

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

04-03-417М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни
«Метрологія» (частина 1) для здобувачів вищої освіти першого
(бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою
«Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка» спеціальності 174 «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-
методичною радою з якості
ННІ ЕАВГ
Протокол № 3 від 26.11.2024 р.

Рівне – 2024

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Метрологія» (частина 1) для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» денної та заочної форм навчання. [Електронне видання] / Матус С. К. – Рівне : НУВГП, 2024. – 24 с.

Укладач: Матус С. К., к.т.н, 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 освітньої програми «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»: Христюк А. О., к.т.н., доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

© С. К. Матус, 2024
© НУВГП, 2024

Зміст

Практична робота № 1.	4
Практична робота № 2.	15
Література	24

Практична робота 1. Розрахунок впливу підключення вимірювального приладу на процес вимірювання

1.1 Мета роботи

Навчитися оцінювати і коригувати похибки при взаємодії засобу вимірювальної техніки з об'єктом вимірювання

1.2 Теоретичні відомості

Згідно з ДСТУ 2681-94 [7] *вимірювання* є відображенням вимірюваних величин їх значеннями шляхом експерименту та обчислень за допомогою спеціальних технічних засобів.

Будь-яке вимірювання здійснюється за допомогою обов'язкового виконання фізичного експерименту, в якому взаємодіють об'єкт вимірювання і засоби вимірювальної техніки (ЗВТ), а також, якщо необхідно, виконання певних обчислювальних процедур з результатами вимірювання.

Принцип вимірювання – це фізичний закон, ефект, явище, на яких ґрунтується вимірювання, тобто наукова основа вимірювання. Наприклад, вимірювання індукції магнітного поля на основі ефекту Холла, а інших параметрів магнітного поля – на основі застосування закону електромагнітної індукції, вимірювання температури на основі термоелектричного ефекту, вимірювання швидкості на основі ефекту Доплера тощо. Залежно від принципу розрізняють електричні, магнітні, акустичні, оптичні, механічні, хімічні, теплові, квантові та інші вимірювання.

Кожне вимірювання передбачає порівняння величини з одиницею, яка відповідає мірі. Отже, у кожному вимірюванні явно чи неявно присутня міра і тому залежно від наявності при вимірюванні міри як окремого ЗВТ виділяють три групи методів: безпосереднього оцінювання, порівняння з мірою і комбіновані.

Метод вимірювання – це загальна логічна послідовність операцій із ЗВТ, що виконують під час здійснення вимірювань згідно з певним принципом. Один і той самий метод вимірювання може бути застосований для вимірювання різних величин. Конкретна назва методу може залежати від принципу вимірювання. Так, якщо вимірювання електричного опору ґрунтується на використанні закону Ома, причому напругу

вимірюють вольтметром, а силу струму – амперметром, то можна говорити про метод амперметра – вольтметра вимірювання електричного опору.

Розрізняють два основні види вимірювань: прямі та непрямі. *Пряме вимірювання* – це вимірювання однієї величини, значення якої знаходять безпосередньо за показом відповідного засобу вимірювань, наприклад, вимірювання довжини лінійкою, потужності – ватметром.

Непряме вимірювання – це вимірювання, в якому значення однієї чи декількох вимірюваних величин знаходять, обчисливши їх за відомими залежностями від декількох величин аргументів, що вимірюються прямо. Непрямі вимірювання можуть бути опосередкованими, сукупними або сумісними.

З поняттям вимірювання безпосередньо пов'язані: істинні значення X вимірюваних величин, які не є доступними для експериментатора, а також результати вимірювань x , які відомі експериментатору, однак є лише певними практичними оцінками (наближеннями) істинних значень.

Оскільки вимірювання є певним видом діяльності, внаслідок якої отримують певний продукт – результат вимірювання, то саме вимірювання і результати вимірювань оцінюють певними якісними характеристиками (параметрами). Серед них найважливішими є: точність, похибка, повторюваність, правильність, збіжність, невизначеність результату вимірювань тощо.

На практиці для кількісного оцінювання якості вимірювання найчастіше застосовують характеристику – похибку результату вимірювання або часто просто похибку вимірювання, як відхилення результату вимірювання x від істинного значення X вимірюваної величини

$$\Delta = x - X \quad (1.1)$$

Отриманню похибки для оцінювання якості вимірювань сприятиме те, що похибки ЗВТ можна визначити (принаймні наближено) експериментально, наприклад, подаючи на їх вхід відоме значення величини і зіставляючи з ним отриманий результат. Експериментально можна перевірити методики

вимірювань тих чи інших величин, що виконуються певними ЗВТ в певних умовах.

Похибки вимірювань виникають внаслідок різних причин, зокрема від неадекватної моделі вимірювальної величини, неідеальності властивостей ЗВТ, небажаної їх взаємодії з об'єктом вимірювання, впливу інших фізичних об'єктів. Завдяки глибокому вивченню об'єкта і вимірювальної величини, покращенню ЗВТ, способів їх використання, методик виконання вимірювань, корекції та опрацювання результатів тощо, вплив похибок на результат вимірювання зменшують, а значить, зменшують похибку вимірювання.

Класифікаційні ознаки похибок вимірювання наведено на рис. 1.1.

Кінцевою метою аналізу похибок вимірювань є оцінювання границь (умовних чи безумовних), в яких міститься фактичне значення похибки. Вважають, що результат вимірювання разом з інтервалом, що визначається границями похибки вимірювання, накриває з певною ймовірністю істинне значення вимірюваної величини.

Виявлення і коригування систематичних похибок в первинних результатах вимірювання (тобто їх виправлення) є обов'язковим елементом опрацювання цих результатів. Для забезпечення належної точності вимірювань насамперед необхідно встановити наявність тих чи інших складових похибок, щоб далі по можливості зменшити їх вплив (скоригувати). Виявлення систематичних похибок є часто складною операцією і її ефективність суттєво залежить від досвіду та кваліфікації експериментатора, а також від обсягу наявної інформації про об'єкт дослідження, вимірювальні засоби та умови вимірювань.

Насамперед аналізують можливість появи методичних похибок, пов'язаних зі спрощеннями об'єкта моделі і моделі вимірюваної величини, а також спричинених взаємодією використовуваних засобів вимірювань з об'єктом досліджень.

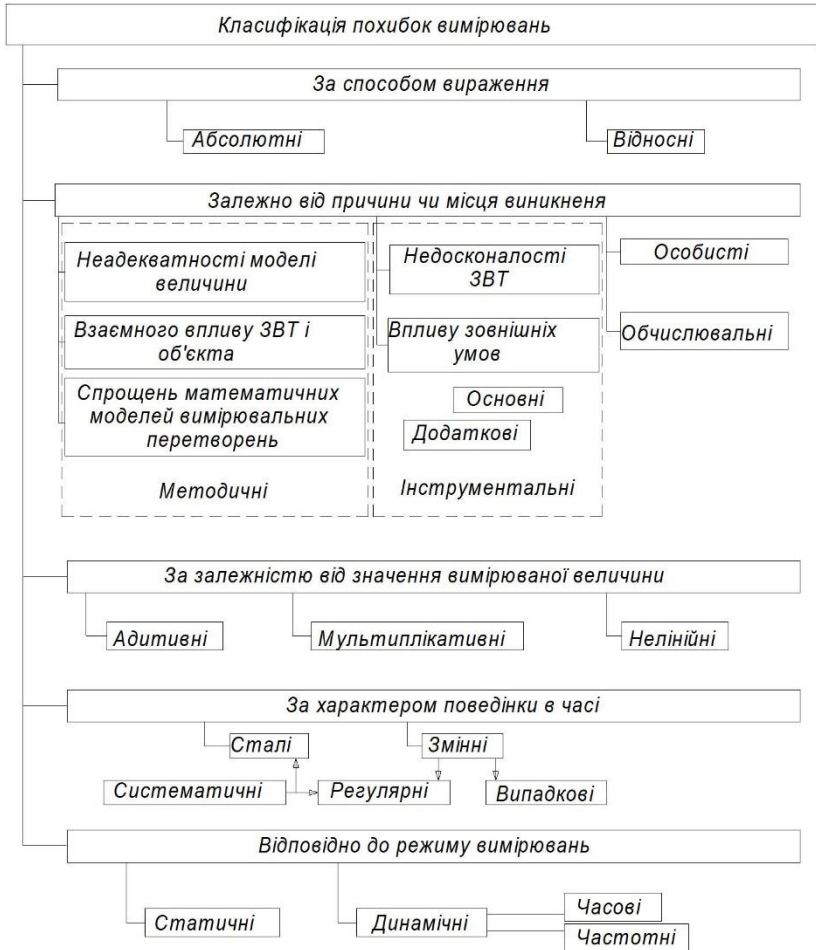


Рис. 1.1 Класифікація похибок вимірювань

Нехай в колі з загальним опором $R_K = R_0 + R_x$ протікає струм I_x , значення якого треба виміряти, рис. 1.2.

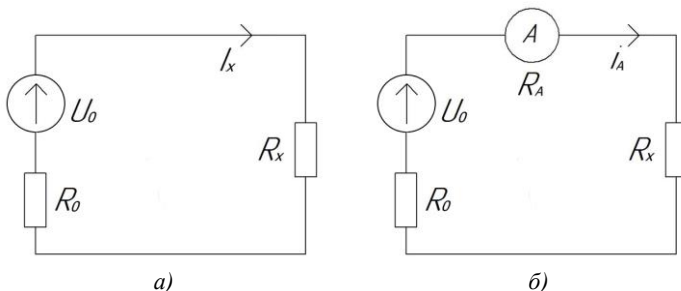


Рис. 1.2 Методична похибка при взаємодії ЗВ з об'єктом вимірювання

Якщо в коло під'єднати амперметр з ненульовим опором R_A , то загальний опір кола збільшиться до $R_K + R_A$. Струм у колі, відповідно, зменшиться від значення U/R_K до $U/(R_K + R_A) = i_A$ (де i_A – покази амперметра). Відносна похибка, зумовлена під'єднанням амперметра дорівнює:

$$\delta_{i(A)} = \frac{i_A - I_x}{I_x} \cdot 100\% = \frac{\frac{U}{R_K + R_A} - \frac{U}{R_K}}{\frac{U}{R_K}} \cdot 100\% = -\frac{1}{\frac{R_K}{R_A} + 1} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

Абсолютна методична похибка вимірювання струму, як і відносна, є від'ємною

$$\Delta_{i(A)} = i_A - I_x = \frac{U}{R_K + R_A} - \frac{U}{R_K} = -i_A \frac{R_A}{R_K} \quad (1.3)$$

Отже, методична похибка вимірювання залежить від співвідношень опорів кола та амперметра і є тим меншою, чим менше це відношення.

Приклад 1. Нехай загальний опір електричного кола становить $R_K = 50 \text{ Ом}$, а опір амперметра $R_A = 0.5 \text{ Ом}$. Покази амперметра $i_A = 2,4 \text{ А}$. Оцінити відносну та абсолютну методичні похибки вимірювання струму, зумовлені під'єднанням у коло амперметра.

Розв'язання. Використовуючи вираз (1.2), обчислимо відносну методичну похибку вимірювання струму

$$\delta_{i(A)} = -\frac{1}{\frac{R_K}{R_A} + 1} \cdot 100\% = -\frac{1}{\frac{50 \text{ Ом}}{0.5 \text{ Ом}} + 1} \cdot 100\% = -1.0\%.$$

2. Застосовуючи вираз (1.3), знайдемо абсолютну методичну похибку вимірювання струму

$$\Delta_{i(A)} = -i_A \frac{R_A}{R_K} = -2.4 \text{ А} \cdot \frac{0.5 \text{ Ом}}{50 \text{ Ом}} = -0.024 \text{ А} = -24 \text{ мА}.$$

У деяких випадках систематичну похибку можна оцінити і виправити результат на основі аналізу вимірювальної схеми з використанням апріорної інформації про характеристики елементів схеми.

Таким способом можна оцінювати і коригувати систематичні похибки від взаємодії ЗВТ з об'єктом вимірювання. Про похибку вимірювання струму внаслідок під'єднання у коло амперметра з ненульовим опором вже йшлося.

При відомих опорах кола та амперметра цю похибку можна оцінити і скоригувати. Зокрема, нехай у коло (рис. 1.3), яке мало загальний опір $R_K = R_0 + R_x = 100 \text{ Ом}$, під'єднали амперметр з вхідним опором $R_A = 1 \text{ Ом}$, і отримали покази амперметра $i_A = 2,15 \text{ мА}$. Відносна похибка, зумовлена під'єднанням амперметра, оцінюється за виразом

$$\Delta_{i(A)} = -i_A \cdot \frac{R_A}{R_K} = -2.15 \text{ мА} \cdot \frac{1 \text{ Ом}}{100 \text{ Ом}} = -0.0215 \text{ мА} \quad (1.4)$$

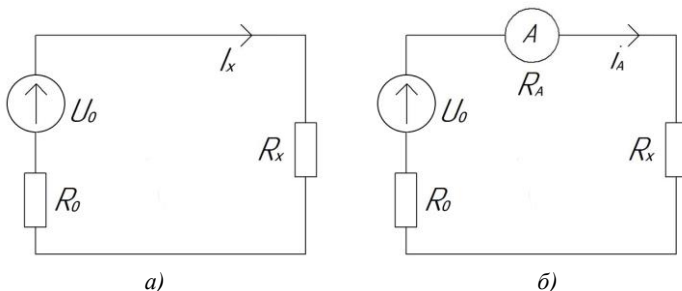


Рис. 1.3 До оцінювання поправки для корекції систематичної методичної похибки при під'єднанні у вимірювальне коло амперметра

Отже, виміряне значення струму на 1% менше за

фактичний струм (до під'єднання в коло амперметра). Така похибка може перевищувати основну та додаткові похибки амперметра. Її можна скоригувати, збільшивши на 1% покази амперметра, тобто

$$I_x \cong i_A \cdot (1 + 0.01) = 2.15 \text{ мА} \cdot 1.01 \cong 2.17 \text{ мА}, \quad (1.5)$$

або знайти відразу скоригований результат вимірювання струму, додаючи до показів амперметра поправку – з протилежним знаком оцінену вище абсолютну похибку

$$I_x \cong i_A - i_m = 2.15 \text{ мА} + 0.0215 \text{ мА} \cong 2.17 \text{ мА}. \quad (1.6)$$

Здійснюючи таке коригування, не вдається повністю усунути вплив систематичної похибки при під'єднанні приладу. Це зумовлено тим, що зазначені опори кола та амперметра відомі не точно, а лише наближено. Тому після коригування залишиться невиключений залишок, що залежить від неповних знань про опори амперметра і кола. Оцінимо цей залишок, розклавши вираз абсолютної похибки в ряд за приростами, обмежившись лише лінійними членами:

$$\begin{aligned} \Delta I_{н.з} &\approx \frac{d\Delta I_M}{dR_A} \Delta R_A + \frac{d\Delta I_M}{dR_K} \Delta R_K = -\frac{I_A}{R_K} \Delta R_A + \frac{I_A R_A}{R_K^2} \Delta R_K = \\ &= I_A \frac{R_A}{R_K} \left(\frac{\Delta R_A}{R_A} - \frac{\Delta R_K}{R_K} \right) = I_A \frac{R_A}{R_K} (\delta_{R_A} - \delta_{R_K}), \end{aligned} \quad (1.7)$$

а нескоригований залишок відносної систематичної похибки

$$\delta_{н.з} = \frac{\Delta I_{н.з}}{I} = \frac{R_A}{R_K + R_A} (\delta_{R_A} - \delta_{R_K}), \quad (1.8)$$

де $\delta_{R_A} = \frac{\Delta R_A}{R_A}$, $\delta_{R_K} = \frac{\Delta R_K}{R_K}$ – відносні невизначеності опорів амперметра та досліджуваного кола.

Для граничних значень невизначеності цих опорів невиключений залишок методичної похибки вимірювання струму становить

$$\delta_{н.з} = \frac{\Delta I_{н.з}}{I} = \frac{R_A}{R_K + R_A} (|\delta_{R_A}| + |\delta_{R_K}|). \quad (1.9)$$

Отже, внаслідок нестачі інформації, про опір кола, введення поправки не усуває повністю систематичну похибку, а

лише її зменшує.

Приклад 2. Нехай опір кола відомий на рівні $\pm 10\%$, а опір амперметра – $\pm 1\%$. Оцінити залишкову (невиключений залишок) систематичну похибку.

Розв'язання. Згідно з (1.8) залишкова (нескоригована) похибка

$$|\delta_{н.з}| \cong \pm \frac{1 O_M}{101 O_M} \cdot (10\% + 1\%) \cong \pm 0.11\%.$$

Ефективність введення поправки призводить до зменшення впливу систематичної похибки приблизно у 10 разів, була похибка на рівні 1%, а після корекції становить 0,11%.

Розглянемо приклад взаємодії засобу вимірювання з об'єктом вимірювання, а саме: вимірюванню підлягає параметр електричного кола – постійна напруга на його ділянці, опір якої дорівнює R_n , рис. 1.4.

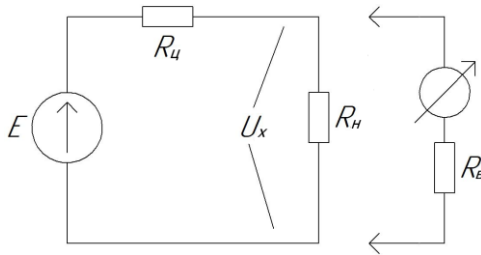


Рис. 1.4 Приклад взаємодії ЗВ з об'єктом вимірювання

Еквівалентний опір іншої частини кола дорівнює R_u . Істинне значення вимірюваної напруги, що було на опорі R_n до підключення вольтметра, дорівнює U_x . Засіб вимірювання – стрілочний вольтметр, опір якого зазначено в його технічній документації. Для розрахунку ефекту, зумовленого взаємодією, будемо вважати, що інструментальна похибка вольтметра дорівнює нулю, а опір R_v набагато більший за R_n ($R_v \gg R_n$).

$$U_x = E \frac{R_n}{R_n + R_u}, \quad \tilde{U} = E \frac{R_n R_v}{R_n R_v + R_n R_u + R_v R_u}, \quad (1.10)$$

$$\Delta U = \tilde{U} - U_x = -E \frac{R_n^2 R_u}{(R_n R_g + R_n R_u + R_g R_u)(R_n + R_u)}. \quad (1.11)$$

В формулах (1.10) і (1.11) \tilde{U} – напруга після підключення вольтметра буде меншою істинної напруги в силу шунтування цієї ділянки кола опором вольтметра. Загальний струм у колі збільшується на величину струму через вольтметр, і об'єкт вимірювань піддається зовнішньому впливу, тобто змінюється. В результаті цього впливу виникає систематична похибка (позначена через ΔU).

Стосовно результату вимірювання похибка обчислюється за формулою:

$$\gamma_U = \frac{\Delta U}{\tilde{U}} = -\frac{R_n \cdot R_u}{(R_n + R_u)} \cdot \frac{1}{R_g} \quad (1.12)$$

Помноживши чисельник і знаменник виразу (1.12) на (\tilde{U}^2) , бачимо, що відносна похибка, яка викликана взаємодією вольтметра і кола, дорівнює відношенню енергій, тобто частці від розподілу енергії, що споживається вольтметром, на енергію, що розсіюється об'єктом:

$$\gamma_U = -\frac{R_n \cdot R_u}{(R_n + R_u) \cdot (\tilde{U})^2} \cdot \frac{(\tilde{U})^2}{R_g} = -\frac{(\tilde{U})^2}{R_g} : \frac{(\tilde{U})^2}{R_{ug}}, \quad (1.13)$$

де R_{ug} – опір, що еквівалентний паралельно з'єднаних опорів навантаження R_n та вольтметра R_g .

Таким чином, похибка може бути повністю виключена шляхом введення виправлення. Залишкова похибка, буде визначатися точністю, з якою відомі значення величин, що входять до виразу для ΔU .

1.3 Завдання

Завдання 1. Оцініть методичну (абсолютну та відносну) похибку вимірювання, зумовлену під'єднанням у вимірювальне коло приладу:

1. Для вимірювання напруги вольтметр з внутрішнім опором $R_V = 10 \text{ кОм}$ під'єднано паралельно до одного з послідовно з'єднаних резисторів з опором $R_{K1} = 2 \text{ кОм}$, опір другого резистора $R_{K2} = 1 \text{ кОм}$. Покази вольтметра $u = 8,5 \text{ В}$.

2. Для вимірювання струму у коло з опором $R_K = 500 \text{ Ом}$ під'єднали амперметр з внутрішнім опором $R_A = 2 \text{ Ом}$. Покази амперметра $i = 2,75 \text{ мА}$.

3. Для вимірювання опору резистора послідовно до нього під'єднано амперметр з опором $R_A = 0,25 \text{ Ом}$. Напруга, якою живиться вимірювальна схема, послідовне сполучення досліджуваного резистора та амперметра, безпосередньо вимірюється вольтметром з внутрішнім опором $R_V = 100 \text{ кОм}$. Покази амперметра $i = 2,5 \text{ А}$, вольтметра $u = 12,5 \text{ В}$.

Завдання 2. Скоригуйте систематичну методичну похибку вимірювання, зумовлену під'єднанням у вимірювальне коло приладу. Задано показ приладу X_n , границю вимірювання X_k та клас точності (кл.т.), а також параметри (опори) вимірювального кола R_k та приладу R_{np} , граничні відносні значення похибок цих опорів похибки $\delta_{R_{k.ep}}$, $\delta_{np.ep}$. Оцініть і скоригуйте систематичну методичну похибку (знайдіть скоригований результат вимірювання), оцініть нескоригований залишок систематичної похибки. Запишіть результат вимірювання. Оцініть ефективність корекції методичної похибки:

1. Для вимірювання напруги вольтметр з внутрішнім опором $R_V = 10 \text{ кОм}$ (невизначеність опору вольтметра $\delta_{R_{V.ep}} = \pm 0,05\%$) під'єднано паралельно до одного з послідовно з'єднаних резисторів з опором $R_{K1} = 2 \text{ кОм}$, опір другого резистора $R_K = 1 \text{ кОм}$ (невизначеність цих опорів $\delta_{R_{k.ep}} = \pm 5\%$). Покази вольтметра $U_n = 8,56 \text{ В}$, границя вимірювання $U_k = 20 \text{ В}$, кл.т. = 0,1.

2. Для вимірювання струму в коло з опором $R_k = 1 \text{ кОм}$

(непевність опору кола $\delta_{R_{1.2p}} = \pm 10\%$) під'єднали амперметр з внутрішнім опором $R_A = 4 \text{ Ом}$ (невизначеність опору амперметра $\delta_{R_{2.2p}} = \pm 0.5\%$). Показ $I_n = 2,75 \text{ mA}$, границя вимірювання $I_k = 5 \text{ mA}$, кл.т.=0,1/0,05.

1.4 Контрольні запитання

1. Назвіть основні класифікаційні ознаки вимірювань.
2. Назвіть основні характеристики якості вимірювань і результатів.
3. Що називається похибкою вимірювання?
4. Що таке метод вимірювання?
5. Що таке принцип вимірювання?
6. Яка похибка називається методичною?

Практична робота 2. Оцінювання невизначеності результатів прямих одноразових вимірювань

2.1 Мета роботи

Навчитися оцінювати невизначеність результатів прямих вимірювань з одноразовим спостереженням

2.2 Теоретичні відомості

Оцінювання невизначеності вимірювання здійснюється відповідно до вимог [8, 9]. Стандарти базуються на «Настанові з оцінювання невизначеності вимірювань» (Guide to the expression of uncertainty in measurement, GUM).

Невизначеність вимірювання (uncertainty of measurement) – параметр, пов'язаний з результатом вимірювання, який характеризує дисперсію значень, які можуть бути достатньо обгрунтовано приписані вимірюваній величині.

Стандартна невизначеність (standard uncertainty) – невизначеність, виражена як стандартне відхилення.

Сумарна стандартна невизначеність (combined standard uncertainty) – невизначеність, що отримується шляхом підсумовування всіх складових стандартних невизначеностей, пов'язаних з вимірюваною величиною.

Розширена невизначеність (expanded uncertainty) – інтервал навколо результату вимірювання, в межах якого ймовірно розташована більшість розподілу значень, які з достатнім обгрунтуванням можуть бути приписані вимірюваній величині.

Всі невизначеності за способом оцінювання поділяються на тип А і тип В.

За типом А оцінюються невизначеності, що підлягають повторним вимірюванням, до яких можна застосувати статистичні методи.

За типом В оцінюються невизначеності, до яких статистичні методи застосувати неможливо. В таких випадках використовують інші відомі способи.

Оцінювання невизначеності за типом А. Експериментальну дисперсію, яка характеризує складову невизначеності, отриману в результаті оцінювання за типом А,

знаходять із рядів повторних спостережень, і вона є статистичною оцінкою дисперсії. Експериментальне стандартне відхилення отримують як квадратний корінь з дисперсії та позначають як u_A і називають *стандартною невизначеністю типу A*.

Оцінювання компонентів стандартної невизначеності за типом A засновано на розподілах частоти. Тому для оцінювання стандартної невизначеності за типом A необхідно провести n незалежних спостережень вимірюваної величини x в умовах повторюваності.

У більшості випадків найкращою доступною оцінкою математичного сподівання значення μ_x величини x , що змінюється випадковим чином, є середнє арифметичне або середнє значення \bar{x} із n спостережень

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k. \quad (2.1)$$

Експериментальне стандартне відхилення, що характеризує змінність значень x_k , або, точніше, їхню дисперсію σ^2 щодо середнього значення \bar{x} , розраховують за формулою

$$u_A(x_k) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (2.2)$$

Оскільки за результат багаторазових вимірювань приймають середнє значення \bar{x} , то важливо оцінити його дисперсію.

Найкраща оцінка $\sigma^2(\bar{x}) = \frac{\sigma^2}{n}$ дисперсії середнього значення $u_A^2(\bar{x})$ виражається як

$$u_A^2(\bar{x}) = \frac{u_A^2(x_k)}{n}. \quad (2.3)$$

Експериментальна дисперсія середнього $u_A^2(\bar{x})$ і експериментальне стандартне відхилення середнього значення $u_A(\bar{x})$, що дорівнює квадратному кореню з оцінки дисперсії $u_A^2(\bar{x})$, кількісно визначають, наскільки добре \bar{x} оцінює очікування μ_k величини x .

Отже, стандартна невизначеність типу А становить:

$$u_A(\bar{x}) = \frac{u_A(x_k)}{\sqrt{n}}. \quad (2.4)$$

Оцінювання невизначеності за типом В. Більшість вимірювань є одноразовими (вимірювання фізичної величини виконані один раз). Навіть у випадку вимірювань з багаторазовими спостереженнями число повторних вимірювань найчастіше є відносно невеликим, а отже оцінка стандартної невизначеності за типом А буде ненадійною. В такому разі оцінювати стандартну невизначеність доцільно іншими методами.

Розрахунок стандартної невизначеності за типом В можливий в разі наявності певної інформації про величину, для якої здійснюється оцінювання.

Невизначеність за типом В одержують із врахуванням передбачуваної функції розподілу ймовірності шляхом прогнозування, яка базується на впевненості в тім, що очікувана подія відбудеться. Така ймовірність часто називається суб'єктивною. Для невизначеності В стандартне відхилення $u(x)$ обчислюють, використовуючи наявні дані, теж як квадратний корінь із дисперсії.

Фонд інформації може містити:

- дані попередніх вимірювань;
- дані, отримані в результаті досвіду, чи загальні знання про функціонування і властивості відповідних приладів і обладнання;
- дані виробника з супровідної документації до приладу;
- дані калібрувальних, повірювальних і випробувальних лабораторій;

- невизначеності, відповідно до довідкових даних, та інші дані.

Правильне використання фонду доступної інформації для оцінювання стандартної невизначеності за типом В вимагає інтуїції, заснованої на досвіді та загальних знаннях, і є майстерністю, яка приходить з практикою. Слід визнати, що оцінка стандартної невизначеності за типом В може бути такою ж надійною, як і оцінка за типом А, особливо у вимірювальній ситуації, коли оцінювання за типом А ґрунтується на невеликій кількості статистично незалежних спостережень.

Пряме вимірювання – це вимірювання однієї фізичної величини, значення якої знаходять безпосередньо без перетворення її роду та використання відомих залежностей.

Опрацювання результатів прямих вимірювань з одноразовими спостереженнями. 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 ряду проведених вимірювань. Оцінкою значення виміряної величини є безпосередньо показ засобу вимірювальної техніки. Опрацювання даних у цьому випадку полягає в аналізі складових невизначеностей вимірювання, вилученні систематичних складових невизначеностей, оцінюванні невилучених залишків систематичних складових невизначеностей та підсумовуванні складових невизначеностей.

Таким чином, для оцінки результату прямого вимірювання з одноразовим спостереженням використовують способи оцінювання невизначеностей типу В.

Приклад. Проведено вимірювання за допомогою вольтметра, що має верхню межу вимірювання $U_k = 100\text{ В}$ і клас точності 0,15/0,05. В результаті вимірювання отримано покази вольтметра $U_x = 14,75\text{ В}$.

Вимірювання проведено при температурі навколишнього середовища $t = 26^{\circ}\text{C}$ у зовнішньому магнітному полі напруженістю $H = 400 \text{ A/м}$. Активний вхідний опір приладу $R_{\text{ex}} = (10 \pm 1) \text{ МОм}$. Відомо, що температурна похибка не перевищує основну на кожні 10°C відхилення температури від нормальних умов 20°C , а магнітна похибка становить половину основної інструментальної похибки ЗВТ при напруженості магнітного поля до $H = 400 \text{ A/м}$.

Оцініть невизначеність результату вимірювання та запишіть результат вимірювання.

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

- вимірювання проводилися в лабораторних умовах при температурі навколишнього середовища $t = 26^{\circ}\text{C}$;

- межа вимірювання приладу $U_k = 100 \text{ В}$;

- напруга вимірюється на виході джерела з внутрішнім опором $R_{\text{вн}} = (100 \pm 10) \text{ кОм}$

- робочі умови застосування приладу – температура навколишнього середовища від 5 до 40°C ;

- крок квантування приладу складає одиницю молодшого розряду $q = 0,01 \text{ В}$;

- граничне значення основної відносної похибки приладу при вимірюванні постійної напруги складає:

$$\delta = \pm \left[0,15 + 0,05 \left(\frac{U_k}{U} - 1 \right) \right] \%;$$

- межа додаткової похибки приладу при відхиленні температури навколишнього середовища від нормальної $t = 20^{\circ}\text{C}$ не перевищує граничного значення при робочих умовах основної похибки на 10°C при зміні температури;

- додаткова магнітна похибка становить половину основної інструментальної ЗВТ при напруженості зовнішнього магнітного поля до $H = 400 \text{ A/м}$;

- активний вхідний опір приладу: $R_{\text{вх}} = (10 \pm 1) \text{ МОм}$

2. Визначимо виправлений результат вимірювання із врахуванням поправки на систематичну похибку вимірювання зумовлену шунтуванням опору джерела живлення опором вольтметра

$$U_R = U_x \cdot \frac{R_{\text{вн}} + R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}} = 14,75 \cdot \frac{10 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6} = 14,76475 \text{ В}$$

3. Визначимо оцінки складових $u_i(U) = c_i \cdot u(x_i)$ сумарної невизначеності вимірювання напруги.

Складова невизначеності результату, що зумовлена конструктивними особливостями вольтметра оцінюється через основну похибку вважаючи, що розподіл можливих її значень в певних межах визначається рівномірним законом розподілу.

Оскільки $U_k = 100 \text{ В}$, а $U_x = 14,75 \text{ В}$, то відносна похибка отриманого результату буде

$$\delta = \pm \left[0,15 + 0,05 \left(\frac{100}{14,75} - 1 \right) \right] = \pm 0,439\%$$

Граничні значення, в яких знаходяться можливі абсолютні значення похибки:

$$\delta = \frac{\Delta}{X_n} 100\% \Rightarrow \Delta = \frac{\delta \cdot X_n}{100\%}$$

$$\delta = \frac{\delta \cdot U_x}{100\%} = \frac{0,439\% \cdot 14,75}{100\%} = \pm 0,065 \text{ В}$$

Невизначеність, яка обумовлена основною похибкою вимірювання, в загальному вигляді визначається таким чином:

$$u_B(x_i) = \frac{b_i}{\sqrt{3}},$$

$$\text{тоді } u_B(\delta) = \frac{|\Delta|}{\sqrt{3}} = \frac{0,065}{\sqrt{3}} = 0,037 \text{ В}$$

Невизначеність зумовлена відхиленням температури від нормальної. Оскільки вимірювання проводилися при температурі $t = 26^\circ \text{C}$, то додаткова невизначеність буде дорівнювати:

$$u_B(\Delta t) = \frac{t - t_0}{10} \cdot u_B(\delta),$$

$$u_B(\Delta t) = \frac{26 - 20}{10} \cdot u_B(\delta) = 0,022V$$

Додаткова невизначеність, що зумовлена зовнішнім магнітним полем напруженістю $H = 400 \text{ A/M}$, буде рівна:

$$u_B(H) = \frac{1}{2} \cdot u_B(\delta),$$

$$u_B(H) = \frac{1}{2} \cdot 0,037 = 0,019V$$

Невизначеність зумовлена квантуванням, тобто поданням неперервної шкали значень напруги за допомогою деякого дискретного ряду, різниця між сусідніми значеннями якого складає одиницю молодшого розряду пристрою.

Приймаємо рівномірний закон розподілу можливих значень напруги між сусідніми поділками вольтметра, які відрізняються на одиницю молодшого розряду. В такому випадку невизначеність, у загальному вигляді, визначається таким чином:

$$u_B(x_i) = \frac{b_{i+} - b_{i-}}{2\sqrt{3}},$$

$$\text{тоді } u_B(q) = \frac{q}{2\sqrt{3}} = \frac{0,01}{2\sqrt{3}} = 0,00288V$$

Невизначеність поправки $u_B(p)$, зумовлена невизначеністю вхідного опору вольтметра $u_B(R_{ex})$ та невизначеністю опору джерела $u_B(R_{вн})$, визначається з виразу для поправки

$$p = -(U_x - U_R) = U_x \cdot \frac{R_{вн}}{R_{ex}}$$

Розглядаючи цей вираз, як рівняння непрямих вимірювань, з урахуванням відсутності кореляції між похибками визначення

вхідного опору вольтметра та джерела живлення, в загальному вигляді буде таким:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i), \text{ де } c_i = \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right),$$

$$u_c(p) = \sqrt{c_{R_{\text{вн}}}^2 u^2(R_{\text{вн}}) + c_{R_{\text{вх}}}^2 u^2(R_{\text{вх}})},$$

$$\text{де } c_{R_{\text{вн}}} = \left(\frac{\partial p}{\partial R_{\text{вн}}} \right) = \frac{U_x}{R_{\text{вх}}} = \frac{14,75}{10 \cdot 10^6} = 1,475 \text{ мкВ/Ом},$$

$$c_{R_{\text{вх}}} = \left(\frac{\partial p}{\partial R_{\text{вх}}} \right) = -U_x \frac{R_{\text{вн}}}{R_{\text{вх}}^2} = 1,475 \text{ нВ/Ом}.$$

Приймаємо всі значення опорів в межах (min, max) рівномірно розподіленими, тоді можна оцінити за типом В невизначеності обох опорів в загальному вигляді

$$u_B(x_i) = \frac{b_{i+} - b_{i-}}{2\sqrt{3}},$$

$$u_B(R_{\text{вн}}) = \frac{R_{\text{вн.max}} - R_{\text{вн.min}}}{2\sqrt{3}} = \frac{110 \text{ кОм} - 90 \text{ кОм}}{2\sqrt{3}} = 5,77 \text{ кОм}$$

$$u_B(R_{\text{вх}}) = \frac{R_{\text{вх.max}} - R_{\text{вх.min}}}{2\sqrt{3}} = \frac{11 \text{ МОм} - 9 \text{ МОм}}{2\sqrt{3}} = 0,577 \text{ МОм}$$

Комбінована невизначеність поправки визначена за типом В буде рівна:

$$u_c(p) = \sqrt{c_{R_{\text{вн}}}^2 u^2(R_{\text{вн}}) + c_{R_{\text{вх}}}^2 u^2(R_{\text{вх}})} = 8,555 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

4. Комбінована стандартна невизначеність вимірювання напруги в загальному вигляді буде рівна:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u(x_i)^2}$$

Тоді із врахуванням всіх складових, які визначені в п.3 отримаємо

$$u_c(U) = \sqrt{u_B^2(\delta) + u_B^2(\Delta t) + u_B^2(H) + u_B^2(q) + u_B^2(p)} = 0,048 \text{ В}$$

5. Визначимо розширену невизначеність

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

$$U = k \cdot u_c(y)$$

де $k=1.96$, тоді $U = k \cdot u_c(y) = k \cdot u_c(U) = 0,0946V$

6. Результат вимірювання

$$U = (14,764 \pm 0,095)V, P = 0,95$$

2.3 Завдання

Завдання. Проведено вимірювання за допомогою вольтметра, який має верхню межу вимірювання $U_k = 1000V$ і клас точності $0,1/0,01$. В результаті вимірювання отримано покази вольтметра $U = 600,5V$. Вимірювання здійснено при температурі навколишнього середовища $t = 26^{\circ}C$ в магнітному полі напруженістю $H = 400 \frac{A}{m}$. Відомо, що температурна похибка не перевищує основну на кожних $10^{\circ}C$ відхилення температури від нормальних умов $20^{\circ}C$, а магнітна похибка складає половину основної інструментальної похибки ЗВТ при напруженості магнітного поля до $400 \frac{A}{m}$. Оцініть невизначеність результату вимірювання напруги.

2.4 Контрольні запитання

1. Дайте визначення: стандартна невизначеність, сумарна невизначеність, розширена невизначеність.

2. На які категорії поділяють невизначеності за способами їх оцінювання?

3. В чому відмінність між невизначеністю типу А та невизначеністю типу В?

4. На основі яких даних визначається невизначеність типу В?

5. Як оцінюється сумарна стандартна невизначеність?

6. Як оцінюється розширена невизначеність?

Література

1. Метрологія та вимірювальна техніка : підручник / Є. С. Поліщук та ін. ; за ред. проф. Є. С. Поліщука ; 2-ге вид., доп. та переробл. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. 544 с.
2. Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2013. 538 с.
3. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Основи метрології та засоби вимірювань : навчальний посібник. Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 256 с.
4. Бойко Т. Г., Руда М. В. Основи точності мехатронних засобів : навч. посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2022. 168 с.
5. Васілевський О. М., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т. Непевність результатів вимірювань, контролю та випробувань : підручник. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, Стереотип. вид., 2024. 352 с.
6. Основи теорії похибок : Практикум здобувачів освітнього ступеня «магістр» спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» усіх форм навчання [Електронний ресурс] / Р. В. Трембовецька, В. В. Тичков, К. В. Базіло, Л. Г. Куницька ; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси : ЧДТУ, 2018. 170 с.
7. ДСТУ 2681 - 94 Метрологія. Терміни та визначення К. : Держстандарт України, 1994.
8. ДСТУ ISO/IEC Guide 98-1:2018. Невизначеність вимірювань. Частина 1. Вступ до подання невизначеності у вимірюванні (ISO/IEC Guide 98- 1:2009, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
9. ДСТУ ISO/TS 21749:2013. Невизначеність вимірювання в метрологічній практиці. Повторні вимірювання та ієрархічні експерименти (ISO/TS 21749:2005, IDT). Київ : Мінекономрозвитку України, 2015.