**Лекції №7-8**

**ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН**

**7.1. Вимірювання ФВ**

Для дослідження оточуючого світу, отримання кількісної визначеності параметрів штучних об’єктів, мати можливість проводити досліди, контроль та технічне обслуговування складних пристроїв та систем, перш за все потрібно визначити об’єкти вимірювання, поставити вимірювальне завдання та визначити значення відповідних фізичних величин.

***Об’єкт вимірювання*** – тіло (фізична система, процес, явище, тощо), яке характеризується однією або декількома фізичними величинами, що вимірюються.

Наприклад: об’єктами вимірювання є колінчастий вал (вимірюється діаметр, ФВ – довжина), технологічний процес (контролюються і вимірюються ФВ температура та тиск), ракета (вимірюються координати по вісях х,у,z, ФВ - довжина), ділянка ланцюга (вимірюється ФВ напруга).

***Вимірювальне завдання*** – завдання, яке полягає у вимірюванні конкретної ФВ із потрібною точністю в даних умовах вимірювання.

***Вимірювання ФВ*** - відображення ФВ їхніми значеннями за допомогою експерименту та обчислень із застосуванням спеціальних технічних засобів.

***Вимірювання ФВ*** – сукупність операцій із застосування технічного засобу (засобу вимірювання), в якому зберігається одиниця ФВ, за допомогою якого забезпечується знаходження співвідношення (в явній чи неявній формі) величини, що вимірюється, з її одиницею з метою отримання значення цієї величини. Значення ФВ отримують за допомогою відліку показань засобу вимірювання з наступним опрацюванням результату вимірювання.

З останнього, більш розширеного визначення, можна зрозуміти 3 аспекти (або характеристики) – обов’язкові та достатні - для того, щоб експеримент вважати вимірюванням (не кожен експеримент = вимірюванню). Вимірювання характеризується: 1) гносеологічним; 2) технічним та 3) метрологічним аспектами.

*Гносеологічний* – пізнавальний; за результатами експерименту дослідник здобуває нові знання (або уточнює, корегує і т.п. попередні).

*Технічний* – обов’язково застосовують технічний засіб вимірювання, який повинен мати технічні та метрологічні властивості*.*

*Метрологічний* – засіб вимірювання повинен зберігати у вигляді аналогової шкали (або цифрового індикатора) одиницю вимірювання, з якою в процесі вимірювання порівнюється величина, що є однорідною з одиницею, але невідомою за значенням; в результаті такого порівняння ми отримуємо значення вимірюваної ФВ (основне рівняння вимірювання).

Відлік показань засобу вимірювання здійснюється шляхом фіксації значення ФВ або числа по покажчику засобу вимірювання в завданий момент часу.

Наприклад: а) при вимірюванні лінійного розміру деталі застосовують засіб вимірювання – лінійку (рулетку, мікрометр або штангенциркуль), забезпечену шкалою з поділками. Прикладаючи лінійку до деталі, порівнюють розмір деталі з одиницею, яку забезпечує лінійка (метр, дециметр, сантиметр, мікрометр тощо), здійснюють відлік показань по шкалі та отримують розмір деталі.

б) при вимірюванні напруги або сили струму застосовують засіб вимірювання – аналоговий вимірювальний прилад (вольтметр або амперметр). За допомогою приладу порівнюють розмір ФВ (напруги або сили струму), який в приладі перетворюється в переміщення покажчика, з одиницею, яку зберігає шкала відповідного приладу, роблять відлік показань і знаходять значення ФВ.

В процесі вимірювань ФВ використовуються вимірювальні сигнали, які утримують вимірювальну інформацію про ФВ.

*Вимірювальна інформація* - це кількісні дані про властивості матеріальних об’єктів або ФВ, які отримані за допомогою засобів вимірювань в результаті їх взаємодії з об’єктом вимірювання, може включати дані про похибки вимірювань. Вимірювальна інформація – одна із складових частин пізнання матеріального світу за допомогою експериментальних методів пізнання. Частиною вимірювальної інформації є вимірювальний сигнал.

В прикладі а) вимірювальним сигналом є відбите від шкали лінійки світло, яке надходить в очі експериментатору, вимірювальною інформацією – отримане значення ФВ (довжини, товщини, висоти або ширини деталі). В прикладі б) вимірювальними сигналами є безпосередньо електричний струм (саме струм; такий принцип дії багатьох аналогових приладів для вимірювання електричних ФВ), який проходить через вимірювальний ланцюг вимірювального механізму приладу та світло, відбите від його шкали, а вимірювальною інформацією – отримане значення напруги або сили струму.

Вимірювання можливо виконати за таких умов:

* ФВ можна виділити (відокремити) серед багатьох інших;
* повинна бути визначена одиниця вимірювання обраної ФВ;
* повинен існувати засіб вимірювання з потрібними характеристиками точності (або похибок).

У випадках, коли неможливо виконати вимірювання, проводять *оцінювання* величин по шкалах найменувань та умовним шкалам.

**7.2. Основне рівняння вимірювання**

Нагадаємо, що багато різноманітних об’єктів вимірювань мають одні й ті самі *якісні* властивості, але відрізняються їх *кількісними*, індивідуальними, властивостями. Для встановлення різниці в кількісному складі властивості конкретної ФВ або об’єкту встановлено поняття *розміру* ФВ. Знання розмірів дає можливість порівнювати фізичні величини і виконувати над ними математичні операції.

Основною операцією, в результаті якої отримуємо результат вимірювання, є операція порівняння вимірюваної величини Х з величиною. Прийнятою за зразок [x]. Відома аксіома Евдокса-Архімеда: «Для будь-яких двох відрізків *А* і *В*, *А < B* можна винайти таке натуральне число *N*, що *А* можна повторити додатними стільки разів, щоб сума була більшою *В*» (Рис. 1):

*А + А + … + А = А · N > B* (1.55)

Якщо *А · N > B, B >> A,* то отримуємо рівняння, яке основане на припущенні рівності всіх відрізків *А*, які підсумовуються всередині відрізка *В*:

(1.56)

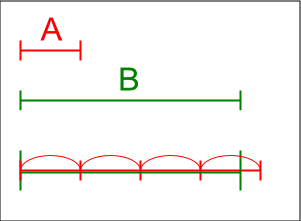


Рис.1 Ілюстрація закону Евдокса-Архімеда

Прийнявши *Х = В, А = [x]*, отримаємо

(1.57)

Відношення (1.57), записане у вигляді

*Х = N · [х]* (1.58)

де *N* – числове значення величини *Х*, називають ***основним рівнянням вимірювання.***

Тобто для реалізації вимірювання необхідно виконати:

1) операцію відтворення зразкової величини *[х]*;

2) операцію порівняння вимірюваної величини *Х* і зразкової *[х]*.

Розмір величини залежить від того, яка одиниця прийнята при вимірюванні величини. Розмір або кількісна оцінка вимірюваної величини має відповідати двом вимогам:

1) внаслідок вимірювання потрібно отримати не просто число, а число іменоване, тобто в певних одиницях, загальноприйнятих для даної величини;

2) результат вимірювання має містити оцінку точності отриманого значення вимірюваної величини.

Наприклад: за одиницю вимірювання напруги електричного струму прийнято 1 В, тоді значення напруги в мережі буде: U = 220 [1 B] = 220 B ± Δ1 В (± Δ1 - симетричне значення абсолютної похибки, яке є оцінкою точності результату вимірювання). Числове значення дорівнює 220. Але якщо за одиницю напруги обрати [1 кB], то U = 0,22 [1 кB] = 0,22 кВ ± Δ2 кВ, тобто числове значення буде 0,22.

Основне рівняння вимірювань показує, що числове значення залежить від розміру прийнятої одиниці вимірювання.

**7.3. Вимірювальне перетворення**

Процес встановлення взаємно-однозначної відповідності між розмірами двох величин: перетворюваної величини (вхідної) і перетвореній в результаті вимірювання (вихідної) називається ***вимірювальним перетворенням***.

Множина розмірів вхідної величини, яка перетворюється за допомогою технічного пристрою – вимірювального перетворювача – називається ***діапазоном перетворення***.

Вимірювальне перетворення є *лінійним*, якщо при збільшенні величини *Х*, що перетворюється, на *ΔХ* результат перетворення – величина *Y* – збільшується (або зменшується) на *ΔY*, а при збільшенні *ΔХ* в *n* раз значення *ΔY* збільшується (або зменшується) також в *n* раз.

Результат вимірювального перетворення (вихідна величина) не завжди є однорідною вхідні величині.

Наприклад: вхідною величиною може бути температура (в градусах Цельсія), а вихідною – електрична напруга (в вольтах); вхідною – тиск (в кілопаскалях), вихідною – індуктивність (в мілігенрі), вхідною – сила (в ньютонах або кілоньютонах), а вихідною – електричний опір (в міліомах).

Вимірювальне перетворення може здійснюватись різними способами в залежності від *видів фізичних величин*, котрі прийнято розділяти на три групи.

Перша група ФВ – це величини, на множині розмірів яких визначені тільки їх відношення у вигляді співставлення «слабкіше – сильніше», «холодніше - тепліше», «більше – менше» і т.п. Ці відношення встановлюють на основі теоретичних або експериментальних досліджень і називають *відношеннями порядку (або еквівалентності).*

До другої групи відносять величини, для котрих відношення порядку (еквівалентності) дійсні не тільки для самих розмірів, але й для їх різниць цих величин в парах їх розмірів. Це *відношення інтервалів* розмірів.

Третя група величин характеризується тим, що на множині їх розмірів (крім вищеназваних) можна виконувати операції додавання та віднімання (властивість адитивності).

***Вимірювальне перетворення*** – це відображення розміру однієї ФВ розміром іншої ФВ, функціонально з нею пов’язаної.

Вимірювальне перетворення лежить в основі структури (побудови) будь-якого вимірювального пристрою. Найбільш доцільним способом отримання вимірювальної інформації є перетворення різних ФВ (як електричних, так і неелектричних) в електричні (напруга, струм, опір). Перевагами цього вважають:

* Високу точність перетворювань і вимірювань;
* Зручність відтворення одиниці вимірювання;
* Зручність порівняння електричних величин;
* Високу швидкість вимірювання електричних сигналів;
* Високу швидкодія вимірювання, зручність передачі, зберігання та кодування інформації;
* Можливість автоматизації процесів;
* Можливість дистанційних вимірювань.

Вимірювальне перетворення здійснюється за допомогою вимірювальних перетворювачів.

**7.4. Класифікація типів вимірювань**

Для класифікації вимірювань необхідно встановити їх найбільш суттєві ознаки, до яких можна віднести:

* Спосіб отримання вимірювальної інформації;
* Змінюється в часі чи ні величина, що вимірюється;
* Кількість спостережень;
* Відношення до основних одиниць або спосіб виразу результату вимірювання;
* За призначенням.

Класифікація наведена в Таблиці 1.

Таблиця 1 – Класифікація типів вимірювання

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Ознака класифікації | Типи вимірювань |
| 1 | Спосіб отримання вимірювальної  Інформації | прямі  непрямі: - опосередковані;   * сукупні; * сумісні |
| 2 | За характером зміни вимірюваної величини | статичні;  динамічні |
| 3 | За точністю | рівноточні;  нерівноточні |
| 4 | За кількістю вимірювальної інформації | одноразові (однократні);  багаторазові (багатократні) |
| 5 | По відношенню до основних одиниць (виразом результату вимірювання) | абсолютні;  відносні |
| 6 | За призначенням | лабораторні (метрологічні);  технічні |

1. За способом отримання вимірювальної інформації.

***Пряме*** – вимірювання, результат якого отримують безпосередньо з експериментальних даних.

Пряме вимірювання характеризується тим, що

- не потребує перетворення роду ФВ або використання додаткових формул чи математичних залежностей,

- в наявності існує вимірювальний прилад, призначений для вимірювання саме цієї ФВ з встановленими і підтвердженими метрологічними властивостями,

- результатом вимірювання є безпосередньо відлік по шкалі або індикатору приладу,

- похибки результату вимірювання розраховуються по метрологічним властивостям застосованого приладу.

Наприклад: тиск вимірюють за допомогою манометра, силу струму – амперметром, електричний опір – омметром, силу – дінамометром (дін - внесистемна застаріла одиниця сили, 1 дін = 10-5 Н).

***Непряме*** – вимірювання, результат якого визначають розрахунком за результатами інших ФВ, отриманими прямими вимірюваннями, які пов’язані функціонально з шуканою величиною.

Непряме вимірювання характеризується тим, що:

* як правило, потребує перетворення роду величини;
* результат вимірювання находять за функціональною залежністю або шляхом вирішення системи рівнянь;
* похибки результату вимірювання враховують похибки всіх ФВ, які були виміряні безпосередньо.

Непрямі вимірювання поділяють на опосередковані, сукупні і сумісні.

***Опосередковане*** – вимірювання однієї величини з перетворенням її роду чи обчисленнями за результатами вимірювань інших ФВ, з якими вимірювана величина пов’язана функціональною залежністю.

Наприклад: а) вимірювання потужності *P = U2/R* ланцюга постійного струму, якщо вольтметром виміряна напруга *U*, а омметром опір *R*; вимірювання потужності в цьому випадку зводиться до розрахунку її значення за значеннями прямо виміряних величин напруги та опору.

б) вимірювання густини тіла циліндричної форми за результатами прямих вимірювань маси *m*, висоти *h* і діаметра *d* циліндра.

***Сукупне*** – одночасне вимірювання декількох однорідних ФВ, при якому результат вимірювання отримують шляхом рішення системи рівнянь, що пов’язують різні комбінації цих величин.

Кількість рівнянь повинна бути не меншою за кількість шуканих величин. Сукупні вимірювання проводять у випадках, коли неможливо безпосередньо виміряти однорідні (однойменні) величини, але можна знайти значення різних поєднань цих величин.

Наприклад: а) вимірювання опору низки послідовно (або паралельно) з’єднаних резисторів:

*Rпосл. = R1 + R2 + … + Rn*  або ; (1.59)

б) визначення за допомогою важільних ваг значень мас *m2, m3, m4*  для набору з 4-х різних ваг, якщо вага однієї гирі відома: *m1 = 1 кг*. Безпосередньо зважити гирі неможливо (припустимо, за вимогами до точності або при відсутності компаратора), тому для визначення мас гир *m2, m3, m4* необхідно виконати звірення мас різних поєднань гир і отримати три рівняння, які пов’язують всі чотири маси. Припустимо, що виявилось

*m1 + m2 = m4,*

*m1 + m4 = m3,* (1.60)

*m1 + m3 = m2 + m4*

Рішення цієї системи дає такі відповіді: *m2 = 2 кг, m3 = 4 кг, m4 = 3 кг.*

***Сумісне*** - одночасне вимірювання декількох неоднорідних ФВ, при якому результат вимірювання отримують шляхом рішення системи рівнянь, що пов’язують їх з іншими величинами, які вимірюють прямо чи опосередковано з метою визначення залежності між ними.

Наприклад: вимірюється температура і електричний опір терморезистора, за результатами вимірювань і розрахунків встановлюється залежність опору терморезистора від температури виду

Rt = R20°C ± R·t, (1.61)

де R20°C – температура терморезистора при нормальних умовах (+20 °C).

2. За характером зміни вимірюваної величини.

***Статичні*** – вимірювання, які проводять при незмінній в часі (або так припускають) вимірюваної ФВ. При цьому вважається, що похибка, яка виникає від зміни значення ФВ, що вимірюють, настільки незначна, що нею можна знехтувати.

***Динамічні*** – вимірювання, в процесі яких вимірювана величина змінюється

До статичних вимірювань належать вимірювання параметрів різноманітних об'єктів (розміри деталі, індуктивність котушки, сила постійно струму тощо).

Динамічний режим може виникати при вимірюванні незмінної величини безпосередньо після включення засобу вимірювання внаслідок його інерційності, але через деякий час режим стає статичним. Також прикладом динамічного режиму є будь-який момент перемикання (зміна діапазону, включення в мережу додаткового обладнання, вимкнення/увімкнення окремих перетворювачів або приладів системи і т.ін.) В такі інтервали не рекомендовано робити вимірювання, треба зачекати закінчення перехідних режимів.

Інша річ, коли вимірюють параметри періодичних і аперіодичних сигналів. Результат вимірювання змінної в часі величини представляють сукупністю його значень з моментами часу, котрим відповідають виміряні значення. Тобто динамічні вимірювання відносяться до сумісних. В інших випадках результат динамічного вимірювання надають як усереднений.

Динамічні вимірювання підрозділяють на *безперервні* та *дискретні*.

***Безперервне*** – вимірювання, при якому значення ФВ фіксують безперервно, з урахуванням часу вимірювання (такі вимірювання здійснюють за допомогою аналогових засобів вимірювань).

***Дискретне*** – вимірювання, при якому значення вимірюваної ФВ фіксують в певні моменти часу, які перевищують час вимірювання приладу (такі вимірювання здійснюють за допомогою цифрових приладів).

3. За характеристикою точності

***Рівні за точністю*** – низка вимірювань одної ФВ, які отримані при умовах:

* одним і тим самим (або однаковими за потенційною точністю) вимірювальним приладом (або приладами);
* в одних незмінних умовах середовища;
* однією групою людей або одним експериментатором.

Ці ж умови, але навпаки, будуть зумовлювати отримання ***нерівних за точністю*** вимірювань.

Але зважати тільки на умови при отриманні результатів вимірювань неправильно. Результати вимірювань на рівно- або нерівноточність підтверджують за допомогою критеріїв згоди; тільки після такої перевірки можна встановити характер отриманих даних. Від цього залежить вибір методики опрацювання результатів і точність (величина похибки) кінцевого результату вимірювання.

4. За кількістю вимірювальної інформації.

***Одноразові (однократні)*** - вимірювання, при яких їх кількість дорівнює кількості вимірюваних величин. Одна величина – одне вимірювання. Однак, за такої умови може виникнути груба помилка – промах, тому зазвичай виконують поспіль два-три вимірювання і, якщо значення повторюються, то за результат обирають одне з них.

***Багаторазові (багатократні)*** - вимірювання, при яких кількість вимірювань *n* перевищує кількість вимірюваних величин *m*. Зазвичай n ≥ 4 і , і багаторазові вимірювання проводять для зменшення впливу випадкових складових похибок вимірювання.

4. По відношенню до основних одиниць.

***Абсолютне*** – вимірювання ФВ, яке ґрунтується на прямих вимірюваннях однієї або декількох основних величин та (або) застосуванні значень фізичних констант.

На практиці здебільшого здійснюють саме абсолютні вимірювання, так як отримані значення виражаються в одиницях виміряних величин. Наприклад: вимірювання сили тяжіння *F = mg* здійснюють як пряме вимірювання основної ФВ – маси *m* – та використання фізичної сталої *g* (в точці вимірювання маси).

***Відносне*** - вимірювання відношення величини до однорідної ФВ, обраної за одиницю, або до однорідної, прийнятої за початкову.

Отримані за результатами відносних вимірювань значення ФВ виражають в безрозмірних одиницях, таких як відсотки, проміле, децибели, непери тощо).

Наприклад: всі вимірювання з використанням основного рівняння вимірювань є відносними, так як результат знаходимо у вигляді відношення *Х/[x]*. Але вимірювання площі одного об’єкта шляхом порівнянні її з площею іншою об’єкта – недоречно, бо об’єкти можуть бути не подібними (коло і трикутник).

5. За призначенням.

***Лабораторні*** – вимірювання, за яких похибки кожного результату вимірювання оцінюють за даними, що одержані при цьому вимірюванні. Їх виконують висококваліфіковані спеціалісти, з використанням взірцевих засобів вимірювань для метрологічних досліджень еталонів одиниць та при розробці методик виконання технічних вимірювань.

***Технічні*** – вимірювання, які виконуються фахівцями за атестованими методиками вимірювань за допомогою серійних засобів вимірювань, що повинно забезпечувати завдані значення похибок і необхідний рівень точності цих вимірювань. Призначення – контроль параметрів об’єктів, поточні вимірювання.

**7.5. Основні характеристики вимірювань**

Основними характеристиками вимірювань є:

* принципи вимірювань;
* методи вимірювань;
* точність (похибка) вимірювань.

***Принципи вимірювання*** – це фізичні ефекти або явища, покладені в основу вимірювань тим чи іншим засобом вимірювання.

Наприклад: а) термоелектричний ефект – властивість зміни електричного опору металів та напівпровідників при зміні температури – використовують для точкового вимірювання температури. Також цей ефект проявляється в замкненому колі, складеному з двох різнорідних провідників або напівпровідників, в якому виникає термоелектрорушійна сила (термоЕРС) при наявності різниці температур в місцях спаю і з’єднання з вимірювачем. Чим більша різниця температур, тим більше значення напруги термоЕРС.

б) фотоелектричний ефект – перетворення енергії світла в електричну енергію.

в) ефект Допплера (або допплерівське зрушення) – виникає при русі спостерігача відносно джерела випромінювання (або навпаки) і полягає в зміні довжини хвилі або частоти сигналу; застосовується для вимірювання швидкості. .

г) явище надпровідності; поки використовується в дослідженнях і фізичних моделях, іграшках.

***Метод вимірювання*** - сукупність прийомів (способів) порівняння виміряної величини з її одиницею (або шкалою) у відповідності з обраним (реалізованим) принципом вимірювання.

Всі методи розділяють на методи безпосередньої оцінки (прямі) та методи порівняння. Метод вимірювання зазвичай обумовлений облаштуванням засобу вимірювання.

***Метод безпосередньої оцінки*** – метод вимірювання, в якому оцінку виміряної величини визначають за шкалою або з індикатора засобу вимірювання.

***Метод порівняння з мірою*** – метод вимірювання, в якому розмір вимірюваної величини порівнюють з величиною, яку відтворює міра (у відповідності до основного рівняння вимірювань); міра також вказує розмірність.

Також методи вимірювання поділяють на *контактні* і *безконтактні*, залежно від того, чи наводиться в контакт чутливий елемент приладу з об’єктом вимірювання, чи ні.

***Точність вимірювань*** визначається близькістю до нуля похибки вимірювання, тобто близькістю результату вимірювання ФВ до її істинного значення. Значення точності визначають величиною, зворотною до відносної похибки

, (1.62)

де δ – відносна похибка; взята за модулем, так як може приймати позитивне та негативне значення. Чим менша похибка, тим вище точність вимірювання.

До початку виконання вимірювань потрібно не тільки обрати потрібний метод вимірювання і підібрати засіб вимірювання, яки би забезпечував потребуючу точність результату, але й вказати чітку послідовність дій процесу вимірювання. Тому складається методика виконання вимірювань або методика вимірювань (МВ).

***Методика вимірювань*** – це сукупність операцій і правил при вимірюванні, виконання яких забезпечує отримання результатів вимірювань з гарантованою точністю у відповідності до прийнятого методу.