**Лекції №11-12**

**ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕОРІЇ ПОХИБОК ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ**

Якість засобів вимірювань та результатів вимірювань прийнято характеризувати вказівкою їх похибок. Характер проявів та причини виникнення похибок дуже різноманітні, тому на практиці прийнято розділяти похибки на різновиди в залежності від їх походження, умов виникнення, впливу на результат вимірювання, тощо. Кожна похибка має певне найменування.

***Похибка результату вимірювання*** – це число, яке показує можливі границі невизначеності отриманого значення виміряної величини.

***Похибка засобу вимірювання*** – це певна властивість ЗВ, для визначення якої потрібно застосовувати відповідні правила.

Похибка вимірювання ≠ Похибка засобу вимірювання

Історично так склалось, що певна частина *найменувань похибок* співпадає для результатів вимірювань і ЗВ, тому потрібно звертати увагу на галузі застосування термінів.

**11.1. Інструментальні та методичні похибки**

***Інструментальними*** (приладними, апаратурними, hardware) похибками ЗВ називають такі, які належать даному ЗВ, їх можна визначити при випробуваннях або повірці ЗВ і дані внести в паспорт або інший документ.

***Методичні*** – похибки, які пов’язані з методом проведення вимірювань, а не з конкретним екземпляром ЗВ. Вони часто пов’язані з тим, що на практиці вимірюють не потребуєму величину, а іншу, близьку до неї. Це також пов’язано з реалізацією принципу вимірювання (ідеальна модель) через той чи інший метод (реальне втілення моделі). Часто таке спрощення дає можливість реалізовувати найбільш прості, технологічні, надійні, універсальні прилади та методи вимірювань, але виникає похибка методу реалізації.

Найбільш впливовим чинником виникнення методичної похибки для вимірювальних приладів є вплив самого ЗВ при приєднанні його до об’єкту вимірювання. Приєднання до об’єкту вимірювання по типу вольтметру (який шунтує своїм вхідним опором ділянку ланцюга, на якій вимірюють напругу) зменшує вхідний опір (Rідеал → ∞), який був ДО приєднання приладу. Приєднання і вимірювання по типу амперметру, напроти, збільшує опір (Rідеал → 0), який був ДО приєднання. За рахунок цього і виникають методичні похибки при вимірюваннях. Більш того, похибка вимірювання одним і тим самим приладом, наприклад, вольтметром напруги на ділянках з малим опором може бути зневажливо малою, а на ділянках з високим опором – великою, якою не можна зневажати, а потрібно обчислювати і враховувати в результаті вимірювання. Тому користувач повинен при кожному конкретному вимірюванні напруги вимірювати ще вихідний опір досліджуваної ділянки.

В теорії цифрових приладів термін «методична похибка» застосовують для позначення *похибки квантування*, яка не залежить від розробника чи виробника, а виникає закладеним в принцип роботи приладу методом. Ця похибка обумовлена самим методом цифрового подання інформації і є неминучою. Тому вона належить саме до інструментальних похибок. Її значення можна зменшити саме апаратурним, інструментальним способом, а саме – підвищуючи розрядність аналого-цифрового перетворювача.

«Всі похибки, які обумовлені відхиленням реалізованих апаратно перетворень від ідеальних, відносяться до … інструментальних похибок. <…> До методичних похибок відносяться всі похибки, які можуть бути визначені і кількісно оцінені за допомогою формального опису (математичної моделі) вимірювальної процедури. Кількісна оцінка похибок та їх характеристик при цьому виконується на основі розрахунків або імітаційного моделювання» [1].

Таким чином, відмінною особливістю методичних похибок є те, що вони можуть бути визначені лише шляхом складання математичної моделі або імітаційним моделюванням вимірювального об’єкту і не можуть бути винайдені найретельнішим дослідженням самого вимірювального приладу.

Наприклад, визначення температури в центрі виготовленої деталі складного профілю (наприклад, за ливарною технологією) неможливо лише за вимірюванням температури на її поверхні, для цього потрібно мати математичну модель розподілу теплового поля цієї деталі.

Так як методичні похибки не можуть бути вказані в документації на ЗВ, а повинні оцінюватись самим користувачем, то він зобов’язаний при виконанні вимірювань чітко розділяти *фактично* вимірювану величину *і величину, яка підлягає вимірюванню*. Якщо об’єкт і процес вимірювання відомі, метод вимірювання встановлений і тривалий певний час, то за результатом такого дослідження його похибки можуть бути встановлені, визначені і нормовані.

**11.2. Основна і додаткова похибки**

Будь-який ЗВ працює в складних, змінних в часі, умовах. Це обумовлено тим, що в процесі вимірювання на об’єкт і середу вимірювання, засіб вимірювання, оператора за час вимірювання впливає декілька різноманітних чинників. Причому їх зміна за чисельністю, знаком, впливовістю і т.п. не є постійною. Кожен з впливових чинників можна дослідити окремо, але в реальних умовах прямого експерименту їх дія носить сукупний, корельований та малопередбачуваний характер. Від засобу вимірювання вимагається виділити і виміряти тільки один чинник – вимірювану величину. Всі інші чинники мають характер впливових, заважаючих і перешкоджаючих.

Кожен прилад проектується і виготовляється таким чином, щоб його чутливість до вимірюваної величини була набагато переважною, ніж чутливість до перешкод (перешкодостійкість). Але такі перешкоди, як температура (перепад температур), атмосферний тиск, вологість, вібрації, тряска, удари, стрибки напруги в мережі та ін. здійснюють суттєвий вплив на процес вимірювання, об’єкт і середу вимірювання і сам засіб вимірювання.

При випробуваннях, оцінці відповідності або первинній повірці, які проводять в лабораторних умовах, всі значення впливових чинників підтримують у відносно вузьких діапазонах, які відповідають умовам роботи того чи іншого ЗВ. Наприклад, температура підтримується в діапазоні (20 ± 5) °С, напруга живлення ± 5% від номінального значення, коефіцієнт гармонік ≤ 1% і т.ін. Такі умови називають *нормальними*, а похибку ЗВ, яка виникає в нормальних умовах, називають ***основною похибкою***.

В експлуатаційних умовах ЗВ буде застосований в умовах, які відрізнятимуться від лабораторних, що призведе до виникнення похибок, за значеннями більшими, ніж в нормальних умовах або умовах повірки.

Змінення показань внаслідок відхилень умов експлуатації від нормальних виникають за рахунок впливу перешкоджаючих чинників і називають *додатковими похибками,* які *нормують* як коефіцієнти впливу або функції впливу змінення окремих впливових величин на змінення показань у вигляді: ΨΘ; ; ΨU; , тощо. Числа *n* та *m* показують, на скільки відсотків потрібно збільшити значення основної похибки вимірювань при вказаному відхиленні від нормальних умов того чи іншого чинника.

В загальному випадку функції впливових чинників нелінійні, тому їх представляють у вигляді графіка, формули або таблиці. Але часто для простоти обрахувань і при допущенні, що значення впливового чинника незначно перевищує межі нормальних значень, їх наближено вважають лінійними і визначають

*γдодат = Ψ·ΔΘ* або *γдодат = f(Ψ·ΔΘ)*, (1.70)

де *Ψ* – коефіцієнт впливу,  *f* - функція впливу,

*ΔΘ* – відхилення від нормальних умов чинника (в даному випадку термодинамічної температури).

***Додаткова похибка*** – складова похибки ЗВ, яка додатково виникає внаслідок відхилення будь-якої впливової величини (впливового чинника) від нормального її значення або внаслідок її виходу за межі нормальної області значень.

Похибка ЗВ в реальних умовах його застосування називається ***експлуатаційною*** і складається з його основної похибки і всіх додаткових (сумарна або сумарна вірогідна).

**11.3. Статичні і динамічні похибки**

Статичні та динамічні похибки притаманні як засобам, так і методам вимірювань. Їх розділяють за залежністю від швидкості змінення вимірюваної величини в часі.

***Статична*** - похибка, яка не залежить від зміни в часі значення ФВ або такими змінами можна знехтувати. Тобто припускається, що дійсне значення вимірюваної величини не змінюється, тому й абсолютна похибка також залишається незмінною.

***Динамічна*** – похибка, яка виникає додатково при вимірюванні змінної ФВ і обумовлена невідповідністю реакції ЗВ на швидкість (частоту) змінення вхідного сигналу.

Сутністю динамічної похибки є неідеальність динамічних характеристик засобів вимірювань. Впливовою величиною є *швидкість змінення в часі* самої вимірюваної величини, тому динамічну похибку часто називають похибкою запізнення реакції самого ЗВ (похибка запізнення). Вона зумовлена затримкою вихідного сигналу ЗВ відносно зміни вхідного сигналу (який є вимірюваною ФВ), спотворенням його форми тощо.

Динамічні похибки за причиною виникнення є інструментальними.

х х

Δстат Δдин

х Вимірювана ФВ

хд  x

Дійсне значення хд

t1  t t2 t

*а б*

Рис. 11.1. Ілюстрація статичної (а) та динамічної (*б*) похибок

При аналізі похибок статичні і динамічні похибки розглядають окремо. Спочатку визначають статичні, які залежать тільки від значень вимірюваної і дійсної величин. При визначенні динамічних похибок аналізують взаємозв’язок між сигналами на вході та виході ЗВ, яка залежить не тільки від значення вимірюваної величини, але й від характеру змінення її в часі. Поширеним є метод відтворення (імітації) умов, при яких в процесі вимірювань проявляються відповідні похибки.

В більшості випадків при вимірюваннях необхідно отримувати результати, які би не перевищували заздалегідь завданих значень, тому потрібно враховувати загальну похибку вимірювань, отриману підсумовуванням окремих її складових.

**11.4. Систематичні, прогресуючі та випадкові похибки**

***Систематична*** – складова похибки ЗВ, яку приймають за постійну або закономірно змінну або така, яка є незмінною в часі функцією певних параметрів. Основною ознакою систематичної похибки є те, що її можна передбачити або розрахувати і усунути або зменшити шляхом введення відповідної поправки. Але систематичну похибку важко розпізнати при технічних вимірюваннях. Тому кожен ЗВ повинен проходити періодичну повірку, в результаті якої і визначають характер та значення систематичних похибок, розраховують поправки і вказують їх значення в експлуатаційній документації для корегування результатів вимірювань.

Прикладами систематичних похибок є більшість додаткових похибок, які є незмінними в часі функціями величин, що їх викликають (температури, частоти, напруги і т. ін.). Оскільки ці похибки мають сталість в часі функцій впливу, то вони також можуть бути передбачені і скореговані уведенням додаткових корегувальних перетворювачів, які сприймають впливову величину, розраховують в реальному часі і вводять поправку в результат вимірювання.

Зазвичай проектувальники ЗВ розробляють схему із вбудованими додатковими вимірювальними каналами, кожен з яких призначений для вимірювання окремого впливового чинника і корегування його впливу на результат.

***Прогресуюча*** (або *дрейфова*) – похибка, яка непередбачувана в часі або повільно змінюється. Причинами цих похибок є процеси амортизації і старіння окремих деталей, вузлів, агрегатів ЗВ (наприклад, розрядження джерел живлення, старіння резисторів, конденсаторів, деформації механічних деталей, т.п.)

Однією особливістю цих похибок є те, що їх можна скорегувати введенням поправок тільки в даний момент часу, а надалі вони будуть змінюватись (зростати) непередбачуваним чином. Другою особливістю є те, що зміна в часі їх значень, є нестаціонарним випадковим процесом. Тому для корегування прогресуючих похибок тим більше потрібно використовувати швидкі (неінерційні) прецизійні перетворювачі.

***Випадковими*** похибками називають непередбачувані ані за знаком, ані за розміром похибки. Вони виникають як результат впливу на процес вимірювання багатої кількості різноманітних чинників випадкового характеру. Випадкові похибки можна виявити та зменшити при повторних випробуваннях однієї ФВ. Вони проявляються у вигляді деякого розкиду отримуваних результатів спостережень. Тому опис випадкових похибок може бути здійснено на основі теорії ймовірностей і математичної статистики.

В реальних вимірюваннях ці три складові похибки проявляються сумісно і створюють єдиний нестаціонарний випадковий процес.

**11.5. Похибки адекватності і градуювання**

Вимірювання не є ідеальним процесом, тому результат завжди містить похибки різного характеру, а характеристики ЗВ (давальників, перетворювачів, приладів, каналів інформаційно-вимірювальних систем – ІВС і інформаційно-вимірювальних комплексів - ІВК) виявляються неоднозначними.

При експериментальному визначенні характеристик засобів вимірювань (або *градуюванні ЗВ*) отримують низку значень, які на графіку представляють як низку точок, які поєднують між собою плавною усередненою кривою, котру і приймають за характеристику ЗВ, хоча деякі експериментальні значення (точки) від неї відхиляються.

***Похибка градуювання ЗВ*** – похибка дійсного значення величини, яке приписане тій чи іншій відмітці шкали ЗВ за результатами градуювання. Ця похибка доречна для аналогових ЗВ (тобто тих, які мають шкалу і покажчик).

Відхилення, які систематично спостерігаються, від обраної в якості характеристики плавної кривої, в загальному випадку називають похибкою адекватності обраної функціональної залежності. Функціональна залежність характеризує взаємозв’язок вихідної величини (вихідного сигналу) ЗВ від вхідної (або сигналу, поданого на вхід ЗВ). Вона може бути виражена прямою лінією, параболою, експонентою і т. ін. Похибка адекватності *характеризує*, наскільки реальна функціональна залежність співпадає (або не співпадає) з математично-ідеальною.

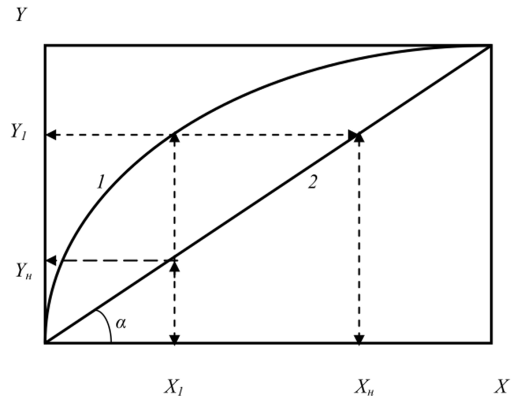
Наприклад, якщо залежність характеризується прямою, то похибку адекватності називають похибкою *лінійності* ЗВ. Якщо похибка адекватності змінює свій знак залежно від напряму попереднього відліку змінення вхідної величини, то таку похибку називають похибкою *від гістерезису* або *варіацією* ЗВ.

Похибки ЗВ можуть бути обумовлені недостатньою точністю зразкових ЗВ, котрі використовують при градуюванні. Тому встановлені допустимі співвідношення між точністю ЗВ, що повіряють (калібрують) і зразковими ЗВ як 10:1, 5:1, 3:1. Тобто, якщо клас точності робочого ЗВ дорівнює 1,5, то клас точності зразкового ЗВ не повинен бути більшим за 0,5.

**11.6. Поняття смуги похибок, реальної і номінальної характеристик ЗВ, абсолютна, відносна і наведена похибки, адитивна та мультиплікативна похибки**

Перелік всіх причин виникнення похибок призводить до того, що багато-кратно отримані характеристики ЗВ або серії однотипних ЗВ займають на графіку деяку смугу. Тому в теорії вимірювань є поняття *смуги невизначеності* або *смуги похибок* даного типу або даного екземпляру давальника, перетворювача, приладу, вимірювального каналу ІВС і ІВК. Декотра детермінована середня лінія цієї смуги приймається за *номінальну характеристику* ЗВ даного типу, відображається в документації і використовується для визначення результатів вимірювань.

**Похибка** даного ЗВ – це різниця між його реальною і номінальною характеристиками, тобто не число, а функція вимірювальної величини.



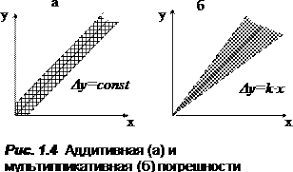
*а* *б*

Рис. 11.2. Характеристики ЗВ

1- реальна (нелінійна) характеристика; 2 - номінальна (лінійна) характеристика.

Різниці між реальною і номінальною характеристиками (рис.11.2), знайдені по вісі абсцис при завданому значенні *х* у вигляді *Δy = yреал - уном* = *у1 – у2* або по вісі ординат при завданому значенні *у* у вигляді *Δх = хреал - хном = х1 –* х2 є по суті *абсолютними похибками*, тому що виражені в одиницях величин *Х* або *Y*.

Знак абсолютної похибки приймають позитивним (Рис. 11.2, *а*), якщо реальна характеристика проходить вище за номінальну. Абсолютна похибка не може сама по собі слугувати показником точності вимірювань, тому введена похибка, яка характеризує результат вимірювання, - *відносна*: *δ = Δх/х ≈ Δу/у*. Відносна похибка виражається у відносних одиницях або у відсотках. Але при різних значеннях *х* вона може приймати значення від ∞ і до практично 0. Тому для нормування похибки *в усьому діапазоні вимірювання* застосовують *наведену* похибку.



*а б*

Рис. 11.3. Адитивна і мультиплікативна похибки і смуга похибки

Адитивна і мультиплікативна похибки призначені для опису форми меж смуги похибок ЗВ. Якщо дані виміряних при повірці або градуюванні ЗВ значень вимірювань *хi , yi* у вигляді точок нанести на графік з координатами *х* та *у*, то отримаємо деяку полосу (на графіках Рис. 11.3 це заштриховані області).

У випадку, коли точки знаходяться в межах ліній, паралельних одна одній (Рис. 11.3, *а*), тобто абсолютна похибка ЗВ у всьому діапазоні вимірювань обмежена постійною границею ±Δ0, яка не залежить від поточного значення *х* , то така похибка називається *адитивною*, тобто такою, яку отримують додаванням, або *похибкою нуля*. Це поняття стосується як випадкових, так і систематичних похибок. Для усунення систематичних адитивних похибок в багатьох ЗВ передбачено механічний, електричний або програмний коректор нуля.

Причинами виникнення адитивних похибок є: знаходження стороннього вантажу (тари) на важелях, від неточної установки нуля ЗВ перед вимірюванням, від термоЕРС в ланцюгах постійного струму, тощо.

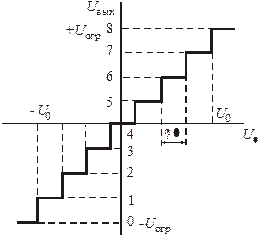
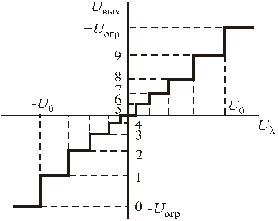
У випадку, коли ширина смуги зростає пропорційно зростанню вхідної величини *х*, а при *х = 0* також дорівнює 0 (Рис. 11.3, *б*), похибка називається *мультиплікативною*, тобто її отримують помноженням; вона характеризує похибку чутливості ЗВ, незалежно від систематичного або випадкового характеру.

Причинами виникнення мультиплікативної похибки можуть бути: змінення коефіцієнта посилення підсилювача, змінення жорсткості мембрани давача манометру, змінення опорної напруги в цифровому вольтметрі, тощо.

Адитивно-мультиплікативна похибка поєднує варіанти *а* та *б*.

**11.7. Похибка квантування**

Похибка квантування виникає в цифрових приладах і дискретних перетворювачах. При плавному зміненні вхідної величини *Uвх* в малих межах вихідна величина *Uвих* залишається деякий час незмінною, а потім стрибком змінює своє значення (рівень) і залишається на цьому рівні до наступного перевищення якогось порогового значення.

*а б*

Рис. 11.4. Амплітудна характеристика цифрового приладу

з рівномірною (*а*) і нерівномірною (*б*) шкалами

Номінальною характеристикою цифрового приладу вважається пряма, але реальною характеристикою є ступінчаста крива. Поточна різниця номінальної та реальної характеристик цифрового приладу є **похибкою квантування**. Межі смуги похибки квантування мають постійну ширину і по формі аналогічні показаній на Рис. 11.3, *а*.

Вимірювана величина *Х* випадковим чином може приймати будь-які проміжні значення, тому похибка квантування також випадково може приймати значення в інтервалі від +Δ0 до -Δ0. Тому похибка квантування є інструментальною випадковою адитивною статичною похибкою, так як не залежить від поточного значення результату вимірювання величини *Х* і від швидкості її змінення в часі.

1. Цветков Э.И. Методические погрешности статистических измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 144 с.