



**Міністерство освіти і науки України  
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет енергетики, робототехніки та комп'ютерних технологій  
Кафедра електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та  
електротехніки**

## **ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ**

**Методичні вказівки  
для самостійного вивчення дисципліни  
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
денної форми та заочної форм навчання  
зі спеціальності 163 «Біомедична інженерія»**

**Харків 2023**



Міністерство освіти і науки України

ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет енергетики, робототехніки та комп'ютерних технологій

Кафедра електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки

## **ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ**

Методичні вказівки  
для самостійного вивчення дисципліни  
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
денної та заочної форм навчання спеціальності  
163 «Біомедична інженерія»

Затверджено  
рішенням Науково-методичної  
ради  
факультету енергетики,  
робототехніки та комп'ютерних  
технологій  
Протокол № 3  
від 22.02.2023 р.

Харків  
2023

УДК 517.27  
О-60

Схвалено  
на засіданні кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії  
та електротехніки  
Протокол №5 від 16.02.2023 р.

**Рецензенти:**

**О. Г. Аврунін**, докт. техн. наук, проф., завідувач кафедри біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки;  
**О. М. Мороз**, докт. техн. наук, проф., професор кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Державного біотехнологічного університету

О-60 Засоби вимірювань: методичні вказівки для самостійного вивчення дисципліни для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання спеціальності 163 «Біомедична інженерія» / укладачі: Н. Г. Косуліна, Г. А. Ляшенко, Н. В. Полянова ; ДБТУ. – Харків : [б.в.], 2023. – 32 с.

Методичні вказівки для самостійного вивчення дисципліни розроблено відповідно до програми навчальної дисципліни «Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології». Розглянуті основні теоретичні питання курсу. Методичні вказівки призначені здобувачам першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання зі спеціальності 163 «Біомедична інженерія».

**УДК 517.27**

**Відповідальний за випуск : Н. Г. Косуліна**, д-р техн. наук

© Косуліна Н. Г., Ляшенко Г. А.,  
Полянова Н. В. 2023  
© ДБТУ, 2023

## Зміст

1. Класифікація засобів вимірювання.....	6
2. Загальні конструктивні елементи і основні параметри засобів вимірювань .....	8
3. Метрологічні характеристики засобів вимірювання.....	11
4. Похибки засобів вимірювань.....	14
5. Методи підвищення точності показів вимірювальних приладів.....	16
6. Способи розширення діапазону вимірювання вимірювальних приладів.....	22
7. Загальні питання сумування похибок засобів вимірювань.....	23
8. Класи точності засобів вимірювань.....	25
Контрольні питання .....	29
Список використаних джерел .....	30

Засоби вимірювань – технічні засоби, які використовуються при вимірюванні і мають нормовані метрологічні властивості.

Розробка комплексів засобів вимірювань є задачею приладобудування. Метрологія дає єдину класифікаційну систему засобів вимірювань і виявляє сукупність їх параметрів, які б дозволили вибрати засоби, що забезпечують отримання результату з заданою точністю, прогнозувати точність вимірювань, які проводяться за допомогою цих засобів, і встановити методи їх повірки.

## 1. Класифікація засобів вимірювання

Засоби вимірювань можна розділити на засоби реалізації окремої операції вимірювання і усієї процедури вимірювання. Умовно будемо називати їх відповідно елементарними і комплексними засобами вимірювань, рис. 1.

До елементарних засобів вимірювання відносяться засоби, кожний з яких сам по собі недостатній для здійснення процесу вимірювання. Ці засоби служать тільки для реалізації основних і допоміжних операцій вимірювання – створення відомої величини, порівняння, вимірювального і масштабного перетворення. Тоді до елементарних засобів вимірювань відносяться міри величини, пристрої порівняння, вимірювальні і масштабні перетворювачі.

В комплексних засобах вимірювання процедура вимірювання виконується повністю. До цих засобів відносяться вимірювальні прилади, вимірювальні установки, вимірювальні системи.

Вимірювальним приладом називається засіб вимірювань, який виробляє сигнал вимірювальної інформації в формі, доступної для безпосереднього сприйняття спостерігачем. Прикладами вимірювальних приладів можуть служити вольтметр, осцилограф, частотомір та ін.

Більш складними засобами вимірювань є вимірювальна установка і вимірювальна система.

*Вимірювальна установка* – це сукупність функціонально поєднаних засобів вимірювання (мір, вимірювальних приладів, вимірювальних перетворювачів) і допоміжних пристроїв, яка виробляє сигнали вимірювальної інформації в формі, зручної для

безпосереднього сприйняття спостерігачем, що розташована в одному місці.

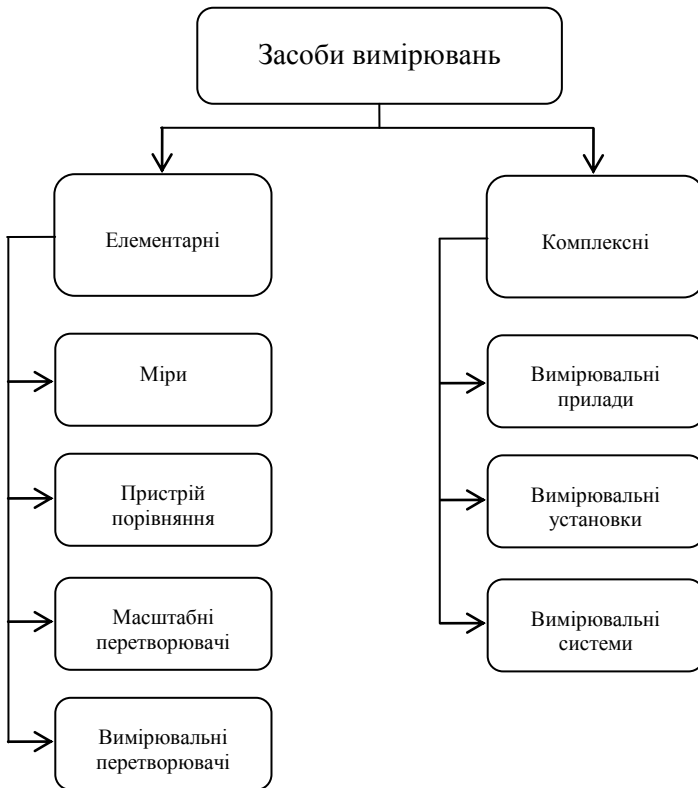


Рис. 1. Класифікація засобів вимірювання

Прикладом вимірювальної установки може служити установка для повірки вольтметрів, до складу якої входять джерела живлення, регулюючі пристрої, зразкові вольтметри та ін.

*Вимірювальна система* – це сукупність засобів вимірювання (мір, вимірювальних приладів, вимірювальних перетворювачів) і допоміжних пристроїв, з'єднаних між собою каналами зв'язку, яка виробляє сигнали вимірювальної інформації в формі, зручної для автоматичної обробки та передачі і використання (переважно) в автоматичних системах управління.

Такі системи можуть використовуватись в широкому діапазоні можливих напрямків, наприклад, для метеорологічних, геофізичних та інших досліджень.

## 2. Загальні конструктивні елементи і основні параметри засобів вимірювань

### Відлікові і реєструючі пристрої

Відліковим пристроєм називається частина конструкції засобу вимірювання для зчитування значень вимірюваної величини.

Відлікові пристрої мають вимірювальні прилади, вимірювальні установки, вимірювальні системи і регульовані міри. Відлікові пристрої поділяються на аналогові і цифрові.

*Аналоговий відліковий пристрій* являє собою сукупність шкали і покажчика; покажчик звичайно пересувається відносно шкали, рідше навпаки. Аналогові відлікові пристрої широко розповсюджені і застосовуються в показуючих вимірювальних приладах. Найбільш важливим їх елементом є шкала, рис. 2.

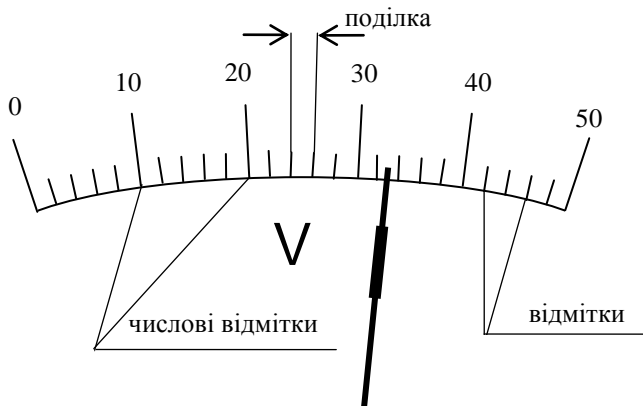


Рис. 2. Відліковий пристрій аналогового вольтметра

Шкалою називається частина відлікового пристрою, яка є сукупністю відміток і вказаних у деяких з них чисел відліку, які відповідають ряду послідовних числових значень величин. Шкала



наноситься на визначеній прямолінійній ділянці або на дузі окружності.

*Відміткою* називається знак на шкалі в вигляді смуги, точки або зубця, який відповідає деякому чисельному значенню вимірюваної величини.

*Числовими відмітками* називаються відмітки, напроти яких проставлені відповідні числові значення величини. Числові відмітки полегшують оператору віддалік значень вимірюваної величини, яке від виконує за положенням покажчика відносно відміток шкали.

Проміжок між двома сусідніми відмітками шкали називається *поділкою*.

*Ціною поділки* шкали називається різниця значень вимірюваної величини, які відповідають двом сусіднім відміткам шкали. На рис. 2 ціна поділки дорівнює 2 В.

При зчитуванні значень вимірюваної величини з аналогового відлікового пристрою оператор визначає числове значення величини за порядковим номером тієї відмітки шкали, яка розташована поблизу покажчика, і долі поділки шкали, яка визначається приблизно. На рис. 2. значення вимірюваної величини дорівнює 31 В.

Цифровий відліковий пристрій – це пристрій, в якому створюється цифрове візуальне зображення вимірюваної величини в даній системі числення. В ньому звичайно використовується десяткова система числення. При роботі з цифровим відліковим пристроєм оператора бачить на табло готове цифрове зображення вимірюваної величини і виконує тільки його зчитування.

Реєструючий пристрій є пристроєм довгочасної пам'яті, в якому в якості носія інформації застосовується звичайний папір, наприклад енцефалограф, електрокардіограф та ін. Реєструючі пристрої також поділяються на аналогові і цифрові.

В аналогових реєструючих пристроях виписується безперервна за величиною і часом крива. В цифрових реєструючих пристроях величина наведена в формі числа. Вся нескінченна множина числових значень вимірюваної величини в заданих межах замінюється в цифровому приладі обмеженим рядом чисел, наприклад, в цифровому приладі з тридекадним реєструючим пристроєм результат спостереження обмежений рядом цілих чисел від 001 до 999.

Переваги аналогових відлікових і реєструючих пристроїв:

- зручність співставлення значень вимірюваної величини з заданими її мужевими значеннями;

- велика інформаційна надлишковість;
- при візуальній реєстрації зручність обзору, можливість одночасного сприйняття і швидкого порівняння показів багатьох приладів.

Недоліки аналогових відлікових і реєструючих пристроїв:

- велика імовірність суб'єктивної похибки відліку;
- неможливість передачі, перетворення і запам'ятання результату вимірювань в аналоговій формі без додаткових похибок;
- для підвищення точності зчитування показів необхідно збільшити габарити відлікових і реєструючих пристроїв.

Основні переваги цифрових відлікових і реєструючих пристроїв:

- менша імовірність суб'єктивної похибки відліку;
- перетворення, передача і документування можливі більш простими методами і без внесення в результат додаткових похибок;
- менші габарити реєструючих пристроїв.

Недоліки цифрових і реєструючих пристроїв:

- результати спостережень величини, яка змінюється у часі, документуються у вигляді таблиці або колонки чисельних значень, які менш зручні для швидкого аналізу і співставлення результатів;
- в цифровому відліковому пристрої більш складне співставлення з заданими граничними значеннями;
- більш сильний вплив нелінійності вимірювального перетворювача.

Цифрові і аналогові відлікові і реєструючі пристрої мають протилежні властивості – перевага цифрових є недоліками аналогових і навпаки. Тому, безумовно, доцільна їх гібридизація з метою сумування позитивних сторін і послабленні негативних. Одним з сучасних прикладів гібридизації властивостей цифрових і аналогових відлікових і реєструючих пристроїв є використання сучасних засобів електроніки, електролюмінесценції, електронно-променевих пристроїв і газорозрядних ефектів для перетворення цифрової інформації в видимий зсув, в видиму шкалу. Особливо перспективно використання електронно-променевих пристроїв. Електронно-променеві пристрої на базі телевізійних трубок знайшли застосування і для зображення багатомірної інформації в вигляді одномірних і двомірних кривих розподілу.

Відлік, діапазон і межі вимірювання засобів вимірювання

*Відлік* – число, яке відлічене за відліковим пристроєм засобу вимірювання, або отримане оператором шляхом підрахування послідовних відміток або імпульсів.

*Показ засобу вимірювань* – значенні величини, яке визначене за відліковим пристроєм і виражене в одиницях даної величини.

*Початкове  $x_{поч}$  і кінцеве  $x_{кін}$  значення шкали* – це відповідно найменше і найбільше значення вимірюваної величини, вказані на шкалі.

*Діапазоном показів* називають область значень шкали, обмежену початковим  $x_{поч}$  і кінцевим  $x_{кін}$  значеннями.

*Діапазоном вимірів* називають область значень вимірюваної величини, для якої нормовані допустимі похибки засобу вимірювань. Найменше і найбільше значення діапазону вимірювання називаються межами вимірювання.

На рис. 2: відлік – 31; показ – 31 В; початкове значення шкали  $x_{поч} = 0$ ; кінцеве значення шкали  $x_{кін} = 50$  В; діапазон показів від 0 до 50 В.

### 3. Метрологічні характеристики засобів вимірювання

Держстандартом «Метрологічні характеристики засобів вимірювання» в якості метрологічних характеристик встановлені такі характеристики засобів вимірювання, які дають можливість оцінити похибку засобу вимірювання в нормальних і робочих умовах експлуатації, оцінити динамічні похибки засобу вимірювання, отримати показники точності результату вимірювань. При цьому під нормальними умовами розуміють умови, при яких величини, які впливають, (тобто фізичні величини, які не є вимірюваними даним засобом вимірювання, але які оказують вплив на результат вимірювань цим засобом), мають нормальні значення або знаходяться в межах нормальній, встановленій стандартом або технічними умовами, області значень. Під робочими умовами розуміють умови, при яких значення величин, які впливають, знаходяться в межах робочих областей, встановлених стандартом або технічними умовами.

Сукупність метрологічних характеристик включає вказівки, рис. 3,

щодо призначення даного засобу вимірювання, області можливого його застосування, похибки вимірювання або відтворення значення визначеної фізичної величини.

1. *Призначення засобу вимірювання* оговорюється в повному найменуванні даного засобу вимірювання, де вказується мета, для якої він призначений, яку характеристику, параметр сигналу або кола вимірюють або відтворюють за його допомогою.

2. *Сфера застосування засобів вимірювань* протилежно до попередньої характеристики є не якісною, а кількісною; вона є сукупністю характеристик, які мають вигляд системи нерівності, яка обмежує діапазони допустимих значень параметрів. До цієї сукупності характеристик відносяться:

- діапазони можливої зміни вимірюваних або відтворених параметрів. Вимірювані параметри можуть приймати будь яке значення в деякому більш або менш широкому діапазоні. Наприклад, напруга може змінюватись від мікрвольт до сотень кіловольт. Однак побудувати такий прилад, який з задоволеною точністю вимірював би як дуже великі, так і дуже малі значення параметра, звичайно не вдається. Тоді створюють набір приладів, які в сукупності забезпечують вимірювання даного параметра в широкому діапазоні його змінення. Кожний прилад з цього набору має обмежений діапазон вимірювань;

- діапазони допустимого змінення невимірюваних або невідтворених параметрів. Наприклад, гармонійне коливання  $u(t) = U \cos \omega t$  повністю характеризується двома параметрами  $U$  і  $\omega$ . Тому при вимірювання основного параметра, наприклад, частоти, похибка вимірювання залежить від діапазону значень, в якому може змінюватися невимірюваний параметри – амплітуда. Наприклад, частотомір ЧЗ-24 може вимірювати частоту, якщо напруга знаходиться в межах від 0,1 до 100 В;

- діапазони допустимого зміненні параметрів зовнішніх умов (температури, тиску, вологості, напруженості електромагнітного полі і т. ін.). Звичайно для більш точних засобів встановлюють більш вузькі діапазони змінення параметрів;

- вимоги до умов узгодження засобів вимірювань зовнішніми колами. Підключення приладу до досліджуваного кола не повинне приводити до кілька-будь суттєвому зміненню режиму цього кола. Тому важливою характеристикою засобу вимірювання є його вхідний імпеданс. В більш складному випадку, коли засіб вимірювання є

чотириполносником (наприклад, підсилювач, атенюатор, фазообертач і т. ін.), оговорюються вхідний і вихідний імпеданси або припустимі значення коефіцієнту стоячої хвилі (КСХ), або модуля і фази коефіцієнту віддзеркалення зі сторони входу і виходу.

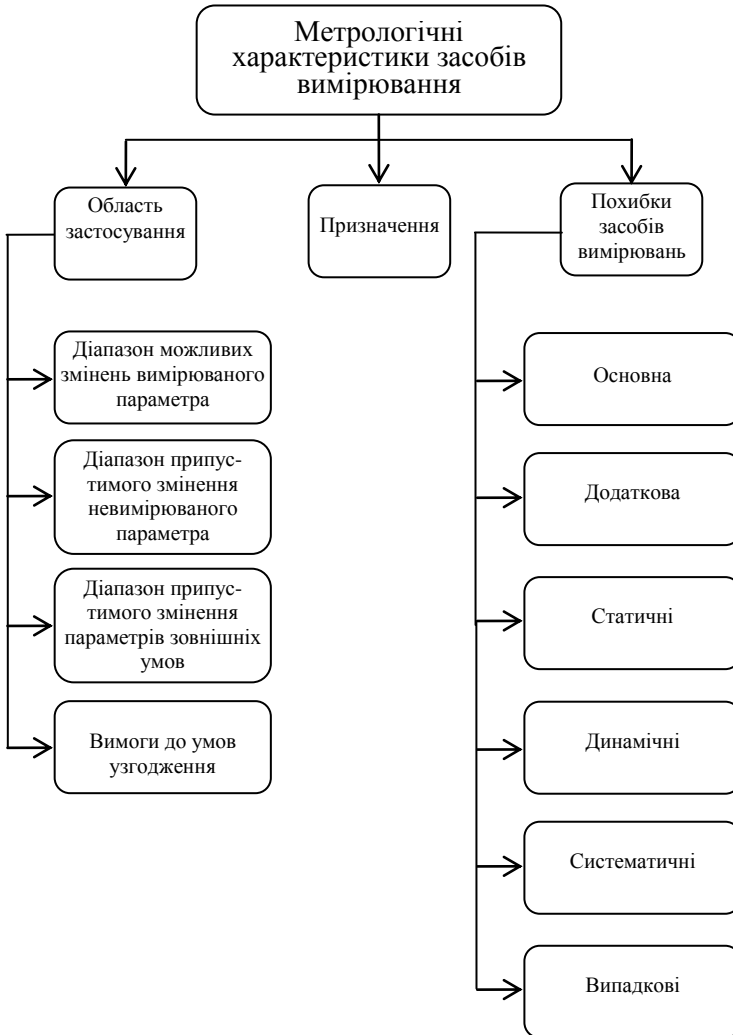


Рис. 3. Метрологічні характеристики засобів вимірювань

#### 4. Похибки засобів вимірювань.

В результаті впливу більшого числа різних випадкових і не випадкових факторів, які виникають в процесі виготовлення, зберігання і експлуатації засобів вимірювань, номінальні значення мір (тобто значення величини, які приписані даній мірі) і покази вимірювальних приладів відрізняються від істинних значень відтворених або вимірюваних величин. Ці відхилення характеризують похибки засобів вимірювань.

В засобах вимірювань розрізняють абсолютні, відносні і зведені похибки.

Під абсолютною похибкою  $\Delta x$  міри розуміють алгебраїчну різницю між її номінальним і дійсним значеннями, а під абсолютною похибкою вимірювального приладу - алгебраїчну різницю між показом  $x$  і істинним значенням вимірюваної величини  $Ax$  :

$$\Delta x = x - Ax. \quad (1)$$

Однак по великому рахунку точність засобів вимірювань характеризує відносна похибка  $\gamma$ , тобто виражене у відсотках відношення абсолютної похибки до істинного значення вимірюваної або відтвореної даним засобом вимірювання величини:

$$\gamma = \frac{\Delta x}{Ax} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Звичайно  $\gamma \ll 1$ , тому в формулі (2) замість істинного значення часто може бути підставлене номінальне значення міри або показ вимірювального приладу.

Якщо діапазон вимірювання приладу охоплює значення вимірюваної величини, які близькі до нуля, то відносна похибка буде наближатися до нескінченності. В цьому випадку користуються приведеною (зведеною) похибкою, яка дорівнює відношенню похибки вимірювального приладу до деякого нормуючого значення  $x_n$

$$\gamma_{зв} = \frac{\Delta x}{x_n} \cdot 100\%. \quad (3)$$

В якості нормуючого значення приймається значення, характерне для даного виду вимірювального приладу. Це може бути, наприклад, діапазон вимірювань, верхня межа вимірювань, довжина шкали та ін. Відносна похибка вимірювання (показуючим приладом з односторонньою шкалою) величини, близької до  $x_n$ , приблизно дорівнює зведеній похибці даного приладу.

За причиною і умовами виникнення похибки вимірювальних приладів розподіляють на основні і додаткові.

*Основна похибка* – це похибка вимірювального приладу, який використовується в нормальних умовах. Межа припустимої основної похибки – це найбільша основна похибка вимірювального приладу, при якій він може бути признаним гідним і допущеним до застосування.

*Додаткова похибка* – це складова похибки вимірювального приладу в робочих умовах, яка викликана відхиленням однієї з величин, які впливають, від нормального значення. Додаткові похибки характеризуються функціями впливу, які виражають залежність похибки  $\Delta x_\xi$  від змінення зовнішньої величини  $\xi$ , яка впливає.

*Похибки засобів вимірювань* прийнято розподіляти на статичні, які мають місце при вимірювання сталих величин після завершення перехідних процесів в елементах приладу, і динамічні, які з'являються при вимірюванні змінних величин і обумовлені інерційними властивостями засобів вимірювань.

Відповідно до загальної класифікації, статичні похибки засобів вимірювань розподіляються на систематичні і випадкові.

Систематичні похибки в загальному випадку є функцією вимірюваної величини, величин, які впливають (температура, вологість та ін.), і напруги живлення.

Випадкові похибки засобів вимірювання зобов'язані своїм виникненням випадковим вимірюванням параметрів елементів, які їх складають, і випадковим похибкам відліку (паралакс, похибка інтерполяції положення покажчика між штрихами шкали). В загальному випадку їх необхідно розглядати як випадкову функцію часу, вимірюваної величини і величин, які впливають.

Згідно Держстандарту:

- систематичні і випадкові складові похибки нормуються окремо;
- так як систематичні похибки засобів вимірювання даного

типу (від екземпляру до екземпляру) є сукупністю випадкових величин, то нормуються не тільки граничні значення систематичної похибки, але також і статистичні характеристики, тобто математичне сподівання і середнє квадратичне відхилення;

- в умовах, які відрізняються від нормальних, передбачається нормування функцій впливу даних зовнішніх дій на метрологічні характеристики і найбільші допустимі їх відхилення під впливом зовнішніх дій.

## 5. Методи підвищення точності показів вимірювальних приладів

Найважливішою задачею як при удосконаленні вимірювальних приладів так і при проведенні вимірювань є зниження всіх складових похибки вимірювання.

Причинам виникнення похибок в вимірювальних приладах є впливи:

- зовнішніх впливаючих величин (температура оточуючого середовища, напруженості зовнішнього магнітного і електричного полів, вібрацій, напруги мережі живлення та ін.);
- внутрішніх впливаючих величин (змінення параметрів елементів схеми, внутрішніх шумів та ін.);
- неінформативних параметрів вхідних величин (наприклад, змінення напруги при змінненні частоти).

Розроблено багато різних методів підвищення точності вимірювальних приладів. Які можна підрозділити на дві групи, рис. 4.:

- методи запобігання виникнення даної похибки;
- метод зниження впливу існуючих похибок.

До першої групи відносяться конструктивно-технологічні і захисно-запобіжні методи. Ці методи найбільш зручні, так як запобігають появу даної похибки або не допускають перевищення нею допустимого значення звичайно найбільш простим шляхом при мінімальному структурному ускладненні приладу. Тому їх застосовують в першу чергу.

Конструктивно-технологічні методи зменшення похибки полягають в використанні елементів і вузлів найбільш високої якості,



з найбільш стабільними параметрами.

Захисно-запобіжні методи призвані зменшити вплив зовнішніх впливаючих величин і полягають в зменшенні діапазону їх змінення в локалізованому просторі (екранування, стабілізація живлячих напруг та ін.).

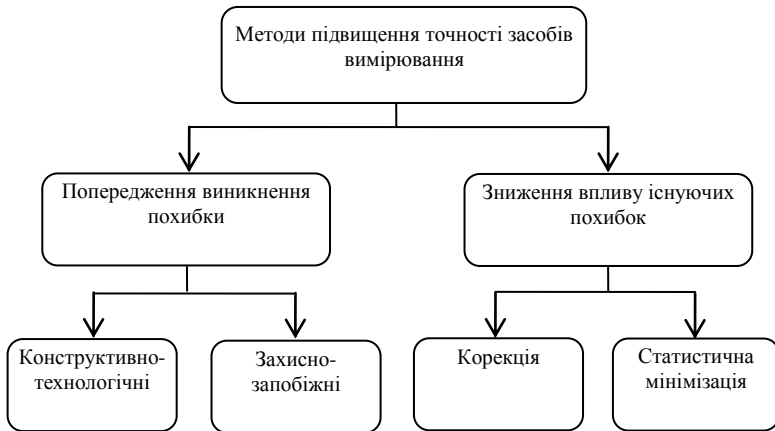


Рис. 4. Основні методи підвищення точності засобів вимірювання

До другої групи відносяться методи корегуванні і статистичної мінімізації похибок. Загальною особливістю цих методів є те, що вони направлені не на запобігання виникнення похибок, а на зниження впливу вже існуючих похибок.

*Корекція*, або функціональні мінімізація похибок вимірювальних приладів полягає в зниженні похибок на основі аналітичного або експериментального знаходження похибок, систематичних або випадкових, які повільно змінюються.

*Статистична мінімізація* похибок полягає в зниженні передбачуваних, але не знайдених випадкових похибок вимірювальних приладів. Вона може мати місце під час і після вимірювання. В останньому випадку методи статистичної мінімізації співпадають з методами зменшення похибок вимірювання.

Реалізації методів підвищення точності конкретних вимірювальних приладів будуть розглядатися в відповідних курсах. В якості прикладу розглянемо метод корекції похибок вимірювального

приладу оператором.

При аналізі методі корекції абсолютну сумарну похибку вимірювального приладу зручно розділити на три складові: адитивну, мультиплікативну і похибку від нелінійності характеристики.

Адитивна похибка  $\Delta x_a$  не залежить від вимірюваної величини  $x$ , рис. 5. В цьому випадку відносна адитивна складова похибки  $\gamma_a$  буде залежати від вимірюваної величини згідно з нелінійним законом, рис. 6, при чому чим менше  $x$ , тим більше відносна похибка  $\gamma_a$ .

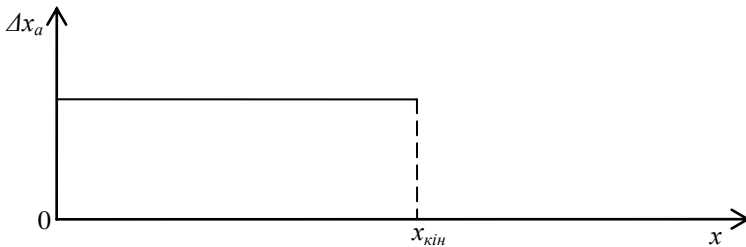


Рис. 5. Графік залежності адитивної похибки від вимірюваної величини

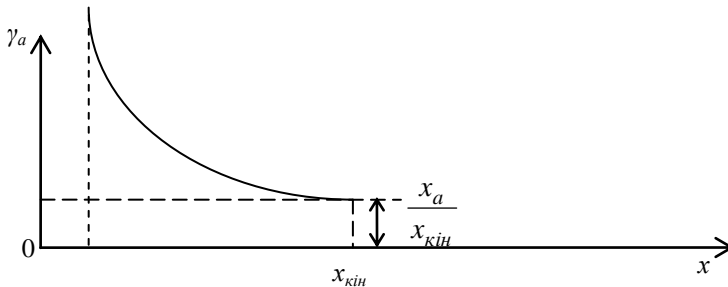


Рис. 6. Графік залежності відносної адитивної складової похибки вимірювального приладу

Мультиплікативна похибка  $\Delta x_M$  пропорційна  $x$ , рис 7. В цьому випадку відносна мультиплікативна складова похибки  $\gamma_M$  не залежить від вимірюваної величини, рис. 8. Так як

$$\gamma_M \approx \frac{\Delta x_M}{x} = \frac{\Delta x'_M}{x_{кін}} = const, \text{ то } \Delta x_M = \gamma_M \cdot x.$$

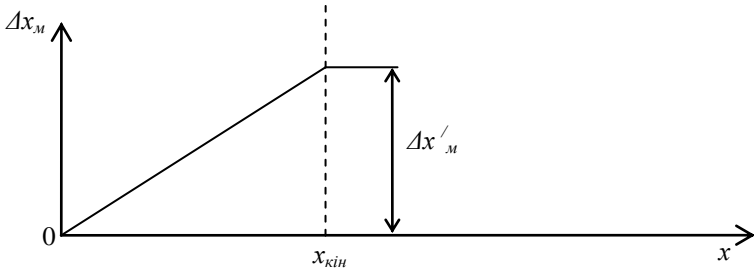


Рис 7. Графік залежності мультиплікативної похибки від вимірюваної величини

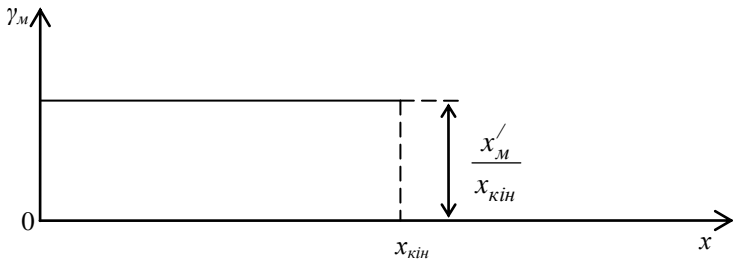


Рис. 8. Графік залежності відносної мультиплікативної складової похибки вимірювального приладу

Похибка від нелінійності приладу  $\Delta x_{нел}$  залежить від  $x$  нелінійно і визначається нелінійністю характеристик ланок, які входять в склад вимірювального приладу (вимірювальних і масштабних перетворювачів та ін.). Нелінійну складову похибки, як правило, намагаються звести до мінімуму при проектуванні засобів вимірювань.

Сумарна похибка вимірювального приладу, таким чином, буде дорівнювати

$$\Delta x_c = \Delta x_a + \Delta x_m + \Delta x_{нел}.$$

Розглянемо метод корекції похибок вимірювального стрілочного приладу. В такому приладі є як адитивна, так і мультиплікативна

складова похибки (похибку нелінійності будемо вважати рівної нулю), тобто

$$\Delta x_c = \Delta x_a + \Delta x_m = \Delta x_a + \gamma_m \cdot x.$$

Графік залежності  $\Delta x_c$  від вимірюваної величини  $x$  наведений на рис. 9.

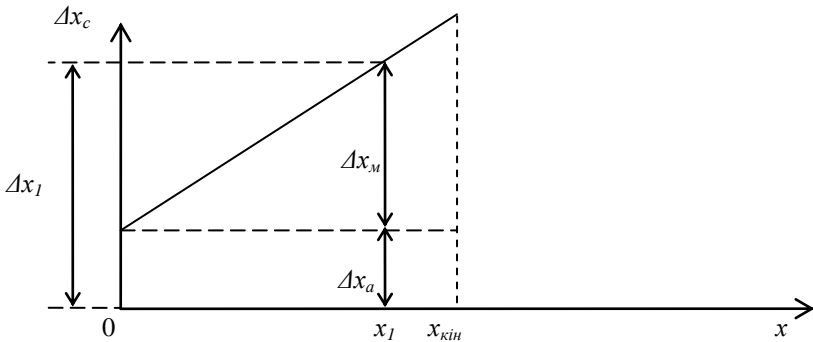


Рис. 9. Графік залежності сумарної похибки вимірювального приладу від вимірюваної величини за наявності адитивної і мультиплікативної похибок

Адитивну складову похибки можна знайти при  $x = 0$ , тоді  $\Delta x_c / x = 0 = \Delta x_a$ .

Мультиплікативну складову можна знайти лише за наявністю міри.

Методи корекції адитивної і мультиплікативної похибок на адитивну корекцію, або встановлення нуля, і мультиплікативну корекцію, або калібрування.

На рис 10 наведений графік залежності кута відхилення  $\alpha$  покажчика вимірювального приладу від вимірюваної величини (1 – до корекції, 2 – після корекції).

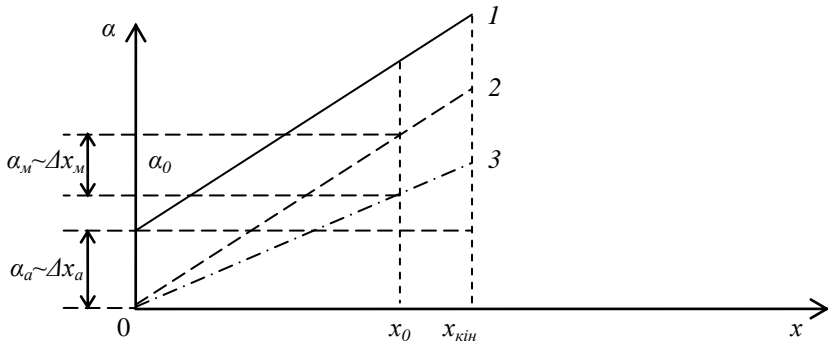


Рис. 10. Графік, який пояснює установку нуля і калібрування стрілочного вимірювального приладу

Встановлення нуля виконується шляхом паралельного зсуву характеристики приладу (пряма 3 на рис. 10). Встановлення нуля виконується встановленням покажчика на нульову відмітку при  $x=0$ . Калібрування приладу виконується зміненням чутливості приладу, тобто зміненням кута нахилу характеристики. Калібрування здійснюється при подачі на вхід приладу відомої за розміром величини  $x_0$  (звичайно  $x_0$  береться рівною або близькою до величини  $x_{кин}$ ).

Під час калібрування оператор змінює коефіцієнт перетворення приладу  $K$  до тих пір, поки при  $x=x_0$  відхилення не стане дорівнювати  $\alpha_0$ , яке за шкалою відмічається спеціальною міткою.

Корекцію похибок намагаються автоматизувати. Але це призводить до ускладнення конструкції приладу.

## 6. Способи розширення діапазону вимірювання вимірювальних приладів

Більшість вимірюваних величин змінюється в діапазонах, які досягають многих порядків. наприклад. вимірювані напруги

постійного струму змінюються від  $10^{-9}$  до  $10^8$  В, струми - від  $10^{-16}$  до  $10^6$  А, потужність – від  $10^{-16}$  до  $10^8$  Вт, і т. ін. Діапазони вимірювань вимірювальних приладів розширюються в сторону як більших, так і менших значень. Особливо важною є задача розширення діапазону вимірювань в сторону менших значень, так як це дозволяє все більш глибоко проникати в фізику процесів з низькими рівнями енергії.

При розширенні діапазону вимірювань в сторону менших значень необхідно виміряти величину  $x$ , яка менше ціни поділки або розміру інтервалу  $x_E$  даного вимірювального пристрою.

Якщо виходити з рівняння вимірювання

$$N_x = \frac{x}{x_E} . \quad (4)$$

то визначити значення величини, меншої за розміром. нуж розмір інтервалу  $x_E$  (ступінь міри), можна наступними способами:

1) шляхом використання масштабного перетворювача – підсилювача з коефіцієнтом масштабного перетворення  $K_{МП} > 1$ , тобто збільшенням  $x$  в  $K_{МП}$  разів, і вимірюванням величини  $K_{МП} \cdot x$  за допомогою даного вимірювального пристрою з розміром інтервалу  $x_E$ . Тоді результат вимірювання

$$N_x = \frac{K_{МП} \cdot x}{x_E} . \quad (5)$$

Цей спосіб широко застосовується при вимірювання малих за розміром величин і реалізується за допомогою вимірювальних підсилювачів;

2) шляхом використання більш чутливого приладу або міри з разів меншим значенням розміру інтервалу  $x_E$ , тобто

$$x_{E1} = \frac{x_E}{n} , \quad (6)$$

тоді

$$N_x = \frac{x}{x_E} = \frac{nx}{x_E} . \quad (7)$$

Межа зменшення розміру міри обмежується дискретною природою мікросвіту, кінцевим значенням рівня шумів;

3) шляхом сумісного одночасного використання двох або більше мір з близькими значеннями розміру ступенів методом співпадінь;

4) шляхом перетворення  $x$  в вихідну величину  $y$ , для якої створені більш чутливі вимірювальні пристрої з відповідно необхідними нижніми межами вимірювань;

5) шляхом застосування багатоканального нерегульованого або одно канального регульованого масштабного перетворювача  $x$  для випадку, якщо  $x > x_E$ , але відношення  $\frac{x}{x_E}$  невелике;

б) шляхом створення  $m$  однакових  $x$  та їх сумування.

Розширити діапазон вимірювання в сторону більших значень можна наступними способами:

- зменшенням значення  $x$  за допомогою масштабних перетворювачів-подільників;
- застосуванням міри з більшими розмірами ступеня  $x_E$ ;
- перетворенням  $x$  в вихідну величину  $y$ , для якої створені вимірювальні пристрої з відповідними верхніми межами вимірювань.

## 7. Загальні питання сумування похибок засобів вимірювань

Задача сумування похибок є дуже актуальною із-за різкого ускладнення вимірювальних пристроїв, збільшення числа їх ланок, а також підвищення вимог до їх точності. До недавнього часу результуючу похибку засобів вимірювань (навіть за наявністю випадкових складових) визначали арифметичним сумуванням, тобто знаходили максимально можливе значення результуючої похибки. Таке сумування можна допустити при малому числі складових похибки, однак при більшому числі складових похибки цей підхід становиться зовсім неприйнятним. Більш адекватним природі похибок є імовірнісний підхід, який найбільш просто застосовується в тому випадку, якщо всі похибки є випадковими і незалежними величинами.

Однак серед них можуть бути і випадкові залежні, тобто корельовані, і систематичні, і це також необхідно приймати до уваги при сумуванні.

Основною задачею Державної системи забезпечення єдності вимірювань є забезпечення такого рівню вимірювань, при якому похибка буде відома з заданою імовірністю. Тому основними повинні бути імовірнісні метрологічні характеристики засобів вимірювань, в частоті, математичне сподівання систематичної складової похибки і середнє квадратичне відхилення випадкової.

Тому при рішенні задачі сумуванні похибок за основу прийнятий імовірнісний підхід, який забезпечує можливість визначення довірчих границь, всередині яких з заданою імовірністю знаходиться істинне значення вимірюваної величини.

Систематичні і випадкові складові похибки засобів вимірювань нормуються окремо, тому і їх сумування теж виконується окремо. Окремо сумуються мультиплікативні і адитивні похибки.

Для коректного рішення задачі щодо визначення сумарної похибки визначеного засобу вимірювань повинні бути відомі:

- функціональна залежність між вихідною і вимірюваною величинами;
- характер змінення похибок (систематичні або випадкові, адитивні і мультиплікативні);
- межі невиключених систематичних похибок кожного ланки;
- закон розподілу або математичне сподівання і середнє квадратичне відхилення – для випадкової похибки кожного ланки;
- відомості про кореляційний зв'язок між випадковими складовими похибок різних ланок.

Сумування похибок необхідно виконувати в такій послідовності:

1. Підготовка до сумування, при якому похибки ланок розподіляють на систематичні і випадкові, адитивні і мультиплікативні.

2. Сумування систематичних похибок з урахуванням функціональної залежності між вимірюваною і вихідною величиною, а також меж невиключених систематичних похибок ланок.

3. Сумування випадкових похибок, яке виконують в такому порядку:

- математичні сподівання випадкових похибок сумують окремо, потім сума математичних сподівань додається з систематичною похибкою засобу вимірювань. В результаті отримують систематичну



складову похибки засобу вимірювань;

- знаходять середнє квадратичне відхилення  $\sigma_{\Delta x}$  випадкової похибки і закон розподілу сумарної випадкової похибки.

При цьому необхідно враховувати, що при числі складових похибок, яке дорівнює або більше п'яти, і відсутності домінуючих похибок, незалежно від законів розподілу окремих похибок, закон розподілу сумарної похибки буде близький до нормального.

Інтервал, в якому з заданою імовірністю знаходиться випадкова похибка конкретного екземпляра засобу вимірювань при відомих  $M[\Delta x]$  і  $\sigma_{\Delta x}$ , може наближено визначатися нерівністю

$$M[\Delta x] - K\sigma_{\Delta x} < \Delta x < M[\Delta x] + K\sigma_{\Delta x}, \quad (8)$$

де  $K$  - коефіцієнт, який вибирається в залежності від імовірності  $P(-\Delta x_2 < \Delta x < \Delta x_2)$ , виходячи з сумарного закону розподілу випадкової похибки.

## 8. Класи точності засобів вимірювань

Клас точності – це узагальнена характеристика точності засобів вимірювань, яка визначає межі припустимих основної і додаткової похибок. В позначенні класу точності використовується число з деякого набору нормованих чисел, яке характеризує межу припустимої похибки у вигляді зведеної або відносної похибки. Клас точності характеризує точність засобу вимірювань, але далеко не завжди є безпосередньою характеристикою точності вимірювання, виконаного за допомогою даного засобу.

Клас точності бажано виразити за допомогою відносної похибки, яка, як відомо, більш зручна для характеристики точності вимірювання, виконаного за допомогою даного приладу. Це можна зробити для приладу з переважаючою мультиплікативною складовою похибки, однак у багатьох приладів, переважає адитивна складова. Крім того, ряд засобів вимірювань зручніше характеризувати абсолютною похибкою.

Засоби вимірювання в залежності від способу позначення класу точності розподіляються на п'ять основних груп.

1. Засоби вимірювання, у яких межа припустимої основної похибки виражається в вигляді абсолютної похибки, тобто в одиницях даної вимірюваної величини в вигляді одного числа, або в формі таблиць значень абсолютної похибки. Це сприяє більш правильній оцінці точності вимірювань, виконаних за допомогою наборів даних засобів вимірювання. Клас точності засобів вимірювання цієї групи можна також позначати порядковим номером: кл. 0, кл. 1, кл. 2 і т. ін., причому більші порядкові номери повинні відповідати більшим значенням похибки. До засобів вимірювання першої групи відносяться багатозначні міри, наприклад, набори гир і кінцевих мір, міри напруги і т. ін.

2. Засоби вимірювання, у яких переважає адитивна складова похибки. Межа припустимої основної похибки в цьому випадку виражається у вигляді приведеної похибки

$$\gamma_{пра} = \frac{\Delta x}{x_n} \cdot 100\%, \quad (9)$$

де  $x_n$  - нормуюче значення вимірюваної величини;

$\gamma_{пра}$  - приведена адитивна похибка приладу.

Клас точності засобів вимірювання другої групи рекомендується позначати одним числом, яке повинне співпадати або бути близьким до числового значення межі припустимої зведеної основної похибки, яка виражена у відсотках. Наприклад, у електровимірювальних приладів класи точності позначаються: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. До засобів вимірювань другої групи відносяться, головним чином, показуючі і самопишучі прилади, в яких переважають адитивні похибки від тертя, похибки відліку, від змінення положення в просторі та ін. У таких приладів відносна похибка в діапазоні змінень змінюється, і тільки в останньої треті робочого діапазону близька за значенням до класу точності, який чисельно дорівнює зведеній похибці. Тому рекомендується межу вимірювання приладу вибирати так, щоб покази розташовували в останній треті шкали, тобто в області, близької до  $x_{кін}$ .

Збільшення числа меж вимірювання в сторону менших значень в таких приладі дає можливість підвищити точність вимірювання. Наприклад, в одноможевому міліамперметрі класу 0,5 з  $x_{кін} = 150$  мА відносна похибка вимірювання струму 50 мА дорівнює

$$\gamma = 0,5 \cdot \frac{150}{50} = 1,5\% .$$

Якщо прилад зробити двохмежевим, тобто і з верхньою межею 35 мА, то відносна похибка вимірювання струму 50 мА складе величину

$$\gamma = 0,5 \cdot \frac{75}{50} = 0,75\% .$$

Таким чином, відносна похибка вимірювання струму зменшилась в 2 рази.

3. Засоби вимірювання, у яких переважає мультиплікативна складова похибки. Клас точності засобів вимірювання групи позначається одним числом, розташованим в кругу і рівному межі припустимої відносної похибки у відсотках, наприклад, ①. До засобів вимірювань третьої групи відносяться однозначні міри, інтегруючі прилади, наприклад, лічильники енергії та ін.

4. Засоби вимірювання, у яких адитивна і мультиплікативна складові похибки сумірні. Для них межа відносної припустимої похибки виражається за формулою

$$\gamma_c = \pm \left[ c + d \left( \frac{x_H}{x} - 1 \right) \right] , \quad (10)$$

де  $c = \gamma_{пра} + \gamma_m$  - сума значень приведеної адитивної і відносної мультиплікативної складових похибки;

$d = \gamma_{пра}$  - адитивна приведена похибка приладу (коефіцієнти  $c$  і  $d$  є абстрактні числа).

Дійсно,

$$\gamma_c = \frac{\Delta x_c}{x} = \frac{\Delta x_a + \Delta x_m}{x} = \frac{\Delta x_a}{x} + \frac{\Delta x_m}{x} = \frac{\Delta x_a}{x} + \gamma_m . \quad (11)$$

Перетворимо перший доданок у виразі (11) таким чином:

$$\frac{\Delta x_a}{x} = \frac{\Delta x_a}{x} \cdot \frac{x_H}{x_H} = \frac{\Delta x_a}{x_H} \cdot \frac{x_H}{x} = \gamma_{пра} \cdot \frac{x_H}{x} . \quad (12)$$

З урахуванням (12) вираз (11) може бути переписаний у вигляді

$$\gamma_c = \gamma_{пра} \cdot \frac{x_H}{x} + \gamma_M . \quad (13)$$

Додаємо і віднімаємо з правої частини виразу (13)  $\gamma_{пра}$

Тоді

$$\begin{aligned} \gamma_c &= \gamma_{пра} \cdot \frac{x_H}{x} + \gamma_M + \gamma_{пра} - \gamma_{пра} = \\ &= (\gamma_{пра} + \gamma_M) + \gamma_{пра} \left( \frac{x_H}{x} - 1 \right) . \end{aligned} \quad (14)$$

Або

$$\gamma_c = \pm \left[ c + d \left( \frac{x_H}{x} - 1 \right) \right] ,$$

що і потрібно було довести.

Графік залежності  $\gamma_c$  від  $x$  наведений на рис 11.

Позначення класу точності засобів вимірювання цієї групи складається з двох чисел, які виражають  $c$  і  $d$  в відсотках і розділені косим штрихом ( $c/d$ ), наприклад клас  $0,02/0,01$ .

Таке позначення зручне, так як перший його член  $c$  дорівнює відносній похибці засобу вимірювань в найбільш сприятливих умовах, коли  $x = x_H$ . Другий член виразу (10) характеризує збільшення відносної похибки вимірювання при зменшенні  $x$ . До четвертої групи засобів вимірювань відносяться, наприклад, цифрові прилади.

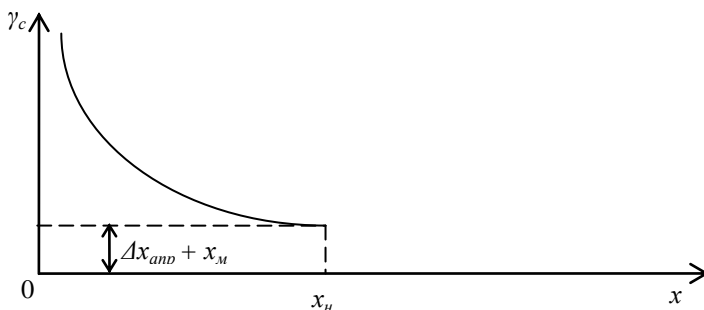


Рис. 11. Графік залежності  $\gamma_c$  від  $x$  для вимірювального приладу з адитивною і мультиплікативною похибками

5. Засоби вимірювання, у яких нормована похибка, зведена до довжини шкали. Клас точності в цьому випадку позначається одним числом (у відсотках), яке розміщене між лініями, розташованими під кутом, наприклад  $0,5$ . До цих засобів відносяться показуючі прилади з різко нерівномірною шкалою, наприклад логарифмічною.

### Контрольні питання

1. Дати визначення засобу вимірювання.
2. Назвати окремі категорії засобів вимірювання.
3. Перелічити переваги та недоліки аналогових та цифрових засобів вимірювання.
4. Яким чином можна підвищувати точність виміру фізичних величин?
5. Перелічити способи розширення меж вимірювання вимірювальних приладів.
6. Перелічити похибки засобів вимірювання.
7. Дати визначення класу точності засобу вимірювання.

## Перелік використаних джерел

1. Закон України “Про метрологію та метрологічну діяльність” від 15.06.2004 р. № 1765-IV.
2. ДСТУ 2681-94 Метрологія. Терміни та визначення.
3. Бакка М. Т., Тарасова В. В. Метрологія, стандартизація, сертифікація і акредитація. Ч. 1. Метрологія / М. Т. Бакка – Житомир, ЖІТІ, 2002. – 384 с.

Навчальне видання

## **ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ**

Методичні вказівки  
для самостійного вивчення дисципліни

Автори-укладачі:

**КОСУЛІНА** Наталія Геннадіївна  
**ЛЯШЕНКО** Геннадій Анатолійович  
**ПОЛЯНОВА** Надія Володимирівна

Формат 60x84/16. Гарнітура Times New Roman  
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.

Ум. друк. арк. \_.

Наклад \_\_\_ пр.

Державний біотехнологічний університет  
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44

