для багатьох величин створення простої та високоточної регульованої міри, а також відповідного компаратора-пристрою порівняння - є складним завданням. Тому часто вимірювану величину попередньо перетворюють за допомогою вимірювального перетворювача (вимірювальних перетворювачів) в іншу величину, для якої створення міри та пристрою порівняння не становить особливих труднощів. У такому випадку можна говорити про вимірювання *методом опосередкованого порівняння з мірою*. Наприклад, вимірюючи силу постійного електричного струму можна спочатку перетворити його за допомогою зразкового (еталонного) резистора в напругу, яку після цього можна виміряти шляхом безпосереднього порівняння з мірою напруги. Результат вимірювання струму знаходять як показ міри напруги, поділеної на опір резистора. Точність вимірювання в цьому випадку визначається точністю міри, компаратора та зразкового еталонного резистора, тобто вона менша ніж у методі безпосереднього порівняння з мірою.

Метод заміщення

Метод заміщення — це метод різночасового порівняння вимірюваної величини з мірою, в якому компаратором слугує вимірювальний прилад (ВП). вимірювання відбувається у два етапи, спочатку під час першого вимірювання до входу приладу під'єднують об'єкт і запам'ятовують ефект дії вимірюваної величини на ВП, тобто показ приладу x , а потім під час другого вимірювання до входу приладу під'єднують вихід регульованої міри цей показ відновлюють, регулюючи вихідну величину міри X_m . Як результат вимірювання приймають показ міри $x = X_m$.

Комбіновані методи

Суть комбінованого методу полягає в тому, що в процесі вимірювання беруть безпосередню участь як вимірювальний прилад, так і міра, а результат вимірюваної величини визначають за показами міри і приладу. Такі методи ще називають методами неповного зрівноважування та *різницевиими (диференціальними)* методами.

Методи збігу

Ці методи використовують для вимірювання величин простору (вимірювання довжини) чи часу (вимірювання інтервалів часу, періоду, частоти), і полягають вони у тому, що різниця між ефектами, викликаними дією на компаратор вимірюваної та зразкової величин, визначається за збігом відповідних поділок шкал (вимірювання довжини) чи періодичних сигналів (вимірювання часових параметрів). Типовими прикладами такого методу вимірювань є вимірювання довжини штангенциркулем з ноніусом (метод ноніуса) метод подвійного збігу, а також вимірювання частоти стробоскопом (стробоскопічний метод).

Метод одного збігу (ноніуса). Це метод з одноразовим порівнянням вихідних міток (величин) двох багатозначних мір, кожна з яких має інші відстані між мітками (імпульсами під час вимірювання часу), причому нульові мітки цих мір зміщені між собою на розмір вимірюваної величини. Числове значення результат) вимірювання визначається номерами міток двох шкал, які збігаються.

Метод подвійного збігу полягає у тому, що періодична (у часі чи просторі) величина порівнюється з періодичною величиною, яка відтворюється багато значюю нерегульованою мірою, причому результат вимірювання (період I_x - інтервал між мітками (імпульсами) з вимірювального об'єкта) визначається кількістю інтервалів між двома сусідніми збіганнями міток (імпульсів) та періодом I_m - інтервалом між мітками (імпульсами) вихідної величини міри.

Для вимірювань величин спеціальних об'єктів застосовують інші специфічні методи. зокрема резонансний метод та метод биттів.

Резонансний метод вимірювання - це один із методів порівняння, який полягає у тому, що значення вимірюваної величини знаходять з відомої умови досягнення резонансу у електричному колі, механічній, акустичній чи іншій системі, а навіть на атомному чи ядерному рівні тощо.

Метод биттів - це один із різницевих методів, у якому використовують явище биттів між частотами двох сигналів, що порівнюються: одного вимірюваного, а іншого - зразкового.

3 Види вимірювань

З погляду отримання значення (значень) вимірюваної величини за результатами первинних вимірювань розрізняють прямі та непрямі вимірювання. До непрямих належать опосередковані, сумісні та сукупні вимірювання.

Прямі вимірювання

Пряме вимірювання - це вимірювання однієї величини, під час якого її значення отримують безпосередньо за показом відповідного приладу ХП, без необхідних для знаходження значення вимірюваної величини додаткових обчислень. Приклади прямих вимірювань: вимірювання сили струму амперметром, довжини лінійкою, інтервалу часу годинником, температури термометром, електричного опору омметром тощо. Значення вимірюваної величини вважається знайденим прямо, якщо шкалу вимірювального засобу проградуйовано прямо у відповідних значеннях вимірюваної величини або опосередковано через таблицю чи графік. Наприклад, під час вимірювання опору показ омметра і безпосередньо дає значення опору .

Вимірювання вважають також прямим і тоді, коли результат знаходять шляхом опрацювання результатів спостережень без перетворення роду величини, тобто коли результат вимірювання і результат окремого спостереження є одного роду. Наприклад, якщо для розширення границь

вимірювання амперметра застосовують вимірювальний трансформатор струму, вольтметра — вимірювальний трансформатор напруги чи подільник напруги тощо. Результат вимірювання в цьому випадку є добутком масштабного коефіцієнта κ_m відповідного масштабного перетворювача на показ приладу $X = \kappa_a X_n$. Вимірювання є прямим, навіть якщо необхідні додаткові вимірювання впливаючих величин, наприклад, щоб зробити корекцію систематичних впливів.

Опосередковані вимірювання

Під час опосередкованих вимірювань значення величини Y знаходять за результатами безпосередніх вимірювань величин $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, які пов'язані з нею функційною залежністю $Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$

Якщо результати вимірювань аргументів позначити як $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, то результат опосередкованого вимірювання отримують підстановкою результатів вимірювань величин-аргументів у відповідне рівняння вимірювання $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$.

Прикладом опосередкованого вимірювання є вимірювання опору споживача за результатами прямих вимірювань струму амперметром та напруги вольтметром за умови живлення схеми від джерела напругою.

Сумісні вимірювання. Вимірювання параметрів залежностей

Сумісні вимірювання переважно використовують для знаходження функціональних залежностей між декількома фізичними величинами, у найпростішому випадку - між двома X та Y

$$Y(X) = F[x].$$

Так, наприклад, сумісно вимірюють декілька значень вхідної величини - температури і відповідні значення вихідної величини - опору перетворювача для встановлення шляхом проведення відповідних обчислень функції статичної характеристики термоперетворювача опору.

Загалом функція між вхідною та вихідною величинами може бути як [лінійною, так і нелінійною відносно як незалежного аргументу X , так і шуканих коефіцієнтів. *Сукупні вимірювання (групові вимірювання)*

Існують різноманітні застосування сукупних вимірювань. Основною їхньою ознакою є те, що такі вимірювання використовують для знаходження значення не однієї величини, а певної кількості однорідних величин, причому первинними результатами є комбінації сукупної дії шуканих величин.

Прикладом сукупного вимірювання є вимірювання для визначення індивідуальних значень опорів резистивних сіток за результатами їхнього сукупного впливу. Якщо до внутрішніх вузлів такої сітки немає прямого доступу, то принципово неможливо безпосередньо виміряти значення опорів елементів такої сітки. Тут можливі прямі (за допомогою омметра) чи опосередковані (наприклад, за допомогою амперметра - вольтметра) вимірювання еквівалентних опорів між зовнішніми вузлами (електродами) сітки, причому кожен результат вимірювання є функцією (результатом) змішаного (паралельно-послідовного) увімкнення всіх елементів (резисторів) сітки

Такі самі проблеми можуть виникати у випадку багатoelementних вимірювальних перетворювачів з обмеженою кількістю виводів, наприклад, мікро-електронних (виготовлених у вигляді мікросхеми) цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП). У таких ЦАП також неможливо незалежно виміряти опори окремих його резисторів, оскільки внутрішні вузли (сполучення окремих резисторів) не мають зовнішніх виводів, тобто є недоступними до вимірювань.

Сукупні вимірювання здійснюють під час калібрування наборів мір. Хоча кожен міру з цього набору можна застосовувати окремо, однак основне призначення таких наборів - їхнє сукупне використання. Наприклад, нехай в наборі гир для зважування в діапазоні 1-1000 г використовують гирки масою 1 г, 2 г, 2 г, і 5 г; 10 г, 20 г, 20 г, 50 г; 100 г, 200 г, 200 г і 500 г. Під час зважування використовують різні комбінації гир (залежно від маси зважуваних тіл), тому для отримання приблизно однакової точності зважування у всьому діапазоні доцільно мати значення мас окремих гир у

сукупній залежності при відтворенні ними різних значень маси. Тому такі набори необхідно калібрувати сукупно.

Калібрування наборів мір, визначення параметрів багатоеlementних пристроїв, елементи яких використовують сукупно, здійснюють шляхом виконання сукупних вимірювань. Їхньою особливістю є те, що за групою результатів вимірювань сукупної дії різних комбінацій однотипних елементів досліджуваного об'єкта знаходять "найкращі", у певному значенні, індивідуальні значення параметрів цих елементів.

Результати таких вимірювань є функцією сукупної дії одночасно вимірюваних декількох величин. При цьому, залежно від того, чи шукані величини до кожного результату вимірювання входять лінійно чи нелінійно, сукупні вимірювання можна розділити на лінійні та нелінійні. Провівши всі можливі вимірювання сукупної дії окремих елементів і отримавши первинні результати, можна сформулювати систему (лінійних чи нелінійних) рівнянь. Невідомими у цих рівняннях саме і є шукані значення окремих елементів, які знаходять в результаті розв'язування отриманої системи рівнянь.

Разові вимірювання. Разові вимірювання виконують за умови стабільних показів засобів вимірювань, тобто за умови невеликих змінних регулярних чи випадкових впливів. Щоб переконатись у стабільності показів, зазвичай виконують декілька спостережень (3-4) і як результат вибирають один з них, не виконуючи якогось опрацювання.

Багаторазові вимірювання. Такі вимірювання необхідні у випадках, коли покази засобів вимірювань є нестабільними і розходження між ними перевищують допустимі границі, що встановлюються за класами точності та іншими метрологічними характеристиками. Причинами нестабільності показів переважно є змінні впливи похибок, наприклад, періодичні завади чи швидка зміна параметрів вимірювального кола, наприклад, розряд батареї живлення тощо, а також дія випадкових шумів та завад різної природи.

Під час багаторазових вимірювань кількість первинних вимірювань становить від 3-4 і аж до мільйонів. Усередненням отриманих результатів (чи

за допомогою інших статистичних методів) підвищують точність вимірювань завдяки взаємній компенсації складових змінних впливів.

Багаторазові вимірювання виконують також з метою знаходження певних характеристик (параметрів) сигналів і полів, таких як середнє значення, середнє за модулем і середньоквадратичне значення, градієнт тощо, а також з метою спектрального (частотного) аналізу сигналів.

Багаторазові вимірювання з метою зменшення випадкових впливів, або для визначення статистичних параметрів випадкових процесів (сигналів) називають *статистичними вимірюваннями*.

Контактні вимірювання. Вимірювання називають контактним, якщо ЗВТ має безпосередній механічний контакт з досліджуваним об'єктом. Наприклад, для вимірювання струму вмикаємо амперметр у вимірювальне коло, розмішуємо термоелектричний перетворювач в досліджуване середовище під час вимірювання його температури тощо. В багатьох випадках контакт ЗВТ з об'єктом може спричинити зміну параметрів об'єкта, зокрема і вимірюваної величини. Наприклад вмикання у коло амперметра з ненульовим опором змінює опір відповідної вітки кола та струм у ній, розміщення вимірювального перетворювача скінченної маси; невеликому об'єкту може спричинити перерозподіл температури в ньому тощо, і таких випадках враховують можливий негативний вплив ЗВТ на вимірювану величину, а також в певних випадках - негативний вплив середовища на ЗВТ.

Безконтактні (дистанційні) вимірювання. Це вимірювання, під час яких не існує безпосереднього механічного контакту ЗВТ з досліджуваним об'єктом, а вимірювану інформацію про стан об'єкта одержують шляхом використання різного виду випромінювань: оптичних, акустичних, теплових, іонізаційних, електромагнітних тощо. Теоретично такі випромінювання також відповідно впливають на об'єкт, наприклад, акустичні випромінювання створюють тиск на досліджувану поверхню, однак такий вплив є набагато меншим ніж у випадку контактних вимірювань. Хоча в певних вимірюваннях

необхідно також враховувати взаємодію ЗВТ з об'єктом через випромінювання.

Статичні вимірювання. Це вимірювання величини, яку можна вважати незмінною за час вимірювання, або якщо характеристики зміни величини відповідають динамічним властивостям ЗВТ. Наприклад, вимірювання діаметра, довжини, маси стрижня. *Динамічні вимірювання.* Це вимірювання величини, яка змінюється протягом вимірювального експерименту, або якщо характеристики зміни цієї величини не відповідають динамічним властивостям ЗВТ. Наприклад, вимірювання температури в процесі розігрівання пічки (змінюється вимірювана величина - температура) або вимірювання сталої температури відразу після розміщення терморезистивного перетворювача у досліджуване середовище - вплив інерційності вимірювального перетворювача, внаслідок чого опір перетворювача ще не досяг усталеного значення.

Технічні вимірювання. Це типові вимірювання на об'єктах з використанням наперед заданих ЗВТ, вимірювальних схем відповідно до конкретної методики вимірювань. Як правило, під час таких вимірювань спеціально не оцінюють характеристики точності результатів, оскільки вони закладені ще на етапі планування таких вимірювань у відповідній метрологічній установі, з урахуванням використовуваних ЗВТ та умов вимірювань. Наприклад, вимірювання параметрів генератора електричної станції (лінійні та фазові напруги, струми, частота, потужність тощо) в процесі його роботи.

Науково-дослідні (лабораторні) вимірювання.

Такі вимірювання здійснюють під час досліджень фізичних закономірностей в різних об'єктах навколишнього світу, зокрема створюючи нові технології і засоби вимірювальної техніки. Переважно це не типові вимірювання, за яких необхідно спеціально планувати вимірювальний експеримент, розробляти вимірювальну схему, обґрунтовувати вибір ЗВТ (зокрема, їхніх характеристик точності), забезпечувати умови вимірювань та

належне опрацювання результатів вимірювань з обов'язковим оцінюванням точності.

Метрологічні (прецизійні, еталонні) вимірювання.

Це вимірювання в метрологічних установах під час досліджень ЗВТ, створення нових методик вимірювань, під час метрологічних випробувань, контролю, атестації та експертизи, передавання розмірів одиниць фізичних величин тощо. Такі вимірювання здійснюють відповідно до суворо регламентованих рекомендацій, сформульованих у відповідних нормативних документах, що часто мають статус стандартів.

Висновок. 1. Будь-яке вимірювання здійснюють обов'язково шляхом виконання фізичного експерименту, в якому взаємодіють об'єкт вимірювання і засоби вимірювальної техніки, а також, за необхідності, шляхом виконання певних обчислювальних процедур над отриманими результатами.

2. Вимірювання можна характеризувати, враховуючи їхні різні ознаки. Якість отримуваних результатів значною мірою залежить від застосовуваних принципів, методів, методик та видів вимірювань.

Питання для самоконтролю

1. В чому полягає сутність принципу вимірювання?
2. Навести класифікацію вимірювань.
3. Охарактеризуйте прямі вимірювання.
4. Які ви знаєте види вимірювань?

Рекомендована література

1. Алесковский Б.Б и др. Физико-химические методы анализа. – Л., Химия. – 1988. – 373 с.