

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування
Кафедра автоматизації, електротехнічних та
комп'ютерно-інтегрованих технологій

04-03-314М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт
з навчальної дисципліни
«Метрологія»

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за
освітньо-професійними програмами: «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології», «Робототехніка та штучний інтелект»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології», «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка» денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-
методичною радою з якості
ННІАКОТ
Протокол № 2 від 23.12.2021р.

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Метрологія» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійними програмами: «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», «Робототехніка та штучний інтелект» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної та заочної форм навчання [Електронне видання] / Матус С. К. – Рівне : НУВГП, 2022. – 38 с.

Укладач: Матус С. К., к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Відповідальний за випуск: Древецький В. В., д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Керівник групи забезпечення спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: Древецький В. В., д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Керівник групи забезпечення спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»: Василюк С. В., д.т.н., професор кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

© Матус С. К., 2022

© НУВГП, 2022

Зміст

Вступ	4
Лабораторна робота № 1	5
Лабораторна робота № 2	11
Лабораторна робота № 3	15
Лабораторна робота № 4	21
Лабораторна робота № 5	25
Лабораторна робота № 6	32
Список рекомендованої літератури	38

Вступ

Метою дисципліни «Метрологія» є засвоєння основних принципів та методів вимірювання фізичних величин, опрацювання результатів вимірювання та методів підвищення точності вимірювання. Лабораторні роботи дають змогу оволодіти навичками виконання вимірювального експерименту, технікою вимірювань, методами оцінки результатів вимірювання та їх точності.

В методичних вказівках наведено короткі теоретичні відомості до кожної роботи, описано порядок виконання, а також наведені контрольні запитання для самоперевірки. Для виконання робіт передбачено використання лабораторного обладнання та засобів вимірювальної техніки.

Лабораторна робота 1. Вивчення шкал вимірювальних приладів

Мета роботи: вивчити умовні позначення на шкалах вимірювальних приладів, навчитись визначати параметри, що характеризують точність вимірювань.

Теоретичні відомості

Більшість шкальних вимірювальних приладів складається з вимірювального механізму і відлікового пристрою. Відліковий пристрій складається з шкали і покажчика, призначених для відліку значень фізичної величини.

Шкала – це елемент відлікового пристрою, що являє собою сукупність відміток і розміщених біля деяких із них чисел чи інших символів, що відповідають, згідно коду, значенням вимірюваного розміру фізичної величини (рис. 1.1).

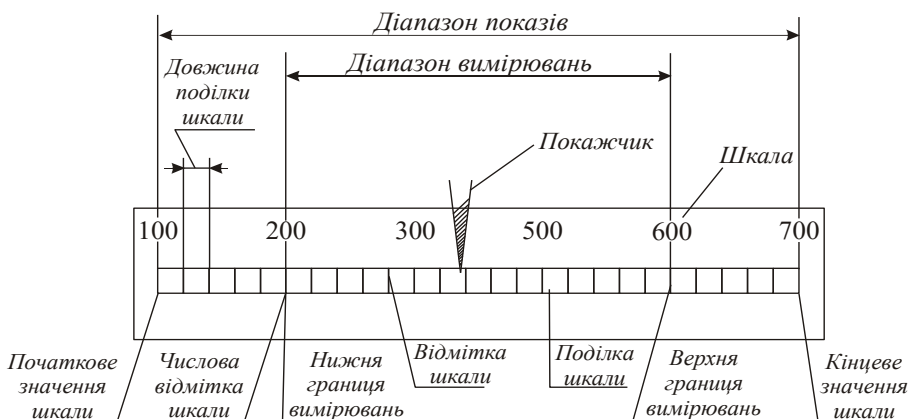


Рисунок 1.1. Шкала вимірювального приладу

Поділка шкали – це проміжок між сусідніми відмітками шкали.

Довжина поділки шкали – відстань між осями двох сусідніх відміток шкали.

Ціна поділки шкали – модуль різниці значень виміряної фізичної величини, що відповідає, згідно коду, сусіднім відміткам шкали для засобу вимірювальної техніки (ЗВТ).

Значення шкали – певне значення вимірюваного розміру фізичної величини, що відповідає кожній відмітці шкали.

Початкові і кінцеві значення шкали – це значення фізичної величини, що відповідають початку і кінцю шкали.

Нижня і верхня границі вимірювання – найменше і найбільше значення діапазону вимірювання.

Діапазон показів – це область значень шкали, обмежена нижньою і верхньою границями показів.

Діапазон вимірювань – частина діапазону показів, для якої похибки вимірювань регламентовані.

Покази ЗВТ – це номінальне значення вхідної фізичної величини чи інформаційного параметру вхідного сигналу, отриманого розкодуванням за допомогою відлікового пристрою ЗВТ.

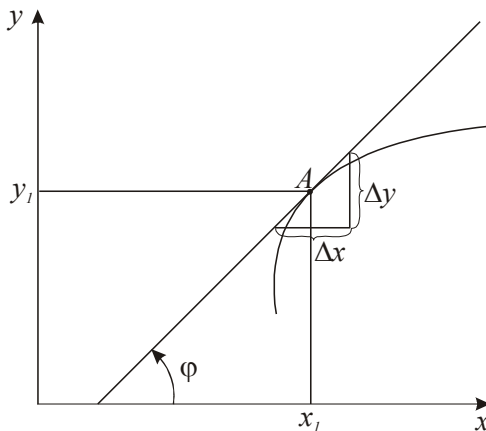


Рисунок 1.2. До визначення чутливості ЗВТ величини, якщо остання прямує до нуля :

Відлік – це число, прочитане на відліковому пристрою.

Показчик – це частина відлікового пристрою, положення якого відносно відміток шкали визначає покази ЗВТ.

Чутливістю ЗВТ при значенні вимірюваної величини x_1 називається границя відношення приросту вихідної величини до приросту вхідної

$$S = \lim \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)_{x_1} = \left(\frac{dy}{dx} \right)_{x_1} = \frac{m_y}{m_x} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (1.1)$$

де m_x, m_y – масштабні коефіцієнти; φ – кут нахилу дотичної до градуовальної характеристики $y = f(x)$ в точці дотику $A(x_1, y_1)$ (рис. 1.2).

Для електровимірювальних приладів

$$S = \frac{N}{X} = \frac{\text{число поділок}}{\text{число одиниць фізичної величини}}. \quad (1.2)$$

Ціна поділки шкали визначається за формулою

$$C = \frac{I}{S}. \quad (1.3)$$

Клас точності ЗВТ – узагальнена характеристика ЗВТ, що відображає рівень точності і визначає набір нормованих метрологічних характеристик.

Класи точності відрізняються рівнем границь допустимих похибок – основної і додаткової. Вони нумеруються певними числами. Електровимірювальні прилади бувають таких класів точності: 0.1; 0.2; 0.5; 1.0; 1.5; 2.5; 4.0.

Ці числа відповідають границям допустимої приведенної похибки, тобто похибки, вираженої у відсотках від деякого умовного значення, за яке приймається найбільший показ чи довжина шкали.

Покази ЗВТ, визначені за відліковим пристроєм, виражаються в прийнятих одиницях фізичної величини даної шкали. Ці покази можуть бути виражені таким чином

$$x_{\Pi} = N \cdot c \text{ або } x_{\Pi} = N_{\text{под}} \cdot c_{\text{под}} \quad (1.4)$$

де N – відлік (число, відраховане за відліковим пристроєм ЗВТ або отримане відліком послідовних відміток чи сигналів); c – стала ЗВТ (число, виражене в одиницях вимірюваної величини), $N_{\text{под}}$ – число поділок, підрахованих за відліковим пристроєм; $c_{\text{под}}$ – ціна поділки шкали як різниця значень величини, що відповідають двом сусіднім відміткам шкали.

Шкали приладів бувають односторонні (рис. 1.3, а), двосторонні (рис. 1.3, б) і безнульові (рис. 1.3, в).

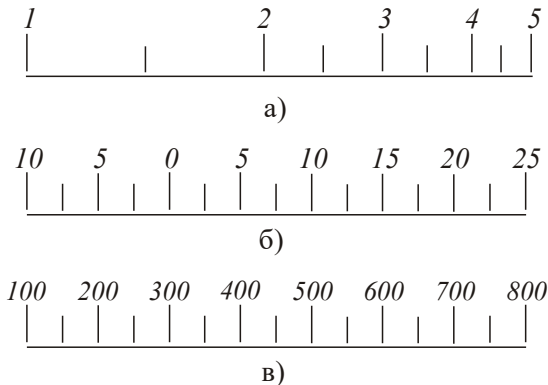


Рисунок 1.3. Основні типи шкал приладів

В односторонніх шкалах одна з границь вимірювання приладу дорівнює нулю. В двосторонніх шкалах нульове значення розміщене на шкалі. В безнульових – на шкалі немає нульового значення.

Шкали приладів бувають рівномірні (рис. 1.3, б та рис. 1.3, в), якщо в них постійна ціна і довжина поділки, і нерівномірні (рис. 1.3, а) в інших випадках. Практично рівномірною шкалою називається шкала, довжина поділок якої відрізняється одна від одної не більше ніж на 30% і має постійну ціну поділки.

Суттєво нерівномірна шкала – це шкала із звужуючими поділками, для якої значення вихідного сигналу, що відповідає півсумі верхньої і нижньої границі діапазону вимірювань вхідного (вихідного) сигналу, знаходиться в інтервалі між 65% і 100% діапазону вимірювань вхідного (вихідного) сигналу.

На рис. 1.4. зображені такі шкали: *а* – прямолінійна; *б* – дугова; *в* – кругова; *г* – дугова; *д* – барабанна; *е* – кругова нерівномірна.

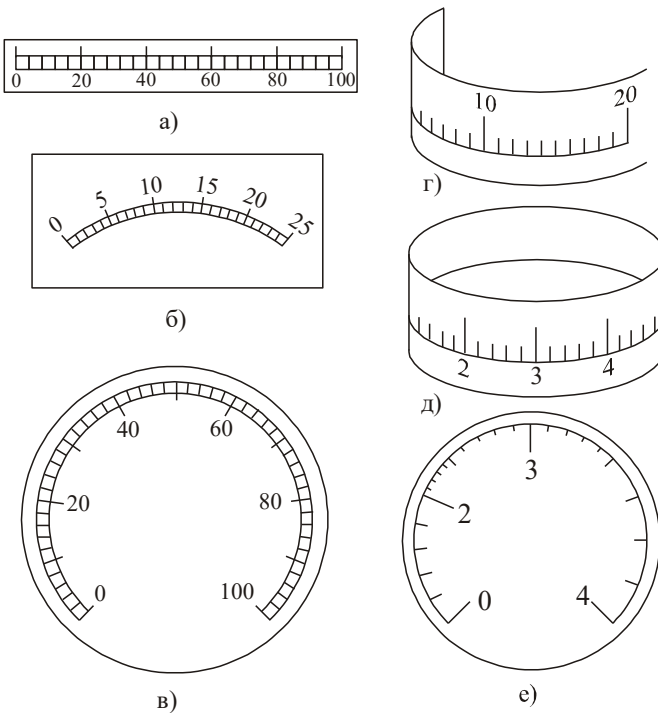


Рисунок 1.4. Типи шкал

Степенева шкала – це шкала з розширюючими чи звужуючими поділками, довжина між якими змінюється згідно закону відповідної степеневі функції.

За типом шкали є прямолінійні, дугові, кругові, профільні і барабанні (рис. 1.4).

ЗВТ можуть мати дві і більше шкал. Наприклад, у штангенциркуля є дві шкали: основна і допоміжна (ноніусна).

Програма роботи

Ознайомитися із типами шкал приладів. Навчитись визначати характеристики шкал.

Порядок виконання роботи

В лабораторній роботі використовують зразки різних типів шкал, приладів різного призначення: амперметра, вольтметра, манометра та штангенциркуля.

1. Вивчити шкалу, описати її.

2. Визначити діапазон вимірювання шкали в таких межах: нижня межа – $1/n$ діапазону вимірювання, верхня межа – $2/n$ діапазону показів, де n – номер варіанту.

3. Визначити відносну похибку вимірювання за даною шкалою, використовуючи формулу

$$\delta = \frac{x_N}{x} \gamma_{\Gamma}, \quad (1.5)$$

де x_N – номінальне (граничне, верхня межа вимірювання) значення вимірюваної величини за шкалою; x – покази приладу за шкалою, що відповідає $3/n$ діапазону вимірювання; γ_{Γ} – приведена гранична похибка ЗВТ (клас точності в % за шкалою).

4. Визначити приведену похибку відліку γ (%), використовуючи формулу

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N} \cdot 100, \quad (1.6)$$

де $\Delta = \Delta_3 + \Delta_{\Gamma} + \Delta_i$ – абсолютна похибка відліку показів, що включає в себе $\Delta_3 = 0.042C$ – абсолютну похибку через обмежену розділову здатність зору; $\Delta_{\Gamma} = 0.033C$ – абсолютну похибку від паралаксу

(зміни видимого положення покажчика при спостереженні його з двох різних точок); $\Delta_i = 0,1C$ – абсолютну похибку інтерполяції (наближеного знаходження значення шкали за двома сусідніми її значеннями).

Контрольні запитання

1. Що таке відліковий пристрій?
2. Що таке шкала?
3. Які бувають шкали?
4. Що таке діапазон вимірювання?
5. Що таке чутливість?
6. Що таке ціна поділки шкали?
7. Що таке діапазон показів?
8. Що таке клас точності?
9. Наведіть формулу для обчислення відносної похибки вимірювання.
10. Наведіть формулу для обчислення приведеної похибки.

Лабораторна робота 2. Дослідження точності способів вимірювання опору

Мета роботи: провести аналіз запропонованих схем вимірювання електричного опору, дослідити умови виникнення методичної похибки, навчитися її визначати.

Теоретичні відомості

На практиці доводиться вимірювати електричний опір в широкому діапазоні від 10^{-9} Ом до значень порядку 10^{15} Ом і більше. Різними є вимоги і до точності вимірювання. Якщо при повірці зразкових мір опору 1 розряду похибка вимірювання не повинна перевищувати десятих часток відсотка, то при вимірюванні перехідного опору контактів, опору заземлення або опорів ізоляції допускається похибка порядку декількох відсотків.

Якщо опір r_x визначати за формулою закону Ома $r_x = u / i_A$, де u – спад напруги, виміряний вольтметром V ; i_A – сила струму, виміряна амперметром A , то в обох випадках будуть мати місце методичні похибки.

В схемі 2.1 а, значення сили струму, яка вимірюється амперметром, більше за величину її дійсного значення, що проходить через опір r_x , оскільки невеликий струм проходить також через вольтметр.

В схемі 2.1 б, величина напруги, що вимірюється вольтметром, більша ніж спад напруги на опорі r_x , оскільки невеликий спад напруги є на амперметрі.

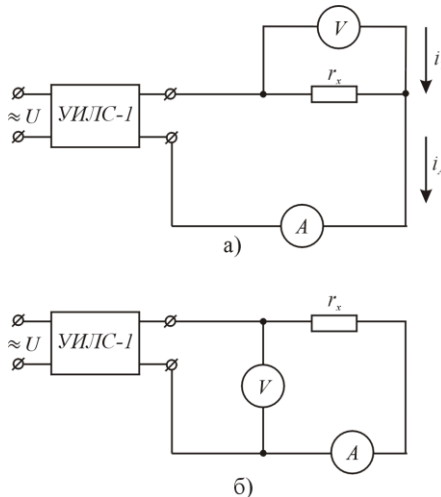


Рисунок 2.1. Схеми вимірювання електричного опору

Тут похибки виникли за рахунок не взятих до уваги опорів амперметра r_A і вольтметра r_V . З врахуванням опорів вказаних вимірювальних приладів можна обчислити опір і відносну похибку за такими формулами:

для схеми вимірювання наведеної на рис. 2.1, а,

$$r_x = 1 / (i_A / u - 1 / r_V)$$
$$\delta_1 = \{ 1 - 1 / [1 - u / (i_A r_V)] \} 100, \% \quad (2.1)$$

для схеми вимірювання наведеної на рис. 2.1, б,

$$r_x = u / i_A - r_A$$
$$\delta_2 = r_A i_A / u 100, \% \quad (2.2)$$

Відносні похибки δ_1 або δ_2 є в даному випадку методичними похибками як різновид систематичної похибки.

З формул (2.1) і (2.2) видно, що у першому випадку поправку необхідно вносити зі знаком плюс, а у другому випадку – зі знаком мінус.

Поправки можна і не вносити, якщо вони значно менші допустимої похибки вимірювання опору r_x , наприклад, якщо в першому випадку опір вольтметра значно більший r_x , а в другому опір амперметра значно менший r_x .

Програма роботи

1. Ознайомитися зі схемами вимірювання електричного опору та умовами виникнення в них методичної похибки за наведеними теоретичними відомостями.

2. Скласти відповідні електричні схеми згідно рис. 2.1.

3. Провести дослідження електричних схем та отримати експериментальні дані.

4. Обчислити значення електричного опору та величину методичної похибки.

5. Порівняти результати різної методики вимірювання електричного опору та зробити необхідні висновки.

Порядок виконання роботи

Для проведення лабораторної роботи використовуються прилади та обладнання: стенд УИЛС-1, цифровий вольтметр, мультиметр,

магазин опорів, з'єднувальні провідники, як джерело живлення використовується блок постійного струму.

1. Ознайомитися з приладами, що використовуються в лабораторній роботі. Технічні дані приладів записати в табл.2.1.

Таблиця 2.1

Назва приладу	Клас точності	Межі вимірювання	Опір приладу

2. Скласти схему а) згідно рис. 2.1. Зібрану схему перевірити.

3. Змінюючи опір в діапазоні, що допускається магазином опорів, провести n дослідів (задається викладачем) вимірювання напруги u та сили струму i_A . Результати вимірювань записати в табл. 2.2. Опір r визначити за спрощеною формулою $r = u / i_A$.

4. Провести необхідні обчислення за формулами (2.1).

Отримавши таким чином методичні похибки (відносні похибки), зробити відповідні висновки.

Таблиця 2.2

Дані, отримані при використанні схеми а) (рис. 2.1)

№ з/п	Покази вольметра, u , В	Покази амперметра, i_A , А	Опір, r , Ом	Опір, r_x , Ом	Відносна похибка, δ , %
1.					
...					
n					

5. Скласти схему б) згідно рис. 2.1. Зібрану схему перевірити.

6. Змінюючи опір в діапазоні, що допускається магазином опорів, провести n дослідів (задається викладачем) вимірювання напруги u та сили струму i_A . Результати вимірювань записати в табл. 2.3. Опір r визначити за спрощеною формулою $r = u / i_A$.

7. Провести необхідні обчислення за формулами (2.2).

Отримавши таким чином методичні похибки (відносні похибки), зробити відповідні висновки.

Таблиця 2.3

Дані, отримані при використанні схеми б) (рис. 2.1)

№ з/п	Покази вольметра, u , В	Покази амперметра, i_A , А	Опір, r , Ом	Опір, r_x , Ом	Відносна похибка, δ , %
1.					
...					
n					

Контрольні запитання

1. Порівнявши відносні похибки, отримані при дослідженні схем а) і б), пояснити, яку схему доцільно використовувати при проведенні вимірювань.
2. В яких випадках при нехтуванні методичною похибкою під час вимірювань бажано користуватися схемою а) і чому?
3. В яких випадках при нехтуванні методичною похибкою під час вимірювань бажано користуватися схемою б) і чому?
4. Чому методичну похибку вимірювання називають систематичною похибкою?
5. Що таке відносна похибка вимірювання?
6. Наведіть формулу для обчислення відносної похибки вимірювання.
7. Які є способи виключення систематичних похибок?
8. Поясніть, як визначається діапазон вимірювання приладу.

Лабораторна робота 3. Визначення вибірових статистичних характеристик результатів вимірювання

Мета роботи: навчитись правильно обробляти результати вимірювань, будувати гістограму, дослідну криву розподілу і теоретичну криву розподілу.

Теоретичні відомості

В статистичному аналізі при дослідженні технологічних процесів часто користуються вибіровим методом контролю якості продукції. Вибірка – це сукупність числа вимірювань, взятих із генеральної сукупності вимірювань (множини числа вимірювань). Щоб за даними вибірки можна було досить впевнено судити про ознаку генеральної сукупності, вибірка має бути достатньою. Іншими словами, вимірювання повинні мати мінімальні випадкові відхилення і однакову ймовірність появи. При аналізі вимірювань застосовують великі вибірки, що складаються з 50...100 вимірювань, а при контролі – малі вибірки об'ємом 3...10 вимірювань.

Вибірковий метод дозволяє розв'язати дві основні задачі. Перша полягає у встановленні закону розподілу випадкової величини, що вивчається, і параметрів цього розподілу за даними вимірювань, а друга – в статистичній перевірці гіпотез, що висувуються при різних виробничих дослідженнях.

Встановити закон розподілу випадкової величини можна аналітично або графічно. Виявити характер розподілу випадкової величини графічно можна, побудувавши гістограму чи дослідну криву.

Гістограмою називають ступінчасту фігуру, що складається з прямокутників, основами яких є інтервали шириною h , а висоти дорівнюють відношенню

$$m_i = \frac{n_i}{N} \quad (3.1)$$

де m_i – частість; n_i – частота, кількість результатів вимірювань, що попала в даний інтервал h .

Ширину інтервалу визначають за формулою

$$h = \frac{x_{max} - x_{min}}{7}, \quad (3.2)$$

де x_{min}, x_{max} – екстремальні значення, менші і більші за всі x .
 Значення x_{min} і x_{max} вибирають так, щоб їх різниця ділилася на
 знаменник (в даному випадку на 7), а h було парним числом. 7 – це
 кількість інтервалів (розрядів). Взагалі кількість інтервалів
 рекомендується брати від 6 до 15. Після цього заповнюють табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Дослідний розподіл величини x

Інтервали	Середина інтервалу x	Частота n	Частість m
$x_{min} - x_1$	x_{cp1}		
$x_1 - x_2$	x_{cp2}		
$x_2 - x_3$	x_{cp3}		
$x_3 - x_4$	x_{cp4}		
$x_4 - x_5$	x_{cp5}		
$x_5 - x_6$	x_{cp6}		
$x_6 - x_{max}$	x_{cp7}		

Знайшовши всі дані в таблиці 3.1, будують гістограму (рис. 3.1).

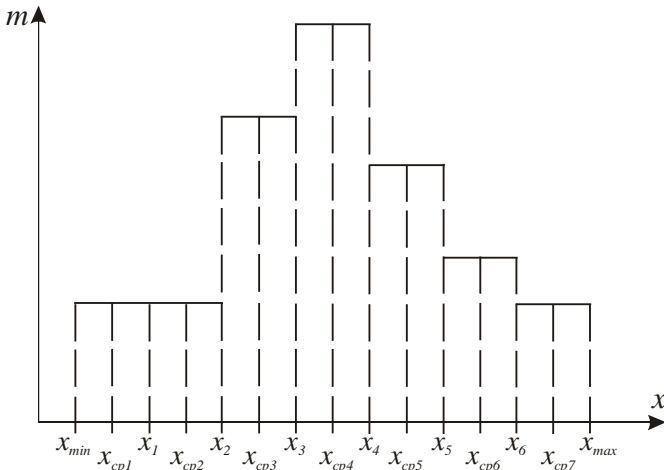


Рисунок 3.1. Гістограма

Використовуючи дані табл. 3.1, будують дослідну криву розподілу (рис. 3.2).

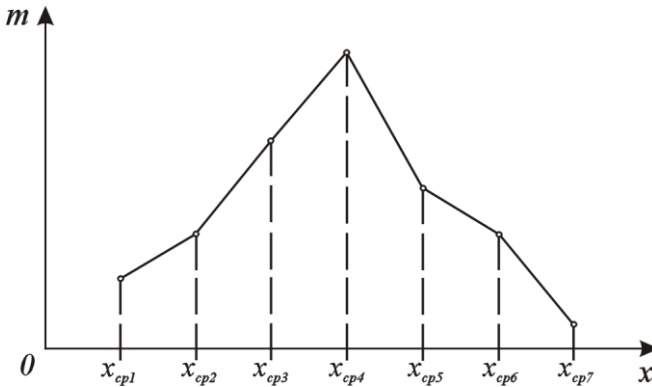


Рисунок 3.2. Дослідна крива розподілу

За формою дослідної кривої розподілу можна орієнтовано визначити теоретичний закон розподілу, якому підлягає дана сукупність вимірів.

Для побудови теоретичної кривої закону розподілу необхідно знайти середнє арифметичне ряду вимірів $x_{ср}$ і стандартне відхилення σ .

Середнє арифметичне визначають за формулою

$$x_{ср} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3.3)$$

Стандартне відхилення визначають за формулою

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{ср})^2} \quad \text{для } N \geq 20; \quad (3.4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{ср})^2} \quad \text{для } N < 20. \quad (3.5)$$

Використовуючи формулу густини ймовірності випадкової похибки (закону Гауса)

$$\rho(x_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(x_i - x_{ср})^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (3.6)$$

обчислюють $\rho(x_i)$ для кожного x_i . Отримані $\rho(x_i)$ і x_i дають можливість побудувати криву нормального закону розподілу.

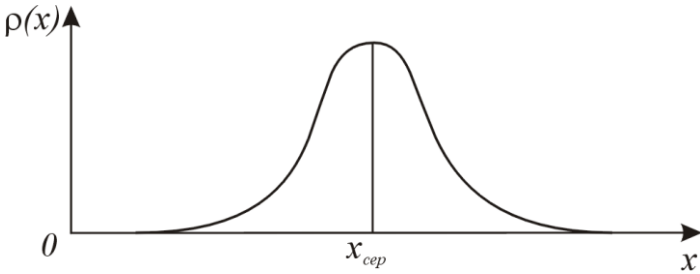


Рисунок 3.3. Теоретична крива нормального закону розподілу

Програма роботи

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями.
2. Отримати експериментальні дані для побудови графіків і гістограм.
3. Побудувати гістограму і криві $m_i = f_1(x_{cpi})$ і $\rho(x_i) = f_2(x_i)$.
4. Порівняти результати дослідної і теоретичної кривих розподілу випадкових величин.

Порядок виконання роботи

Для вимірювання температури і відносної вологості повітря використовується прилад AZ8721 (рис. 3.4).

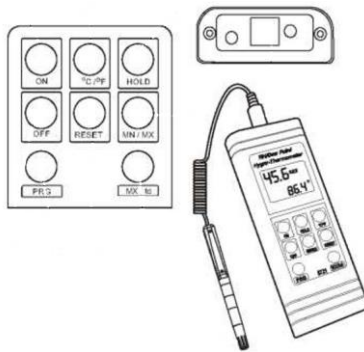


Рисунок 3.4. Термогігрометр AZ8721

Діапазон вимірювання відносної вологості повітря: 0~100% RH. Діапазон вимірювання температури -20°C...+50°C. Тип сенсора –

емнісний. Роздільна здатність за температурою 0.1°C. Роздільна здатність за вологістю 0.1% RH. Точність вимірювання температури ±1°C. Точність вимірювання відносної вологості ±2% RH (0~95%).

Прилад має дисплей із відображенням вологості і температури повітря, функцію сигналізації при досягненні максимального або мінімального значення, функцію автоматичного вимкнення, функцію фіксації показів, індикації низького заряду батареї, можливість роботи від зовнішнього джерела живлення.

Провести вимірювання температури ($t, ^\circ C$) і відносної вологості повітря ($RH, \%$), дані записати в табл. 3.2. Вимірювання проводять в одному і тому ж місці.

Таблиця 3.2

№ з/п	$t, ^\circ C$	$RH, \%$
1.		
...		
n		

Далі заповнюють табл. 3.1, табл. 3.3, табл. 3.4 і виконують всі розрахунки (табл. 3.4 має аналогічну форму табл. 3.3.).

Вологість повітря і температура можуть бути позначені через x_i .

Таблиця 3.3

Розрахункові дані

№ з/п	x_i	$x_i - x_{cep}$	$(x_i - x_{cep})^2$	$\gamma = \frac{(x_i - x_{cep})^2}{2\sigma^2}$	$e^{-\gamma}$	$\rho(x_i)$
1.						
2.						
...						
n						
	Σ		Σ			

При розрахунках притримуватися правил заокруглення цифр.

При побудові гістограми на осі абсцис відкладають значення температури/вологості повітря $x_{min}, x_1, \dots, x_{max}$ (рис. 3.1), пунктирними

лініями вказані значення $x_{cp1} = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}$, а по осі ординат – частоті m_i .

При побудові дослідної кривої розподілу по осі абсцис відкладають значення температури/вологості повітря x_{cp1} ($i = 1, \dots, 7$), а по осі ординат – частоті m_i (рис. 3.2). Отримані точки з'єднуються відрізками прямих ліній.

При побудові теоретичної кривої розподілу по осі абсцис відкладають значення температури/вологості повітря x_i ($i = 1, \dots, n$), а по осі ординат – густину ймовірності $\rho(x_i)$.

Контрольні запитання

1. Що таке вибірка?
2. Що таке генеральна сукупність вимірювань?
3. Що дає вибірковий метод статистичного аналізу?
4. Що таке гістограма?
5. Як знайти частість?
6. Як будується гістограма?
7. Для чого необхідні дослідна і теоретична криві розподілу?
8. За якими формулами визначають $x_{сеп}$ і σ ?
9. За якими формулами визначають густину ймовірності випадкової похибки?
10. Яку форму має крива Гауса?

Лабораторна робота 4. Оцінювання невизначеності результатів вимірювань

Мета роботи: навчитися оцінювати невизначеність результатів прямих одноразових вимірювань.

Теоретичні відомості

Невизначеність вимірювання – параметр, пов'язаний з результатом вимірювання, який характеризує розсіяння значень, які можуть бути достатньо обґрунтовано приписані вимірюваній величині.

Стандартна невизначеність (u) – невизначеність, виражена у вигляді стандартного відхилення.

Сумарна стандартна невизначеність (u_c) – стандартна невизначеність результату вимірювання, отриманого зі значень низки інших величин, дорівнює додатному квадратному кореню суми членів, які є дисперсіями або коваріаціями цих величин, зваженими відповідно до того, як результат вимірювання змінюється у разі зміни цих величин.

Розширена невизначеність (U) – величина, що визначає інтервал навколо результату вимірювання, який, як очікують, містить у собі більшу частину розподілу значень, що з достатнім обґрунтуванням можуть бути приписані вимірюваній величині.

Всі невизначеності подаються через стандартні відхилення незалежно від того, обумовлені вони випадковими чи систематичними ефектами. По суті є дві різні процедури для визначення цього стандартного відхилення. Звичайна процедура (оцінювання за типом А) базується на припущенні розподілу ймовірностей випадкової мінливості результатів вимірювання. Оцінки стандартного відхилення цього розподілу одержують шляхом повторних вимірювань і статистичного аналізу результатів вимірювання (серії вимірювань). Альтернативна процедура (оцінювання за типом В) використовується переважно для оцінювання невизначеності, яка обумовлена систематичними ефектами. Вона базується на використанні можливого розподілу ймовірностей, котрий обґрунтовується наявною інформацією про вимірювану величину, та стандартного відхилення цього розподілу. Ці два класи оцінок невизначеності визначені в GUM наступним чином:

тип А: оцінки, отримані шляхом статистичного аналізу серії вимірювань;

тип В: оцінки, отримані на основі інших методів, ніж статистичний аналіз серії вимірювань.

Прямі одноразові вимірювання виконують один раз, і значення фізичної величини визначають за показами засобу вимірювальної техніки. У деяких випадках, прямі одноразові вимірювання повторюють декілька разів. Надлишкові вимірювання виконують для захисту від збоїв апаратури, аномальних результатів тощо, а кінцевий результат визначають за одним вимірюванням, яке вибирають з декількох проведених вимірювань. Оцінкою значення вимірюваної величини є безпосередньо показ засобу вимірювальної техніки. Опрацювання даних у цьому випадку полягає в аналізі складових невизначеностей вимірювання, вилученні систематичних ефектів, оцінюванні невилучених залишків систематичних ефектів вимірювання та підсумовуванні складових невизначеностей вимірювання. Для оцінювання результату прямого вимірювання з одноразовим спостереженням використовують способи оцінювання невизначеностей типу В.

Програма роботи

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями.
2. Здійснити вимірювання напруги постійного струму.
3. Оцінити невизначеність результатів вимірювання.

Порядок виконання роботи

Провести вимірювання напруги постійного струму за допомогою вольтметра; отримати показ вольтметра V_x , B .

1. Аналіз умов вимірювання, схеми вимірювання та технічних характеристик приладу:

- вимірювання проводяться в лабораторних умовах при температурі навколишнього повітря t °С;
- границя вимірювання приладу V_k , B ;
- робочі умови застосування приладу, °С;
- крок квантування приладу складає одиницю молодшого розряду q , мВ;

- граничне значення основної відносної похибки приладу при вимірюванні постійної напруги на піддіапазоні визначається за

$$\text{формулою } \delta = \pm \left[0,15 + 0,4 \left(\frac{V_k}{V_x} \right) \right] \% ;$$

- межа додаткової похибки приладу при відхиленні температури навколишнього середовища від нормальної (t_n 20 °C) не перевищує в робочих умовах граничного значення основної похибки на 10 °C зміни температури.

2. Оцінка складових $u_i(V) = c_i u(x_i)$ сумарної невизначеності

вимірювання напруги

2.1 Складова невизначеності результату, що обумовлена конструктивними властивостями вольтметра оцінюється через основну похибку при допущенні рівномірного закону розподілу можливих її значень у певних границях.

Знайти відносну похибку отриманого результату

$$\delta = \pm \left[0,15 + 0,4 \left(\frac{V_k}{V_x} \right) \right] \% .$$

Тоді граничні значення, в яких знаходяться можливі абсолютні значення похибки, будуть $\Delta = \delta \frac{V_x}{100\%}$.

Таким чином, невизначеність, яка обумовлена основною похибкою вимірювання, дорівнює $u(\delta) = \frac{|\Delta|}{\sqrt{3}}$.

2.2 Невизначеність, що обумовлена відхиленням температури від нормальної.

Врахувати температуру t °C, при якій проводилися вимірювання та

знайти додаткову невизначеність $u(\Delta t) = \frac{t - t_n}{10} u(\delta)$.

2.3 Невизначеність, обумовлена квантуванням, тобто подання неперервної шкали значень напруги за допомогою деякого дискретного ряду, різниця між сусідніми значеннями якого складає одиниці молодшого розряду пристрою.

Беремо рівномірний закон розподілу можливих значень напруги між сусідніми відліками вольтметра (які відрізняються на одиницю молодшого розряду) $u(q) = \frac{q}{2\sqrt{3}}$.

3. Знайти сумарну стандартна невизначеність результату

$$u_c(V) = \sqrt{u^2(\delta) + u^2(\Delta t) + u^2(q)}$$

4. Визначити розширену невизначеність.

При рівні довіри $P=0.95$, допускаючи, що можливі результати вимірювання розподілені за нормальним законом, знайти розширену невизначеність

$$V = k_p u_c(V), \quad k_p = 1.96.$$

5. Записати результат вимірювання

$$U = (V_x \pm V)B, \quad P=0.95.$$

Контрольні запитання

1. Дайте визначення поняття «невизначеність вимірювання».
2. Дайте визначення поняття «стандартна невизначеність».
3. Дайте визначення поняття «розширена невизначеність».
4. На які категорії поділяють невизначеності за способами їх оцінювання?
5. В чому відмінність між невизначеністю типу А та невизначеністю типу В?
6. На основі яких даних визначається невизначеність типу В?

Лабораторна робота 5. Опрацювання результатів повторних вимірювань

Мета роботи: навчитися виявляти і вилучати систематичну похибку, навчитися визначати необхідне число вимірювань в експерименті.

Теоретичні відомості

Систематичною називається така складова похибки вимірювання, яка залишається постійною чи закономірно змінюється при повторних вимірюваннях однієї і тієї самої величини.

Причинами виникнення систематичних складових похибки вимірювання (систематичних похибок) є:

- відхилення параметрів реального ЗВТ від розрахункових значень, передбачуваних повірочною схемою;
- незбалансованість деяких деталей ЗВТ відносно їх осі обертання, що призводять до додаткового повороту за рахунок щілин, які є в механізмі;
- пружна деформація деталей ЗВТ, що мають малу жорсткість, яка призводить до додаткових переміщень;
- похибка градування чи невеликий зсув шкали;
- неточність підгонки шунта чи додаткового опору, неточність еталонної вимірювальної котушки опору;
- нерівномірне зношення направляючих пристроїв для базування вимірювальних деталей;
- зношення робочих поверхонь деталей ЗВТ, за допомогою яких здійснюється контакт ланок механізму;
- зміни пружних властивостей деталей, а також їх природне старіння;
- несправності ЗВТ.

Ряд постійних систематичних похибок зовні себе не виявляють. Їх можна виявити при повірці шляхом звіряння робочих ЗВТ з еталонними.

Способи виключення і облік систематичних похибок можна розділити на групи:

- усунення джерел похибок до початку вимірювання (профілактика похибок);
- виключення похибок в процесі вимірювання (експериментальне виключення похибок) способами заміщення, компенсації похибки за знаком, протиставлення, симетричних спостережень;

- внесення відомих поправок в результат вимірювання (виключення похибок обчисленням);
- оцінка границь систематичних похибок, якщо їх не можна виключити.

Для вилучення систематичних похибок в даній роботі використовують метод заміщення. Метод заміщення – це порівняння з мірою, в якому виміряну величину замінюють відомою величиною, яка відтворюється мірою. Для цього спочатку вимірюють невідому величину. Результат виміру записують у вигляді

$$x_{\Pi} = x + \Delta_C, \quad (5.1)$$

де x – істинне значення невідомої величини; x_{Π} – покази вимірювального приладу; Δ_C – систематична складова похибки вимірювань.

Нічого не змінюючи у вимірювальному приладі, підключають взамін значення x регульовану міру x_m і підбирають таке її значення, при якому досягається попередній показ ЗВТ. Тоді

$$x_{\Pi} = x_m + \Delta_C. \quad (5.2)$$

Порівнюючи співвідношення (5.1) і (5.2), отримують значення невідомої величини $x = x_m$ і обчислюють значення систематичної складової похибки

$$\Delta_C = x_{\Pi} - x_m. \quad (5.3)$$

Для виправлення результатів вимірювань вводять поправку, яка чисельно дорівнює модулю систематичної складової похибки, але протилежна за знаком, тобто $\Delta_{\Pi} = -\Delta_C$.

Нехай деяку невідому величину вимірюють за допомогою ряду окремих спостережень, виконаних з однаковою старанністю і в однакових умовах (такий ряд вимірювань називають рівноточним і варіаційним). В підсумку отримують n результатів, що мало чим відрізняються один від одного числовими значеннями і які відповідно дорівнюють $x_1^*, x_2^*, x_3^* \dots x_n^*$. Після цього вилучають систематичну складову похибки з результатів спостережень і отримують варіаційний ряд $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$.

Визначають середнє арифметичне значення

$$x_{\text{сеп}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (5.4)$$

Для оцінки результатів вимірювань вводять поняття гарантійної ймовірності P_a і гарантійного інтервалу від $+\varepsilon$ до $-\varepsilon$. Гарантійна ймовірність означає, що дійсне значення a виміряної величини знаходиться в границях $x_{\text{сеп}} \pm \varepsilon$, тобто

$$P(x_{\text{сеп}} - \varepsilon < a < x_{\text{сеп}} + \varepsilon) = P_a. \quad (5.5)$$

Іншими словами, ймовірність попадання випадкової похибки Δ в симетричний гарантійний інтервал $\pm \varepsilon$ при нормальному законі розподілу випадкових похибок визначається за формулою

$$P(-\varepsilon < \Delta < +\varepsilon) = P(\Delta < |\varepsilon|) = \Phi(t), \quad (5.6)$$

де $\Phi(t) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{\Delta^2}{2}} d\Delta$ (при $t > 0$) – інтеграл Лапласа, а

$t = \varepsilon/\sigma$ – коефіцієнт довіри.

Величина σ являє собою стандартне відхилення, що визначається за формулою

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad \text{при } n \leq 20; \quad (5.7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad \text{при } n > 20; \quad (5.8)$$

де μ – математичне сподівання результатів вимірювань (при обробці результатів вимірювань $\mu \approx x_{\text{сеп}}$).

В дійсності при обробці результатів вимірювань крім $x_{\text{сеп}}$ знаходять ще стандартне відхилення середнього значення за формулою

$$S = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (5.9)$$

На практиці часто говорять про точність вимірювань і вводять характеристику, що називається статистичною похибкою V , Величину V визначають за формулою

$$v = \frac{S}{x_{сеп}} \cdot 100. \quad (5.10)$$

При задовільній точності вимірювань $v < 6\%$ необхідна точність вимірювань визначається вибором відповідного числа повторень вимірів. Чим більше повторень при рівноточних вимірюваннях, тим більша ймовірність зменшення випадкової похибки. Визначення числа повторень n при рівноточних вимірюваннях проводять за таблицею Романовського (табл. 5.1). Значення t визначають за формулою

$$t = \frac{\varepsilon}{S}. \quad (5.11)$$

Величину ε визначають за класом точності γ ЗВТ за формулою

$$\varepsilon = \frac{x_N \cdot \gamma}{100}, \quad (5.12)$$

де x_N – нормоване значення вимірювального приладу.

Таблиця 5.1

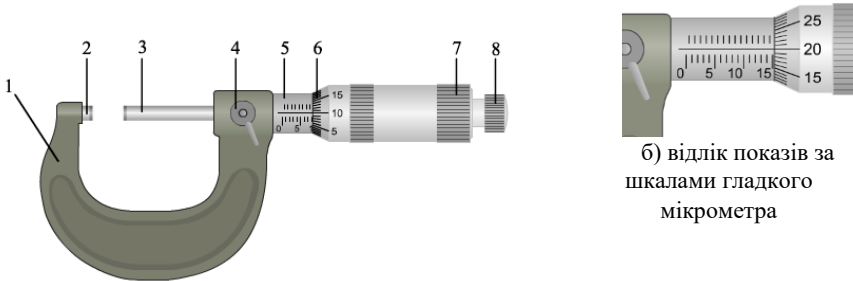
t	Число повторень n при значеннях P_a				
	0,8	0,9	0,95	0,99	0,999
3,0	1	2	3	4	5
2,0	2	3	4	5	7
1,0	4	5	7	11	17
0,5	9	13	18	31	50
0,4	12	19	27	46	74
0,3	20	32	46	78	127
0,2	43	70	99	171	277
0,1	266	273	387	668	1089

Програма роботи

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями.
2. Вилучити систематичні похибки при вимірюваннях.
3. Визначити необхідне число вимірювань в експерименті.

Порядок виконання роботи

В лабораторній роботі як вимірювальний прилад використовується гладкий мікрометр. Зовнішній розмір вимірюється абсолютним контактним методом. На рис. 5.1, а показаний загальний вигляд мікрометра.



а) 1 – скоба; 2 – п'ятка; 3 – мікрометричний гвинт; 4 – стопор; 5 – стебло; 6 – барабан; 7 – корпус тріскачки; 8 – тріскачка

Рисунок 5.1. Мікрометр гладкий

Основою мікрометра є скоба 1, а передавальним (перетворювальним) пристроєм служить гвинтова пара, що складається з мікрометричного гвинта 3 і мікрометричної гайки, закріпленої всередині стебла 5, які часто називають мікропарою. У скобу 1 запресовані п'ятка 2 і стебло 5. Вимірювана деталь охоплюється вимірювальними поверхнями мікрогвинта 3 і п'ятки 2. Барабан 6 приєднаний до мікрогвинта 3 корпусом тріскачки 7. Для наближення мікрогвинта 3 до п'ятки 2 його обертають за барабан або за тріскачку 8 за годинниковою стрілкою (від себе), а для видалення мікрогвинта від п'ятки його обертають проти годинникової стрілки (на себе). Закріплюють мікрогвинт у потрібному положенні стопором 4.

При щільному зіткненні вимірювальних поверхонь мікрометра з поверхнею вимірюваної деталі тріскачка прокручується з легким тріском, при цьому обмежується вимірювальне зусилля мікрометра. Результат вимірювання розміру мікрометром відраховується як сума відліків за шкалою стебла 5 і барабана 6. Ціна поділки шкали стебла становить 0,5 мм, а шкали барабана – 0,01 мм. Крок різьби мікропари (мікрогвинт і мікрогайка) $P = 0,5$ мм.

Кількість поділок барабана – 50. Якщо зрушити барабан на одну поділку його шкали, то торець мікрогвинта переміститься відносно п'ятки на 0,01 мм, оскільки $0,5 \text{ мм} : 50 = 0,01 \text{ мм}$.

Покази за шкалами гладкого мікрометра відлічують у такому порядку: спочатку за шкалою стебла 5 читають значення штриха, найближчого до торця скоса барабана b (на рис. 5.1, b – це число 15,00 мм). Далі за шкалою барабана читають значення штриха, найближчого до поздовжнього штриха стебла (на рис. на рис. 5.1, b – це число 0,20 мм). Додавши обидва значення, отримують покази мікрометра (на рис. 5.1, b – це значення 15,20 мм).

1. Провести $n = 25$ вимірювань розміру L предмета і отримати значення $x_1^*, x_2^*, \dots, x_i^*, \dots, x_{25}^*$. Дані вимірювання записати в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

№ з/п	x_i^* , мм	$x_i = x_i^* + \Delta_{II}$, мм	$x_i - x_{сеп}$, мм	$(x_i - x_{сеп})^2$, мм ²
1.				
2.				
...				
25.				

2. Вилучити систематичну похибку. Для цього вибрати з набору кінцевих мір довжини брусок розміром $L_M = L$ і виміряти його мікрометром. Отримавши значення за мікрометром x_{II} і маючи істинне значення довжини $x_M = L_M$, обчислити систематичну похибку за формулою (5.3). Отримавши похибку Δ_C , внести поправку $\Delta_{II} = -\Delta_C$ у кожне виміряне значення $x_1^*, x_2^*, \dots, x_i^*, \dots, x_{25}^*$, тобто визначити виправлені результати вимірювання за формулою

$$x_i = x_i^* + \Delta_{II}.$$

3. З виправлених результатів вимірювань визначають необхідне число повторень. Для цього спочатку визначають $x_{сеп}, \delta$ і S за формулами (5.4), (5.8), і (5.9). Для гладкого мікрометра приймають $\varepsilon = \pm 4 \mu\text{км}$. Згідно заданої викладачем гарантійної ймовірності P_a і

визначеного t за формулою (5.11) з табл.5.1. визначають число повторень. Зробити відповідні висновки.

Контрольні запитання

1. Що таке систематична похибка?
2. В чому полягає метод заміщення?
3. Що собою являє поправка?
4. Які виміри називаються рівноточними?
5. Пояснити терміни гарантійний інтервал і гарантійна ймовірність.
6. Наведіть формули для обчислення стандартного відхилення при різній кількості спостережень.
7. Пояснити порядок виконання вимірювання мікрометром.

Лабораторна робота 6. Встановлення кореляційного зв'язку за результатами спостережень

Мета роботи: навчитися визначати кореляційний зв'язок за результатами спостережень, навчитися правильно обробляти результати вимірювань.

Теоретичні відомості

Середнє арифметичне значення і стандартне відхилення дають можливість кількісно охарактеризувати особливості фізичної величини, що вивчається, а саме: його типову середню величину, мінливість тощо.

Часто буває необхідно дослідити залежність властивості, що вивчається, від інших факторів. Зокрема таку залежність між фізичними величинами можна вивчити за допомогою кореляційного аналізу.

Кореляційна залежність – це така залежність, коли одній незалежній величині відповідає декілька змінних величин, варіюючих навколо якоїсь середньої величини. Кореляція може бути прямолінійною та криволінійною, прямою та зворотною. Наприклад, при зворотній кореляції зі збільшенням однієї фізичної величини середнє значення іншої фізичної величини пропорційно зменшується.

Для з'ясування залежності між двома властивостями при експериментах необхідно спостерігати одночасно кожне із них, причому число спостережень над однією фізичною величиною повинно відповідати тому ж самому числу спостережень над іншою. Таким чином, повинні бути взаємно пов'язані пари результатів спостережень (експериментів).

Найбільш простий спосіб первинного визначення зв'язку між двома властивостями є спосіб графічного зображення результатів спостережень. Так як у кожному окремому випадку, крім залежності від властивості (параметра), що вивчається, має місце вплив цілого ряду інших невідомих параметрів, то точки на графіку будуть розкидані. Однак, якщо між фізичними величинами, що вивчаються, є зв'язок в розташуванні точок, то спостерігається деяка функціональна залежність.

Для аналітичної оцінки функціональної залежності між двома фізичними величинами (вхідним та вихідним параметрами) використовують коефіцієнт кореляції, якого позначають літерою r .

Коефіцієнт кореляції коливається від -1 до +1 (рис.6.1). Знак мінус вказує на зворотний зв'язок. Якщо коефіцієнт кореляції рівний нулю, то це вказує на те, що прямолінійний зв'язок відсутній, а тому такий зв'язок носить нелінійний характер.

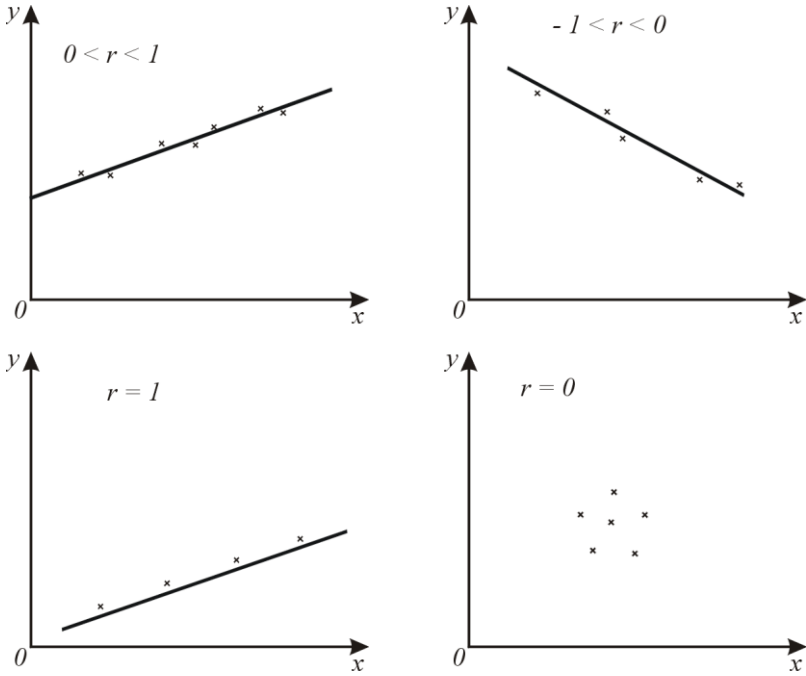


Рисунок 6.1.

Коефіцієнт кореляції визначається за формулою:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ai} - M_x)(y_{ai} - M_y)}{(n-1)\sqrt{D_X D_Y}}, \quad (6.1)$$

де x_a, y_a – відповідно експериментальні значення вхідного та вихідного параметрів, i - порядковий номер експеримента, n - кількість експериментів,

$$D_X = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ai} - M_x)^2, \quad D_Y = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{ai} - M_Y)^2$$

– дисперсії, M_x, M_y – середні арифметичні за x_a та y_a ,

$$K_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ai} - M_x)(y_{ai} - M_y) - \text{називається другим змішаним}$$

моментом.

Кореляційна залежність між двома змінними (вихідним та вхідним) при $|r_{xy}| \approx 1$ апроксимується рівнянням прямої лінії (рівнянням регресії)

$$y_p = a + bx, \quad (6.2)$$

де y_p – розрахункове значення вхідного параметра, a і b – коефіцієнти рівняння регресії, які визначаються методом найменших квадратів за формулами

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N y_{ai} - b \sum_{i=1}^N x_{ai}}{N}, \quad b = \frac{N \sum_{i=1}^N y_{ai} x_{ai} - \sum_{i=1}^N y_{ai} \sum_{i=1}^N x_{ai}}{N \sum_{i=1}^N x_{ai}^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_{ai} \right)^2}. \quad (6.3)$$

Після цього перевіряють адекватність отриманого рівняння регресії, тобто відповідність розрахункових даних y_p дослідним даним y_a за формулою

$$\delta = \left(\sum_{i=1}^N (y_{ai} - y_p) / y_a \right) * 100, \% . \quad (6.4)$$

Відповідність між дослідними і розрахунковими даними вважається задовільною, якщо $\delta < 10 \%$.

Програма роботи

1. Скласти схему і розглянути процеси, що відбуваються в електричному колі.
2. Зняти дані для аналізу результатів вимірювання.
3. Отримати рівняння регресії.
4. Перевірити адекватність отриманого рівняння регресії

Порядок виконання роботи

Лабораторну роботу виконують на стенді УИЛС-1, в якому використовують блок змінного струму. Напругу живлення

виставляють регулятором напруги. Частоту виставляють перемикачем частоти повернувши регулятор ручкою “Плавно” в праве крайнє положення. Використовують резистор та конденсатор з номінальними значеннями опору і ємності вказаними викладачем (наприклад $R=750 \text{ Ом}$, $C=0,5 \text{ мкФ}$). Для вимірювання напруги використовують цифровий вольтметр.

Для виконання роботи складають електричну схему згідно рис.6.2. Опір R резистора визначають за допомогою мультиметра. Ручку на блоці змінного струму “Частота - Плавно” переводять в праве крайнє положення. Підключають схему до блока живлення і фіксують послідовно напруги U_{12} і U_{23} при кожній частоті $f = 1, 2, \dots, 8 \text{ кГц}$ (частота виставляється перемикачем частоти). Результати записують в табл.6.1.

Потім визначають ємність конденсатора за наближеною формулою

$$C = U_{12} / (2\pi f R U_{23}),$$

де C – ємність конденсатора, мкФ; f – частота напруги живлення, кГц; R – опір резистора, кОм; U_{12} і U_{23} – відповідно падіння напруги на резисторі і конденсаторі, В.

Позначивши через x частоту f і через y ємність конденсатора C , заповнюють табл.6.2.

Далі визначають величини, що входять у рівняння (6.1). потім перевіряють умову кореляції і заповнюють табл.6.3. На підставі отриманих результатів робляться відповідні висновки.

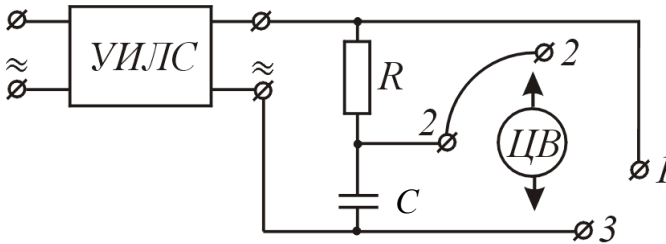


Рисунок 6.2.

Таблица 6.1

Дослідні дані

№ з/п	$f, \text{кГц}$	$U_{12}, \text{В}$	$U_{23}, \text{В}$

Таблиця 6.2

Розрахунок за дослідними даними (x - частота f , y - ємність конденсатора C)

№ з/п	x_{ai}	y_{ai}	$x_{ai}-M_x$	$y_{ai}-M_y$	$(x_{ai}-M_x)^2$	$(y_{ai}-M_y)^2$	x_{ai}^2	$x_{ai} * y_{ai}$

За даними таблиці (6.2) обчислюємо значення коефіцієнта r_{xy} за формулою (6.1), а саме:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ai} - M_x)(y_{ai} - M_y)}{(n-1)\sqrt{D_x D_y}}.$$

Якщо $|r_{xy}| \approx 1$, то між вхідним параметром x (частотою f) та вихідним параметром y (ємністю конденсатора C) існує лінійна залежність у виді (6.2). Тоді знаходимо коефіцієнти a і b за формулами 6.3 з використанням даних табл.(6.2), а саме :

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N y_{ai} - b \sum_{i=1}^N x_{ai}}{N}, \quad b = \frac{N \sum_{i=1}^N y_{ai} x_{ai} - \sum_{i=1}^N y_{ai} \sum_{i=1}^N x_{ai}}{N \sum_{i=1}^N x_{ai}^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_{ai} \right)^2},$$

та представляємо рівняння регресії у виді $y_p = a + bx$. Будуємо графік отриманого рівняння та наносимо на нього точки, що відповідають дослідним даним.

Далі заповнюємо табл. 6.3.

Таблиця 6.3

Дані для перевірки адекватності рівняння регресії

№ з/п	$x_{ai} (f, \kappa\Gamma\psi)$	$y_{ai} (C, \text{мкФ})$	$y_{pi} (C, \text{мкФ})$	$(y_{ai} - y_{pi}) / y_{ai} (C, \text{мкФ})$

Після цього обчислюємо адекватність отриманого рівняння за формулою 6.4., а саме

$$\delta = \left(\sum_{i=1}^N (y_{ai} - y_p) / y_a \right) * 100, \%.$$

Контрольні запитання

1. Як може проявитися систематична похибка при такому експерименті?
2. Від чого залежать випадкові похибки в даному експерименті?
3. Що таке кореляція?
4. Для чого необхідний кореляційний аналіз?
5. За якої умови отримане рівняння регресії вважається адекватним?

Список рекомендованої літератури

1. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В. Вінниця : ВНТУ, 2012. 522 с.
2. Метрологія та вимірювальна техніка : підручник / Поліщук Є.С. та ін.; за ред. проф. Є. С. Поліщука. Львів : Видавництво Львівська політехніка, 2012. 544 с.
3. Марчук В. І., Караченцев В. Є. Основи метрології та електричні вимірювання: теорія і практикум : навч. посіб. Луцьк : Луцький національний технічний університет, 2013. 621 с.
4. Величко О. М., Коломієць Л. В., Гордієнко Т. Б. Основи метрології та метрологічна діяльність : підручник; за заг. ред. О. М. Величка. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2021. 576 с.
5. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин : навч. посіб. Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 256 с.
6. Настанова з оцінювання невизначеності вимірювання результатів кількісних випробувань: Технічний звіт EUROLAB №1/2006 / пер. з англ. Київ, Євролаб-Україна, 2008. 51 с.
7. Поджаренко В. О., Васілевський О. М., Кучерук В. Ю. Опрацювання результатів вимірювань на основі концепції невизначеності : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2008. 128 с.
8. Основи теорії похибок: Практикум здобувачів освітнього ступеня «магістр» спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» усіх форм навчання [Електронний ресурс] / Упоряд. : Трембовецька Р. В., Тичков В. В., Базіло К. В., Куницька Л. Г., ; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси : ЧДТУ, 2018. 170 с.
9. ДСТУ 2681-94 Метрологія. Терміни та визначення.
10. ДСТУ OIML R 34:2014 Метрологія. Класи точності засобів вимірювальної техніки (OIML R 34:1979, IDT).
11. ДСТУ ISO/TS 21749:2013 Невизначеність вимірювання в метрологічній практиці. Повторні вимірювання та ієрархічні експерименти (ISO/TS 21749:2005, IDT).
12. ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2018 Невизначеність вимірювань. Частина 3. Настанова щодо подання невизначеності у вимірюванні (GUM:1995) (ISO/IEC Guide 98-3:2008, IDT).