

Національний університет цивільного захисту України

С. В. Рудаков

**МЕТРОЛОГІЯ, СТАНДАРТИЗАЦІЯ
І СЕРТИФІКАЦІЯ З ПИТАНЬ ПОЖЕЖНОЇ
БЕЗПЕКИ**

Курс лекцій

Харків 2016

Національний університет цивільного захисту України

С. В. Рудаков

**МЕТРОЛОГІЯ, СТАНДАРТИЗАЦІЯ
І СЕРТИФІКАЦІЯ З ПИТАНЬ ПОЖЕЖНОЇ
БЕЗПЕКИ**

Курс лекцій

Харків 2016

Підготовлено до друку за рішенням
засідання методичної ради
НУЦЗ України
Протокол від 20.10.16 № 2

Рецензент: доктор технічних наук, професор Чуб І.А.

Укладач : С. В. Рудаков

Метрологія, стандартизація і сертифікація з питань пожежної
безпеки: курс лекцій / С. В. Рудаков– Х.: НУЦЗУ, 2016. – 58 с.

В даному курсі лекцій викладаються питання основ метрології та
виміральної техніки. Курс лекцій призначений для вивчення теоретичних
питань і відпрацювання практикуму з дисципліни курсантами та
студентами НУЦЗ України.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Вихідні положення теорії вимірювань.....	5
1.1. Одиниці фізичних величин.....	6
1.2. Правила застосування одиниць фізичних величин.....	8
1.3. Класифікація вимірювань і методів вимірювань.....	9
1.4. Похибки вимірювань.....	12
1.4.1. Класифікація похибок вимірювань.....	14
1.4.2. Систематичні похибки вимірювань.....	15
1.4.3. Випадкові похибки вимірювань.....	20
1.4.4. Надмірні похибки вимірювань.....	25
2. Основні відомості про засоби виміральної техніки.....	28
2.1. Класифікація засобів виміральної техніки.....	28
2.2. Похибки засобів виміральної техніки.....	30
2.2.1. Основні та додаткові похибки засобів виміральної техніки.....	31
2.2.2. Класи точності засобів виміральної техніки.....	35
3. Правила подання результатів вимірювань.....	38
4. Основні способи додавання похибок вимірювань.....	42
5. Обробка результатів вимірювань.....	44
5.1. Обробка результатів однократних вимірювань.....	44
5.2. Обробка результатів багатократних вимірювань.....	44
6. Приклади розв'язання типових задач.....	45
Література.....	58

ВСТУП

У сучасних умовах зростання ефективності виробництва, поліпшення якості продукції, що випускається, забезпечення високої ефективності її використання можуть бути гарантовані тільки при належному розвитку метрології.

Метрологія – наука про вимірювання.

Проблеми, що розроблюються метрологією:

- загальна теорія вимірювань;
 - одиниці фізичних величин та їх системи;
 - методи та засоби вимірювань;
 - засоби вимірювальної техніки (ЗВТ);
 - методи визначення точності вимірювань;
 - основи забезпечення єдності вимірювань і одноманітності засобів вимірювальної техніки;
 - державні та робочі еталони;
 - методи передавання одиниць фізичних величин від державних еталонів через систему робочих еталонів до робочих засобів вимірювальної техніки.
- Особливостями основ метрології як предмета вивчення є:
- інженерно-прикладна спрямованість;
 - тісний зв'язок із професійно-орієнтованими та спеціальними дисциплінами;
 - різноманітність понять, термінів, визначень, норм, правил, а також методів і принципів побудови ЗВТ;
 - використання достатньо складних математичних методів при вирішенні метрологічних завдань.

Основні завдання даного посібника:

- дати знання нормативних і науково-технічних основ метрології;
- дати знання основних характеристик засобів вимірювальної техніки, підготувати фахівців до їх самостійного вивчення;
- привити практичні навички з аналізу та оцінювання похибок вимірювань, вибору ЗВТ для вимірювань.

1. ВИХІДНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ ВИМІРЮВАНЬ

Вимірювання – відображення вимірюваних величин їх значеннями шляхом експерименту та обчислень за допомогою спеціальних технічних засобів – ЗВТ.

Об'єктами вимірювань є фізичні величини. До них відносяться: довжина (ширина, висота, глибина, відстань), час, маса, температура, плоский та тілесний кути, тиск і розрядження, швидкість, сила і напруга електричного струму, частота, індуктивність, ємність, зсув фаз і багато інших. Задача вимірювань полягає у визначенні кількісних характеристик фізичних величин.

Фізична величина (ФВ) – це властивість, спільна в якісному відношенні у багатьох матеріальних об'єктів (системах, їх станах і процесах, що в них відбуваються) та індивідуальна у кожного з них.

Наприклад, ФВ частота f – це властивість, що належить в якісному відношенні широкому колу об'єктів:

- частота мережі живлення ($f_{\text{мж}} = 50$ Гц);
- частота радіоімпульсу ($f_{\text{рі}} = 3000$ МГц);
- частота кварцевого генератора ($f_{\text{кв}} = 100$ кГц) та ін.

На практиці замість терміна "*фізична величина*" дозволяється вживати термін "*величина*".

Кількісно індивідуальні властивості об'єкта вимірювань характеризуються розміром ФВ та її значенням Q . Ця обставина дозволяє порівнювати між собою декілька однорідних ФВ ($f_{\text{мж}}$, $f_{\text{рі}}$, $f_{\text{кв}}$ та ін.). На практиці легше порівнювати розміри фізичних величин з єдиним розміром, що прийнятий за одиницю.

Одиниця фізичної величини $[Q]$ – фізична величина певного розміру, яка прийнята за угодою для кількісного відображення однорідних з нею величин.

Звідси випливає, що вимірювання значення ФВ базується на її порівнянні з відповідною одиницею фізичної величини (ОФВ). Таким чином, основне рівняння вимірювання має вигляд:

$$Q = q \cdot [Q], \quad (1.1)$$

де q – числове значення ФВ.

Значення вимірюваних величин залежать від того, які використовуються одиниці вимірювань, тобто яка вибрана система одиниць.

Формалізованим відображенням якісної різниці величин, що вимірюються, є їх *розмірність* (*dimension*):

$$\dim Q = k \cdot L^{\alpha} \cdot M^{\beta} \cdot T^{\gamma} \dots, \quad (1.2)$$

де k – коефіцієнт пропорційності (звичайно дорівнює 1 або основоположній фізичній сталій);

Q, L, M, T, \dots – основні та похідні фізичні величини;

$\alpha, \beta, \gamma, \dots$ – показники розмірності.

1.1. Одиниці фізичних величин

Різноманітність одиниць фізичних величин зводиться до систем ОФВ, пов'язаних між собою залежностями. До системи звичайно входять основні та похідні одиниці; останні визначаються через основні.

Загальноприйнятою є стандартизована міжнародна система одиниць SI, основними одиницями якої є: метр (позначення розмірності L), кілограм (M), секунда (T), ампер (I), кельвін (Q), кандела (J), моль (N).

У табл. 1.1 наведені основні і додаткові одиниці, а в табл. 1.2 – похідні одиниці системи SI, що мають спеціальні найменування (згідно ГОСТ 8.417-81). У табл. 1.3 наведені множники і префікси для утворення десяткових кратних (10^n) і часткових (10^{-n}) одиниць.

Таблиця 1.1

Величина	Одиниця		
	найменування	позначення	
		міжнародне	українське
Довжина	метр	m	м
Маса	кілограм	kg	кг
Час	секунда	s	с
Сила електричного струму	ампер	A	А
Термодинамічна температура	кельвін	K	К
Кількість речовини	моль	mol	моль
Сила світла	кандела	cd	кд
Плоский кут	радіан	rad	рад
Тілесний кут	стерадіан	sr	ср

Таблиця 1.2

Величина	Одиниця			Вираження через основні і додаткові одиниці
	найменування	позначення		
		міжнародне	українське	
Частота	герц	Hz	Гц	c^{-1}
Сила	ньютон	N	Н	$m \cdot kg \cdot c^{-2}$
Тиск	паскаль	Pa	Па	$m^{-1} \cdot kg \cdot c^{-2}$
Енергія	джоуль	J	Дж	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-2}$
Потужність	ватт	W	Вт	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-3}$
Кількість електрики	кулон	C	Кл	$c \cdot A$
Електрична напруга	вольт	V	В	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-3} \cdot A^{-1}$
Електрична ємність	фарад	F	Ф	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot c^4 \cdot A$

Закінчення табл. 1.2

Величина	Одиниця			Вираження через основні і додаткові одиниці
	найменування	позначення		
		міжнародне	українське	
Електричний опір	ом	Om	Ом	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-3} \cdot A^{-2}$
Електрична провідність	сіменс	S	См	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot c^3 \cdot A$
Потік магнітної індукції	вебер	Wb	Вб	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-2} \cdot A^{-1}$
Магнітна індукція	тесла	T	Тл	$kg \cdot c^{-2} \cdot A^{-1}$
Індуктивність	генрі	H	Гн	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-2} \cdot A^{-2}$
Світловий потік	люмен	lm	лм	кд·ср
Освітленість	люкс	lx	лк	$m^{-2} \cdot кд \cdot ср$
Активність радіонукліду	беккерель	Bq	Бк	c^{-1}
Поглинена доза іонізуючого випромінювання	грей	Gy	Гр	$m^2 \cdot c^{-2}$
Еквівалентна доза випромінювання	зіверт	Sv	Зв	$m^2 \cdot c^{-2}$

Таблиця 1.3

Множник	Префікс		
	найменування	позначення	
		міжнародне	українське
10^{18}	екса	E	Е
10^{15}	пета	P	П
10^{12}	тера	T	Т
10^9	гіга	G	Г
10^6	мега	M	М
10^3	кіло	k	к
10^2	гекто	h	г
10^1	дека	da	да
10^{-1}	деци	d	д
10^{-2}	санти	c	с
10^{-3}	мілі	m	м
10^{-6}	мікро	μ	мк
10^{-9}	нано	n	н
10^{-12}	піко	p	п
10^{-15}	фемто	f	ф
10^{-18}	атто	a	а

1.2. Правила застосування одиниць фізичних величин

Правила написання позначень одиниць ФВ визначені ГОСТ 8.417-81 і РД 50-160-79.

У тексті не можна застосовувати одночасно міжнародні і російські або українські позначення одиниць фізичних величин.

Позначення одиниць, названих на честь вчених, записуються з великої літери.

Позначення одиниць належить застосовувати після чисельних значень величин в один рядок з ними (без переносу на наступний рядок). Між останньою цифрою числа і позначенням одиниці слід залишати пропуск:

Вірно	Невірно
100 кВт	100кВт
80 %	80%
20 °С	20°С; 20° С

При наявності десяткових знаків у чисельному значенні величини позначення одиниці слід розташовувати після усіх цифр:

Вірно	Невірно
423,6 м	423 м, 06
5,758° або 5°45,48'	5°, 758 або 5°45,48'
або 5°45'28,8	або 5°45' 28" ,8

Якщо указуються значення величин з граничними відхиленнями, їх слід брати в дужки і позначення одиниці розміщати після дужок або проставляти після чисельного значення величини і після її граничного відхилення:

Вірно	Невірно
(5,7 ± 0,3) кВт	5,7 ± 0,3 кВт
728,7 МГц ± 0,8 МГц	728,7 МГц ± 0,8
412,4 кОм ± 2,5 кОм	412,4 кОм ± 2,5

Якщо вказується інтервал або група чисельних значень однієї й тієї ж ФВ, позначення одиниці проставляють тільки після останнього значення: від 15 до 25 °С; від 190 до 240 Вт; 6,1; 6,3; 6,4 В; 210 × 297 мм; 10,1; 10,6; 10,4 мкВт.

Літерні позначення одиниць, що входять до добутку, слід відокремлювати точками, як знаками множення:

Вірно	Невірно
В·А	ВА
А·м ²	Ам ²
Па·с	Пас

У літерних позначеннях відношень одиниць як знак ділення повинна застосовуватися тільки одна риска: скісна чи горизонтальна. При застосуванні косої риси позначення одиниць у чисельнику і знаменнику слід поміщати в один рядок, добуток позначень одиниць у знаменнику слід брати у дужки. Дозволяється застосовувати позначення одиниць у вигляді добутку позначень, піднесених до степеня додатного або від'ємного (в останньому випадку застосовувати рису не дозволяється):

Вірно	Невірно
$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2/\text{К}}$
$\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$	$\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$, $\text{Вт}/\text{м}^2/\text{К}$
$\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$	$\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}/\text{К}$
$\text{м}/\text{с}$, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$\text{м}/\text{с}$

Префікси множників кратних або часткових одиниць об'єднують і приєднують до позначень першої одиниці без пропуску і точки:

Вірно	Невірно
кВ·А	В·кА або к·В·А
мПа·с	м·Па·с, кПа·мкс або к·мк·Па·с

При найменуванні фізичних величин слід керуватися правилами відміни і утворення похідних одиниць: м/с² – метр на секунду у квадраті, В/м – вольт на метр, але м/с – метр за секунду, кг·м/с – кілограм-метр за секунду.

1.3. Класифікація вимірювань і методів вимірювань

Вимірювання – акт познання властивостей (звичайно кількісних характеристик) матеріального об'єкта (фізичної величини).

За способом одержання числових значень фізичних величин вимірювання підрозділяють на прямі, непрямі (опосередковані), сукупні та сумісні.

Прямим називають вимірювання однієї величини, значення якої знаходять безпосередньо без перетворення її роду та використання відомих залежностей. Рівняння прямого вимірювання має вигляд:

$$A_{\text{вим}} = c \cdot N, \quad (1.3)$$

де $A_{\text{вим}}$ – показання приладу, тобто значення вимірюваної величини;
с – ціна поділки шкали або одиниці розряду цифрового відлікового пристрою.

N – відлік у поділках шкали або цифровому коді;

Наприклад, під час вимірювання струму амперметром маємо $N = 20,5$ под., $c = 0,1$ А/под.

Тоді $I_{\text{вим}} = 0,1 \cdot 20,5 = 2,05$ А.

Відрізняють два основних методи прямих вимірювань – *метод безпосередньої оцінки та метод порівняння з мірою*. Перший полягає в тому, що значення ФВ визначають безпосередньо за допомогою відлікового пристрою вимірювального приладу. Наприклад, за показаннями термометра можна визначити температуру, а за показаннями амперметра – силу електричного струму.

Метод порівняння з мірою має декілька різновидів: метод протиставлення, диференційний метод, метод урівноваження з регульованою мірою, метод заміщення і метод ноніуса.

Метод протиставлення – метод, при якому вимірювана величина та величина, що виробляється мірою, одночасно впливають на прилад порівняння, який встановлює відношення між цими величинами. Приклад – вимірювання маси речовини на рівноплечих важільних терезах з урівноваженням гирями.

Якщо результат порівняння доводять до нуля, різновид методу називається *нульовим методом*. Приклад – вимірювання опору резистора з використанням мостової схеми.

Диференційний метод – метод вимірювання, за яким невелика різниця між вимірюваною величиною та вихідною величиною одноканальної міри вимірюється відповідним засобом вимірювання. Приклад – вимірювання маси на важільних індикаторних (торгівельних) вагах.

Метод урівноваження з регульованою мірою – метод прямого вимірювання з багаторазовим порівнянням вимірюваної величини та величини, що відтворюється мірою, яка регулюється, до повного їх урівноваження.

Метод заміщення – метод прямого вимірювання з багаторазовим порівнянням до повного урівноваження вихідних величин вимірювального перетворювача з почерговим перетворенням ним вимірюваної величини та вихідної величини регульованої міри. Приклад – вимірювання маси на одноплечих важільних терезах.

Метод ноніуса – метод прямого вимірювання з одноразовим порівнянням вихідних величин двох багатозначних нерегульованих мір з різними за значеннями ступенями, нульові позначки яких зсунуті між собою на вимірювану величину. Приклади: вимірювання довжини за допомогою штангенциркуля, вимірювання частоти періодичного сигналу по фігурах Лісажу за допомогою осцилографа.

Опосередковане вимірювання – непряме вимірювання однієї величини з перетворенням її роду чи обчисленням за результатами прямих вимірювань інших величин, з якими вимірювана величина пов'язана явною функціональною залежністю.

Рівняння опосередкованого вимірювання має вигляд:

$$Y = \varphi(A_1, A_2, \dots, \alpha, \beta, \dots), \quad (1.4)$$

де Y – вимірювана величина;

φ – деяка функція, що зв'язує вимірювану величину з величинами, які визначаються прямими вимірюваннями;

A_1, A_2, \dots – величини, що визначаються прямими вимірюваннями;

α, β, \dots – фізичні константи та сталі вимірювальних пристроїв.

Наприклад, резонансна частота коливального контуру зв'язана із значеннями індуктивності L та ємності C контуру залежністю:

$$f_0 = f(L, C, \pi) = 1 / 2\pi \sqrt{LC}.$$

Виконавши прямі вимірювання параметрів контуру (індуктивності L та ємності C), можна визначити (розрахувати) резонансну частоту f_0 .

Сукупним називають непряме вимірювання, в якому значення декількох одночасно вимірюваних однорідних величин отримують розв'язанням рівнянь, що пов'язують різні поєднання цих величин, які вимірюються прямо чи опосередковано.

Наприклад, визначення електричного опору резистора R_x на постійному струмі за допомогою компенсаторів K_1, K_2 (приладів, що вимірюють напругу без власного споживання енергії) та зразкового опору.

Після вимірювання U_0 і U_x вирішуємо систему рівнянь:

$$\begin{aligned} U_0 &= I R_0, \\ U_x &= I R_x. \end{aligned} \quad R_x = U_x / I; \quad I = U_0 / R_0; \quad R_x = U_x \cdot R_0 / U_0.$$

Сумісними називають непрямі вимірювання, в яких значення декількох одночасно вимірюваних різнорідних величин отримують розв'язанням рівнянь, які пов'язують їх з іншими величинами, що вимірюються прямо чи опосередковано.

Наприклад, необхідно визначити залежність опору резистора від температури за формулою:

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2). \quad (1.5)$$

Після вимірювання опору резистора при трьох різних температурах t_1, t_2 і t_3 , складають систему з трьох рівнянь:

$$\begin{aligned} R_{t_1} &= R_0 (1 + At_1 + Bt_1^2); \\ R_{t_2} &= R_0 (1 + At_2 + Bt_2^2); \\ R_{t_3} &= R_0 (1 + At_3 + Bt_3^2). \end{aligned} \quad (1.6)$$

Вирішуючи систему рівнянь (1.6), знаходимо параметри А і В залежності (1.5).
На практиці сукупні та сумісні вимірювання зустрічаються значно рідше, ніж прями й опосередковані.

1.4. Похибки вимірювань

Основними складовими вимірювань на практиці є (рис.1.1): спостерігач, об'єкт вимірювань, засіб вимірювальної техніки, метод вимірювань і умови проведення вимірювань. Кожна зі складових вимірювань впливає на результат вимірювань, що одержується. Цей вплив призводить до того, що результат вимірювань ФВ не збігається з істинним значенням вимірюваної величини.

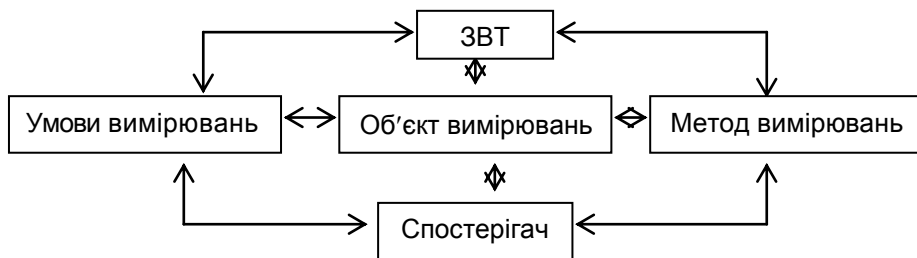


Рис. 1.1

Відхилення результату вимірювань від істинного значення вимірюваної величини зветься *похибкою вимірювання*. Кількісно похибка вимірювання відображається у формі абсолютної або відносної похибки (із знаком “±” при числових значеннях).

Абсолютна похибка вимірювання має розмірність вимірюваної величини і визначається як

$$\Delta X = X_{\text{вим}} - X_{\text{іст}}, \quad (1.7)$$

де $X_{\text{вим}}$ – значення величини, що одержане під час вимірювань;
 $X_{\text{іст}}$ – істинне значення вимірюваної величини.

Абсолютна похибка ΔX , якщо не порівняти її з розміром вимірюваної величини $X_{\text{вим}}$, дає недостатню інформацію про точність вимірювання. Тому часто користуються *відотною похибкою* вимірювань, яка звичайно виражається у відсотках

$$\delta_x = (\Delta X / X) \cdot 100. \quad (1.8)$$

Вона дозволяє порівнювати точності вимірювань однієї й тієї ж ФВ різними методами і засобами або точності вимірювань різних ФВ.

Оскільки істинне значення вимірюваної величини не може бути знайдено дослідним шляхом і залишається невідомим, замість нього використовують умовно істинне значення $X_{\text{умі}}$.

Умовно істинне значення фізичної величини – значення фізичної величини, знайдене експериментальним шляхом і настільки наближене до істинного значення, що його можна використати замість істинного для даної мети.

Заміна в формулах (1.7) і (1.8) істинного значення вимірюваних величин $X_{\text{іст}}$ на умовно істинне $X_{\text{умі}}$ дозволяє записати

$$\Delta X = X_{\text{вим}} - X_{\text{умі}}; \quad (1.9)$$

$$\delta_x = (\Delta X / X_{\text{умі}}) \cdot 100, \quad (1.10)$$

але приводить до того, що на практиці вдається одержати лише приблизну оцінку похибки вимірювань.

Оскільки $X_{\text{іст}} \approx X_{\text{умі}} \approx X_{\text{вим}}$, для визначення δ_x у відносних значеннях і у відсотках використовують формули:

$$\delta_x = \Delta X / X_{\text{вим}}; \quad (1.11)$$

$$\delta_x = (\Delta X / X_{\text{вим}}) \cdot 100, \quad (1.12)$$

Результат кожного вимірювання містить в собі *похибку*. Оскільки похибка вимірювання характеризує відхилення результату вимірювання (РВ) від істинного значення вимірюваної величини, то її оцінювання є не менш важливою задачею, ніж знаходження РВ, бо без вказівки похибки вимірювання результат вимірювання не має ніякої практичної цінності.

Основними компонентами вимірювань, що чинять вплив на РВ і його похибку, є (рис. 1.1):

- суб'єкт (спостерігач), який проводить вимірювання;
- метод вимірювання;
- об'єкт вимірювань;
- засіб вимірювань;
- умови проведення вимірювання.

Недосконалість або нестабільність кожного з цих компонентів вносить свій внесок до похибки вимірювання Δ , яка в загальному вигляді може бути подана об'єднанням трьох складових:

$$\Delta = \Delta_{\text{мет}} * \Delta_{\text{інстр}} * \Delta_{\text{суб}}, \quad (1.13)$$

- де $\Delta_{\text{мет}}$ – складова, що обумовлена недосконалістю метода вимірювань;
- $\Delta_{\text{інстр}}$ – інструментальна складова, що обумовлена похибками інструменту- засобу вимірювальної техніки, який застосовується;

$\Delta_{\text{суб}}$ – складова, що обумовлена суб'єктивними властивостями спостерігача.

Символом * позначено застосування до складових похибки деякого функціоналу: підсумовування за модулем, алгебраїчне підсумовування, квадратичне підсумовування з добуванням кореню, вагове підсумовування та ін.

Треба підкреслити, що з метою недопущення великої похибки методу найбільш важливі вимірювання виконуються за стандартними методиками, встановленими більш ніж 300 державними стандартами, в яких визначені метод і засоби вимірювань, регламентовані схеми вимірювальних установок, умови виконання вимірювань, алгоритм проведення вимірювань, а також методики оцінювання результату і похибки вимірювання.

1.4.1. Класифікація похибок вимірювань

За закономірностями проявлення похибки вимірювань поділяють на систематичні, випадкові та надмірні.

Систематична похибка вимірювань Δ_s – складова похибки вимірювань, що залишається сталою або прогнозовано змінюється в ряді вимірювань однієї й тієї ж величини в однакових умовах. Систематична похибка шляхом застосування спеціальних способів або засобів вимірювань може бути визначена з достатньою точністю, і результат вимірювань може бути уточнений шляхом внесення поправок. Однак на практиці повне виключення систематичної похибки не являється можливим і завжди буде мати місце невиключена систематична похибка, яку необхідно оцінювати.

Випадкова похибка вимірювань Δ – складова похибки вимірювань, що не прогнозовано змінюється в ряді вимірювань однієї й тієї ж величини. Вона обумовлена великою кількістю факторів, що, як правило, впливають на результат вимірювання і носять випадковий характер: нестабільність напруги мережі живлення, випадкові зміни умов вимірювань, вібрації і т.ін. Випадкову похибку принципово неможливо виключити з результату вимірювань, але шляхом збільшення кількості вимірювань і їх статистичної обробки можна оцінити її значення та уточнити результат вимірювань.

Надмірна похибка Δ_n – похибка вимірювання, що суттєво перебільшує очікувану за даних умов вимірювань похибку. Надмірна похибка часто є результатом низької кваліфікації спостерігача, його неуважності, наслідком раптової короточасної зміни умов вимірювань (порушення контакту, вібрації і т.ін.). Надмірна похибка призводить до спотворення результату вимірювань і його похибки. Тому при вимірюваннях повинні здійснюватися заходи з недопущення надмірних похибок, а результати вимірювань, що містять в собі надмірну похибку, повинні виявлятися і виключатися при обробці як ті, що не заслуговують довіри.

1.4.2. Систематичні похибки вимірювань

Систематичні похибки обумовлені впливом на результат вимірювання факторів, дія яких на практиці не усунена, не врахована або не виявлена.

У залежності від ступеня наших знань про систематичні похибки їх можна поділити на чотири основні групи.

1. Систематичні похибки, природа яких відома і значення (абсолютна величина, знак) може бути достатньо точно визначено. Результат вимірювань може бути виправлений шляхом внесення *поправки* – величини, яка чисельно дорівнює систематичній похибці, але взята із протилежним знаком.

2. Систематичні похибки, природа яких може бути встановлена, однак абсолютне значення і знак похибки залишаються невідомими. Відомо тільки, що похибка не перевищує за абсолютною величиною деякого граничного значення Δ_{sp} тобто $\Delta_s < \Delta_{sp}$. До даної групи відносять похибки засобів вимірювань, які виражені у вигляді границь допустимої похибки, а також похибки, що обумовлені іншими факторами.

3. Систематичні похибки, про наявність яких ми не підозрюємо. Числове значення цих похибок може бути дуже значним.

4. Систематичні похибки, що обумовлені вимірюваними властивостями об'єкту та впливом вимірювальної схеми. Наприклад, систематичні похибки будуть мати місце при вимірюванні деякими приладами синусоїдної напруги, яка має нелінійні спотворення.

Будь-яке вимірювання повинно починатися з ретельного аналізу можливих факторів, що обумовлюють появу систематичних похибок.

Інструментальна складова систематичної похибки може бути обумовлена:

- реакцією ЗВТ на впливні величини (температуру, атмосферний тиск, вологість повітря, вібрації та електричні поля, іонізуючі випромінювання та ін.) і на швидкість (частоту) зміни вимірюваних величин;
- впливом ЗВТ на об'єкт вимірювань;
- здатністю ЗВТ розрізняти малі зміни вимірюваних величин у часі або в просторі (дозволяюча спроможність);
- невірною установкою або взаємним впливом засобів вимірювань;
- неточною установкою нуля приладу і т.ін.

Методична складова систематичної похибки вимірювань обумовлена неадекватністю об'єкта вимірювання та його моделі, що прийнята при вимірюванні. Ця похибка є наслідком тих чи інших припущень або спрощень в рівнянні вимірювання, застосування емпіричних формул і функціональних залежностей замість точних, неповного знання усіх властивостей явищ, що спостерігаються, а також впливу паразитних зв'язків і т.ін. Таку похибку часто називають також *теоретичною похибкою*.

Наприклад, при вимірюванні потужності, що падає на резисторі, або опору резистора методом амперметра і вольтметра (рис. 1.2, 1.3) виникає методична похибка. В схемі на рис. 1.3 вольтметр показує не падіння напруги на резисторі R , а сумарне падіння напруги в ланцюгу, який складається з резистора і амперметра; в схемі на рис. 1.2 показання амперметра завищено і враховує також струм, що проходить через вольтметр.

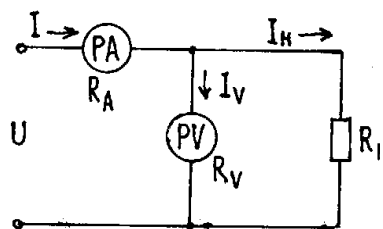


Рис. 1.2

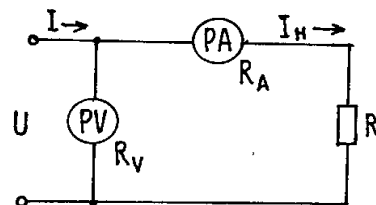


Рис. 1.3

Завдання експериментатора – врахувати при вимірюваннях усі похибки методу як сукупності прийомів використання засобів вимірювальної техніки та вибрати таку методику вимірювань, яка забезпечить мінімум таких похибок.

Суб'єктивні похибки є наслідком індивідуальних властивостей спостерігача, які обумовлені особливостями його організму. Може статися, що спостерігач припускає стійку похибку, яка є наслідком укорінених невірних навичок, уповільненої реакції, особливостей зору, недостатнього досвіду і т.ін. Суттєву долю суб'єктивних похибок становлять похибки відліку – похибка інтерполяції, похибка від паралаксу; похибки, що обумовлені запізненням або випередженням в реєстрації будь-якого моменту часу та ін.

За характером проявлення систематичні похибки розділяються на *постійні* і *змінні*. Останні можуть бути прогресуючими, періодичними і такими, що змінюються за складним законом. До постійних систематичних похибок відносяться, наприклад, похибки градування шкал приладів. Прогресуючими називаються систематичні похибки, які в процесі зміни монотонно збільшуються чи зменшуються. До них, наприклад, відносяться похибки, пов'язані з поступовим падінням напруги джерел живлення, прогріванням апаратури і т.ін.

Періодичними називаються систематичні похибки, що періодично змінюють значення і знак. Періодичні похибки можуть виникати, наприклад, у цифрових вимірювальних приладів, коли одна з цифр індикатора установлюється невірно (замість цифри "6" завжди з'являється цифра "5").

Решту видів систематичних похибок прийнято називати похибками, що змінюються за складним законом.

Виявлення та зменшення систематичних похибок може бути досягнуто:

- усуненням факторів, що обумовлюють появу систематичних похибок;
- вибором засобів і методів вимірювань з малими систематичними похибками;
- повторними вимірюваннями однієї й тієї ж величини різними засобами вимірювальної техніки, різними методами і різними спостерігачами;
- виконанням вимог інструкції з експлуатації ЗВТ і їх своєчасною перевіркою.

Використання стандартних методів і методик вимірювань, своєчасно повірених ЗВТ, підготовка оператора (спостерігача) є основним способом, що дозволяє уникнути невиправдано великих значень систематичних похибок.

Виявлення і усунення систематичних похибок можна проводити до, під час і після проведення вимірювань.

Для вилучення систематичних похибок у процесі вимірювань використовується ряд способів.

Спосіб заміщення полягає в тому, що спочатку до входу вимірювального приладу подають вимірювану величину і фіксують показання приладу, а потім замінюють її величиною з відомим значенням (що виробляється мірою), змінюючи яке добиваються знов тих же самих показань. Значення вимірюваної величини визначають за значенням, яке виробляється мірою. Такий захід дає змогу вилучити систематичну похибку, останнє значення якої буде визначатися неточністю атестації міри. Наприклад, процедура калібрування при вимірюванні за допомогою осцилографа амплітуди сигналу.

Спосіб компенсації похибки за знаком застосовується тоді, коли джерело похибки має спрямовану дію і зміна напрямку на зворотній викликає зміну знаку, але не значення похибки. При цьому способі вимірювання проводять парне число разів, наприклад, 4 рази, причому в половині випадків джерело похибки повинно викликати систематичні похибки одного знаку, а в іншій половині – зворотного знаку. Похибка виключається при обчислюванні середнього значення.

Таким способом, наприклад, можна скомпенсувати вплив зовнішнього рівномірного магнітного поля, повертаючи електровимірювальний прилад на 180 градусів.

Спосіб симетричних спостережень використовується для вилучення прогресуючої похибки, що є лінійною функцією часу. Для цього проводяться декілька спостережень вимірюваної величини через однакові проміжки часу, а потім обчислюються середні арифметичні значення кожної пари значень, симетрично розміщених відносно деякого значення. Вони повинні бути рівні між собою, наприклад:

$$\frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{x_2 + x_3}{2} \quad \text{або} \quad \frac{x_1 + x_5}{2} = \frac{x_2 + x_4}{2} = x_3.$$

Такий спосіб дозволяє вилучити можливі прогресуючі похибки, що не були помічені через свою незначність або з інших причин, а також переконатися в тому, що під час роботи не відбулися зміни в самих приладах чи в зовнішніх умовах, які могли б вплинути на їх показання.

Такий спосіб застосовується, наприклад, при вимірюванні напруги за допомогою компенсатора, якщо під час вимірювань зменшується напруга акумулятора, що виробляє робочий струм. Якщо робочий струм компенсатора змінюється лінійно з часом, то для усунення похибки достатньо провести два спостереження, зафіксувавши попередньо час регулювання робочого струму за нормальним елементом.

Результати спостережень E_1 і E_2 , що одержані, є функціями часу:

$$E_1 = E_x + kt_1, \quad E_2 = E_x + kt_2, \quad (1.14)$$

де t_1 і t_2 – інтервали часу між регулюванням і відповідним спостереженням;

k – коефіцієнт, що характеризує швидкість зміни похибки.

Вирішивши систему рівнянь (1.14), отримаємо

$$E_x = (E_1 t_2 - E_2 t_1) / (t_2 - t_1).$$

Не всі види систематичних похибок вимірювань можуть бути визначені експериментально або враховані, а в подальшому і вилучені з результату вимірювання (РВ). Систематична похибка звичайно вважається виключеною, якщо її залишок у 20...100 разів менше границі допустимої похибки РВ. Систематичну похибку, яка залишається, називають невилученою систематичною похибкою. Така похибка повинна бути оцінена за ГОСТ 8.207-84.

У якості границь складових невилучених систематичних похибок прямих вимірювань можуть бути прийняті, наприклад, границі допустимих основних і додаткових похибок засобів вимірювань, якщо випадкові складові похибки незначні. При підсумовуванні складових невилученої систематичної похибки результату вимірювання невилучені систематичні похибки засобів вимірювань кожного типу розглядають як випадкові величини. При відсутності даних про вид розподілу випадкових величин їх розподіл приймають за рівномірний.

При рівномірному розподілі невилучених систематичних похибок ці границі (без урахування знаку) обчислюють за формулою

$$\Delta_s = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta_{si}^2}, \quad (1.15)$$

де Δ_{si} – границя i -ї невилученої систематичної похибки;

k – коефіцієнт, що визначається прийнятою довірчою імовірністю;

m – кількість підсумованих невилучених систематичних похибок.

Коефіцієнт k приймається рівним 1,1 при довірчій імовірності $P = 0,95$.

При довірчій імовірності $P = 0,99$ коефіцієнт k приймається рівним 1,4, якщо число підсумованих невилучених систематичних похибок більше, ніж чотири ($m > 4$).

При опосередкованих вимірюваннях вимірювана величина Y визначається виразом

$$Y = \varphi (A_1, A_2, \dots, A_k, \dots, A_m). \quad (1.16)$$

У результаті прямих вимірювань знаходяться числові значення величин $A_{1n}, A_{2n}, \dots, A_{mn}$ та їх систематичні похибки $\Delta_{s1}, \Delta_{s2}, \dots, \Delta_{sm}$.

Якщо вимірювання величин A_1, A_2, \dots, A_m , що є аргументами рівняння (1.14), проведені з деякими систематичними похибками, тобто аргументи A_1, A_2, \dots, A_m містять кінцеві порівняно малі прирощення $\Delta_{s1}, \Delta_{s2}, \dots, \Delta_{sm}$, то вимірювана величина Y буде визначена з деякою систематичною похибкою Δ_{sY} і її значення буде визначатися виразом

$$Y_n + \Delta_{sY} = \varphi (A_{1n} + \Delta_{s1}, A_{2n} + \Delta_{s2}, \dots, A_{mn} + \Delta_{sm}). \quad (1.17)$$

Розклавши праву частину виразу (1.17) в ряд Тейлора та нехтуючи похідними вище першого порядку, одержуємо

$$Y_n + \Delta_{sY} = \varphi (A_{1n}, A_{2n}, \dots, A_{kn}, \dots, A_{mn}) + \Delta_{s1} + \Delta_{s2} + \dots + \Delta_{sk} + \dots + \Delta_{sm}.$$

Тоді результат опосередкованого вимірювання

$$Y = \varphi (A_{1n}, A_{2n}, \dots, A_{kn}, \dots, A_{mn}), \quad (1.18)$$

а систематичну похибку результату опосередкованого вимірювання обчислюють за формулою

$$\Delta_{sY} = \sum_{k=1}^m \frac{\partial \varphi}{\partial A_k} \cdot \Delta_{sk}. \quad (1.19)$$

Вираз (1.19) застосовується на практиці, коли відомі числові значення та знаки систематичних похибок аргументів.

У випадках, коли поправки невідомі, а відомі граничні значення невилучених систематичних похибок, границя невилученої систематичної похибки результату опосередкованого вимірювання в залежності від числа аргументів обчислюється за формулами:

$$\Delta_{sY} = \pm \sum_{k=1}^m \left| \frac{\partial \varphi}{\partial A_k} \cdot \Delta_{sk} \right| \quad \text{при } m \leq 3; \quad (1.20)$$

$$\Delta_{sY} = \pm k \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^m (\partial \varphi / \partial A_k)^2 \cdot \Delta_{sk}^2} \quad \text{при } m \geq 4. \quad (1.21)$$

Додатки $\partial \varphi / \partial A_k$ називають *частинними систематичними похибками опосередкованого вимірювання*.

1.4.3. Випадкові похибки вимірювань

Поява при вимірюваннях випадкових похибок обумовлена впливом на ЗВТ і об'єкт вимірювань багаточисельних випадкових факторів, наприклад, зміни зовнішніх умов, вібрацій, нестабільності напруги живлення і т.ін., а також факторів, що пов'язані з деякими випадковими змінами параметрів і характеристик об'єкта і самих засобів вимірювань. Ефект від впливу кожного з цих факторів може бути незначним, але сумарна їх дія може створити значні (часом перевищуючі допустиму похибку відхилення) похибки, які змінюються безперервно випадковим чином як за величиною, так і за знаком. Наявність таких випадкових відхилень виявляється в тому, що при повторних вимірюваннях однієї й тієї ж незмінної величини, виконаних з однаковою старанністю, одними й тими ж методами і засобами, в одних і тих же умовах, числові значення результатів вимірювань (спостережень) трохи відрізняються один від одного. Якщо при повторних вимірюваннях одержані однакові числові значення, то це вказує не на відсутність випадкових похибок, а на недостатню чутливість вимірювального приладу і невисоку точність вимірювань. Якщо систематичні похибки можуть бути в тій чи іншій мірі виявлені та вилучені, то випадкові похибки усунути принципово неможливо. Однак, на основі методів теорії ймовірностей і математичної статистики вдається уточнити значення одержаного результату вимірювань і оцінити його випадкову похибку, тобто міру наближення результату вимірювань до істинного значення вимірюваної величини. Для оцінки випадкової похибки можуть бути застосовані такі показники:

- числові характеристики випадкової складової похибки вимірювань;
- функція (щільність) розподу імовірностей випадкової складової похибки вимірювань;

– інтервал, в якому похибка вимірювання знаходиться із заданою імовірністю.

Такі показники визначені в законодавчому порядку і встановлені ГОСТ 8.207-76, МИ 1552-86, РД 50-555-85 та іншими документами. Перші два показники застосовують у тих випадках, коли результат вимірювання призначений для порівняння або використання разом з іншими результатами вимірювань. Показник точності у вигляді інтервалу застосовують у тих випадках, коли результат вимірювання призначений для одноразового використання, наприклад, під час контрольних операцій або якщо на основі результату вимірювань необхідно, наприклад, прийняти рішення про придатність виробу до застосування.

Нехай проведено n спостережень постійної величини, істинне значення якої дорівнює A , і одержані результати спостережень $x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n$, що відрізняються один від одного, тобто мають місце випадкові похибки.

Припустимо, що спостереження проведені таким чином, що систематичні і надмірні похибки відсутні або виявлені та вилучені, тобто ми маємо справу з виправленими результатами спостережень. Будемо також вважати, що результати спостережень *незалежні* (тобто похибки окремого спостереження не залежать від похибки інших спостережень) і *рівноточні* (тобто одержані за допомогою одного засобу вимірювань, в однакових умовах, одним спостерігачем).

Очевидно, що результати спостережень x_1, x_2, \dots, x_n , являють собою можливі значення випадкової величини X .

При обмеженому числі спостережень як результат вимірювання доцільно прийняти оцінку математичного сподівання випадкової величини X , тобто $M[X]$, статистичним аналогом якого є середнє арифметичне значення результатів спостережень

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (1.22)$$

Середнє арифметичне значення є *спроможною* та *незсуненою* оцінкою математичного сподівання для будь-якого закону розподілу випадкових величин, а також *ефективною* оцінкою, якщо випадкова величина X розподілена за нормальним законом.

У реальних умовах, коли число спостережень обмежено, X є випадковою величиною. Характеристикою розсіювання середнього арифметичного значення X відносно істинного значення величини A є дисперсія або середнє квадратичне відхилення результату вимірювань (СКВРВ), оцінка якого визначається за формулою

$$\tilde{\sigma}_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} = \tilde{\sigma}_x / \sqrt{n}, \quad (1.23)$$

де $x_i - X = \Delta_i$ – випадкове відхилення результату спостереження;

$$\tilde{\sigma}_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}. \quad (1.24)$$

Оцінка, яка розрахована за формулою (1.3), зветься оцінкою середнього квадратичного відхилення результату спостереження (СКВРС).

При обмеженому числі спостережень оцінки $\tilde{\sigma}_{\bar{X}}$ і $\tilde{\sigma}_X$ є випадковими величинами, вони характеризують випадкові похибки результату вимірювання і результату спостереження відповідно.

Ці оцінки мають позитивне значення, оскільки є числовими параметрами закону розподілу випадкової величини X . Тому не можна ототожнювати поняття оцінок $\tilde{\sigma}_{\bar{X}}$ і $\tilde{\sigma}_X$ з середніми квадратичними похибками.

Вирази (1.23) і (1.24) справедливі при кількості спостережень $n \geq 2$. При збільшенні числа спостережень, тобто при прагненні n до нескінченності, оцінка $\tilde{\sigma}_X$ прагне до генерального значення середнього квадратичного відхилення результату спостереження σ_X , а оцінка $\tilde{\sigma}_{\bar{X}}$, згідно з (1.23) – до нуля.

Встановлення закону розподілу (ЗР) випадкової складової похибки вимірювання потребує виконання ряду трудомістких операцій (побудова емпіричного ЗР, вибір теоретичного ЗР, встановлення відповідності обраного теоретичного ЗР емпіричному за деяким критерієм згоди), тому на практиці звичайно використовуються *інтервальні оцінки*.

Сенс такого оцінювання полягає в знаходженні інтервалів, що зветься *довірчими*, між границями яких з певними імовірностями знаходяться істинні значення оцінюваних параметрів. Оскільки ця імовірність, по суті, характеризує надійність результату вимірювання, то звичайно вона задається, виходячи з практичних міркувань, і з урахуванням цього розраховують довірчі границі. Згідно з ГОСТ 8.207-76 довірчу імовірність P для визначення довірчих границь похибки результату технічного вимірювання приймають рівною 0,95. У випадках, коли виконуються високоточні вимірювання або коли вимірювання неможливо повторити, припускається вказувати границі для довірчої імовірності $P = 0,99$. У особливих випадках, наприклад, при вимірюваннях, результати яких мають значення для здоров'я людей, припускається приймати більш високу довірчу імовірність.

Довірчі границі інтервалу можуть бути визначені згідно з формулою

$$\overset{\circ}{\Delta}_x = t \cdot \tilde{\sigma}_{\bar{x}}. \quad (1.25)$$

Тут t – коефіцієнт, що визначається прийнятою довірчою імовірністю P і законом розподілу випадкової величини – функцією $F(x)$ або щільністю $p(x)$ розподілу імовірностей.

У якості оцінок параметра може бути прийняте математичне сподівання, дисперсія, середнє квадратичне відхилення і т.ін.

Часто згідно з умовами вимірювального експерименту достатньо знати орієнтовно апріорне розподілення. У такому випадку використовують відомості про закони розподілу та умови їх застосування (табл. 1.4) або використовують так звані стандартні апроксимовані функції розподілу, які найбільш часто зустрічаються в метрологічній практиці (табл. 1.5). На відміну від реальних, такі функції розподілу є зрізаними, внаслідок чого можна характеризувати їх одним параметром – середнім квадратичним відхиленням похибки. Граничні значення похибки для $P = 1$ знаходять шляхом множення середнього квадратичного відхилення на відповідний коефіцієнт з табл. 1.5.

Таблиця 1.4

Закон розподілу	Об'єкти, умови застосування
Нормальний	Випадкові похибки, зокрема флуктуаційні похибки різного роду; похибки багаторазових вимірювань (навіть якщо ЗР імовірностей складових відрізняються від нормального); сумарні похибки великої кількості незалежних окремих похибок (при відсутності домінуючої похибки) При великому числі спостережень
Ст'юдента	Випадкові похибки вимірювань при малому числі спостережень
Рівномірний	Похибки рахування імпульсів за еталонний проміжок часу; похибки, що обумовлені люфтами; похибки округлення результатів; відхилення значень параметрів, що контролюються Відсутні дані для вибору обгрунтованого ЗР
Трикутний (Сімпсона)	Сумарна похибка, що залежить від двох випадкових похибок, які розподілені за однаковим (наприклад, рівномірним) законом; похибки цифрових вимірювальних приладів; похибки вимірювання послаблювання, опору і т.ін. методом заміщення; похибки вимірювань відрізків часу, довжини і т.ін. за двома округленими відліками; нестабільності параметрів усередині заданих границь відхилення від номінального значення

Таблиця 1.5

Найменування функції	Скорочене позначення	Графік	$T = a/\sigma$
Нормальна (зрізана)	норм.		3,0
Рівномірна	рівн.		1,7
Трикутна (Сімпсона)	Δ		2,4
Трапецієподібна	трап.		2,3
Антимодальна I	ам. I		1,4
Антимодальна II	ам. II		1,2
Релєя			3,3

Оскільки в більшості випадків результати спостережень належать до нормального (або достатньо близького до нього) розподілу, то для визначення значення t при $n > 30$ можна користуватися таблицями значень функцій Лапласа (табл. 1.6); надійність оцінки зберігається при різному числі спостережень. Ця ж таблиця використовується, коли середнє квадратичне значення похибки вимірювань задано в нормативній документації ЗВТ.

Таблиця 1.6

t	P	t	P	t	P
0,00	0,0000	1,00	0,6826	2,0	0,9545
0,05	0,0399	1,05	0,7063	2,1	0,9643
0,10	0,0797	1,10	0,7287	2,2	0,9722
0,15	0,1192	1,15	0,7499	2,3	0,9786
0,20	0,1585	1,20	0,7699	2,4	0,9886
0,25	0,1974	1,25	0,7887	2,5	0,9876
0,30	0,2358	1,30	0,8064	2,6	0,9907
0,35	0,2737	1,35	0,8230	2,7	0,9931
0,40	0,3108	1,40	0,8385	2,8	0,9949
0,45	0,3473	1,45	0,8529	2,9	0,9963
0,50	0,3829	1,50	0,8664	3,0	0,9973
0,55	0,4177	1,55	0,8789	3,1	0,9981
0,60	0,4515	1,60	0,8904	3,2	0,9986
0,65	0,4843	1,65	0,9011	3,3	0,9990
0,70	0,5161	1,70	0,9109	3,4	0,9993
0,75	0,5468	1,75	0,9199	3,5	0,9995
0,80	0,5763 i	1,80	0,9281	3,6	0,9997
0,85	0,6047	1,85	0,9357	3,7	0,9998
0,90	0,6319	1,90	0,9426	3,8	0,9999
0,95	0,6579	1,95	0,9488	3,9	1,0000

Якщо ж число спостережень, при яких було визначено значення оцінки σ_x , незначне, тобто $n \leq 30$, але відомо, що випадкова похибка результату спостережень розподілена за нормальним законом, то значення коефіцієнта t (коефіцієнта Стюдента) можна визначити за табл. 1.7 для відомого n . Табл. 1.6, 1.7 побудовані для двосторонньої довірчої імовірності (двостороннього рівня значущості).

1.4.4. Надмірні похибки вимірювань

Наявність в результатах багатократних вимірювань надмірних похибок може викривити результат вимірювання та розширити довірчі межі. Тому результати спостережень, які містять надмірні похибки, мають бути виключені з обробки.

Таблиця 1.7

n	P = 0,9	P = 0,95	P = 0,98	P = 0,99	P = 0,999
3	2,92	4,30	6,96	9,92	31,60
4	2,35	3,18	4,54	5,84	12,92
5	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
6	2,02	2,57	3,36	4,03	6,87
7	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
8	1,89	2,36	3,00	3,50	5,40
9	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
10	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
11	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
12	1,80	2,20	2,72	3,11	4,44
13	1,78	2,18	2,68	3,05	4,32
14	1,77	2,16	2,65	3,01	4,22
15	1,76	2,14	2,62	2,98	4,14
16	1,75	2,13	2,60	2,95	4,07
17	1,75	2,12	2,58	2,92	4,02
18	1,74	2,11	2,57	2,90	3,97
19	1,73	2,10	2,55	2,88	3,92
20	1,73	2,09	2,54	2,86	3,88
22	1,72	2,08	2,52	2,83	3,82
24	1,71	2,07	2,50	2,81	3,77
26	1,71	2,06	2,49	2,79	3,73
28	1,70	2,05	2,47	2,77	3,69
30	1,70	2,04	2,46	2,76	3,66
40	1,69	2,02	2,42	2,70	3,55
50	1,68	2,01	2,40	2,68	3,50
60	1,67	2,00	2,39	2,66	3,46
80	1,66	1,99	2,37	2,64	3,42
100	1,66	1,98	2,36	2,63	3,39

Коли немає підстави вважати, що результати спостережень розподілені за нормальним законом, використовують так званий критерій Ірвінга:

$$\Delta_{\Gamma n}^0 = K_{\Gamma n} \cdot \sigma_X, \quad (1.26)$$

де $K_{\Gamma n}$ визначають за табл. 1.8 для відомих n і P ;

Таблиця 1.8

n	2	3	10	20	30	50	100	400	1000
P = 0,95	2,8	2,2	1,5	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8
P = 0,99	3,7	2,9	2,0	1,8	1,7	1,6	1,5	1,3	1,2

– розраховане значення $\Delta_{\Gamma n}$ порівнюють з різницею двох сусідніх значень результатів спостережень впорядкованої (за збільшенням або зменшенням значень) вибірки $\Delta_{x\Gamma} = x_n - x_{n-1}$;

– якщо $\Delta_{x\Gamma} < \Delta_{\Gamma n}$, то x_n не містить надмірної похибки, інакше x_n виключають з вибірки, обробку повторюють.

Якщо є підстави вважати закон розподілу результатів нормальним, розраховують

$$\Delta_{\Gamma}^0 = K_{\Gamma} \cdot \sigma_X, \quad (1.27)$$

де K_{Γ} визначають за табл. 1.9 для відомих n і P .

Якщо $\Delta_{x_i} = |x_i - X| < \Delta_{\Gamma}$, то вважають, що результат спостереження надмірну похибку в собі не містить, інакше – результат спостереження виключають з вибірки, обробку повторюють.

Таблиця 1.9

n	K_{Γ}		n	K_{Γ}	
	P = 0,95	P = 0,99		P = 0,95	P = 0,99
3	1,41	1,41	28	2,76	3,12
4	1,69	1,72	29	2,78	3,14
5	1,87	1,96	30	2,79	3,16
6	2,00	2,13	31	2,80	3,17
7	2,09	2,26	32	2,82	3,18
8	2,17	2,37	33	2,83	3,20
9	2,24	2,46	34	2,84	3,21
10	2,29	2,54	35	2,85	3,22
11	2,34	2,61	36	2,86	3,24
12	2,39	2,66	37	2,87	3,25
13	2,43	2,71	38	2,88	3,26
14	2,46	2,76	39	2,89	3,27
15	2,49	2,80	40	2,90	3,28
16	2,52	2,84	41	2,91	3,29
17	2,55	2,87	42	2,92	3,30
18	2,58	2,90	43	2,93	3,31
19	2,60	2,93	44	2,94	3,32
20	2,62	2,96	45	2,95	3,33
21	2,64	2,98	46	2,96	3,34
22	2,66	3,01	47	2,96	3,35
23	2,68	3,03	48	2,97	3,35
24	2,70	3,05	49	2,98	3,36
25	2,71	3,07	50	2,99	3,37
26	2,73	3,09	51	2,99	3,38
27	2,75	3,11	52	3,00	3,39

При написанні розділу були використані джерела [1...4].

2. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

У процесі технічного обслуговування складних виробів (об'єктів контролю) з метою визначення їх готовності до застосування проводять вимірювання їх параметрів за допомогою засобів вимірювальної техніки.

Засіб вимірювальної техніки (ЗВТ) – технічний засіб, який застосовується під час вимірювань і має нормовані метрологічні характеристики.

За допомогою ЗВТ можуть вирішуватись такі вимірювальні задачі:

- контроль функціонування, працездатності та справності пристроїв;
- діагностування і прогнозування стану об'єкта контролю (ОК);
- пошук відмов і несправностей ОК;
- вимірювання параметрів при контролі технічних характеристик виробів;
- юстирування та калібрування технічних пристроїв.

2.1. Класифікація засобів вимірювальної техніки

ЗВТ класифікуються за двома ознаками: за функціональним та за метрологічним призначенням.

За *функціональним призначенням* ЗВТ поділяються на вимірювальні пристрої та засоби вимірювань (ЗВ).

Вимірювальний пристрій – засіб вимірювальної техніки, в якому виконується лише одна зі складових частин (компонентів) процедури вимірювань, яка зветься вимірювальною операцією.

Засіб вимірювань – засіб вимірювальної техніки, який реалізує процедуру вимірювань.

До вимірювальних пристроїв відносять міри, компаратори, вимірювальні перетворювачі та обчислювальні компоненти.

Міра – вимірювальний пристрій, що реалізує відтворення та (або) збереження фізичної величини заданого значення.

Розрізняють однозначні та багатозначні міри. *Однозначні міри* відтворюють одне значення, а *багатозначні* – декілька значень ФВ. Багатозначні міри конструктивно можуть виконуватись у вигляді регулюємих мір, магазинів та наборів мір. Наприклад, мірами є гирі, магазини опору і ємності, вимірювальні генератори, стандарти частоти і т.ін.

Компаратор – вимірювальний пристрій, що реалізує порівняння однорідних ФВ.

Вимірювальний перетворювач – вимірювальний пристрій, що реалізує вимірювальне перетворення.

Метою вимірювального перетворення є створення на виході вимірювального перетворювача сигналу вимірювальної інформації, форма якого зручна для передавання, подальшого перетворення, обробки і зберігання,

але не піддається безпосередньому сприйманню спостерігачем. До вимірювальних перетворювачів відносяться датчики, в яких величина, що вимірюється, перетворюється на сигнал, зручний для вимірювань, передавання, перетворення, зберігання або реєстрації.

Приклади вимірювальних перетворювачів: аналого-цифрові перетворювачі, цифро-аналогові перетворювачі, вимірювальні трансформатори, підсилювачі, перетворювачі напруги, частоти, зовнішні шунти і додаткові опори, датчики температури, вологості та ін.

Обчислювальний компонент (або числовий вимірювальний перетворювач) – вимірювальний пристрій, що є сукупністю засобів обчислювальної техніки і програмного забезпечення та виконує обчислювальні операції під час вимірювань.

Засоби вимірювань поділяють на вимірювальні прилади, вимірювальні канали та вимірювально-інформаційні системи.

Вимірювальний прилад (ВП) – засіб вимірювань, в якому створюється візуальний сигнал вимірювальної інформації (у формі, яка є доступною для безпосереднього сприйняття спостерігачем).

У залежності від форми подання показів розрізняють аналогові та цифрові вимірювальні прилади.

Аналоговий вимірювальний прилад (АВП) – вимірювальний прилад, показання якого є неперервною функцією зміни вимірюваної величини.

Цифровий вимірювальний прилад (ЦВП) – вимірювальний прилад, який автоматично виробляє дискретні сигнали вимірювальної інформації, та його показання подані в цифровій формі.

За *принципом дії* розрізняють ВП прямої дії, порівняння, інтегруючі та підсумовуючі. У *ВП прямої дії* здійснюється одне або декілька перетворень сигналу вимірювальної інформації, функціонально пов'язаного з ФВ, яка вимірюється, в одному напрямі, тобто без застосування зворотнього зв'язку. У *ВП порівняння* здійснюється безпосереднє порівняння вимірюваної величини з величиною, значення якої відомо. *Інтегруючі ВП* засновані на інтегруванні вимірюваної величини за часом або за іншою незалежною змінною (наприклад, лічильник витрати електричної енергії). До *підсумовуючих ВП* відносять прилади, показання яких пропорційні сумі двох або декількох величин, що підводяться до ВП по різних каналах (наприклад, витратоміри).

ВП можуть бути показувальними та реєструючими. *Показувальні ВП* припускають тільки відлік показань, а *реєструючі ВП* забезпечують реєстрацію сигналів вимірювальної інформації на матеріальному носії інформації (магнітному, паперовому та ін.).

Вимірювальний канал – сукупність ЗВТ, засобів зв'язку та інших технічних засобів, призначена для створення сигналу вимірювальної інформації про одну вимірювану величину.

Вимірювальна система – сукупність вимірювальних каналів, вимірювальних пристроїв та інших технічних засобів, об'єднаних для створення сигналів вимірювальної інформації про декілька вимірюваних фізичних величин.

Вимірювально-інформаційна система – сукупність ЗВТ, засобів контролю, діагностики та інших технічних засобів, об'єднаних для створення сигналів вимірювальної інформації та інших видів інформації, а за необхідністю – передавання їх на відстань.

За **метрологічним призначенням** ЗВТ поділяються на еталони одиниць ФВ, робочі еталони та робочі ЗВТ.

Еталон одиниці ФВ (або еталон) – це засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці ФВ і передавання її розміру відповідним ЗВТ, що стоять нижче за повірочною схемою, й офіційно затверджений як еталон.

За *призначенням та метрологічними характеристиками* еталони підрозділяються на первинні, спеціальні та вторинні.

Первинний еталон – еталон, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці фізичної величини з найвищою в країні (у порівнянні з іншими еталонами тієї ж одиниці) точністю.

Спеціальний еталон – еталон, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці фізичної величини в особливих умовах і замінює в цих умовах первинний еталон.

Вторинний еталон – еталон, якому передається розмір одиниці ФВ від первинного або спеціального еталону.

До вторинних відносяться *еталони-копії* (служать для передавання розміру одиниці ФВ робочим еталонам) та *еталони передавання* (призначені для взаємного звірення еталонів, які за тих чи інших обставин не можуть бути звірені один з одним безпосередньо).

Робочий еталон (РЕ) – еталон, призначений для перевірки чи калібрування засобів вимірювальної техніки. З метою забезпечення працездатності РЕ їх забороняють використовувати для технічних вимірювань, тобто для вимірювань, які не зв'язані з передаванням розміру одиниці ФВ.

Робочий засіб вимірювальної техніки (РЗВТ) – засіб вимірювальної техніки, що застосовується для вимірювань, не зв'язаних з передаванням розміру одиниці ФВ іншим засобам.

Для забезпечення єдності вимірювань одиниці ФВ передаються від первинних еталонів до РЗВТ.

2.2. Похибки засобів вимірювальної техніки

Характеристики засобів вимірювальної техніки можна розбити на дві групи: технічні та метрологічні.

Технічні характеристики ЗВТ включають: граничні значення неінформативних параметрів, нормальні та робочі умови застосування, швидкодію, надійність та ін.

Метрологічні характеристики (МХ) ЗВТ – характеристики ЗВТ, які нормуються для визначення результату вимірювання та його похибок.

Основні МХ засобів вимірювальної техніки:

– принцип дії – фізичний принцип, що покладений в основу побудови ЗВТ даного типу;

– діапазон вимірювань – область значень вимірюваної величини, для якої нормовані припустимі похибки ЗВТ;

– похибка засобу вимірювальної техніки – відхилення показань ЗВТ від істинного значення величини;

– чутливість – відношення змінювання сигналу на виході ЗВТ до змінювання вимірюваної величини;

– вхідний опір (імпеданс);

– область робочих частот;

– динамічні характеристики – МХ властивостей ЗВТ, які проявляються в тому, що на вихідний сигнал цього ЗВТ впливає змінення вхідного сигналу в часі (перехідна характеристика, імпульсна перехідна характеристика, амплітудно-фазова характеристика, амплітудно-частотна характеристика, передаточна функція);

– функція перетворення – залежність інформативного параметра вихідного сигналу ЗВТ від інформативного параметра його вхідного сигналу;

– функція впливу – залежність змінення МХ ЗВТ від змінення впливної величини або від змінення сукупності таких величин.

2.2.1. Основні та додаткові похибки засобів вимірювальної техніки

На показання засобів вимірювальної техніки впливають зовнішні фактори (температура, вологість, тиск та ін.). Весь діапазон можливих значень кожної впливної величини поділяють на три зони: нормальну, робочу і граничну. Відповідно розрізняють нормальні, робочі та граничні умови застосування ЗВТ.

Нормальні умови застосування ЗВТ – умови, за яких впливні величини мають нормальні значення або знаходяться в границях нормальних інтервалів значень.

Робочі умови застосування ЗВТ – умови, за яких значення впливних величин знаходяться в границях робочих зон.

Граничні умови – сукупність границь зон значень впливних величин, при яких можливо транспортування і зберігання ЗВТ без змінення їх метрологічних властивостей після повернення до робочих умов застосування.

У нормальній області значень величин, що впливають, похибка ЗВТ мінімальна. Якщо впливна величина знаходиться в робочій зоні, то похибка збільшується. Якщо впливна величина виходить за межі робочої зони, то похибка засобу ЗВТ може бути скільки завгодно великою і не нормується. Експлуатувати ЗВТ у такому випадку недопустимо.

У залежності від умов застосування ЗВТ їх похибки поділяють на основну і додаткову.

Основна похибка – похибка ЗВТ, який застосовується в нормальних умовах.

Додаткова похибка – похибка ЗВТ, що додатково виникає під час застосування ЗВТ в умовах відхилення хоча б однієї з впливних величин від нормального значення або її виходу за границі нормальної зони значень і дорівнює різниці (без урахування знака) між значенням похибки, що відповідає деякому заданому значенню впливної величини в межах робочих умов застосування, і значенням похибки, що відповідає нормальному значенню впливної величини.

Звичайно нормуються:

– границя допустимого значення основної похибки Δ_0 ЗВТ або границя допустимого значення Δ_s систематичної складової і границя допустимого значення σ_p середнього квадратичного відхилення випадкової складової основної похибки ЗВТ;

– границя допустимого значення додаткової похибки або її складових, найбільше допустиме змінення похибки, що обумовлена зміненням впливних величин в границях робочої зони, границя допустимого значення похибки в інтервалі впливної величини (похибки ЗВТ в умовах, коли одна з впливних величин приймає значення в границях її робочої області, а всі інші впливні величини знаходяться в границях нормальної області значень) або функції впливу.

Границі допустимих додаткових похибок встановлюють:

– у вигляді постійного значення для всієї робочої області впливної величини або у вигляді постійних значень по інтервалах робочої області впливної величини;

– у вигляді відношення границі допустимої додаткової похибки, яка відповідає регламентованому інтервалу впливної величини, до цього інтервалу;

– у вигляді залежності границі допустимої додаткової похибки від впливної величини (граничної функції впливу).

Границі допустимої додаткової похибки, як правило, встановлюються у вигляді часткового (кратного) значення границі допустимої основної похибки. Додаткова похибка нормується тими ж числовими характеристиками, що і основна похибка.

Припускається додаткову похибку виражати у формі, відмінній від форми виразу границь допустимої основної похибки.

Найбільш часто на практиці похибки ЗВТ наводять у вигляді границь допустимих похибок.

У залежності від характеру змінень похибок в границях діапазону вимірювань, а також умов застосування і призначення ЗВТ конкретного виду границі допустимих основної і додаткових похибок прийнято наводити в формі абсолютних, відносних і наведених похибок.

1. Границі допустимої абсолютної основної похибки встановлюються за формулою

$$\Delta_{op} = \pm a \quad (2.1)$$

або

$$\Delta_{op} = \pm (a + bX), \quad (2.2)$$

де X – значення вимірюваної величини на вході (виході) ЗВТ або число позначок, яке відлічено за шкалою;

a, b – додатні числа, що не залежать від X .

Границі наводять у формі абсолютних похибок у тому випадку, коли похибку результатів вимірювань в даній галузі вимірювань прийнято наводити в одиницях вимірюваної величини або в позначках шкали, наприклад, границі допустимих похибок мір маси, довжини, засобів для вимірювання температури і т.ін.

2. Границі допустимої відносної основної похибки встановлюються за формулою

$$\delta_{op} = \pm \Delta_{op} \cdot 100 / X = \pm g, \quad (2.3)$$

якщо Δ_{op} встановлено за формулою (2.1), або за формулою

$$\delta_{op} = \pm \Delta_{op} 100 / X = \pm \left[c + d \left(\frac{|X_k|}{|X|} - 1 \right) \right], \quad (2.4)$$

де X_k – більша (за модулем) з границь вимірювань.

У формулах (2.3) і (2.4) додатні числа g, c і d вибираються з ряду:

$1 \cdot 10^n; 1,5 \cdot 10^n; (1,6 \cdot 10^n); 2 \cdot 10^n; 2,5 \cdot 10^n; (3 \cdot 10^n); 4 \cdot 10^n; 5 \cdot 10^n; 6 \cdot 10^n;$ ($n = 1, 0, -1, -2$ і т.ін.).

Значення ряду, вказані в дужках, не встановлюють для ЗВТ, що заново розробляються.

Наприклад, границя допустимої основної похибки вимірювання постійної напруги вольтметром В7-34 на границі вимірювань 0,1 В встановлена рівною $\delta_{op} = \pm [0,02 + 0,01 (U_k/U - 1)]$, а на границях вище 1 В $\delta_{op} = \pm [0,015 + 0,002 (U_k/U - 1)]$.

Додатково встановлена форма виразу границь допустимої відносної похибки в децибелах

$$\delta_{op} = \pm A \lg (1 - \Delta_{op} / X), \quad (2.5)$$

де $A = 10$ – при вимірюванні потужності, енергії, щільності та інших енергетичних величин;

$A = 20$ – при вимірюванні напруги, сили струму, напруженості поля та інших силових величин;

X – дійсне значення вимірюваної величини.

3. Границі допустимої приведеної основної похибки встановлюють за формулою

$$\gamma_{op} = \pm \Delta_{op} \cdot 100 / X_N = \pm p, \quad (2.6)$$

де γ_{op} – границі допустимої основної похибки, %;

Δ_{op} – границі допустимої абсолютної основної похибки, що встановлюються за формулою (2.1);

X_N – нормуюче значення, що наведено в тих же одиницях, що і Δ_{op} .

Нормуюче значення X_N для ЗВТ з рівномірною, практично рівномірною або ступенною шкалою, а також для вимірювальних перетворювачів, якщо нульове значення вхідного (вихідного) сигналу знаходиться на краю або поза діапазоном вимірювань, встановлюється рівним більшій з границь вимірювань або рівним більшому з модулів границь вимірювань, якщо нульове значення знаходиться усередині діапазону вимірювань.

Приклад 1. Для вольтметра з границями вимірювань від 0 до 100 В нормуюче значення $U_N = 100$ В, а для амперметра з границями вимірювань від 1 до 10 А нормуюче значення $I_N = 10$ А.

Для електровимірювальних приладів з рівномірною, практично рівномірною або ступенною шкалою й нульовою позначкою усередині діапазону вимірювань нормуюче значення припускається встановлювати рівним сумі модулів границь вимірювань.

Приклад 2. Для мікроамперметра з границями вимірювань від – 150 до +150 мкА нормуюче значення

$$I_N = |-150| + |150| = 300 \text{ мкА.}$$

Для приладів, які мають шкалу з умовним нулем, нормуюче значення встановлюють рівним модулю різниці границь вимірювань.

Приклад 3. Для мілівольметра термоелектричного термометра з границями вимірювань від 200 до 600 °С нормуюче значення $T_N = 400$ °С.

Для приладів з встановленим номінальним значенням нормуюче значення встановлюють рівним цьому номінальному значенню.

Приклад 4. Для частотомірів з діапазоном вимірювань (45 – 55) Гц і номінальною частотою 50 Гц нормуюче значення $F_N = 50$ Гц.

Для вимірювальних приладів з суттєво нерівномірною шкалою нормуюче значення встановлюють рівним довжині шкали X_L або її частині, що відповідає діапазону вимірювань. У цьому випадку границі абсолютної похибки наводять, як і довжину шкали, в одиницях довжини.

Границі допустимих похибок наводять у формі наведених похибок, якщо границі абсолютних похибок ЗВТ конкретного виду можна вважати практично незмінними у всьому діапазоні вимірювань. Якщо вказані границі не можна вважати постійними, то границі допустимих похибок наводять у формі відносних похибок ($X_N = X_{вим}$).

2.2.2. Класи точності засобів вимірювальної техніки

Клас точності ЗВТ – узагальнена характеристика ЗВТ, що визначається границями його допустимих основних і додаткових похибок, а також іншими характеристиками ЗВТ, що впливають на його точність, значення яких регламентуються.

Клас точності характеризує властивості ЗВТ у відношенні точності, але не є безпосереднім показником точності вимірювань, що виконуються за допомогою цих засобів, тому що точність цих вимірювань залежить також від методу вимірювань і умов їх виконання. Наприклад, клас точності характеризує: для вольтметра змінного струму – його найбільшу допустиму похибку, тобто допустимі змінення показів, що викликані відхиленням від нормальних значень температури, частоти змінного струму, зовнішніх магнітних полів та інших впливних величин; для нормальних елементів – границі, в яких повинно лежати дійсне значення їх електрорушійної сили, стабільність у часі і т.ін.; для більшості електро- і радіовимірювальних приладів – границі допустимих основної і додаткової похибок, що встановлюються у вигляді абсолютних, відносних і наведених похибок або у вигляді певного числа позначок шкали.

Основою для надання ЗВТ того чи іншого класу точності, як правило, є основна похибка і спосіб її вираження.

Для ЗВТ, у яких границі допустимої основної похибки прийнято виражати в формі приведеної похибки за формулою (2.6) або відносної похибки у відповідності з формулою (2.3), класи точності в документації прийнято зазначати числами, які дорівнюють цим границям, що виражені у відсотках. Наприклад, $\gamma_{op} = \pm 2,5\%$, клас точності позначають 2,5. Головним чином це стосується електровимірювальних приладів, манометрів тощо.

Для ЗВТ, у яких границі допустимої основної похибки прийнято виражати в формі відносних похибок у відповідності з формулою (2.4), класи точності в документації позначають числами c і d , розділяючи їх скісною рискою. Наприклад, для цифрового вольтметра В7-34, у якого границя допустимої відносної похибки вимірювання опору постійному струму на границі вимірювання 0,1 кОм

$$\delta_{\text{Рор}} = \pm \left[0,025 + 0,01 \left(\frac{|R_k|}{|R|} - 1 \right) \right],$$

клас точності позначається у вигляді 0,025/0,01.

Для ЗВТ, у яких границі допустимої основної похибки прийнято виражати у формі абсолютних похибок за формулами (2.1) і (2.2) або відносних похибок, які встановлені у вигляді графіка, таблиці чи формули, класи точності позначають в документації великими літерами латинського алфавіту або римськими цифрами: наприклад, М, С або IV. До літерного позначення класу точності припускається додавати індекси у вигляді арабських цифр. Причому класам точності, яким відповідають менші границі допустимих похибок, призначають літери, що знаходяться ближче до початку алфавіту, або цифри, що означають менші числа. Позначення класів точності (див. табл. 2.1) наносяться на циферблати, щитки і корпуси ЗВТ з додаванням умовних знаків.

Більшою різноманітністю відзначаються позначення класів точності радіовимірювальних приладів.

Наприклад, класи точності високочастотних генераторів встановлюються в залежності від значення похибок основних параметрів.

Для кожного класу точності встановлюють норми на основні і додаткові похибки, супроводжуючі параметри і параметри дрейфу. Класи точності встановлюють:

– за частотними параметрами – границю допустимої основної похибки встановлення частоти. Наприклад, позначення F_1 означає, що границя допустимої похибки встановлення частоти складає 1 %;

– за параметрами вихідної напруги – границю допустимої основної похибки встановлення опорного рівня вихідної напруги або вихідної потужності. Наприклад, $U_{2\text{дб}}$ або $P_{1,5\text{дб}}$. У випадку, коли похибка встановлення опорного рівня вихідної напруги значна, її не нормують, а клас точності позначають U;

– за параметрами амплітудної модуляції – границю допустимої основної похибки коефіцієнта модуляції, наприклад, AM_5 ;

– за параметрами частотної модуляції – границю допустимої основної похибки встановлення девіації частоти, наприклад, FM_{10} ;

– за параметрами амплітудної імпульсної модуляції, наприклад, PM_{15} .

Наприклад, генератор сигналів Г4-102 належить до класу точності $F_1U_{1\text{дб}}AM_{10}$, генератор сигналів Г4-118 – F_1UAM_{10} , генератор сигналів Г4-116 – $F_1U_{1\text{дб}}AM_{10}FM_{10}$.

Таблиця 2.1

Похибка ЗВТ	Границя допустимої основної похибки	Приклад границі допустимої похибки, %	Позначення
Приведена	$\gamma = \frac{\Delta_o}{X_N} = \pm P$, якщо X_N виражено в одиницях вимірюваної величини	$\gamma = \pm 1,5$	1,5
	$\gamma = \frac{\Delta_o}{X_N} = \pm P$, якщо X_N дорівнює довжині шкали	$\gamma = \pm 0,5$	0,5
Відносна	$\delta = \frac{\Delta_o}{X} = \pm q$	$\delta = \pm 0,5$	0,5
	$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{ X_k }{X} - 1 \right) \right]$	$\delta = \pm \left[0,02 + 0,01 \left(\frac{ X_k }{X} - 1 \right) \right]$	0,02/0,01
Абсолютна	$\Delta_o = \pm a$ або $\Delta_o = \pm (a + bX)$	–	М
Відносна	Похибка встановлена у вигляді графіка, таблиці або формули, що не наведені вище	–	С

Електронно-променеві осцилографи в залежності від точнісних параметрів поділяються на п'ять класів точності: прецизійні, класів 1, 2, 3 і 4.

Класи точності ватметрів надвисокої частоти встановлюються в залежності від форми вираження допустимого значення основної похибки з урахуванням деяких додаткових факторів, наприклад, найбільшого значення коефіцієнта стоячої хвилі (для ватметрів поглиненої потужності) і області коефіцієнта ефективності (для теплових ватметрів) у робочому діапазоні частот.

Класи точності інших радіовимірювальних приладів встановлюються згідно з відповідними стандартами загальних технічних вимог на прилади даного виду або можуть не встановлюватися взагалі.

При написанні розділу були використані джерела [1, 2].

3. ПРАВИЛА ПОДАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

Значення фізичної величини, визначене за відліковим пристроєм ЗВТ або одержане в результаті обробки серії n спостережень, не може служити вірогідною характеристикою результату вимірювань (РВ), оскільки не оцінена похибка цього результату і не подана відповідна їй імовірність. Тому запис результату вимірювання, наприклад, у вигляді $U = 17,83$ В неприпустимий.

Форми подання результатів вимірювань встановлені відповідними нормативними документами (НД): ГОСТ 8.011-72, ГОСТ 8.207-76, МИ 1317-86, МИ 1552-86, РД 50-555-85 та ін.

У залежності від призначення вимірювань і характеру використання їх результатів форми подання результатів вимірювань можуть бути розподілені на дві групи, в яких указується:

- сумарна похибка вимірювань Δ_{Σ} ;
- статистичні характеристики випадкової і систематичної складових похибки вимірювання.

Для подання результатів вимірювань впроваджені шість показників точності:

а) інтервальні характеристики:

1) інтервал, що накриває сумарну похибку вимірювань із заданою імовірністю P :

$$\Delta_{\Sigma} \text{ від } \Delta_{\text{н}} \text{ до } \Delta_{\text{в}}; P = \dots,$$

де $\Delta_{\text{н}}$ і $\Delta_{\text{в}}$ – нижня і верхня границі інтервалу;

2) інтервал, що накриває систематичну складову похибки $\Delta_{\text{с}}$ із заданою імовірністю P :

$$\Delta_{\text{с}} \text{ від } \Delta_{\text{сн}} \text{ до } \Delta_{\text{св}}; P = \dots,$$

де $\Delta_{\text{с}}$ визначається за сукупністю ЗВТ, тобто величина, що вимірюється, знаходиться шляхом статистичної обробки результатів, одержаних за допомогою не одного, а n приладів одного типу, систематичні похибки яких відрізняються одна від одної;

б) числові характеристики систематичної і випадкової складових похибки:

3) $\sigma(\Delta_{\text{с}})$ – середнє квадратичне відхилення (СКВ) систематичної складової похибки $\Delta_{\text{с}}$;

4) $\sigma(\Delta)$ – СКВ випадкової складової похибки Δ ;

5) функція (щільність) розподілу імовірностей випадкової складової похибки $P_{\Delta}(x)$;

6) функція (щільність) розподілу імовірностей систематичної складової похибки $P_{\Delta_{\text{с}}}(x)$.

Довірчі імовірності задаються значеннями $P = 0,95$ для технічних і $P = 0,99$ для високоточних (повірка, калібрування, звірення ЗВТ) вимірювань.

З урахуванням вказаних показників точності застосовуються дві форми подання результатів вимірювань.

Форма 1: $A_{\text{вим}}; \Delta_{\Sigma}$ від $\Delta_{\text{н}}$ до $\Delta_{\text{в}}; P = \dots$.

Тут $A_{\text{вим}}$ – результат вимірювання, виражений в одиницях вимірюваної величини;

Δ_{Σ} – сумарна похибка вимірювання, виражена в тих же одиницях;

$\Delta_{\text{н}}$ і $\Delta_{\text{в}}$ – нижня і верхня границі сумарної похибки в тих же одиницях;

P – встановлена імовірність, з якою похибка вимірювання знаходиться в цих границях.

Наприклад: $V = 121,3$ м/с; Δ_{Σ} від $-1,2$ до $1,7$ м/с; $P = 0,99$.

При симетричних границях сумарної похибки ($\Delta_{\text{н}} = \Delta_{\text{в}} = \Delta$) результат вимірювань може бути поданий у вигляді:

$f = (43,83 \pm 0,25)$ кГц; $P = 0,95$.

Якщо в якості границь похибки вимірювань використовуються межі припустимих похибок ЗВТ, які визначаються при $P = 1$, то довірча імовірність у записі результату вимірювань не вказується:

$U = (100,3 \pm 0,4)$ В.

Звичайно форма 1 застосовується для запису результатів одноразових технічних або контрольних вимірювань.

Форма 2: $A_{\text{вим}}; \Delta_{\text{с}}$ від $\Delta_{\text{сн}}$ до $\Delta_{\text{св}}; P = \dots; \sigma(\Delta); P_{\Delta}(x)$.

У такому записі точність вимірювань зумовлюється інтервалом систематичної складової похибки $\Delta_{\text{с}}$ з верхньою $\Delta_{\text{св}}$ і нижньою $\Delta_{\text{сн}}$ границями, в якому з встановленою імовірністю P перебуває систематична складова похибки $\Delta_{\text{с}}$, а також середнім квадратичним відхиленням $\sigma(\Delta)$ випадкової складової похибки Δ і стандартною апроксимацією функції (щільності) розподілу імовірностей $P_{\Delta}(x)$ випадкової складової похибки.

Наприклад: $f = 10,75$ кГц; $\Delta_{\text{сф}}$ від $0,15$ до $0,23$ кГц; $P = 0,95$;

$\sigma(\Delta) = 0,20$ кГц; норм.

Стандартні апроксимації функцій (щільностей) розподілу імовірностей, що встановлені ГОСТ 8.011-72 і використовуються на практиці замість реальних (визначення і використання яких суттєво ускладнює обробку результатів вимірювань), наведені в табл. 1.5. Стандартними вони називаються тому, що їх площа (в границях $\pm\Delta$) дорівнює одиниці.

Форма 2 рекомендується у випадках, коли одержані результати вимірювань підлягають аналізу або використовуються як проміжні при визначенні результатів і похибок опосередкованих або сукупних вимірювань.

Результат вимірювання і його похибка завжди обчислюються з певною помилкою, тому вірогідність їх значущих цифр неоднакова.

Значущими цифрами в записі деякого числа називаються цифри, починаючи від першої зліва, яка відрізняється від нуля. Наприклад, у запису похибки вимірювання напруги $\Delta U = \pm 0,0806$ В значущими є три цифри – 8, 0 і 6, а в запису похибки вимірювання струму $\Delta I = \pm 23,140$ мА – п'ять: 2, 3, 1, 4, 0.

При поданні результату вимірювання (обчислень) залишати більше цифр, ніж треба, не тільки занадто, але й помилково, оскільки може скластися враження, що результат одержаний з більш високою точністю, ніж це є насправді. Прийнято залишати, принаймі, ще одну цифру після тієї, яку можна вважати вірогідною.

Приклад 1. Для вимірювання швидкості руху тіла за допомогою рулетки і точного годинника з відносною похибкою $\delta_v = \pm 1\%$ було визначено, що тіло просунулося на 10 см "у точності" за 3 с. Скільки цифр треба залишити після коми при записі результату?

Результат вимірювання:

$$V = 10 \text{ см/3 с} \approx 3,3333... \text{ см/с.}$$

$$\delta_v = \Delta V \cdot 100 / V, \text{ звідки } \Delta V = \delta_v \cdot V / 100 \approx 10,03 \text{ см/с.}$$

Так як істинне значення V перебуває між 3,30 і 3,36 см/с, вірогідними цифрами результату є перші дві, третя ж ненадійна, тому результат треба записувати у вигляді $V \approx 3,33$ см/с.

Приклад 2. Додати до швидкості $V_1 = 3,33$ см/с швидкість $V_2 = 4,51$ м/с, яка визначена з відносною похибкою 1%, і записати результат.

$$V_1 + V_2 = (3,33 + 4,51) \text{ см/с} = 454,33 \text{ см/с.}$$

Така відповідь означає, що похибка результату менше, ніж 0,01%. Щоб правильно урахувати похибку, результат треба записати у вигляді

$$V_1 + V_2 \approx 454 \text{ см/с.}$$

Приклад 3. Визначити відносну похибку запису чисельних значень A_i : 9; 9,0; 99; 9,9; 0,99; 0,099; 0,999.

Як відомо, $\delta_i = \Delta \cdot 100 / A_i$, де Δ – абсолютна похибка (при записі числового значення не перевищує одиниці молодшого розряду).

$$\text{Тому можна записати } \delta_1 \approx \pm 10\%, \delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = \delta_5 = \delta_6 \approx \pm 1\%, \delta_7 \approx \pm 0,1\%.$$

Розглянуті приклади дозволяють зробити такі висновки:

– відносна похибка запису результату вимірювання максимально представлених числових значень, що утримують дві значущі цифри, не перевищує 1,2%;

– похибка запису PB визначається похибкою вимірювань.

При поданні результатів вимірювань у наведених вище формах керуються такими правилами.

Правило 1.

Кількість значущих цифр похибки (або будь-якого іншого показника точності) повинна бути не більше двох.

На практиці в числовому значенні похибки вимірювань дві значущі цифри утримуються в таких випадках:

– при проведенні особливо відповідальних вимірювань або вимірювань, які виконуються з високою точністю (наприклад, при повірці або атестації ЗВТ);

– якщо з одержаними похибками передбачається проводити подальші розрахунки;

– якщо перша значуща цифра похибки 1 або 2.

У всіх інших випадках похибка округляється до однієї значущої цифри.

Приклади запису похибок:

Вірно	Невірно
$\delta_v = \pm 0,025$	$\delta_v = \pm 0,0246$
$\Delta U = \pm 0,3$ В	$\Delta U = \pm 0,341$ В
$\Delta f = \pm 6$ кГц	$\Delta f = \pm 5,74$ кГц
$\delta_R = \pm 10\%$	$\delta_R = \pm 10,4\%$

Правило 2.

Числові значення похибки і результату вимірювань повинні закінчуватись цифрою одного й того ж розряду.

Наприклад, у записі результату вимірювання напруги $U = (12,74 \pm 0,4)$ В; $P = 0,95$ допущена помилка: чисельне значення результату вимірювань не округлено, тобто не закінчується цифрою того ж розряду, що й похибка.

Правильне подання результату вимірювання повинно мати вигляд:

$$U = (12,7 \pm 0,4) \text{ В}; P = 0,95.$$

Таким чином, спочатку за правилом 1 округляється похибка вимірювання, а потім за правилом 2 – результат вимірювання.

Отриманий результат вимірювання можна подати у вигляді:

$$U = 12,7 \text{ В} \pm 0,4 \text{ В}; P = 0,95.$$

При написанні розділу були використані джерела [1...3].

4. ОСНОВНІ СПОСОБИ ДОДАВАННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ

Додавання похибок вимірювань виконується при вирішенні таких завдань:

- оцінюванні похибки вимірювальної установки на основі похибок ЗВТ, що входять до її складу;
- визначенні похибок вимірювань, що обумовлені комплексним впливом декількох величин;
- оцінюванні похибки опосередкованого вимірювання;
- обчисленні границь допустимих похибок ЗВТ;
- знаходженні сумарної похибки за відомими значеннями систематичної і випадкової складових похибок;
- визначенні сумарної похибки перетворення сигналу в вимірювальному каналі (тракті) за рахунок складових, що обумовлені неточностями передавання сигналу або його перетворення в різних вузлах тракту.

При додаванні похибок застосовуються три основні способи (додаватись можуть як відносні, так і абсолютні похибки).

Спосіб арифметичного додавання похибок передбачає обчислення сумарної похибки за формулою:

$$\delta_{\Sigma} = \sum_{k=1}^m |\delta_{A_k}|, \quad (4.1)$$

де $\delta_{A_k} = \Delta_{A_k}/A_k$ – k -та відносна похибка, що додається;

m – кількість похибок, що додаються.

Додавання за даним способом призводить до збільшеного, у порівнянні з дійсним, значення сумарної похибки, яке тим більше, чим більше число m похибок, що додаються.

Тому на практиці цей спосіб застосовується при умові $m \leq 3$.

Спосіб геометричного додавання похибок передбачає обчислення сумарної похибки за формулою:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{k=1}^m \delta_{A_k}^2}. \quad (4.2)$$

Додавання за даним способом призводить до зниженого, у порівнянні з дійсним, значення сумарної похибки. Тому на практиці в формулу (4.2) вводиться коригувальний коефіцієнт ($k = 1,1$ при $P = 0,95$ і $k = 1,4$ при $P = 0,99$):

$$\delta'_k = k \sqrt{\sum_{k=1}^m \delta_{A_k}^2}. \quad (4.3)$$

Рекомендується застосовувати цей спосіб при $m \geq 4$.

Спосіб моментів передбачає обчислення сумарної похибки за однією з формул для оцінювання похибки опосередкованого вимірювання, коли встановлена залежність $Y = \varphi(A_1, A_2, \dots, A_k, \dots, A_m)$ і обчислені (або відомі) похибки прямих вимірювань аргументів.

Даний спосіб дозволяє одержати більш точне у порівнянні з вказаними вище способами значення сумарної похибки.

При оцінюванні границь похибки результату вимірювання сумарну похибку визначають в залежності від відношення сумарної невилученої систематичної похибки Δ_s до оцінки середнього квадратичного відхилення результату вимірювання σ_x за правилом:

$$\Delta = \begin{cases} \overset{\circ}{\Delta}_{\bar{x}}, & \text{якщо } \Delta_s/\overset{\circ}{\sigma}_{\bar{x}} < 0,8; \\ \Delta_s, & \text{якщо } \Delta_s/\overset{\circ}{\sigma}_{\bar{x}} > 8; \\ k \cdot \sigma_{\Sigma}, & \text{якщо } 0,8 \leq \Delta_s/\overset{\circ}{\sigma}_{\bar{x}} \leq 8, \end{cases} \quad (4.4)$$

де Δ_x обчислюється за відомою формулою;

$\Delta_{s\Sigma}$ визначається з (4.2);

$$k_{\Sigma} = \frac{\overset{\circ}{\Delta}_x + \Delta_{s\Sigma}}{\overset{\circ}{\sigma}_{\bar{x}} + \sqrt{\sum_{k=1}^m \Delta_{sk}^2/3}}; \quad (4.5)$$

$$\overset{\circ}{\sigma}_{\Sigma} = \sqrt{\overset{\circ}{\sigma}_{\bar{x}}^2 + \sum_{k=1}^m \Delta_{s\Sigma}^2/3}. \quad (4.6)$$

Таким чином, при обчисленні сумарних похибок використовуються різні способи: арифметичного, геометричного додавання та спосіб моментів.

При написанні розділу були використані джерела [1,2].

5. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

При обробці результатів вимірювального експерименту встановлення закону розподілу (ЗР) вимірюваної величини є достатньо трудомісткою процедурою [4], тому на практиці звичайно використовуються спрощені методики.

5.1. Обробка результатів однократних вимірювань

Обробка результатів однократних вимірювань виконується в такій послідовності:

- 1) за результат вимірювання приймають будь-який з декількох відліків вимірюваної величини, що співпадають (мажоритарний вибір);
- 2) за класом точності засобу вимірювання, що використовується, відтворюють форму виразу границі основної допустимої похибки; знаходять значення основної абсолютної похибки ЗВТ;
- 3) при необхідності визначають додаткові похибки ЗВТ;
- 4) підсумовують основну і додаткові похибки ЗВТ у відповідності до (4.1) або (4.2);
- 5) записують результат вимірювання відповідно до вимог стандартів (розділ 3).

5.2. Обробка результатів багатократних вимірювань

Обробка групи результатів спостережень включає в себе такі операції:

- 1) вилучають відомі систематичні похибки з результатів спостережень;
- 2) обчислюють середнє арифметичне (1.22) виправлених результатів спостережень, яке приймають за результат вимірювань;
- 3) обчислюють оцінку (1.24) середнього квадратичного відхилення результату спостережень;
- 4) вилучають надмірні похибки за методикою п. 1.4.4;
- 5) обчислюють оцінку (1.23) середнього квадратичного відхилення результату вимірювань;
- 6) обчислюють довірчі границі похибки результату вимірювання у відповідності до (1.25);
- 7) при необхідності враховують систематичну невиключену похибку за правилами (4.4) – (4.6).
- 8) записують результат вимірювання у відповідності до вимог стандартів.

При написанні розділу були використані джерела [1...3].

6. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ТИПОВИХ ЗАДАЧ

Задача 1.

Оцінити приведену, абсолютну та відносну похибки вимірювання постійної напруги приладом Ц4311 за шкалою з межою 150 В, якщо показання приладу складають 130 та 70 В. Записати результати вимірювань.

Розв'язання.

1. Клас точності приладу позначений як 0,5, тобто з табл. 2.1 приведена похибка $\gamma = \pm 0,5\%$, а вираз для її обчислення

$$\gamma = \frac{\Delta_0}{X_N} = \pm P,$$

звідки абсолютна похибка

$$\Delta U = \gamma \cdot U_N / 100 = 0,5 \cdot 150 / 100 = \pm 0,75 \text{ В.}$$

2. Відносні похибки

$$\delta_1 = \Delta U \cdot 100 / U_1 = 0,75 \cdot 100 / 130 = \pm 0,57\%;$$

$$\delta_2 = \Delta U \cdot 100 / U_2 = 0,75 \cdot 100 / 70 = \pm 1,07\%.$$

3. Результати вимірювань:

$$U_1 = (130 \pm 8) \text{ В};$$

$$U_2 = (70 \pm 8) \text{ В.}$$

Висновки:

- абсолютна похибка одного порядку з приведеною;
- співставлення відносних похибок показує, що перше вимірювання точніше другого; таке співставлення можливе тільки за відносними похибками;
- вимірювання доцільно виконувати, виходячи з міркувань, щоб результат знаходився в останній третині або чверті шкали.

Задача 2.

Оцінити приведену, абсолютну та відносну похибки вимірювання постійного струму приладом М4200 за шкалою з межами – 150 ... 0... 150 мА, якщо показання приладу складають 150 та – 50 мА. Записати результати вимірювань.

Розв'язання.

1. Клас точності приладу позначений як 2,5, тобто з табл. 2.1 приведена похибка $\gamma = \pm 2,5\%$, а вираз для її обчислення

$$\gamma = \frac{\Delta_0}{X_N} = \pm P,$$

звідки абсолютна похибка

$$\Delta I = \gamma \cdot I_N / 100 = 2,5 \cdot 300 / 100 = \pm 0,75 \text{ мА.}$$

2. Відносні похибки

$$\delta_1 = \Delta I \cdot 100 / I_1 = 0,75 \cdot 100 / 150 = \pm 5\%;$$

$$\delta_2 = \Delta I \cdot 100 / I_2 = 0,75 \cdot 100 / 50 = \pm 15\%.$$

3. Результати вимірювань:

$$I_1 = (150,0 \pm 0,8) \text{ mA};$$

$$I_2 = (-50,0 \pm 0,8) \text{ mA}.$$

Висновки аналогічні попереднім.

Задача 3.

Визначити абсолютну та відносну похибки вимірювань постійного струму цифровим вольтметром (ЦВ) на діапазонах вимірювання 10, 100 та 1000 В. Вимірювані значення відповідно рівні 1,612; 1,61; 1,6 В. Записати результати вимірювань.

Розв'язання.

З технічного опису ЦВ $\Delta U = (0,001 U_X + \text{од. молодшого розряду})$.

$$\Delta U_1 = 0,001 \cdot 1,612 + 0,001 = 2,612 \cdot 10^{-3} = \pm 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ В}.$$

$$\Delta U_2 = 0,001 \cdot 1,61 + 0,01 = 0,1161 = \pm 0,12 \text{ В}.$$

$$\Delta U_3 = 0,001 \cdot 1,6 + 0,1 = 0,1016 \cdot 10^{-3} = \pm 0,10 \text{ В}.$$

$$\delta_1 = \Delta U_1 \cdot 100 / U_1 = 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot 100 / 1,612 = 0,16129 = \pm 0,16\%.$$

$$\delta_2 = \Delta U_2 \cdot 100 / U_2 = 0,12 \cdot 100 / 1,61 = 0,7453 = \pm 0,7\%.$$

$$\delta_3 = \Delta U_3 \cdot 100 / U_3 = 0,10 \cdot 100 / 1,6 = 6,25 = \pm 6\%.$$

Висновок: Правильний вибір діапазону вимірювань дозволяє підвищити точність вимірювань.

Результати вимірювань:

$$U_1 = (21,6120 \pm 0,0026) \text{ В};$$

$$U_2 = (1,61 \pm 0,12) \text{ В};$$

$$U_3 = (1,60 \pm 0,10) \text{ В}.$$

Задача 4.

Оцінити можливість використання вольтметра В7-15 для вимірювання напруги мережі живлення $U = 220 \text{ В}$ при температурі $4 \text{ }^\circ\text{C}$ з відносною похибкою, що за абсолютною величиною не перевищує 7 %.

Розв'язання.

1. З паспорту приладу приведена похибка $\gamma = \pm 4\%$; $U_N = 300 \text{ В}$; додаткова похибка за рахунок температури складає $0,3\gamma$ на кожні $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Додаткова приведена похибка за рахунок температури

$$\gamma_d = 2 \cdot 0,3\gamma = 2 \cdot 0,3 \cdot 4 = \pm 2,4\%.$$

3. Сумарна приведена похибка $\gamma_\Sigma = \gamma + \gamma_d = 2,4 + 4 = \pm 6,4\%$.

4. Абсолютна похибка $\Delta U = \gamma_\Sigma \cdot U_N / 100 = 6,4 \cdot 300 / 100 = \pm 19,2 \text{ В}$.

5. Відносна похибка $\delta = \Delta U \cdot 100 / U = 19,2 \cdot 100 / 220 = 8,72\% > 7\%$.

Висновок: вольтметр В7-15 використовувати не можна, так як він не забезпечує потрібну точність вимірювання.

Зауваження: стандарт вимагає співставлення за абсолютними похибками, що пов'язано з межами вимірювання ЗВТ.

Задача 5.

Вибрати вольтметр для вимірювання напруги мережі живлення $U = 220 \text{ В}$ в нормальних умовах з відносною похибкою, що за абсолютною величиною не перевищує $4,4 \text{ В}$.

Розв'язання.

1. Вибираємо зі стандартизованого ряду меж вимірювань (шкал) $U_N = 300 \text{ В}$.

2. Обчислюємо розрахункове значення приведеної похибки

$$\gamma_{\text{розрах}} = \Delta U \cdot 100 / U_N = 4,4 \cdot 100 / 300 \approx \pm 1,5\%.$$

3. Вибираємо найближче менше значення приведеної похибки зі стандартизованого ряду, тобто $\gamma = \pm 1,0\%$.

Висновок: Для вимірювань потрібен вольтметр класу точності 1,0 з межею вимірювань 300 В .

Задача 6.

У процесі п'яти спостережень опору резистору R отримані результати, наведені в другому стовпчику табл. 6.1. Визначити та записати результат вимірювання.

Стовпчики 3 та 4 табл. 6.1 заповнюються в ході розв'язання задачі.

Таблиця 6.1

i	$R_i, \text{ Ом}$	$\Delta R_i = R_i - R, \text{ Ом}$	$\Delta R_i^2, \text{ Ом}^2$
1	69,5	-0,1	0,01
2	69,7	+0,1	0,01
3	70,5	+0,9	0,81
4	70,3	+0,7	0,49
5	68,0	-1,6	2,56
Σ	348,0	0	3,88

Розв'язання.

$$1. R = 348,0 / 5 = 69,6 \text{ Ом};$$

$$2. \tilde{\sigma}_X = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} = \sqrt{\frac{1}{4} 3,88} = 0,985 \text{ Ом};$$

3. З табл. 1.9 для $n = 5$ і $P = 0,95$ $K_T = 1,87$;

$$\Delta_T = K_T \cdot \tilde{\sigma}_X = 1,87 \cdot 0,985 = 1,84 \text{ Ом};$$

для підозрюваного значення $\Delta R_5 = 1,6 < 1,84$, тобто R_5 не містить надмірної похибки;

$$4. \tilde{\sigma}_{\bar{X}} = \tilde{\sigma}_X / \sqrt{n} = 0,985 / \sqrt{5} = 0,44 \text{ Ом};$$

5. З табл. 1.7 для $n = 5$ і $P = 0,95$ $t = 2,77$;

$$\overset{\circ}{\Delta}_x = t \cdot \overset{\circ}{\sigma}_{\bar{x}} = 2,77 \cdot 0,44 = \pm 1,22 \text{ Ом.}$$

6. $R = (69,6 \pm 1,2) \text{ Ом}$; $P = 0,95$.

На практиці іноді, при великій кількості однократних вимірювань ($n > 30$), для виявлення промахів (результатів вимірювань, які містять надмірну похибку) використовують критерій “три сигма” у формулюванні: якщо модуль відхилення i -го вимірювання $|x_i - X|$ більше трьох оцінок середнього квадратичного відхилення результату вимірювань $\sigma(X)$, то i -те вимірювання є промахом, і його треба вилучити з результату вимірювань; при $n \leq 30$ застосовують критерій “бета-сигма”: якщо модуль відхилення i -го вимірювання $|x_i - X|$ більше добутку коефіцієнта промаху і середньоквадратичного відхилення $\beta\sigma_x$, то i -те вимірювання є промахом, і його треба вилучити з результату вимірювань. Значення коефіцієнта промаху β в залежності від n та рівня значимості α наведені в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

α	n									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
0,10	1.15	1,42	1,60	1,73	1,89	1,91	1,98	2,03	2,09	
0,05	1,15	1,46	1,67	1,82	1,97	2,03	2,11	2,18	2,23	
α	n									
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
0,10	2,13	2,17	2,21	2,25	2,28	2,31	2,34	2,36	2,38	
0,05	2,29	2,33	2,37	2,41	2,44	2,48	2,50	2,53	2,56	

Задача 7.

Виконано 5 однократних вимірювань напруги, наведених в табл. 6.3.

Таблиця 6.3

I	1	2	3	4	5
$U_i, \text{В}$	124	126	123	125	132

Перевірити вимірювання за критерієм “бета-сигма” на наявність надмірної похибки з рівнем значимості $\alpha = 0,1$. Визначити інтервальну оцінку результату вимірювання з довірчою імовірністю $P = 0,9$.

Розв’язання.

1. Визначаємо точечну оцінку результату вимірювань:

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i = \frac{124+126+123+125+132}{5} = 126 \text{ В.}$$

2. Розраховуємо середньоквадратичне відхилення результату спостережень:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2} = \sqrt{\frac{4+0+9+1+36}{4}} = \sqrt{\frac{50}{4}} = \sqrt{12,5} = 3,53 \text{ В.}$$

3. На наявність надмірної похибки перевіряємо п’яте вимірювання:

$$(U_5 - \bar{U}) = 132 - 126 = 6 \text{ В.}$$

З табл. 6.2 для $n = 5$ і рівня значимості $\alpha = 0,1$ знаходимо $\beta = 1,60$.

Тоді $\beta \cdot \sigma = 1,6 \cdot 3,53 = 5,64$.

Оскільки $(U_5 - \bar{U}) = 6 > \beta \cdot \sigma = 5,64$, п’яте вимірювання містить надмірну похибку (є аномальним) і його треба відкинути. Результати чотирьох вимірювань занесено в табл. 6.4.

Таблиця 6.4

I	1	2	3	4
$U_i, \text{В}$	124	126	123	125

4. Визначаємо точечну оцінку результату вимірювань:

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i = \frac{124+126+123+125}{4} = 124,5 \text{ В.}$$

5. Розраховуємо середньоквадратичне відхилення результату спостережень:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2} = \sqrt{\frac{0,25+2,25+2,25+0,25}{3}} = \sqrt{1,66} = 1,29 \text{ В.}$$

6. Перевіряємо на наявність надмірної похибки друге та третє вимірювання:

$$(U_2 - \bar{U}) = (U_3 - \bar{U}) = 1,5 \text{ В.}$$

З табл. 6.2 для $n = 4$ і рівня значимості $\alpha = 0,1$ знаходимо $\beta = 1,42$.

Тоді $\beta \cdot \sigma = 1,42 \cdot 1,29 = 1,83$.

Оскільки $(U_2 - \bar{U}) = 1,5 < \beta \cdot \sigma = 1,83$, в однократних вимірюваннях надмірних похибок немає, і всі чотири вимірювання треба враховувати в результаті вимірювань.

7. Знаходимо довірчий інтервал.

З табл. 1.7 для $n = 4$ і $P = 0,9$ знаходимо $t = 2,35$, звідки

$$\Delta = \pm t \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 2,35 \cdot \frac{1,29}{\sqrt{4}} = 1,516 \text{ В.}$$

9. Результат вимірювань:

$$U = (124,5 \pm 1,5) \text{ В, } P = 0,9.$$

Задача 8.

Результат обробки $n = 16$ значень ємності конденсатора $C = 185$ пФ. Середнє квадратичне відхилення результатів спостережень $\sigma_C = 9$ пФ. Визначити довірчу похибку та записати результат технічного вимірювання.

Розв'язання.

1. За (1.23) $\sigma_C = \sigma_C / \sqrt{n} = 9 / \sqrt{16} = 9 / 4 = 2,25$ пФ.
2. З табл. 1.7 для $n = 16$ і $P = 0,95$ $t = 2,13$;
 $\Delta = t \cdot \sigma_C = 2,13 \cdot 2,25 = 4,795$ пФ.
3. Результат вимірювання $C = (185 \pm 5)$ пФ; $P = 0,95$.

Задача 9.

Оцінити довірчу похибку результату вимірювань індуктивності $L = 15,78$ мГн, отриманого при $n = 40$ спостереженнях. Середнє квадратичне відхилення результатів вимірювань $\sigma_C = 0,01$ мГн. Записати результат високоточного вимірювання.

Розв'язання.

1. З табл. 1.6 для $P = 0,99$ $t \approx 2,57$;
 $\Delta = t \cdot \sigma_C = 2,57 \cdot 0,01 = 0,0257$ мГн.
3. Результат вимірювання $L = (15,780 \pm 0,026)$ мГн; $P = 0,99$.

Задача 10.

У результаті обробки $n = 20$ спостережень частоти отримані середнє значення частоти $f = 156,08$ кГц, оцінка середнього квадратичного відхилення результату спостережень $\sigma_f = 9,21$ кГц, невиключена систематична похибка вимірювання $\Delta_{Sf} = 1,2$ кГц. Оцінити похибки та записати результат технічного вимірювання.

Розв'язання.

1. Визначаємо оцінку середнього квадратичного відхилення результату вимірювань
 $\sigma_f = \sigma_f / \sqrt{n} = 9,21 / \sqrt{20} = 9,21 / 4,472 = 2,06$ кГц.
2. Розраховуємо відношення $\Delta_{Sf} / \sigma_f = 1,2 / 2,06 \approx 0,58$.
3. Перевіряємо умову (4.4)
 $\Delta_{Sf} / \sigma_f = 0,58 < 0,8$,
тобто невиключеною систематичною похибкою вимірювання можна нехтувати.
4. Розраховуємо границі похибки результату вимірювань
 $\Delta\Sigma = \Delta_f = t \sigma_f$,
де $t = 2,09$ з табл. 1.7 для $n = 20$ та $P = 0,95$.
 $\Delta\Sigma = 2,09 \cdot 2,06 = \pm 4,4$ кГц.
5. Відносна похибка
 $\delta_f = \Delta\Sigma / f = 4,4 / 156,08 = 0,0276 \approx \pm 0,028$.
6. $f = (156 \pm 4)$ кГц; $P = 0,95$.

Задача 11.

У результаті обробки $n = 100$ спостережень частоти отримані середнє значення частоти $f = 156,08$ кГц, оцінка середнього квадратичного відхилення результату спостережень $\sigma_f = 1,1$ кГц, невиключена систематична похибка вимірювання $\Delta_{Sf} = 1,2$ кГц. Оцінити похибки та записати результат технічного вимірювання.

Розв'язання.

1. Визначаємо оцінку середнього квадратичного відхилення результату вимірювань
 $\sigma_f = \sigma_f / \sqrt{n} = 1,1 / \sqrt{100} = 1,1 / 10 = 0,11$ кГц.
2. Розраховуємо відношення $\Delta_{Sf} / \sigma_f = 1,2 / 0,11 \approx 10,9$.
3. Перевіряємо умову (4.4)
 $\Delta_{Sf} / \sigma_f = 10,9 > 8$,
тобто випадковою похибкою вимірювання можна нехтувати.
4. Розраховуємо границі похибки результату вимірювань
 $\Delta\Sigma = \Delta_{Sf} = 1,2$ кГц.
5. Відносна похибка
 $\delta_f = \Delta\Sigma / f = 1,2 / 156,08 = 0,0077 \approx \pm 0,008$.
6. $f = (156,080 \pm 0,008)$ кГц; $P = 0,95$.

Задача 12.

Оцінити похибку вимірювання сили струму амперметром з внутрішнім опором R_A у ланцюгу з опором R_H .

Розв'язання.

1. Значення струму в ланцюзі визначається як
 $I = U / R_H$.
2. Після включення амперметра значення струму
 $I_1 = U / R_A + R_H$.
3. Відносна похибка вимірювання струму
 $\delta_I = [(U / R_A + R_H) - (U / R_H)] / (U / R_H) = [R_H / (R_A + R_H)] - 1 = -1 / (1 + R_H / R_A)$.

Висновки:

- знак “мінус” показує, що виміряне значення струму менше дійсного;
- похибка δ_I методична і не залежить від класу точності амперметра;
- для зменшення похибки δ_I треба виконати умову $R_A \ll R_H$.

Задача 13.

Оцінити похибку вимірювання падіння напруги на опорі R_H вольтметром з внутрішнім опором R_V у ланцюзі з джерелом ЕРС.

Розв'язання.

1. Значення падіння напруги на опорі в ланцюзі з урахуванням внутрішнього опору джерела ЕРС визначається як
 $U = I \cdot R_H = E \cdot R_H / (R_E + R_H)$.

2. Після включення вольтметра значення напруги

$$U_1 = I \cdot (R_H \cdot R_V) / (R_H + R_V).$$

3. Відносна похибка вимірювання напруги

$$\delta_U = [I (R_H \cdot R_V) / (R_H + R_V) - E \cdot R_H / (R_E + R_H)] / [E \cdot R_H / (R_E + R_H)] = \\ = E \cdot R_H \cdot R_V [(R_H \cdot R_V / (R_H + R_V) + R_E) \cdot (R_H + R_V)] = \\ = -1 / (1 + R_V / R_H + R_V / R_E).$$

Висновки:

- знак “мінус” показує, що виміряне значення напруги менше дійсного;
- похибка δ_U методична і не залежить від класу точності вольтметра;
- для зменшення похибки δ_U треба виконати умову $R_V \gg R_H$.

Задача 14.

Оцінити похибку опосередкованого вимірювання опору R_X вольтметром і амперметром за схемою рис. 1.2.

Розв'язання.

1. Значення опору

$$R_X = U / (I - I_V) \quad R_H = E \cdot R_H / (R_E + R_H).$$

2. Відносна похибка вимірювання опору

$$\delta_R = [U / (I - I_V) - U / I] / (U / I) = [U \cdot I - U (I - I_V)] \cdot I / I(I - I_V) \cdot U = \\ = -I_V / (I - I_V) = -U / (I \cdot R_V - U).$$

Висновки:

- знак “мінус” показує, що виміряне значення опору менше дійсного;
- похибка δ_K залежить від класів точності вольтметра та амперметра;
- для зменшення похибки δ_U треба виконати умову $R_V \gg R_X$;
- наведену схему включення приладів доцільно використовувати при вимірюванні малих опорів.

Задача 15.

Оцінити похибку опосередкованого вимірювання потужності на постійному струмі вольтметром і амперметром без урахування та з урахуванням методичної похибки за схемами рис. 1.2 та рис. 1.3. Показання приладів: $U = 200$ В, $I = 0,5$ А; $R_V = 2000$ Ом, $R_A = 1$ Ом.

Розв'язання.

1. Потужність без урахування методичної похибки визначається як

$$P = U \cdot I = 200 \cdot 0,5 = 100 \text{ Вт.}$$

2. Відносна похибка без урахування методичної визначається за (4.1)

$$\delta_P = \delta_U + \delta_R.$$

3. Значення опору

$$R_H = U / I = 200 / 0,5 = 400 \text{ Ом.}$$

4. Відносна методична похибка для схеми рис. 1.2

$$\delta_P = R_H / R_V = 400 / 2000 = 0,2.$$

5. Відносна методична похибка для схеми рис. 1.3

$$\delta_P = R_A / R_H = 1 / 400 = 0,0025.$$

Висновки:

- похибка опосередкованого вимірювання потужності без урахування методичної похибки складається з похибок приладів;
- методичні похибки в обох випадках не залежать від похибок (класів точності) приладів;
- схему рис. 1.2 доцільно застосовувати для вимірювань малих потужностей;
- схему рис. 1.3 доцільно застосовувати для вимірювань великих потужностей.

Задача 16.

Визначити абсолютну і відносну похибки та записати результат опосередкованого технічного вимірювання коефіцієнта передавання поділювача на резисторах $R_1 = 100$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, номінали яких виміряні з відносною похибкою $\delta_{R_1} = \delta_{R_2} = \pm 5$ %.

Розв'язання.

1. За рівнянням вимірювання

$$K = R_2 / (R_2 + R_1) = 10 / (100 + 10) = 0,091.$$

2. За (1.20) абсолютна похибка

$$\Delta_K = \left| \frac{\partial K}{\partial R_1} \Delta R_1 \right| + \left| \frac{\partial K}{\partial R_2} \Delta R_2 \right| = \left| -\frac{R_2 \cdot \Delta R_1}{(R_1 + R_2)^2} \right| + \left| \frac{R_1 \cdot \Delta R_2}{(R_1 + R_2)^2} \right| = \frac{R_1 \cdot \Delta R_2 + R_2 \cdot \Delta R_1}{(R_1 + R_2)^2}.$$

$$\Delta R_1 = \delta_{R_1} \cdot R_1 / 100; \quad \Delta R_2 = \delta_{R_2} \cdot R_2 / 100.$$

$$\Delta_K = \frac{R_1 \cdot \delta_{R_2} \cdot R_2 / 100 + R_2 \cdot \delta_{R_1} \cdot R_1 / 100}{(R_1 + R_2)^2} = \frac{R_1 \cdot R_2 (\delta_{R_2} + \delta_{R_1}) / 100}{(R_1 + R_2)^2} = \\ = \frac{100 \cdot 10 (5 + 5) / 100}{(100 + 10)^2} \approx 0,0083.$$

3. $\delta_K = \Delta K \cdot 100 / K = 0,0083 \cdot 100 / 0,091 \approx \pm 9$ %.

4. $K = 0,091 \pm 0,008$; $P = 0,95$.

Задача 17.

Записати результат вимірювання опору резистора $R = 4070$ Ом електронним вольтметром В7-15.

Розв'язання.

1. За позначенням класу точності 2,5 записуємо вираз для приведеної похибки:

$$\gamma = \Delta L \cdot 100 / L_{\text{шк}},$$

де ΔL – абсолютна похибка в мм;

$L_{\text{шк}} = 68$ мм – довжина шкали (з технічного опису).

2. Визначаємо абсолютну похибку:

$$\Delta L = \gamma \cdot L_{\text{шк}} / 100 = 2,5 \cdot 68 / 100 = 1,7 \text{ мм.}$$

3. Розраховуємо чутливість омметра на вимірюваній позначці з використанням номограми (графіка), наведеної в технічному описі приладу (рис. 6.1):

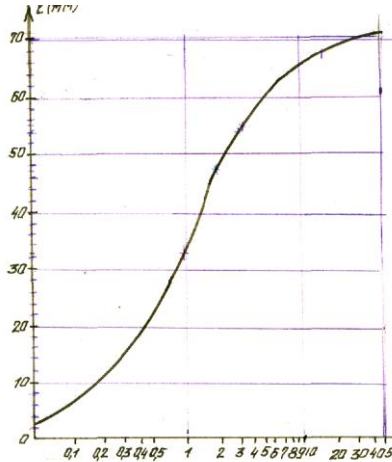


Рис. 6.1

$$s = (L_2 - L_1) / (R_2 - R_1),$$

де $(L_2 - L_1)$ – відстань в мм між двома відмітками шкали, для яких виміряне значення R знаходиться усередині значень опору R_2 та R_1 , відповідних цим відміткам значень опору

$$s = (60,7 - 54) / (5000 - 3000) = 0,00335 \text{ мм/Ом.}$$

4. Розраховуємо абсолютну похибку в омах

$$\Delta R = \Delta L / s = 1,7 / 0,00335 \approx \pm 507 \text{ Ом.}$$

5. Результат вимірювання:

$$R = (4,1 \pm 0,5) \text{ кОм.}$$

Задача 18.

При вимірюванні напруги постійного струму цифровим вольтметром В7-16 на межі вимірювання $U_K = 100 \text{ В}$ одержане значення $U_X = 36,45 \text{ В}$. Визначити відносну та абсолютну похибки вимірювання та записати результат.

Розв'язання.

1. З технічного опису приладу

$$\delta_U = \pm (0,05 + 0,05 U_K / U_X).$$

$$\delta_U = \pm (0,05 + 0,05 \cdot 100 / 36,45) = \pm 0,18 \text{ \%}.$$

$$2. \Delta U = \delta_U U_X / 100 = 0,18 \cdot 36,45 / 100 = \pm 0,0685 \text{ В.}$$

$$3. U = (36,45 \pm 0,07) \text{ В.}$$

Задача 19.

Виміряти частоту 2,5 МГц частотоміром ЧЗ-54 з точністю $\varepsilon = 10^4$, якщо $\delta f_{\text{кв}} = \pm 5 \cdot 10^{-6}$ за 6 місяців.

Час відліку, що встановлюється, $T_B = 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 1, 10, 100 \text{ с}$.

Розв'язання.

$$1. \delta f_{\text{доп}} = 1 / |10^4| = 10^{-4}.$$

2. За технічним описом час відліку розраховується як

$$T_{\text{впорз}} = \frac{1}{f_x (\delta_{\text{доп}} - \delta f_{\text{кв}})} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^6 (10^{-4} - 1 \cdot 10^{-5})} = 0,0042 \text{ с.}$$

3. Вибираємо найближче більше значення з ряду $T_B = 0,01 \text{ с}$.

Задача 20.

Оцінити похибку вимірювання частоти частотоміром ЧЗ-54, якщо результат вимірювання 2502,437 кГц, $\delta f_{\text{кв}} = \pm 5 \cdot 10^{-7}$, $T_B = 1 \text{ с}$. Записати результат вимірювання.

Розв'язання.

1. За технічним описом

$$\delta f_x = \left(\delta f_{\text{кв}} + \frac{1}{T_{\text{сч}} \cdot f_x} \right) = \left(5 \cdot 10^{-7} + \frac{1}{2,5 \cdot 10^6 \cdot 1} \right) = \pm 9 \cdot 10^{-7}.$$

$$2. \Delta f_x = \delta f_x \cdot f_x = 9 \cdot 10^{-7} \cdot 2,5 \cdot 10^6 = \pm 2,3 \text{ Гц.}$$

$$3. f_x = (2502437,0 \pm 2,3) \text{ Гц.}$$

Задача 21.

Виміряти період гармонічного сигналу частотоміром ЧЗ-54 з відносною похибкою $\delta_T \leq 0,05\%$, якщо $T_M = T_{\text{ЕТ}}$ має наступні значення: $10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}, 10^{-7} \text{ с}$; $T_X = 0,005 \text{ с}$, $\delta f_{\text{кв}} = \pm 5 \cdot 10^{-7}$.

Розв'язання.

1. Вибираємо n з умови

$$\frac{0,003}{n} \leq \delta T_x \quad n > \frac{0,003}{0,0005} = 6, \text{ тобто } n = 10.$$

2. Розв'язуємо відносно $T_{\text{ЕТ}}$ рівняння

$$0,0005 = \left(0,0000005 + \frac{0,003}{10} + \frac{T_{\text{ЕТ}}}{10 \cdot 0,005} \right).$$

$$\frac{T_{\text{ЕТ}}}{0,05} = 0,0005 - 0,0003 - 0,0000005 \approx 0,0002,$$

$$T_{\text{ЕТ}} = 0,05 \cdot 0,0002 = 0,00001 \text{ с.}$$

3. Вибираємо з ряду $T_{\text{ЕТ}} = 10^{-5} \text{ с}$.

Задача 22.

Для вихідних даних задачі 21 оцінити відносну та абсолютну похибки вимірювання періоду та записати результат вимірювання.

Розв'язання.

1. З технічного опису

$$\delta T_x = \delta f_{\text{кв}} + \frac{0,003}{n} + \frac{T_{\text{ЕТ}}}{n \cdot T_x} = 5 \cdot 10^{-7} + \frac{0,003}{10} + \frac{10^{-5}}{10 \cdot 0,005} =$$

$$= 0,0000005 + 0,0003 + 0,005 \approx 0,005.$$

$$2. \Delta T_x = \delta T_x \cdot T_x = 0,005 \cdot 0,005 = 0,000025 \text{ с.}$$

$$3. T_x = (5,000 \pm 0,025) \text{ мс.}$$

Задача 23.

Осцилографом С1-114 за методом каліброваної шкали вимірний лінійний розмір амплітуди прямокутного імпульсу (рис. 6.2) в поділках шкали $h = 6,3$. Коефіцієнт відхилення $k_B = 1$ В/поділка. Визначити та записати результат вимірювання.

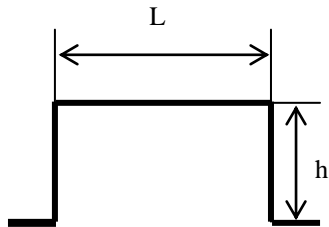


Рис. 6.2

Розв'язання.

$$1. U_{\text{вип}} = h \cdot k_B = 6,3 \cdot 1 = 6,3 \text{ В.}$$

2. Похибка вимірювання амплітуди сигналу складається з похибки визначення лінійного розміру зображення та похибки коефіцієнта відхилення:

$$\delta_U = \delta_h + \delta_B,$$

де δ_B складає близько $\pm 3\%$;

δ_h визначається відношенням одиниці молодшого розряду

представлення Δh до самого значення h , тобто $\delta_h = \Delta h \cdot 100 / h$.

$$\delta_h = 0,1 \cdot 100 / 6,3 \approx \pm 1,6\%.$$

$$\delta_U = 1,7 + 3 = \pm 4,6\%.$$

$$3. \Delta U = \delta_U \cdot U / 100 = 4,6 \cdot 6,3 / 100 = 0,2898 \text{ В.}$$

$$4. U = (6,30 \pm 0,29) \text{ В.}$$

Задача 24.

Осцилографом С1-114 за методом каліброваної шкали вимірний лінійний розмір тривалості прямокутного імпульсу (рис. 6.2) в поділках шкали $L = 4,7$. Коефіцієнт розгортки $k_P = 0,1$ мс/поділка. Визначити та записати результат вимірювання.

Розв'язання.

$$1. T_{\text{вим}} = L \cdot k_P = 4,7 \cdot 0,1 = 0,47 \text{ мс.}$$

2. Похибка вимірювання тривалості сигналу складається з похибки визначення лінійного розміру зображення та похибки коефіцієнта розгортки:

$$\delta_T = \delta_L + \delta_P,$$

де δ_P складає близько $\pm 3\%$;

δ_L визначається відношенням одиниці молодшого розряду представлення ΔL до самого значення L , тобто $\delta_L = \Delta L \cdot 100 / L$.

$$\delta_L = 0,1 \cdot 100 / 4,7 \approx \pm 2,1\%.$$

$$\delta_T = 2,1 + 3 = \pm 5,1\%.$$

$$3. \Delta T = \delta_T \cdot T / 100 = 5,1 \cdot 0,47 / 100 = 0,0239 \text{ мс.}$$

$$4. T = (0,470 \pm 0,024) \text{ мс.}$$

При написанні розділу були використані джерела [1...4].

ЛІТЕРАТУРА

1. Емельянов А.А., Привознов Л.К., Шишов Н.Н. Метрологическое обеспечение вооружения и военной техники. – Х.: ВИРТА, 1985. – 462 с.
 2. Чинков В.М. Основы метрології та вимірювальної техніки. – Х.: ХВУ, 2003. – 424 с.
 3. Шишов Н.Н. Правила выполнения и оформления текстовых научных документов. – Х.: ВИРТА, 1993. – 296 с.
 4. Козлов В.С., Крюков О.М., Рудаков С.В., Стаднік В.В. Ідентифікація законів розподілу результатів вимірювального експерименту: Навчально-методичний посібник. – Х.: ХВУ, 2002. – 16 с.
-

Підп. до друк 22.12.16. Формат 60x84 1/16.
Умовн.-друк. арк. 3,6.
Вид. № 77/16.

Сектор редакційно-видавничої діяльності
Національного університету цивільного захисту України
61023 м. Харків, вул. Чернишевська, 94.