

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Навчально-науковий центр заочної форми навчання  
(повна назва)

Кафедра Інформаційно-вимірювальних технологій  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Розробка методики калібрування трансформатора  
(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи МВТ<sub>ЗМ</sub>-20-1  
Жданов І.В.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 152 Метрологія та  
інформаційно-вимірювальна техніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Метрологія та  
вимірювальна техніка  
(повна назва освітньої програми)

Керівник к.т.н., доц. Козлов Ю.В.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Захаров І.П.  
(прізвище, ініціали)

2021 р.

## Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Навчально-науковий центр заочної форми навчання  
 Кафедра Інформаційно-вимірювальних технологій  
 Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
 Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка  
 (код і повна назва)  
 Тип програми освітньо-професійна  
 (освітньо-професійна або освітньо-наукова)  
 Освітня програма Метрологія та вимірювальна техніка  
 (повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

## НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Жданову Ігорю Васильовичу  
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка методики калібрування трансформатора

затверджена наказом університету від 23 жовтня 2021 р. № 161 Стз

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 06 грудня 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

1. Вимірювальні трансформатори струму  
2. Нормативне забезпечення: . ГОСТ 7746-2001. Трансформатор струму. Загальні технічні умови, РД 34.45.-51.300.-.97. М.: ЕНАС, ГОСТ 1983-2001. Трансформатори напруги Загальні технічні умови

3. Засоби вимірювальної техніки: Вимірювальні трансформатори струму та напруги

4. Апаратне забезпечення: персональний комп'ютер Pentium 2,7 ГГц, ОЗП 2 Гб.

5. Програмне забезпечення: ОС Windows XP/7/10, пакет статистичного аналізу даних Excel 2013.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

1. Види трансформаторів струму та напруги

2. Метрологічне забезпечення випробувань трансформаторів струму та напруги.

3. Основні нормативні положення процедури калібрування засобів вимірювальної техніки.

4. Обладнання для калібрування.

5. Розробка методики калібрування трансформаторів струму та напруги

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) \_\_\_\_\_

1. Тема кваліфікаційної роботи, інформація про студента і керівника. 2. Мета і задачі роботи. 3. Види трансформаторів струму та напруги.4. Метрологічне забезпечення випробувань трансформаторів струму та напруги.5. Основні нормативні положення процедури калібрування засобів вимірювальної техніки.6. Обладнання для калібрування.7. Розробка методики методики калібрування трансформаторів струму та напруги 8. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану проблеми та методів її вирішення	25.10.2021 – 31.10.2021	
2	Розробка загальної схеми випробувань везерометра	01.11.2021 – 07.11.2021	
3	Вибір засобів вимірювань для проведення випробувань	08.11.2021 – 14.11.2021	
4	Розробка програми метрологічної атестації	15.11.2021 – 21.11.2021	
5	Написання пояснювальної записки	22.11.2021 – 28.11.2021	
6	Виконання графічної частини	29.11.2021 – 05.12.2021	
7	Представлення закінченої кваліфікаційної роботи на кафедрі	06.12.2021	

Дата видачі завдання 25 жовтня 2021 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ к.т.н. доц. Козлов Ю.В.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської кваліфікаційної роботи містить 72 сторінки, 12 рисунків, 6 таблиць, перелік посилань з 6 назв.

Об'єкт дослідження – методика калібрування вимірювальних трансформаторів, що забезпечує необхідну вірогідність і повноту одержуваної інформації про якість продукції.

Мета роботи – удосконалення системи керування вимірюваннями на підприємстві у відповідності з ISO 10012, шляхом розробки методики калібрування вимірювальних трансформаторів.

Методи дослідження – використані методи порівняльного аналізу існуючих нормативних документів з калібрування вимірювальної техніки, методик калібрування трансформаторів, обробки результатів вимірювань.

Для досягнення поставленої мети розроблена методика калібрування трансформаторів, що включає в себе ряд заходів, що забезпечують необхідну точність, відтворюваність і вірогідність результатів вимірювань. Запропоновано методи обробки результатів вимірювань.

ВИМІРЮВАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ, ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ  
ТЕХНІКИ, КАЛІБРУВАННЯ, ЕТАЛОН, МЕТОДИКА КАЛІБРУВАННЯ,  
МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

## ABSTRACT

The explanatory note to the master's qualification work contains pages, 14 figures, 6 tables, a list of references with titles.

The object of research is the method of calibration of measuring transformers, which provides the necessary reliability and completeness of the received information about product quality.

The purpose of the work is to improve the measurement control system at the enterprise in accordance with ISO 10012, by developing a methodology for calibration of measuring transformers.

Research methods - used methods of comparative analysis of existing regulations on calibration of measuring equipment, methods of calibration of transformers, processing of measurement results.

To achieve this goal, a method of calibrating transformers has been developed, which includes a number of measures to ensure the required accuracy, reproducibility and reliability of measurement results. Methods of processing measurement results are offered.

MEASURING TRANSFORMERS, MEASURING INSTRUMENTS,  
CALIBRATION, STANDARD, CALIBRATION METHODS,  
METROLOGICAL CHARACTERISTICS

## ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	7
1. Вимірювальні трансформатори.....	8
2 Основні етапи оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні вимірювальних приладів.....	22
3 Методика калібрування вимірювальні трансформатори струму.....	41
Перелік посилань.....	64
Додаток А Форма первинних записів калібрування вимірювального трансформатора струму.....	65
Додаток Б Форма протоколу калібрування вимірювального трансформатора струму.....	67
Додаток В Відомість кваліфікаційної роботи.....	72

## ВСТУП

В енергетичних системах і на підприємствах необхідний постійний контроль режимів роботи електрообладнання. Такий контроль здійснюється для обліку електроенергії, для підтримки режимів роботи електростанцій і мереж і для захисту електрообладнання в разі аварій. Для цього встановлюються трансформатори струму і напруги які повинні бути повіреними відкаліброваними трансформаторами, згідно наказу №1518 від 10.08.2020 «Про затвердження Порядку калібрування вторинних та робочих еталонів»

## 1. ВИМІРЮВАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ

### 1.1 Вимірювальні трансформатори струму

#### 1.1.1 Призначення і режим роботи трансформатора струму

Вимірювальний трансформатор струму є апарат, призначений для підключення струмових вимірювальних приладів, пристроїв релейного захисту та автоматики [1, 2].

В електроустановках трансформатори струму виконують три функції:

- 1) перетворення змінного струму до стандартних значень 5 А чи 1 А;
- 2) ізолювання вторинних струмових ланцюгів від високої напруги первинного кола;

- 3) захист вторинних пристроїв та персоналу від високої напруги.

Вторинні струмові ланцюги трансформаторів струму заземлюються в одній точці. Це запобігає появі високої напруги у вторинних ланцюгах при пошкодженні ізоляції.

Трансформатор струму складається з первинної обмотки 1 та вторинної обмотки 2, які розташовані на магнітопроводі 3 (рис.1.1, а).

Позначення трансформаторів струму наведено на рис.1.1, б і в табл. 1.1 [3].

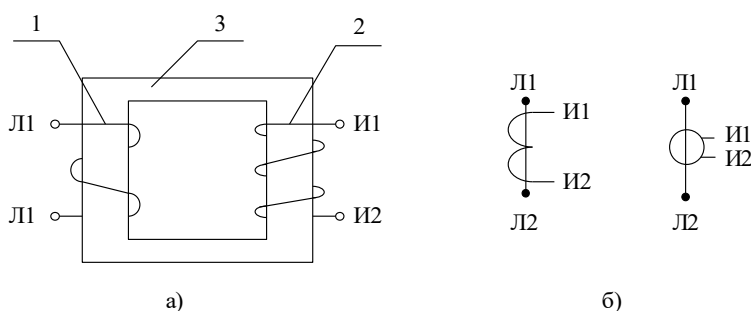

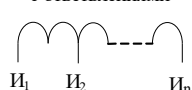
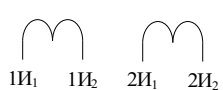
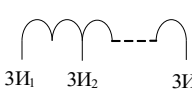


Рис. 1.1. Конструкція (а) і два варіанти позначення трансформатора струму (б):  
1 – первинна обмотка; 2 – вторинна обмотка; 3 – сердечник; Л1, Л2 – відповідно початок і кінець  
первинної обмотки; И1, И2 – відповідно початок і кінець вторинної обмотки

Таблиця 1.1 - Позначення трансформаторних обмоток струму

Обмотка трансформатора	Обозначения выводов и обмоток
Первичная	с одной секцией Л <sub>1</sub> ————— Л <sub>2</sub>
	с несколькими секциями Л <sub>1</sub> ————— К <sub>1</sub> Н <sub>2</sub> ————— К <sub>2</sub> ————— Н <sub>n</sub> ————— Л <sub>2</sub>
Вторичная	Трансформатор с одной вторичной обмоткой : без ответвлений 
	с ответвлениями 
	Трансформатор с несколькими вторичными обмотками: без ответвлений 
	с ответвлениями 

Первинна обмотка трансформатора струму послідовно включається в силовий ланцюг. Амперметри, струмові обмотки варметрів, ваттметрів, лічильники активної і реактивної енергії, струмові схеми релейного захисту і автоматики послідовно підключаються до вторинної обмотки.

Трансформатор струму є джерелом струму, отже вторинна обмотка виконується з більшим внутрішнім опором. Опір пристроїв, підключених до вторинної обмотки трансформатора струму, повинен бути невеликим. Якщо опір підключених пристроїв більше допустимого значення, то це істотно позначиться на кількості вторинного струму. Трансформатор струму не буде працювати в заданому класі точності.

Зупинимося докладніше про режим роботи трансформатора струму. Струм, що протікає через первинну обмотку  $I_1$ , створює магнітний потік  $\Phi_1$  в ядрі. Електрично рушійна сила (ЕРС) взаємної індукційної індукції, індуквана в вторинній обмотці, викликає струм  $I_2$ , який створює його магнітний потік  $\Phi_2$ , спрямований у відповідь на потік  $\Phi_1$ . Величина опору вторинному навантаженню невелика, тому втрати енергії при вторинному навантаженні незначні. Отже, потік  $\Phi_2$  трохи менше, ніж потік  $\Phi_1$ , і отриманий магнітний потік

$$\Phi_0 = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (1.1)$$

Це лише кілька відсотків магнітного потоку  $\Phi_1$ . Для такого магнітного потоку магнітопровід великого перетину не потребується. Крім того, в цьому випадку трансформатор струму має невеликий індуктивний опір, тобто не впливає на кількість струму, що тече в силовому ланцюзі.

При розмиканні вторинної обмотки струм  $I_2$  зникає, а, отже, і потік  $\Phi_2$ . Потік  $\Phi_0$  відповідно до виразу (1.1) збільшується до основного потоку  $\Phi_1$ . Завдяки малому перетину магнітного ядра, обраного флюсом  $\Phi_0$ , магнітне ядро насичене. Магнітна форма потоку з синусоїдального  $\Phi_0$  (рис. 1.2) стає трапеційною  $\Phi_{0xx}$ .

Величина напруги на штифтах вторинної обмотки пропорційна швидкості зміни магнітного потоку  $\Phi_0$  ( $\Phi_{0xx}$ ).

$$U_2 = -W_2 \frac{d\Phi_{0xx}}{dt} \quad (1.2)$$

Отже, при розмиканні вторинної обмотки форма напруги на її виводах стає пікоподібною. Значення напруги на розімкненій вторинній обмотці при великому робочому струмі може досягати декількох кіловольт. Забороняється розмикати вторинну обмотку трансформатора струму під навантаженням. Висока напруга небезпечна для персоналу і, крім того, може пошкодити ізоляцію трансформатора струму. Через насичення серцевини великим магнітним потоком вона перегрівається. Пошкодження трансформатора струму може стати причиною ланцюга в первинному ланцюзі. Якщо необхідно зробити перемикання в ланцюзі під струмом, вторинну обмотку трансформатора струму попередньо закорочують.

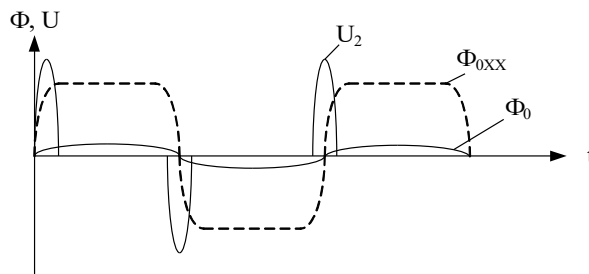


Рис. 1.2. Режимы работы трансформатора тока:  
 $\Phi_0$  - магнитный поток при замкнутой вторичной обмотке  
 $\Phi_{0xx}$  - магнитный поток при разомкнутой вторичной обмотке  
 $U_2$  - напряжение на разомкнутой вторичной обмотке

### 1.1.2 Похибки трансформатора струму

Коефіцієнт трансформації трансформатора струму визначається наступним чином. Під впливом струмів, що протікають через обмотки, в первинній обмотці діє магнітомотивна сила.

$$F_1 = I_1 \cdot W_1, \quad (1.3)$$

а в вторинній обмотці –

$$F_2 = I_2 \cdot W_2, \quad (1.4)$$

У разі ідеального трансформатора струму, при відсутності втрат енергії в трансформаторі і в навантаженні магнітнорухомі сили  $F_1$  і  $F_2$  рівні один одному. У цьому випадку

$$I_1 \cdot W_1 = I_2 \cdot W_2, \quad (1.5)$$

отже, коефіцієнт перетворення становить:

$$K_T = \frac{I_1}{I_2} = \frac{W_2}{W_1} \quad (1.6)$$

Векторна діаграма (рис.1.3) показує струми  $I_1$  і  $I_0$ , а також  $I_{2пр}$ , повернуту  $180^\circ$  і наведений за величиною з урахуванням коефіцієнта трансформації до первинного струму. Струм намагнічування  $I_0$  визначає втрату енергії в ядрі трансформатора струму, тобто його похибку.

Існує два типи помилок: а) струмова; б) кутова.

Струмова похибка - це процентне відношення різниці між зменшеним вторинним струмом і первинним струмом до первинного струму.

$$f = \frac{I_2(W_2 / W_1) - I_1}{I_1} \cdot 100\%$$

(1.7)

Кутова похибка - це кут  $\delta$  між первинним струмом  $I_1$  і вектором  $I_2$ , розвернутим на  $180^\circ$ . Кутова похибка вважається позитивною, якщо вторинний вектор струму випереджає основний поточний вектор.

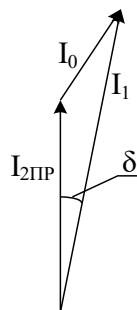


Рис.1.3. Векторная диаграмма токов трансформатора тока

На величину струмової і кутової похибки трансформатора струму впливають:

- а) матеріал та розміри сердечника;
- б) кількість первинних ампер-вітків;
- в) опір вторинної обмотки
- г) величина первинного струму.

Якість матеріалу магнітопровіда визначається втратами на вихрових струмах і гістерезисом на одиницю об'єму матеріалу. Якість матеріалу магнітопровіда характеризується кривою намагнічування (рис. 1.4.a). У точці М найбільшу важливість має магнітна проникність  $\mu$ . Тому при напруженості магнітного поля Н, що відповідає точці М, магнітопровід буде мати найменші втрати і найбільшу точність трансформатора струму.

Величина напруженості магнітного поля залежить від первинного струму  $I_1$ . Магнітопровід виготовляється з електричної холоднокатаної сталі, пермалло або аморфного заліза.

На рисунку 1.4.b показані залежності струмової  $f$  і кутової похибки  $\delta$  від величини первинного струму  $I_1$  і вторинного навантаження  $Z_2$ .

При збільшенні значення вторинного навантаження ( $Z_{2.2} > Z_{2.1}$ ) відбувається збільшення струмових і кутових помилок.

Способи зменшення похибок:

- а) збільшення первинних ампер-витків;
- б) збільшення перетину сердечника;
- в) зменшення середньої довжини магнітопровіда;
- г) поліпшення магнітних властивостей сердечника;
- д) зниження опору вторинного навантаження;
- е) припасування витків.

Повне рівняння магніторухомих сил трансформатора струму має наступний вид

$$I_1 \cdot W_1 = I_2 \cdot W_2 + I_0 \cdot W_1. \quad (1.8)$$

З цієї формули випливає, що

$$I_1 \cdot W_1 > I_2 \cdot W_2. \quad (1.9)$$

Тому струм  $I_2$  необхідно збільшити, щоб виправити втрати в трансформаторі струму. У трансформаторі струму виконується приблизна рівність магніторушійних сил  $I_1 \cdot W_1 \approx I_2 \cdot W_2$ . При зменшенні кількості витків вторинної обмотки  $W_2$  збільшується вторинний струм  $I_2$ . Це називається регулюванням кількості витків трансформатора струму з метою підвищення його точності. Струмові та кутові похибки на відміну від

графіків на рис. 1.4, б зменшуються та будуть перебувати в допустимій межі похибки, наведеної на рис. 1.5 [3]. Характерна форма струмової і кутової похибки показує пунктирна лінія.

Класи точності трансформатора струму: 0,2С; 0,2; 0,5С; 0,5; 1; 3; 5Р; 10R.

Як видно з таблиці. 1.2 [3], найменування класу точності відповідає граничній струмовій похибці трансформатора струму.

З другого стовпчика таблиці 1.2 видно що трансформатори струму з класом точності з буквою S мають нижню межу для вимірювання первинного струму з допустимою похибкою 1 % від номінального значення первинного струму. Трансформатори струму з класом точності без букви S мають нижню межу в 5%. Межі допустимих похибок трансформатора струму залежать від вторинного навантаження трансформатора струму і від величини первинного струму.

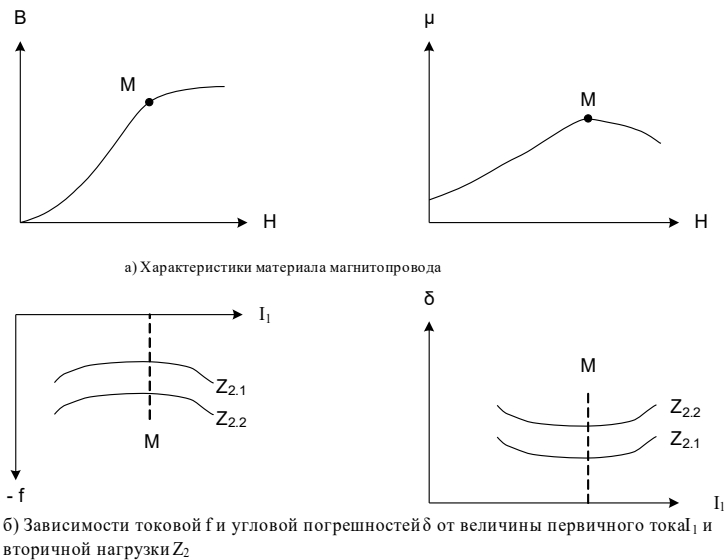


Рис. 1.4. Графики, ілюструючі фактори, впливаючі на погрешності трансформатора тока

Таблиця 1.2 Межі допуску для класів точності від 0.2 до 0.5S

Клас точности	Первичный ток, % номинального значения	Предел допускаемой погрешности		Предел нагрузки, % номинального значения
		токовой, %	угловой	
0,2	5	$\pm 0,75$	$\pm 30'$	25-100
	20	$\pm 0,35$	$\pm 15'$	
	100-120	$\pm 0,2$	$\pm 10'$	
0,2S	1	$\pm 0,75$	$\pm 30'$	25-100
	5	$\pm 0,35$	$\pm 15'$	
	20	$\pm 0,2$	$\pm 10'$	
	100	$\pm 0,2$	$\pm 10'$	
	120	$\pm 0,2$	$\pm 10'$	
0,5	5	$\pm 1,5$	$\pm 90'$	25-100
	20	$\pm 0,75$	$\pm 45'$	
	100-120	$\pm 0,5$	$\pm 30'$	
0,5S	1	$\pm 0,15$	$\pm 90'$	25-100
	5	$\pm 0,75$	$\pm 45'$	
	20	$\pm 0,5$	$\pm 30'$	
	100	$\pm 0,5$	$\pm 30'$	
	120	$\pm 0,5$	$\pm 30'$	

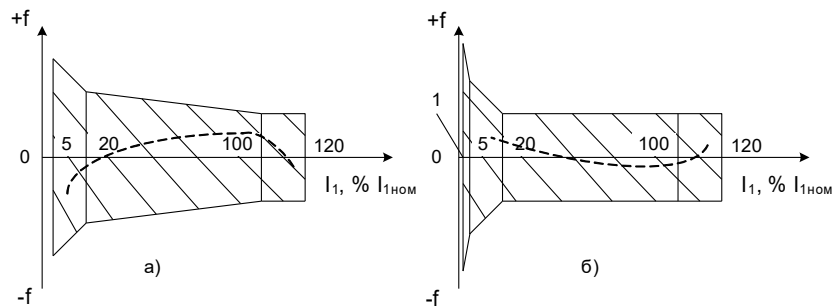


Рис. 1.5. Допускаемые области токовых погрешностей для трансформаторов тока: а) для классов точности 0,2; 0,5; 1; б) для классов точности 0,2S; 0,5S

### 1.1.3 Конструкції трансформаторів струму

Класифікація трансформаторів струму [3]:

Вид установки:

- а) у приміщенні для внутрішньої установки;
- б) зовнішній, для зовнішньої установки;

в) вбудований (В) встановлюється всередині корпусу силових трансформаторів або вимикачів, всередині екранів шин, в газоізолюваного обладнання.

Спосіб установки:

а) прохідний (П), використовується для проходження провідної частини через перегородки;

б) опорний (О), використовується для кріплення несучої частини, виконуючи функцію опорного ізолятора.

Конструкція первинної обмотки:

а) одновіткова - шинна (Ш), земляна (З), що не має власної первинної обмотки, свою функцію виконує шинопровод або трьохпровідний кабель;

б) одновіткова - стрижнева, з первинною обмоткою у вигляді прямолінійного стрижня;

в) двухвіткова, тобто обмотка складається з труби і стрижня, які можуть бути з'єднані паралельно або послідовно;

г) багатовіткова;

д) ланцюгового типу (З), тобто первинна обмотка складається з декількох розділів. Секції з'єднуються послідовно або паралельно;

е) роз'ємна (R);

ж) каскадна (К).

Вид ізоляції:

а) з порцеляноюю покриттям (Ф);

б) газонаповнений (Г);

в) лита (Л);

г) маслонаповнений (М);

д) у пластмасовому корпусі (П).

Принцип роботи:

а) трансформатор із магнітопроводом;

б) повітряний трансформатор

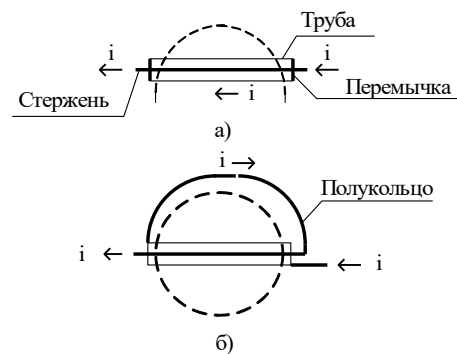
в) оптичний трансформатор.

У трансформаторах струму з литою та елегазовою ізоляцією для зміни коефіцієнта трансформації перемикачів виробляються в первинній обмотці, яка виконана двома витковими типами (рис. 1.5). Первинна обмотка складається з труби та стрижня. Для створення одного витка вони включаються паралельно. На рис. 1.5 а показаний вид збоку трансформатора струму. Пунктиром умовно показаний корпус трансформатора струму. Для створення двох витків труба та стрижень з'єднуються послідовно за

допомогою зовнішнього півкільця. На рис. 1.5 б показаний вид зверху трансформатора струму.

Трансформатори струму з магнітопроводом мають більшу номінальну потужність, але через нелінійність кривої намагнічування погіршується клас точності при невеликих робочих струмах і при струмах, що перевищують номінальне значення.

Повітряний трансформатор струму виконується без магнітопроводу. Отже, проводиться лінійне перетворення первинного струму на вторинний.



В оптичному трансформаторі струму навколо струмопровідної частини 1 розташовується круговий поляризатор 2. Електронно-оптичний блок посиляє світловодів два світлових сигналу. Ці сигнали, спрямовані зустрічно по відношенню один до одного, проходять в поляризаторі 2 кілька разів навколо струмопровідної частини. Магнітне поле, створюване струмом, що протікає в провіднику, змінює швидкість поширення світла у світловоді поляризатора. При цьому уповільнюється один світловий сигнал і прискорюється інший залежно від напрямку магнітного поля по відношенню до світлового сигналу (ефект Фарадея).

Як тільки лінійно поляризовані сигнали завершують свій шлях навколо провідника, вони відображаються в дзеркалі 3 і йдуть назад оптоволоконном 4 до електронно-оптичного блоку 5. Потім подача сигналу в поляризатор повторюється. Таким чином, за відсутності струму через провідник два світлові сигнали синхронізовані по фазі (рис. 1.6, б). Коли струм проходить через провідник, магнітне поле зсуває світлові сигнали в протилежних напрямках (рис. 1.6, в). В електронно-оптичному блоці 5 проводиться вимірювання різниці фаз двох світлових сигналів. Перевагами оптичного трансформатора струму є висока точність та цифровий вихідний сигнал.

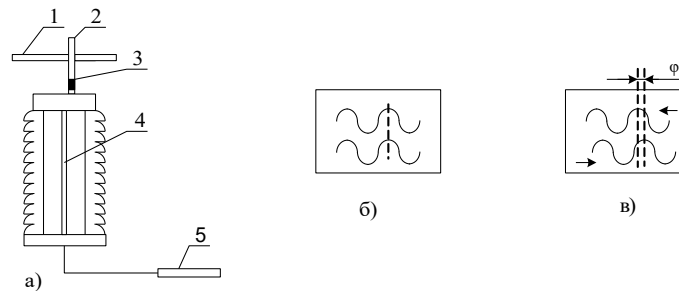


Рис. 1.6. Оптический трансформатор тока: а) конструкция; б) световые сигналы при отсутствии тока; в) световые сигналы при наличии тока

Розглянемо кілька прикладів позначень трансформаторів струму.

ТЛ-0,66 - трансформатор струму, з литою ізоляцією, номінальна напруга 0,66 кВ.

ТШЛ-0,66 - трансформатор струму, шинний, з литою ізоляцією, номінальна напруга 0,66 кВ.

ТОЛ-10 - трансформатор струму, опорний, з литою ізоляцією, номінальна напруга 10 кВ.

ТЛО-10 - трансформатор струму, з литою ізоляцією, опорний, номінальна напруга 10 кВ.

ТЛП-10 - трансформатор струму, прохідний, з литою ізоляцією, номінальна напруга 10 кВ.

ТЗЛ-10 – трансформатор струму для захисту від замикань на землю, з литою ізоляцією, номінальна напруга 10 кВ.

ТВГ-24 - трансформатор струму, вбудований, генераторний, номінальна напруга 24 кВ.

ТШВ-20 - трансформатор струму, шинний, що вбудовується в струмопроводи, номінальна напруга 10 кВ.

ТБМО-35 - трансформатор струму, баковий, маслонаповнений, одноступінчастий, номінальна напруга 35 кВ.

ТГФ-110 – трансформатор струму, елегазовий, з порцеляною покришкою, номінальна напруга 110 кВ.

ТФЗМ-220 – трансформатор струму, з порцеляною покришкою, з обмотками ланкового типу, номінальна напруга 220 кВ.

Первинна обмотка складається з кількох секцій, які з'єднуються послідовно чи паралельно.

## 1.2 Вимірювальні трансформатори напруги

### 1.2.1 Призначення, принцип дії та похибки трансформатора напруги

Трансформатори напруги застосовуються в електроустановках на напругу вище 1000 В та призначені:

- 1) для перетворення змінної первинної напруги в стандартну вторинну напругу 100, 100/, 100:3;
- 2) для захисту персоналу та приладів від високої напруги первинного ланцюга.
- 3) для живлення оперативних кіл на підстанціях з випрямленим та змінним оперативним струмом.

Трансформатор напруги працює в режимі близькому до холостого ходу.

Коефіцієнт трансформації дорівнює:

$$K_{\text{НОМ}} = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}}, \quad (1.10)$$

де  $U_{1\text{НОМ}}$  – номінальна первинна напруга,  $U_{2\text{НОМ}}$  – номінальна вторинна напруга. Вторинна напруга трансформатора, збільшена в  $K_{\text{НОМ}}$  раз, відрізняється від первинної напруги як по модулю, так і по фазі внаслідок втрат напруги в трансформаторі.

Позначення трансформатора напруги наведено у табл. 4.1.

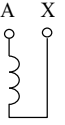
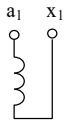
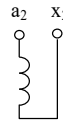
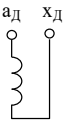
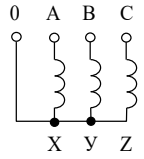
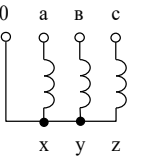
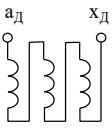
Похибка за напругою – це відношення різниці між наведеною вторинною напругою та первинною до первинної напруги

$$f = \frac{U_2 \cdot K_{\text{НОМ}} - U_1}{U_1}, \quad (1.11)$$

Кутова похибка – це кут  $\delta$  між векторами первинної та вторинної напруги. Похибка вважається позитивною, якщо вектор вторинної напруги випереджає вектор первинної напруги.

Для зменшення похибки за напругою застосовується виткова корекція трансформатора напруги, так як вторинна напруга дещо менше через втрати в трансформаторі. Відношення числа витків вибирають менше від номінального коефіцієнта трансформації. Для цього зменшують кількість витків первинної обмотки.

Таблиця 1.3 Позначення обмоток трансформаторів напруги

Схема соединения обмотки				Схемы соединений обмоток однофазных четырёх обмоточных трансформаторов с двумя основными и дополнительной вторичными обмотками
первичной	вторичной основной 1	вторичной основной 2	вторичной дополнительной	
				
Схема соединения обмотки				Схемы соединений обмоток трёхфазного трёх обмоточного трансформатора с основной и дополнительной вторичными обмотками
первичной	вторичной основной		вторичной дополнительной	
				

Похибки залежать від  $\cos \phi$  і величини навантаження трансформатора напруги (рис.4.1). Отже, для роботи трансформатора напруги з мінімальною похибкою потрібна певна величина вторинного навантаження.

Рекомендовані характеристики процентної зміни вторинної напруги трансформатора, що відповідають  $\cos \phi = 0,8$  вторинного навантаження, наведені на рис. 4.2 [6]. Верхня характеристика відповідає прикладеному первинному напрузі  $0,8 U_{НОМ}$ ; нижня - напрузі  $1,2 U_{НОМ}$ . Характеристики наведені для трансформатора, що має найвищий клас точності 0,2.

Прямокутник ABCD характеризує зону похибки трансформатора напруги, що гранично допускається, при зміні вторинного навантаження від 0,25 до номінального значення. Межі активно-індуктивного навантаження для роботи трансформатора напруги в класі точності при  $\cos \phi = 0,8$  визначається від

$$0,25S_{НОМ} \left( \frac{U_1}{U_{1НОМ}} \right)^2 \text{ до } S_{НОМ} \left( \frac{U_1}{U_{1НОМ}} \right)^2, \quad (1.12)$$

де  $S_{НОМ}$  номінальна потужність трансформатора в даному класі точності, В•А;

$U_{1НОМ}$  номінальна первинна напруга трансформатора, В;

$U_1$  – значення первинної напруги, підведеної до трансформатора, яке має перебувати в діапазоні  $0,8 - 1,2 U_{НОМ}$ , В.

Розмір номінальної потужності  $S_{НОМ}$  залежить від класу точності. Наприклад, для класу точності 1 вона приблизно вчетверо більша ніж для класу точності 0,2 (див. рис. 4.2).

Трансформатори напруги мають 4 класи точності: 0,2; 0,5; 1 та 3.

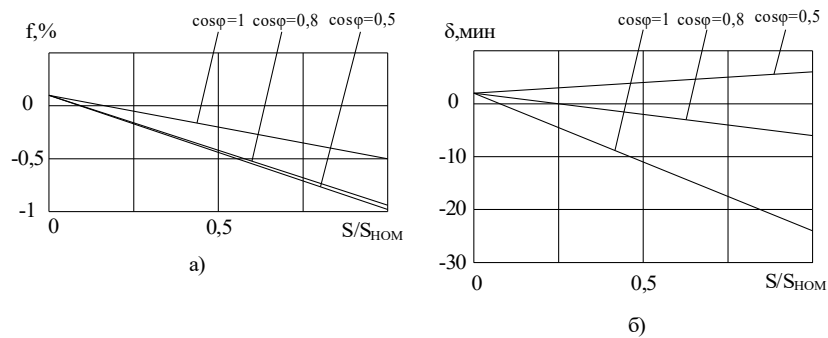


Рис. 4.1. Характеристики погрешностей трансформатора напряжения а) погрешности по напряжению б) угловой погрешности

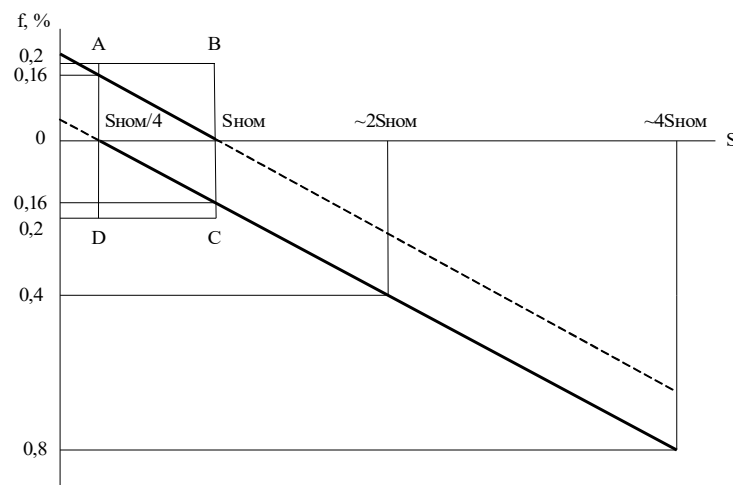


Рис. 4.2. Рекомендуемые характеристики процентного изменения вторичного напряжения трансформатора

## 1.2.2 Конструкції трансформаторів напруги

Класифікація трансформаторів напруги [6].

Рід встановлення:

- а) внутрішній, для встановлення у приміщенні;
- б) зовнішній, для установки поза приміщенням,
- в) вбудовані для встановлення всередині КРУЕ.

За кількістю фаз: а) однофазний (О); б) трифазний (Т).

За наявністю чи відсутністю заземлення виведення «Х» первинної обмотки: а) заземлюваний (з);

б) незаземлюваний.

За принципом дії:

- а) електромагнітний;
- б) з ємнісним дільником;
- в) оптичний.

За кількістю ступенів трансформації:

- а) електромагнітний однокаскадний;
- б) електромагнітний каскадний (К).

Наявність компенсаційної обмотки або обмотки для контролю ізоляції мережі:

- а) трьох фазний з додатковими обмотками для контролю ізоляції мережі (І);
- б) трьох фазний з компенсаційними обмотками (К).

По виду ізоляції:

- а) повітряно-паперова (С);
- б) лита (Л);
- в) залита бітумним компаундом (К);
- г) з порцеляною покриттям (Ф);
- д) масляна (М);
- г) газова (Г).

За особливостями конструктивного виконання:

- а) захищене виконання (З);
- б) водозахищене виконання (В);
- в) герметичне виконання (Г);
- г) із вбудованим запобіжником (П);
- д) антирезонансна конструкція (А).

Приклади позначень трансформаторів напруги.

НТС-6 – трансформатор напруги, трифазний, із сухою ізоляцією, номінальна напруга 6 кВ.

НОМ - трансформатор напруги, однофазний, маслонаповнений.

ЗНОМ – один із висновків первинної обмотки заземлений, трансформатор напруги, однофазний, маслонаповнений.

НОЛ - трансформатор напруги, однофазний, з литою ізоляцією.

ЗНОЛ – один із висновків первинної обмотки заземлений, трансформатор напруги, однофазний, з литою ізоляцією.

НАМИ - трансформатор напруги, антирезонансний, маслонаповнений, для контролю ізоляції.

НДЕ – трансформатор напруги з ємнісним дільником напруги.

НКФ – трансформатор напруги, каскадний, у фарфоровій покритті.

## **2 ОСНОВНІ ЕТАПИ ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ КАЛІБРУВАННІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИБЛІДІВ**

## 2.1 Основні терміни і положення щодо оцінки невизначеності вимірювань

### 2.1.1 Визначення та класифікації

Невизначеність вимірювань – не негативний параметр, характеризує розсіювання значень величини, що приписуються вимірюваній величині на основі наявної інформації [2].

Параметром може бути стандартне відхилення (або кратне йому число) або половина ширини інтервалу із установленою ймовірністю охоплення.

$$Y = y \pm U, p = 0,95. \quad (2.1)$$

Всі складові невизначеності в результаті вимірювання можна згрупувати в дві категорії відповідно до способом їх оцінювання [4]:

A - складові, які оцінюються шляхом застосування статистичних методів (обробкою результатів багаторазових вимірювань);

B - складові, які оцінюються в інший спосіб (по характеристикам, узятим з попередніх експериментів, з паспорта на прилад, методик виконання вимірювань, з довідників і т.д.).

Класифікація невизначеності представлена на рис. 2.1 [4].

Невизначеність вимірювань включає складові, обумовлені систематичними ефектами, в тому числі складові, пов'язані з поправками і приписаними значеннями еталонів, а також дефінітну невизначеність. Іноді поправки на оцінені систематичні ефекти не вводять, а замість цього останні розглядають як складові невизначеності вимірювань.

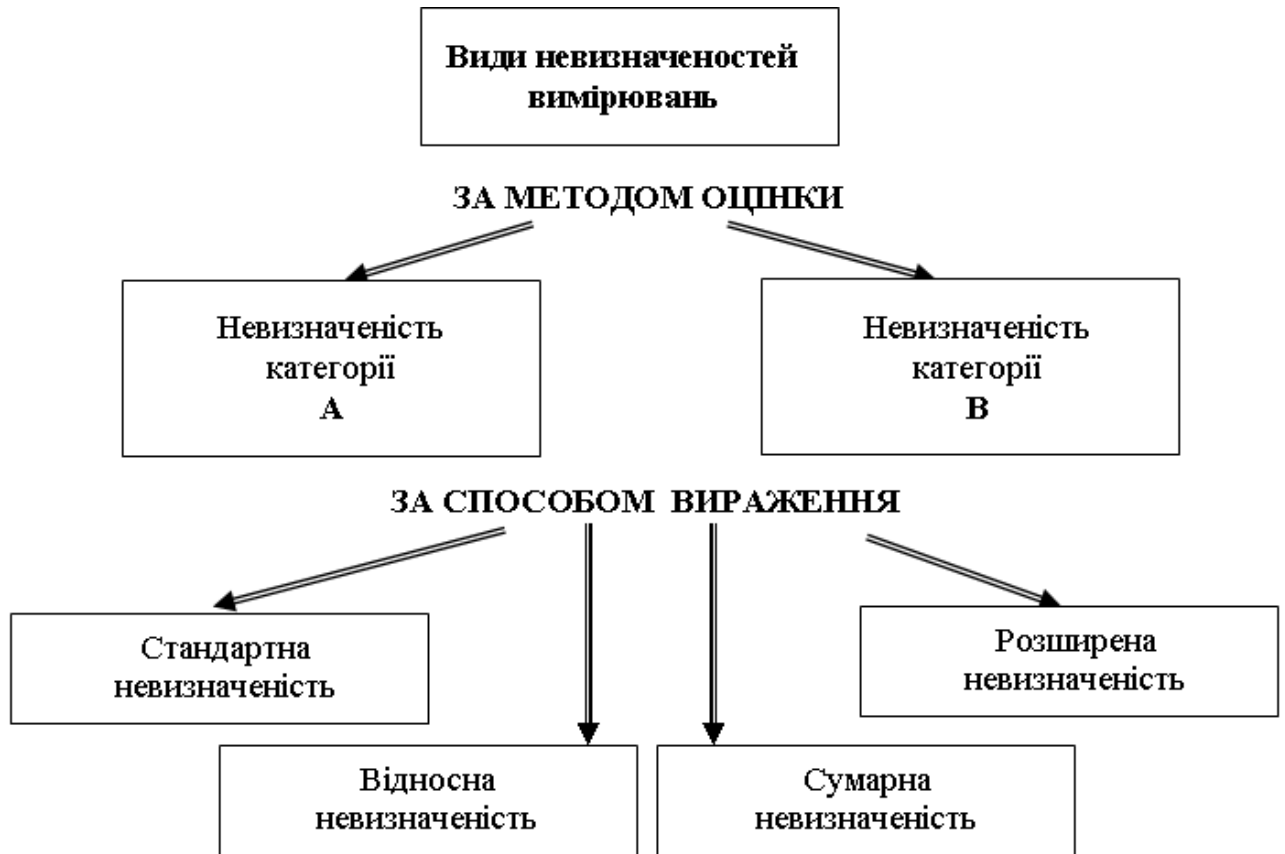


Рисунок 2.1 – Класифікація невизначеності вимірювань

Складові типу А оцінюються як стандартні (середньоквадратичні) відхилення результатів багаторазових вимірювань (невизначеності типу А). Ці складові характеризуються числами ступенів свободи  $\nu$  (для прямих багаторазових вимірювань  $\nu = n-1$ , де  $n$  – кількість багаторазових спостережень, виконаних при вимірюванні). Надалі  $\nu$  враховується при обчисленні коефіцієнта охоплення і розширеної невизначеності. Якщо міжскладовими типу А спостерігається статистичний взаємозв'язок (кореляція), то необхідно вказувати коефіцієнти кореляції  $(x_i, x_j) = r_{ij}$ .

Складові типу В також оцінюються як передбачувані стандартні (середньоквадратичні) відхилення, одержувані з відомих меж, в яких можуть знаходитися – значення цих складових (невизначеності типу В -  $U_B$ ). Для складових типу В число ступенів свободи приймається рівним нескінченності. Між складовими типу В може існувати передбачувана взаємозв'язок, тоді слід вказувати коефіцієнти передбачуваної кореляції.

Сумарна стандартна (середньоквадратична) невизначеність розраховується за правилом підсумовування дисперсій

$$u_C^2 = u_A^2 + u_B^2 \quad (2.2)$$

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (2.3)$$

Інтервальною оцінкою невизначеності є розширена невизначеність  $U$ , яку отримують шляхом множення стандартної сумарної невизначеності на так званий коефіцієнт охоплення  $k$

$$U = k u_C \quad (2.4)$$

При вказівці розширеної невизначеності вказують рівень довіри - ймовірність  $p$ . Ця ймовірність приймається рівною  $p = 0,95$ .

Відносна невизначеність – відношення стандартної, сумарної або розширеної невизначеності до модуля вхідний або вихідний величини

$$\tilde{U}_{Ai} = \frac{U_A}{x_i}, \quad (2.5)$$

$$\tilde{u}_C = \frac{u_C}{y}, \quad (2.6)$$

$$\tilde{U} = \frac{U}{|y|}. \quad (2.7)$$

### 2.1.2 Базовий алгоритм оцінювання невизначеності вимірювань

Базовий алгоритм оцінювання невизначеності вимірювань при виконанні метрологічних робіт включає в себе наступні операції [5]:

- 1) складання модельного рівняння;
- 2) оцінювання вхідних величин, внесення поправок на відомі систематичні ефекти в результатах вимірювань;
- 3) обчислення оцінки результату вимірювань;
- 4) визначення стандартних невизначеностей вхідних величин;
- 5) визначення коефіцієнтів чутливості;
- 6) обчислення вкладу невизначеності кожної вхідної величини в невизначеність вимірюваної величини;
- 7) визначення попарних кореляцій вхідних величин;
- 8) обчислення сумарної стандартної невизначеності вимірюваної величини;

- 9) обчислення коефіцієнта охоплення;
- 10) обчислення розширеної невизначеності вимірюваної величини;
- 11) запис повного результату вимірювання;
- 12) складання бюджету невизначеності.

#### 2.1.2.1. Складання модельного рівняння

Модельне рівняння виражає залежність між вихідний (вимірюваної) величиною  $Y$  і вхідними величинами

В якості вхідних величин в модельне рівняння, крім безпосередньо вимірюваних величин, ще входять змінні, значення яких і їх невизначеності відомі з зовнішніх джерел, а також поправки до результату вимірювання на відомі систематичні ефекти, основні і додаткові абсолютні похибки використовуваних засобів вимірювання.

#### 2.1.2.2 Оцінка вхідних величин, внесення поправок на відомі систематичні ефекти в результатах вимірювань

Значення вхідних величин знаходять шляхом їх вимірювання з одноразовими або багаторазовими спостереженнями або оцінки з зовнішніх джерел. При проведенні багаторазових вимірювань при значенні  $i$ -ої вхідної величини приймають середнє арифметичне результатів ряду окремих спостережень

$$x_i = \bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{q=1}^{n_i} x_{iq}$$

В отримані значення вносять поправки на відомі систематичні ефекти. Ці поправки вносяться в модельне рівняння як вхідні величини і самі є джерелами невизначеності.

#### 2.1.2.3 Обчислення оцінки результату вимірювань

Оцінку вихідної величини отримують при підстановці в модельне рівняння оцінок вхідних величин.

У отримані значення вносячи поправки на відомі систематичні ефекти. Ці поправки вносяться в модельне рівняння як вхідні величини і самі є джерелами невизначеності.

Оцінку вихідної величини отримуються при підстановці в модельне рівняння оцінок вхідних величин:

$$u_A(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - \bar{x}_i)^2}{n_i(n_i - 1)}}$$

Вона відповідає середньому квадратичному відхиленню (СКО) результату вимірювання (середнього арифметичного)  $i$ -й вхідної величини.

Стандартна невизначеність типу В вхідної величини залежить від апріорної інформації про мінливості вхідної величини. Якщо  $i$ -а вхідна величина є невиключеною систематичною похибкою (НСП) з межами  $\pm\theta_i$ , то її невизначеність обчислюється за формулою:

$$u_B(x_i) = \frac{\theta_i}{\alpha_i},$$

де  $\alpha_i$  - коефіцієнт, що відповідає прийнятим законам розподілу в середині кордонів НСП.

Для рівномірного або невідомого закону розподілу  $\alpha_i = \sqrt{3}$ .

Для нормального закон розподілу  $\alpha_i = 2$  (для ймовірності 0,95).

Для трикутного закону розподілу  $\alpha_i = \sqrt{6}$ ; для закону арксинуса  $\alpha_i = \sqrt{2}$ .

#### 2.1.2.4 Визначення коефіцієнтів чутливості

Коефіцієнти чутливості показують, як оцінка вихідної величини змінюється зі зміною оцінок вхідних величин. Їх знаходять як приватні похідні вихідної величини по кожній з вхідних величин, оцінені при значеннях вхідних величин.

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_{ic}} = \frac{\partial Y}{\partial X_{ic}} \Big|_{x_1, x_2, \dots, x_m}.$$

При прямих вимірюваннях все коефіцієнти чутливості рівні 1.

При лінійної модельної функції коефіцієнти чутливості рівні постійним коефіцієнтами при вхідних величинах

При модельної функції у вигляді добутку (частки від розподілу) вхідних величин.

$$Y = bX_1^{a_1} X_2^{a_2} \dots X_m^{a_m}$$

$$c_i = a_i y / x_i$$

Коефіцієнти чутливості відповідають коефіцієнтам впливу, визначають при оцінці похибок непрямих вимірювань при нелінійній залежності

$$c_i = a_i y / x_i.$$

2.1.2.5 Обчислення вкладу невизначеності кожної вхідної величини в невизначеність вимірюваної величини

Внесок невизначеності  $u_i(y)$  кожної вхідної величини  $X_i$  в невизначеність  $u(y)$  вимірюваної величини  $Y$  (сумарна невизначеність) визначається як добуток коефіцієнта чутливості невизначеності вхідної величини

$$u_i(y) = c_i u(x_i).$$

2.1.2.6 Порядок обчислення коефіцієнтів коваріацій вхідних величин

Вхідні величини можуть бути попарно корельовані (статистично залежні). Ступінь їх статистичної залежності виражається за допомогою коефіцієнта кореляції.

$$r_{i,k} (-1 \leq r_{i,k} \leq 1).$$

При  $r_{i,k} = 0$  кореляція відсутня.

Кореляція виникає в наступних випадках:

1) - при одночасному спостереженні обох вхідних величин  $X_i$  і  $X_k$  в одному вимірювальному експерименті (спостерігається кореляція). У цьому випадку коефіцієнт кореляції розраховується по типу А за формулою:

$$r_{i,k} = \frac{1}{n(n-1)} \frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_i)(x_{kj} - x_k)}{u(x_i)u(x_k)}.$$

2) - при наявності залежності обох вхідних величин  $X_i$  і  $X_k$  від тих же незалежних один від одного змінних  $Q_l$ ,  $l = 1, 2, \dots, L$  (які з'являються при використанні тих же засобів вимірювань, вихідних величин або методів вимірювань)

$$X_i = f_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_l).$$

$$X_k = f_k(Q_1, Q_2, \dots, Q_l).$$

В цьому випадку виникає так звана логічна (передбачувана) кореляція, яка обчислюється за типом В за формулою:

$$r_{i,k} = \frac{1}{u(x_i)u(x_k)} \sum_{l=1}^L c_{il} c_{kl} u^2(Q_l),$$

де  $c_i$ ,  $c_k$  – коефіцієнти чутливості;

$u(Q_l)$  – стандартні невизначеності змінних  $Q_l$ ,  $l = 1, 2, \dots, L$ .

2.1.2.7 Визначення стандартної невизначеності вихідної величини (сумарної стандартної невизначеності)

Визначення стандартної невизначеності вихідної величини здійснюється за формулами, званим законом поширення невизначеності.

При відсутності кореляцій між вхідними величинами стандартної невизначеності вихідної величини визначається як

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)} = \sqrt{c_1^2(x_1) + c_2^2(x_2) + \dots + c_m^2 u^2(x_m)}$$

При наявності кореляцій між вхідними величинами стандартна невизначеність вихідної величини визначається як

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y) + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{k=i+1}^m r_{ik} c_i c_k u(x_i) u(x_k)}$$

У разі рівномірного розподілу коефіцієнта кореляції  $\pm 1$ , сумарна стандартна невизначеність двох корельованих величин визначається як

$$u_{1.2}(y) = |u_1(y) \pm u_2(y)| = |c_1 u(x_1) \pm c_1 u(x_2)|$$

#### 2.1.2.8 Обчислення коефіцієнта охоплення

Коефіцієнт охоплення являє собою множник, на який множать стандартну сумарну оцінку невизначеності для отримання розширеної невизначеності. Його наближене значення для рівня довіри 0,95 дорівнює 2, якщо всі вклади невизначеності оцінені по типу В.

При оцінці невизначеності результатів багаторазових вимірювань, GUM рекомендує брати як коефіцієнт охоплення коефіцієнт за розподілом Стюдента для рівня довіри 0,95 та ефективного числа ступенів свободи  $v_{eff}$ , який визначається за формулою Уелча-Саттерсвейта:

$$v_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^m u_i^4(y)/v_i}$$

де  $v_i$  – число ступенів свободи для  $i$ -ої вхідної величини, що дорівнює  $(n-1)$  для невизначеностей типу А та нескінченості для невизначеностей типу В.

При відсутності внесків невизначеностей, що оцінюються за типом А (всі внески оцінені з типом В)

$$v_{eff} = (n-1) \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^m \frac{u_i^4}{\infty}} = \infty$$

тому коефіцієнт охоплення рівний коефіцієнту Стюдента для нескінченного числа ступенів свободи, що відповідає коефіцієнту охоплення для нормального закону розподілу. Для ймовірності 0,95  $k = t_{0,95} = 1,96 \approx 2$ .

Для прямих багаторазових вимірювань ця формула може бути представлена у вигляді:

$$v_{eff} = (n - 1) \left( \frac{u_c(y)}{u_A(y)} \right)^4$$

де  $u_A$  – сумарна невизначеність за типом А для всіх вхідних величин.

Для непрямих багаторазових вимірювань з однаковим числом спостережень формула набуде вигляду:

$$v_{eff} = (n - 1) \frac{u^4(y)}{\sum u_{iA}^2(y)}$$

#### 2.1.2.9 Розрахунок розширеної невизначеності

Розширену невизначеність отримують шляхом множення невизначеності вихідної величини (сумарної стандартної невизначеності) на коефіцієнт охоплення:

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

#### 2.1.2.10 Запис повного результату вимірювання

Повний результат вимірювання включає в себе оцінку вихідної величини і приписано їй значення розширеної невизначеності із зазначенням рівня довіри:

$$Y = y \pm U, p = 0.95$$

Значення розширеної невизначеності вказується з числом значущих цифр, не більше двох. Результат вимірювання, як і значення вхідних величин, округлюють так, щоб вони відповідали своїм невизначеностям.

#### 2.1.2.11 Складання бюджету невизначеності

Обчислені внески невизначеності зручно представляти у вигляді бюджету невизначеності, який включає в себе список всіх вхідних  $X_1, \dots, X_m$ , і їх оцінок  $x_1, \dots, x_m$  разом з належними їм стандартними невизначеностями вимірювання  $u(x_i)$  і законами їх розподілу, а так само числами ступенів свободи (табл. 2.1) [11].

Для невизначеностей типу А (отриманих шляхом багаторазових повторних спостережень) число ступенів свободи на одиницю менше числа проведених спостережень, для невизначеності типу В число ступенів свободи дорівнює нескінченності. Крім цього для кожної величини таблиця повинна містити коефіцієнт чутливості  $c_i$  і внесок невизначеності  $u_i(y) = c_i u(x_i)$ . Для занесених в таблицю числових значень в таблицю числових значень повинні

вказуватися одиниці вимірювання для відповідної величини. У нижньому рядку бюджету невизначеності можна розмістити інформацію про вихідний величиною (вхідна величина, її оцінка, невизначеність вхідної величини, ефективне число ступенів свободи  $v_{eff}$ , довірча ймовірність  $p=0,95$ , коефіцієнт охоплення, розширена невизначеність).

Таблиця 2.1 – Схема бюджету невизначеності

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність	Число ступенів свободи	Коефіцієнт чутливості	Вклад невизначеності
$X_1$	$x_1$	$u(x_1)$	$v_1$	$c_1$	$u_1(y)$
$X_2$	$x_2$	$u(x_2)$	$v_2$	$c_2$	$u_2(y)$
...	...	...	....	...	...
$X_m$	$x_m$	$u(x_m)$	$v_m$	$c_m$	$u_m(y)$
Вимірювальна величина	Оцінка вимірюваної величини	Сумарна стандартна невизначеність	Ефективне число ступенів свободи	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
$Y$	$y$	$u(y)$	$v_{eff}$	$k$	$U$

## 2.2 Вимоги до оцінки невизначеності вимірювань в калібрувальних лабораторіях

Стандарт ISO/IEC 17025 [4] визначає міжнародне визнання результатів випробувань і калібрування лабораторіями, які отримали акредитацію органів, які уклали MRA з аналогічними органами інших країн. Він законодавчо закріпив необхідність наявності процедур оцінювання невизначеності вимірювань, що проводяться в акредитованих лабораторіях:

- а) при виборі, розробці та оцінці придатності методів і процедур, які використовуються в діяльності лабораторії;
- б) при застосуванні стандартизованих, нестандартизованих і розроблених лабораторією методів і процедур калібрування або випробування;
- в) при оформленні свідоцтв про калібрування і протоколів випробувань;
- г) при створенні програм і процедур калібрування своїх власних вихідних еталонів, зразкових речовин і устаткування, для забезпечення

простежуваності проведених лабораторією калібрування і вимірювань Міжнародної системи одиниць (SI).

Угода про взаємне визнання (MRA) національних еталонів і сертифікатів калібрування та вимірювань, що випускаються національними метрологічними інститутами (НМІ) наказує висловлювати у вигляді розширеної невизначеності з рівнем довіри 0,95 наступні характеристики:

- 1) невизначеність опорного значення ключових звірень;
- 2) заявлені невизначеності індивідуальних значень для кожного НМІ;
- 3) ступінь еквівалентності кожного національного стандарту;
- 4) потенційні калібрувальні можливості національних еталонів в

свідоцтві про калібрування і вимірі.

Оцінювання невизначеності вимірювань, що проводяться при випробуваннях і калібрування повинно здійснюватися відповідно до «Керівництва по виразу невизначеності в вимірюваннях» [11].

Згідно ISO/IEC 17025 [3] для лабораторій, які проводять випробування побутових лічильників необхідно розробляти процедури оцінки невизначеності. Слід зазначити, що, незважаючи на велику кількість нормативних документів з оцінки невизначеності вимірювань відсутня інструкція по оцінці невизначеності вимірювань при випробуваннях побутових лічильників води. З урахуванням розвитку процесів міжнародної стандартизації в Україні, цю прогалину повинно бути заповнено найближчим часом.

### 2.3 Основні поняття калібрування

Калібрування – операція, яка, при зазначених умовах, на першому етапі встановлює співвідношення між значеннями величини, забезпечено вимірювальним еталоном з невизначеністю вимірювання, і відповідними показаннями зі зв'язаною невизначеністю вимірювання, і на другому етапі використовує цю інформацію, для встановлення співвідношення, необхідного для отримання результату вимірювання з показань [1].

Калібрування може бути виражено твердженням, калібрувальною функцією, калібрувальної діаграмою, або калібрувальною таблицею. У деяких випадках вона може складатися з адитивного або мультиплікативного виправлення ознаки зі зв'язаною невизначеністю;

Калібрування не повинно бути переплутано з юстировкою засобу вимірювання (ЗВ), часто помилковозваної «самокалібровка», ні з верифікацією.

Іноді перший крок, єдиний в вищезгаданому визначенні калібрування може бути сприйнятий як калібрування [1].

Повірка – процес визначення органами державної метрологічної служби (або будь-якими іншими уповноваженими організаціями) придатності вимірювальних пристроїв до використання, здійснюваний на підставі експериментально встановлених метрологічних характеристик, а також підтверджує їх відповідність існуючим вимогам. Обов'язковій повірці піддаються вимірювальні засоби, які підлягають (за технічними вимогами) державного метрологічного нагляду і контролю.

Калібрування – це сукупність деяких операцій, що визначають співвідношення між значеннями величин, отриманих за допомогою даного вимірювального приладу, і відповідними значеннями величин, встановлених за допомогою еталона. Калібрування проводиться для того, щоб визначити дійсні метрологічні характеристики конкретного вимірювального приладу. Зазвичай калібрування піддаються вимірювальні пристрої, які не потребують обов'язкового державного метрологічного нагляду і контролю.

Калібрування частково замінило раніше існуючу метрологічну атестацію і відомчу перевірку вимірювальних приладів (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Порівняння операцій повірки та калібрування

Ознака	Повірка	Калібрування
Сфера поширення	ЗВ, що підлягають державного метрологічного нагляду і контролю	ЗВ, використовувані в лабораторіях, акредитованих на відповідність [2]
Періодичність	Визначається НД	Визначає замовник
Умови проведення	Нормальні	Задає замовник
Метод	Передбачено НД	Встановлює замовник
Суть	Визначення МХ плюс перевірка відповідності	Визначення МХ плюс внесення поправки
Оцінка характеристик точності результату	Не проводиться	Невизначеність вказується в калібрувальному сертифікаті

Калібрування – це добровільна операція, яку може виконувати метрологічна служба будь-якого підприємства (якщо таке є). Однак добровільність проведення калібрування не має на увазі під собою звільнення метрологічної служби підприємства від дотримання всіх необхідних вимог.

Головне з яких – це обов'язкова «прив'язка» робочого вимірювального пристрою до державного (національного) еталону. Таким чином, процес калібрування можна охарактеризувати як складову частину державної

системи, що забезпечує єдність вимірювань. А з урахуванням того, що національна система гарантування єдності вимірювань гармонізована з міжнародними нормами і правилами вимірювань, калібрування включена в світову систему, що забезпечує єдність вимірювань [16].

Калібруванню підлягають [2]:

- а) власні вихідні еталони та зразкові речовини лабораторії;
- б) засоби вимірювань лабораторії або взяті напрокат (в оренду), які застосовуються під час калібрувань (випробувань);
- в) обладнання лабораторії, якщо його параметри або характеристики значно впливають на результати випробувань (калібрувань).

Лабораторія повинна мати програму і процедуру калібрування всіх перерахованих засобів вимірювання і обладнання. При створенні цих програм і процедур в них необхідно вказувати невизначеність вимірювань.

Необхідність проведення калібрування, обсяг, порядок, періодичність та перелік необхідних засобів для його проведення під час експлуатації визначається їх користувачем, тобто лабораторією, виходячи з вимог інструкцій з його експлуатації або нормативним документам на методи калібрування і/чи випробування.

#### 2.4 Основні методи калібрування

Метрологічна служба підприємства зобов'язана виконувати певні вимоги. Основна вимога до метрологічної службі – забезпечення відповідності робочого засобу вимірювань державному стандарту, тобто калібрування входить до складу національної системи забезпечення єдності вимірювань [11].

Виділяють чотири методи калібрування (півірки) засобів вимірювальної техніки:

- 1) метод безпосереднього порівняння з еталоном;
- 2) метод звірення за допомогою компаратора;
- 3) метод прямих вимірювань величини;
- 4) метод непрямих вимірювань величини.

Вимоги до методів калібрування:

- повинні відповідати потребам замовника;
- повинні відповідати проведеним в лабораторії калібрування;
- задаються замовником або (якщо не задаються) вибираються калібрувальною лабораторією;
- повинні підходити для використання за призначенням і бути достовірними.

##### 2.4.1 Метод безпосереднього порівняння з еталоном

Метод безпосереднього звірення з еталоном засобу вимірювання, що піддається калібруванню, з відповідним еталоном певного розряду практикується для різних засобів вимірювань в таких сферах, як електричні вимірювання, магнітні вимірювання, визначення напруги, частоти і сили струму. Даний метод базується на здійсненні вимірювань однієї і тієї ж фізичної величини калібруемого приладу і еталоном одночасно. Похибка калібруемого приладу обчислюється як різниця показань калібруемого приладу і еталоного приладу (тобто покази еталоного приладу приймаються за справжнє значення вимірюваної фізичної величини).

Переваги методу безпосереднього звірення з еталоном:

- 1) простота;
- 2) наочність;
- 3) можливість автоматичного калібрування (повірки);
- 4) можливість проведення калібрування за допомогою обмеженої кількості приладів і обладнання.

Схема калібрування для цього випадку наведена на рис. 2.2.

Як джерело сигналу вимірювальної інформації виступає стабілізована міра вимірюваної фізичної величини («засіб порівняння» – відповідно до [17]).

Моделльне рівняння в цьому випадку має вигляд:

$$\Delta = (X_c + \Delta_c) - (X_s + \Delta_s + \theta_s),$$

де  $X_c$  - значення, виміряне ВП, що калібрується;

$X_s$  - значення, виміряне еталоном ВП;

$\Delta_c$  - НСП квантування ВП, що калібрується;

$\Delta_s$  - НСП квантування еталоного ВП;

$\theta_s$  - НСП еталоного ВП.

При багаторазових вимірюваннях оцінки  $X_c$  і  $X_s$  визначаються як середнє арифметичне результатів  $n$  спостережень  $x_{ci}$ ,  $x_{si}$

$$x_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ci},$$

$$x_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{si}.$$

Зазначеним вхідним величинам відповідають такі невизначеності:

$u(x_c)$ ,  $u(x_s)$  стандартні невизначеності, пов'язані з розсіюванням показань приладу, що проходить калібрування і еталоного ВП:

$$u(x_c) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_{ci} - x_c)^2},$$

$$u(x_s) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_{si} - x_s)^2},$$

$u(\Delta_c)$ ,  $u(\Delta_s)$  – невизначеності квантування приладу, що проходить калібрування і еталонного ВП;

$u(\theta_s)$  – невизначеність еталонного ВП, отримана із значення його НСП в припущенні рівномірного розподілу НВВ в середині кордонів.

Оскільки вхідний сигнал для еталонного і приладу, що проходить калібрування один і той же, то при одночасному вимірюванні ними величини,

щовідтворюється стабілізованою мірою може виникнути спостерігається кореляція між їх показаннями. В цьому випадку сумарна стандартна невизначеність калібрування буде визначатися виразом:

$$u(\Delta) = \sqrt{u^2(x_c) + u^2(x_s) - 2r_{c,s}u(x_c)u(x_s) + u^2(\Delta_c) + u^2(\Delta_s) + u^2(\theta_s)},$$

де  $r_{c,s}$  коефіцієнт кореляції, розрахований за показниками еталонного і приладу, що проходить калібрування [11].

При  $r_{c,s} = 1$  (повна кореляція) цей вираз спроститься:

$$u(\Delta) = \sqrt{[u(x_c) - u(x_s)]^2 + u^2(\Delta_c) + u^2(\Delta_s) + u^2(\theta_s)}$$

Для більш коректного вирішення цього завдання доцільно скористатися методом приведення [10]. Тоді результат калібрування буде визначатися за формулою:

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ci} - x_{si}),$$

а сумарна стандартна невизначеність калібрування буде дорівнювати:

$$u(\Delta) = \sqrt{u^2(x_c - x_s) + u^2(\Delta_c) + u^2(\Delta_s) + u^2(\theta_s)},$$

де  $u(x_c - x_s)$  невизначеність, пов'язана з розсіюванням різниці показань приладу, що проходить калібрування і еталонного ВП, що оцінюється за типом А:

$$u(x_c - x_s) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_{ci} - x_{si} - \Delta)^2}$$

Ефективне число ступенів свободи для цього випадку дорівнюватиме:

$$v_{eff} = (n-1) \left[ u(\Delta) / u(x_c - x_s) \right]^4$$

Бюджет невизначеності наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Бюджет невизначеності безпосереднього звірення приладу, що проходить калібрування і еталонного ВП

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність	Число ступенів свободи	Коефіцієнт т чутливості	Вклад невизначеності
$X_c - X_s$	(2.41)	(2.43)	$n - 1$	1	$u(x_c - x_s)$
$\Delta_c$	0	$u(\Delta_c) = \frac{\Delta_c}{\sqrt{3}}$	$\infty$	1	$u(\Delta_c)$
$\Delta_s$	0	$u(\Delta_s) = \frac{\Delta_s}{\sqrt{3}}$	$\infty$	-1	$-u(\Delta_s)$
$\theta_s$	0	$u(\theta_s) = \frac{\theta_s}{\sqrt{3}}$	$\infty$	-1	$-u(\theta_s)$
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Сумарна стандартна невизначеність	Ефективне число ступенів свободи	Коефіцієнт т охопту	Розширене на невизначеність
$\Delta$	(2.41)	(2.42)	(2.44)	$t_{0,95}(v_{eff})$	(2.32)

#### 2.4.2 Метод прямих вимірювань величини

Метод прямих вимірювань величини використовується у випадках, коли є можливість провести порівняння приладу, що проходить калібрування з еталонним в встановлених межах вимірювань. Метод прямих вимірювань базується на тому ж принципі, що і метод безпосереднього звірення. Різниця між цими методами полягає в тому, що за допомогою методу прямих

вимірювань здійснюється порівнянням на всіх числових відмітках кожного діапазону (подіапазону).

Пряме вимірювання приладу, що проходить калібрування величини, що відтворюється еталонною мірою

Моделльне рівняння в цьому випадку має вигляд:

$$\Delta = (X_c + \Delta_c) - (x_s + \Delta_s),$$

де  $X_c$  – значення, виміряне приладом, що проходить калібрування;

$\Delta_c$  – невиключена систематична похибка (НСП) квантування приладу, що проходить калібрування;

$x_s$  – значення еталонної міри, вказане в калібрувальному сертифікаті;

$\Delta_s$  – додаткові НСП, пов'язані з дрейфом відтвореного означення з часу останнього калібрування, відхиленнями в умовах експлуатації заходи (параметри навколишнього сиві, напругу живлення), впливом приладу, що проходить калібрування на параметри еталонної міри, неточністю установки значення, відтвореного багатозначною мірою і т.п.

При багаторазових вимірюваннях оцінка  $X_c$  визначається як середнє арифметичне результатів  $n$  спостережень  $x_{ci}$

Зазначеним вхідним величинам відповідають такі стандартні невизначеності:

$u(x_c)$  – невизначеність, пов'язана з розсіюванням показань приладу, що проходить калібрування, що оцінюється за типом А при виконанні багаторазових вимірювань:

$$u(x_c) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_{ci} - x_c)^2}$$

$u(\Delta_c)$  – невизначеність квантування приладу, що проходить калібрування;

$u(x_s)$  – невизначеність калібрування еталонної міри, отримане з значення розширеної невизначеності,  $U(x_s)$  зазначеної в сертифікаті калібрування;

$u(\Delta_s)$  – сумарна невизначеність додаткових похибок.

Сумарна стандартна невизначеність калібрування буде дорівнює

$$u(\Delta) = \sqrt{u^2(x_c) + u^2(\Delta_c) + u^2(x_s) + u^2(\Delta_s)}.$$

Ефективне число ступенів свободи  $v_{eff}$  для цього випадку буде визначатися за формулою:

$$v_{eff} = (n-1) \left[ u(\Delta) / u(x_c) \right]^4$$

Бюджет невизначеності наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Бюджет невизначеності прямих вимірювань приладу, що проходить калібрування величини, що відтворюється еталонною мірою

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність	Число ступенів свободи	Коефіцієнт т чутливості	Вклад невизначеності
$X_c$	(2.26)	(2.47)	$n-1$	1	$u(x_c)$
$\Delta_c$	0	$u(\Delta_c) = \frac{\Delta_c}{\sqrt{3}}$	$\infty$	1	$u(\Delta_c)$
$X_s$	$x_s$	$u(x_s) = \frac{U(x_s)}{2}$	$\infty$	-1	$u(x_s)$
$\Delta_s$	0	$u(\Delta_s)$	$\infty$	-1	$u(\Delta_s)$
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Сумарна стандартна невизначеність	Ефективне число ступенів свободи	Коефіцієнт т охопту	Розширена невизначеність
$\Delta$	(2.45)	(2.48)	(2.49)	$t_p(v_{eff})$	(2.32)

### 2.4.3 Метод непрямих вимірювань величини

Метод непрямих вимірювань використовується у випадках, коли справжні (дійсні) значення вимірюваних фізичних величин неможливо отримати за допомогою прямих вимірювань або коли непрямі вимірювання вище за точністю, ніж прямі вимірювання. При використанні даного методу для отримання шуканого значення спочатку шукають значення величин, пов'язаних з шуканою величиною відомою функціональною залежністю. А потім на підставі цієї залежності знаходиться розрахунковим шляхом дані значення. Метод непрямих вимірювань, як правило, використовується в установках автоматизованого калібрування (півірки).

Опосередковане відтворення декількома еталонними засобами величини, вимірюваної приладом, що проходить калібрування.

В цьому випадку вимірювана приладом, що проходить калібрування фізична величина відтворюється за допомогою декількох еталонних мір.

Модельне рівняння в цьому випадку має вигляд:

$$\Delta = (X_c + \Delta_c) - f \left[ X(x_{1s} + \Delta_{1s}), X(x_{2s} + \Delta_{2s}), \dots, X(x_{ms} + \Delta_{ms}) \right],$$

де  $X_c$  – значення, виміряне приладом, що проходить калібрування; –

$\Delta_c$  – НСП квантування приладу, що проходить калібрування;

$X_{1s}, X_{2s}, X_{ms}$  дійсні значення еталонних мір, зазначені в калібрувальному сертифікаті;

$\Delta_{1s}, \Delta_{2s}, \Delta_{ms}$  – додаткові похибки засобів, пов'язані з дрейфом відтвореного значення з часу останнього калібрування, відхиленнями в умовах експлуатації засобу (параметри навколишнього середовища, напруги живлення), впливом приладу, що проходить калібрування на параметри еталонної міри, неточністю установки значення, відтвореного багатозначною мірою і т.д.

При багаторазових вимірюваннях оцінка  $X_c$  визначається як середнє арифметичне результатів  $n$  спостережень  $x_{ci}$

$$x_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ci}$$

$u(\Delta_c)$  – невизначеність квантування приладом, що проходить калібрування;

$u(x_{1s}), u(x_{2s}), \dots, u(x_{ms})$  невизначеності калібрування еталонних мір;

$u(\Delta_{1s}), u(\Delta_{2s}), \dots, u(\Delta_{ms})$  – сумарні невизначеності додаткових похибок засобів.

Сумарна стандартна невизначеність калібрування буде дорівнює

$$u(\Delta) = \sqrt{u^2(x_c) + u^2(\Delta_c) + \sum_{i=1}^m c_i^2 [u^2(x_{is}) + u^2(\Delta_{is})]},$$

де  $c_j$  – коефіцієнти чутливості, що визначаються як приватні похідні модельного рівняння по кожній вхідній величині

$$c_j = \frac{\partial \Delta}{\partial x_{js}}$$

Ефективне число ступенів свободи  $\nu_{eff}$  для цього випадку буде визначатися за формулою

$$\nu_{eff} = (n-1) \left[ u(\Delta) / u(x_c) \right]^4$$

Бюджет невизначеності наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Бюджет невизначеності непрямого відтворення декількома еталонними засобами величини, що вимірюється приладом, що проходить калібрування

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність	Число ступенів свободи	Коефіцієнт чутливості	Вклад невизначеності
$X_c$	(2.51)	(2.52)	$n - 1$	1	$u(x_c)$
$\Delta_c$	0	$u(\Delta_c) = \frac{\Delta_c}{\sqrt{3}}$	$\infty$	1	$u(\Delta_c)$
$X_{1s}$	$x_{1s}$	$u(x_{1s}) = \frac{U(x_{1s})}{2}$	$\infty$	(2.54)	$-c_1 u(x_{1s})$
...	...	...	...	...	...
$X_{ms}$	$x_{ms}$	$u(x_{ms}) = \frac{U(x_{ms})}{2}$	$\infty$	(2.54)	$-c_m u(x_{ms})$
$\Delta_{1s}$	0	$u(\Delta_{1s}) = \frac{\Delta_{1s}}{\sqrt{3}}$	$\infty$	(2.54)	$-c_1 u(\Delta_{1s})$
...	...	...	...	...	...
$\Delta_{ms}$	0	$u(\Delta_{ms}) = \frac{\Delta_{ms}}{\sqrt{3}}$	$\infty$	(2.54)	$-c_m u(\Delta_{ms})$
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Сумарна стандартна невизначеність	Ефективне число ступенів свободи	Коефіцієнт охопту	Розширена невизначеність
$\Delta$	(2.50)	(2.53)	(2.55)	$t_{0,95}(v_{eff})$	(2.32)

### 3 МЕТОДИКА КАЛІБРУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРИ СТРУМУ

#### 3.1 Призначення

Дійсна методика призначена для калібрування вимірювальних трансформаторів струму УТТ-6, УТТ-6М, И54, И515, УТТ-5, ТЛ, ТНШЛ-40, ТШЛ-10, ТПФМ, ТВЛ, ТОЛ, ТПЛ-10, ТПОЛ-10, ТК-20; ТК-40; ТШ-20; ТШ-40; Т-0,66, ТШ, ТНШЛ, ТФН-35, ТФН-35М, ТФНД-35, ТФКН-330, ТФРМ-750 та інших, вимірювальних трансформаторів струму з частотою 50 Гц з номінальною силою струму первинної обмотки від 0,5 А до 5000,0 А, з номінальною силою струму вторинної обмотки 5 А, з номінальним навантаженням вторинних ланцюгів від 1,25 ВА до 50,00 ВА при  $\cos\varphi=0,8$  та/або від 2,50 ВА до 15,00 ВА при  $\cos\varphi=1,0$ .

#### 3.2 Область застосування

Дана методика визначає порядок виконання калібрування вимірювальних трансформаторів струму в області вимірювань ЕМ-електрика та магнетизм і призначена для осіб, включених до списку на право проведення калібрування по електричним і магнітним вимірюванням.

#### 3.3 Нормативні посилання

ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2005, IDT)

ДСТУ IEC 60044-1:2008 Трансформатори вимірювальні. Частина 1. Трансформатори струму (IEC 60044-1:2003, IDT)

ЕА-4/02 М:2013 Вираз невизначеності вимірювання при калібруванні

VIM International vocabulary of basic and general terms in metrology, issued by BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML (Міжнародний

словник базових і загальних термінів у метрології, виданий ВІРМ, ІЕС, ІFСС, ІSO, ІUPAC, ІUPAP та OIML)

ДСТУ ГОСТ 23624-2003 Трансформатори струму вимірювальні лабораторні. Загальні технічні умови (ГОСТ 23624-2001, IDT)

НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів

ОП 01.12 Інструкція з охорони праці загальні вимоги для робітників підприємства

ОП 02.12 Інструкція з охорони праці для користувачів ПЕОМ

ОП 27.12 Інструкція з охорони праці з випробувань та вимірювань електроустановок споживачів, атестації високовольтного випробувального устаткування, повірки та атестації трансформаторів струму та напруги електротехнічної лабораторії

ПБ 01.12 Інструкція з пожежної безпеки на об'єктах ДП «КРИВБАС-СТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ»

### 3.4 Компетенція

Особа, яка проводить калібрування, має бути атестована як калібрувальник за електромагнітними вимірюваннями, і нести відповідальність за виконання даної процедури калібрування.

### 3.5 Скорочення та визначення

Нижче подано терміни, позначення, скорочення, використовувані в даній Методиці та визначення позначених нею понять.

#### 3.5.1 Середнє арифметичне

Сума всіх зафіксованих значень масиву даних, поділена на кількість елементів масиву.

#### 3.5.2 Коефіцієнт чутливості

Числовий коефіцієнт, який використовується як множник сумарної стандартної невизначеності для отримання розширеної невизначеності.

### 3.5.3 Імовірність охоплення (*coverage probability*)

Ймовірність того, що сукупність дійсних значень вимірюваної величини знаходиться всередині зазначеного інтервалу покриття VIM.

### 3.5.4 Експериментальне стандартне відхилення

Позитивний квадратний корінь з експериментальної дисперсії.

### 3.5.5 Розширена невизначеність вимірювання (*expanded measurement uncertainty*)

Розширена невизначеність добуток сумарної стандартної невизначеності і коефіцієнта більшого, ніж одиниця VIM.

### 3.5.6 Оцінювання невизначеності за Типом А (*Type A evaluation of measurement uncertainty*)

Метод оцінювання складової невизначеності вимірювань за допомогою статистичного аналізу вимірних значень величини, що спостерігаються при певних умовах вимірювання VIM.

### 3.5.7 Калібрування (*calibration*)

Операція, за допомогою якої в зазначених умовах на першому етапі встановлюється зв'язок між значеннями величини з невизначеністю вимірювань, що забезпечується еталонами та відповідними показниками з пов'язаними з ними невизначеностями вимірювання, а на другому етапі використовує цю інформацію для встановлення зв'язку для отримання результату вимірювання з показів VIM.

Примітка 1. Калібрування може бути виражене як якесь твердження, функція калібрування, діаграма калібрування, калібрувальна крива або таблиця калібрування. У деяких випадках вона може включати адитивну або мультиплікативну поправку до показань з відповідною невизначеністю.

Примітка 2. Калібрування не слід плутати ні з регулюванням вимірювальної системи, часто помилково званої "Самокалібруванням", ні з підтвердженням калібрування (*verification of calibration*).

Примітка 3. Часто тільки перший етап в наведеному вище визначенні розуміється як калібрування.

### 3.5.8 Похибка вимірювання, похибка (*measurement error, error of measurement*)

Різниця між результатом вимірювання величини та опорним значенням величини VIM.

### 3.5.9 Позначення і скорочення

НД нормативний документ;

ЗВТ засіб вимірювальної техніки;

ТО технічний опис

## 3.6 Операції калібрування

При проведенні калібрування повинні бути виконані операції, зазначені в Таблиці 1.

**Таблиця 1**

№ операції	Найменування операції	Номер пункту методики
1	Підготовка до калібрування	
2	Проведення калібрування	3.11
2.1	Зовнішній огляд	3.11.1
2.2	Перевірка опору ізоляції	3.11.2
2.3	Розмагнічування	3.11.3
2.4	Перевірка правильності позначення контактних затискачів і виводів	3.11.4
2.5	Проведення вимірювань	3.11.5
2.6	Розрахунок вимірюваної величини і невизначеності вимірювання	3.11.6
3	Оформлення результатів калібрування	3.12

### 3.7 Обладнання і засоби калібрування

При проведенні калібрування використовуються еталони, зазначені в Таблиці 2, допоміжні засоби вимірювальної техніки (ЗВТ), зазначені в Таблиці 3 і допоміжне обладнання в Таблиці 4.

Таблиця 2 – Еталони

Найменування	Характеристики			Рекомендований тип
	Номинальні значення сили первинного струму	Межі основної струмової похибки	Межі основної кутової похибки	
Трансформатор струму еталонний з розширювачем діапазонів	0,5; 1,0; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 7,5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 75; 80; 100; 125; 150; 200; 250; 300; 400; 500; 600 А	$\pm 0,02$ %	$\pm 1,5$ хв	СА535/2
	750, 800, 1000, 1200, 1250, 1500, 1600, 2000, 2500, 3000; 4000; 5000 А	$\pm 0,025$ %		РД564

Таблиця 3 – Допоміжні ЗВТ

Найменування	Характеристики СИТ		Рекомендований тип
	Межі вимірювання	Клас точності, похибка	
Компаратор	від 0,01 А до 7,00 А	$\delta = \pm 0,01$ %	СА507
Магазин опору	від 1,25 ВА до 50,00 ВА при $\cos\varphi=0,8$ від 2,50 ВА до 15,00 ВА при $\cos\varphi=1,0$	$\delta=5,0$ %	Р5018/5М
Аналізатор якості електричної енергії	від 0 до 1000 В, від 0 до 6000 А, від 40 до 60 Гц	$\delta = \pm 0,5$ %	С.А.8335
Мегаомметр	від 0 до 1000 МОм	$\delta = \pm 15$ %	ЭС 0210/2-Г
Гігрометр	от 0 °С до 25 °С	ц.п. 0,2 °С	ВИТ-1

Таблиця 4 – Допоміжне обладнання

Найменування	Характеристики	Рекомендований тип
Джерело струму	до 6200 А	Джерело струму 3600 блок комутаційний з трансформаторами силовими ТС1, ТС2, ТС3

Еталон вибирається, керуючись наступними пунктами:

- Задовольняє заявленому клієнтом діапазону вимірювань і бажаної невизначеності вимірювань,
- Задовольняє наявних можливостей вимірювань,
- Рекомендований виробником вимірювальних трансформаторів.

Дозволяється використовувати інші еталони і допоміжні ЗВТ, що відповідають вимогам даної методики за точністю і межами відтворювань (вимірювань), або з вищими метрологічними характеристиками.

### 3.8 Умови калібрування

Еталони, допоміжні ЗВТ та ті що підлягають калібруванню мають бути витримані не менше ніж три години на робочому місці.

Відносна вологість повітря від 30 % до 80 %.

Температура навколишнього середовища  $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ .

Напруга живлення мережі  $220 \text{ В} \pm 10 \%$ .

Частота мережі  $50 \text{ Гц} \pm 1 \%$

Коефіцієнт гармонік мережі живлення не більше 5 %

Еталони, допоміжні та ЗВТ, що калібруються мають бути витримані на робочому місці не менше трьох годин перед початком калібрування.

Умови калібрування контролюються перед калібруванням і в процесі калібрування.

### 3.9 Підготовка до калібрування

Ознайомитися з технічною документацією, технічним описом (ТО) на вимірювальний трансформатор струму, що підлягає калібруванню, замовленням на калібрування.

Підготувати вимірювальний трансформатор до роботи відповідно до його інструкцій з експлуатації і ТО. Його акліматизація повинна проходити в тому приміщенні, де буде виконуватися калібрування і при тих же умовах, які необхідні для калібрування.

Підготувати еталони до роботи відповідно до інструкцій з експлуатації і ТО. Їх акліматизація повинна проходити в тому приміщенні, де буде виконуватися калібрування і при тих же умовах, які необхідні для калібрування. Прогрів еталонів, допоміжних ЗВТ проводиться для встановлення робочого режиму та досягнення їх параметрами значень, що повністю задовольняють ТО. Під час прогріву не повинно проводитися ніяких вимірювань і перемикачів.

### 3.10 Вимоги безпеки

До калібрування вимірювальних трансформаторів струму допускаються особи, які пройшли інструктаж, відповідно НПАОП 40.1-1.21.

Особи виконують калібрування повинні бути ознайомлені і дотримуватися вимог інструкцій з охорони праці ВП 01.12, ОП 02.12, ОП 27.12 і інструкції з пожежної безпеки ПБ 01.12, а також вимог зазначеними в документації по експлуатації використовуваних приладів.

Перед будь-якими перемикачними в ланцюгах схем калібрування слід переконатися, що живлення ланцюгів первинних струмів відключено та струм у первинному колі калібруемого трансформатора відсутній. Відключення живлення проводять за допомогою комутаційного пристрою, розташованого до регулятора напруги або безпосередньо після нього.

При оцінюванні невизначеності однієї з обмоток трансформаторів струму, що мають дві і більше вторинних обмотки, кожна з яких розміщена на окремому магнітопроводі, інші вторинні обмотки повинні бути замкнуті на навантаження, що не перевищує номінального значення, чи накоротко.

### 3.11 Проведення калібрування

#### 3.11.1 Зовнішній огляд

При зовнішньому огляді встановлюють відповідність трансформаторів струму наступним вимогам:

- контактні затискачі або виводи первинної і вторинної обмоток повинні бути справні і мати відповідне маркування;
- окремі частини трансформаторів струму повинні бути міцно закріплені;
- болт для заземлення, якщо він передбачений конструкцією, повинен мати відповідне позначення графічним символом 60417-2-IEC-5019;
- корпус трансформатора не повинен мати дефектів, що призводять до витоку рідинного або газового ізоляційного середовища, що його заповнює;
- короткозамикач, якщо він передбачений конструкцією, повинен бути справний;
- на табличці трансформатора повинні бути чітко вказані його паспортні дані.

Якщо при зовнішньому огляді виявлені дефекти за наведеним переліком, то вимірювальний трансформатор до подальших операцій калібрування не допускається.

#### 3.11.2 Перевірка опору ізоляції

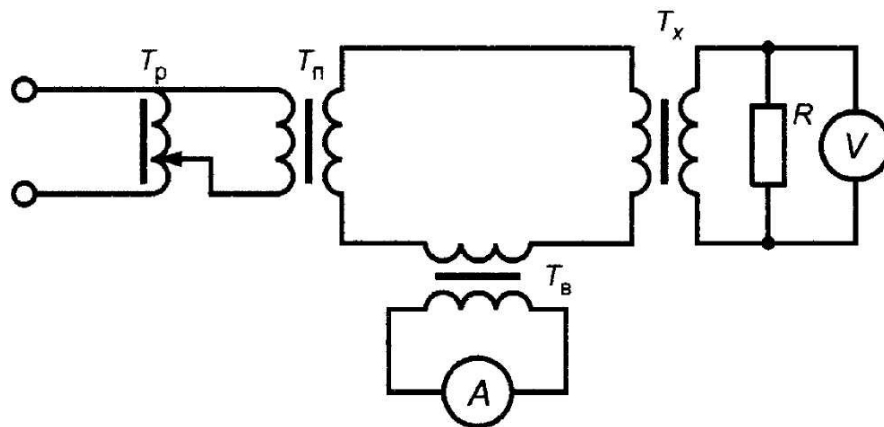
Опір ізоляції обмоток у трансформаторів струму, призначених для експлуатації в мережах з напругою понад 30 В, перевіряють для кожної обмотки між з'єднаними разом контактними виводами обмоток і корпусом за допомогою мегомметра на 1000 В - для вторинних і проміжних обмоток

трансформаторів струму всіх класів напруги, а також для первинних обмоток трансформаторів струму на клас напруги менше 1 кВ і мегомметра на 2500 В - для первинних обмоток трансформаторів струму класів напруги 1 кВ і вище.

Значення опору ізоляції повинні бути не менше значень, зазначених в ДСТУ ІЕС 60044-1, ДСТУ ГОСТ 23624. Якщо значення опору ізоляції не відповідають встановленим нормам, то трансформатор до подальших операцій калібрування не допускається.

### 3.11.3 Розмагнічування

Схема розмагнічування приведена на рисунку 1. Розмагнічування проводять на змінному струмі при частоті 50 Гц.



$T_p$  - регулюючий пристрій (автотрансформатор);

$T_n$  - понижуючий силовий трансформатор;

$T_x$  - трансформатор струму, який калібрують;

$T_b$  - допоміжний трансформатор струму;

$R$  - резистор

Рисунок 1 – Приклад схеми розмагнічування трансформатора струму.

У трансформаторів струму з декількома вторинними обмотками, кожна з яких розміщена на окремому магнітопроводі, розмагнічують кожен магнітопровід. Допускається розмагнічування різних магнітопроводів виконувати одночасно.

Трансформатори струму розмагнічують одним із зазначених нижче способів.

**Перший спосіб.** Вторинну обмотку замикають на резистор потужністю не менше 250 Вт і опором  $R$ , Ом, що розраховується (з відхиленням в межах  $\pm 10\%$ ) за формулою

$$R = \frac{250}{I_{ном}^2}, \quad (1)$$

де  $I_{ном}$  - номінальний вторинний струм трансформатора, що калібрують, А

Якщо трансформатор, що калібрують, має кілька вторинних обмоток, кожна з яких розташована на своєму магнітопроводі, то обмотки, розташовані на інших магнітопроводах, замикають накоротко.

Через первинну обмотку пропускають номінальний струм, потім плавно (протягом однієї-двох хвилин) зменшують його до значення, що не перевищує 2 % від номінального;

**Другий спосіб.** Через первинну обмотку трансформатора струму при розімкнутій вторинній обмотці пропускають струм, рівний 10 % від номінального значення первинного струму, потім плавно знижують його до значення, що не перевищує 0,2 % від номінального;

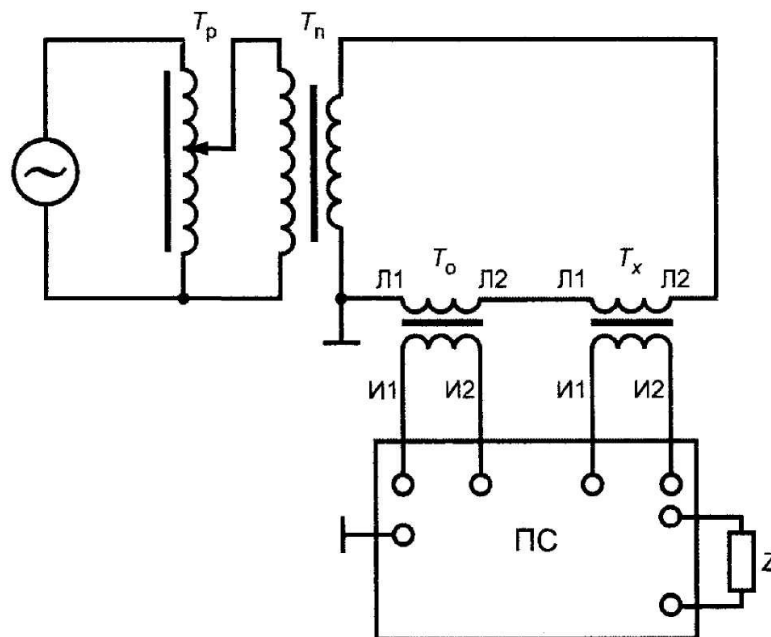
**Третій спосіб.** Через вторинну обмотку трансформатора струму при розімкнутій первинній обмотці пропускають струм, рівний 10 % від номінального значення вторинного струму, потім плавно знижують його до значення, що не перевищує 0,2 % від номінального.

Якщо при струмі в первинній обмотці, що становить 10 % від номінального, амплітудне значення напруги на вторинній обмотці перевищує 75 % від напруги, зазначеної в ДСТУ ІЕС 60044-1 при випробуванні міжвиткової ізоляції, то розмагнічування починають при меншому значенні струму, при якому напруга, індукована (, другий спосіб) або та, що прикладається до вторинної обмотки (, третій спосіб), не перевищує зазначеного.

**Примітка.** При перевірці трансформаторів струму на підприємстві-виробнику (при випуску з виробництва) або при ремонті допускається поєднувати розмагнічування з випробуванням міжвиткової ізоляції або вимірюванням струму намагнічування.

### 3.11.4 Перевірка правильності позначення контактних затискачів і виводів

Схема повірки наведена на рисунку 2. Правильність позначення контактних затискачів і висновків визначають за схемою повірки, обраної для оцінки невизначеності по 9.5.



~ - мережа (генератор);  $T_r$  - регулюючий пристрій (автотрансформатор);  $T_n$  - понижуючий силовий трансформатор;  $T_0$  — еталон;  $T_x$  - трансформатор струму, який калібрують;  $L_1, L_2$  - контактні затискачі первинної обмотки,  $I_1, I_2$  - контактні затискачі вторинної обмотки;  $Z$  - навантаження;  $ПС$  - прилад порівняння

**Рисунок 2** – Схема калібрування з використанням еталона і приладу порівняння (компаратора вторинних струмів)

Трансформатор який калібрують і еталон включають відповідно до маркування контактних затискачів за схемою (див. Рисунок 2). Потім плавно збільшують первинний струм до значення, що становить 5 % - 10 % від номінального. У разі правильного маркування виводів на приладі порівняння струмів можна визначити відповідні значення похибок трансформатора який

калібрують. При неправильному позначенні контактних затискачів і виводів або несправності трансформатора який калібрують спрацьовує захист в приладі порівняння струмів. В цьому випадку вимірювальний трансформатор до подальших операцій калібрування не допускається.

**Примітка.** Допускається проводити перевірку правильності позначення виводів іншими методами.

### 3.11.5 Проведення вимірювань

Струмові і кутові похибки трансформаторів струму визначають диференціальним (нульовим) методом відповідно до рисунка 2 при значеннях первинного струму і навантаження, зазначених в заявці на калібрування. З'єднання приладів для вимірювальної схеми за рисунком 2 здійснюють відповідно до вимог керівництва з експлуатації застосовуваного приладу порівняння струмів. Номінальне значення навантаження встановлюють до початку вимірювань. Послідовність виконання вимірювань - від мінімального значення струму з подальшим його збільшенням до максимального.

Значення відносної струмової похибки трансформатора який калібрують  $\delta_f$  в процентах і абсолютної кутовий похибки  $\Delta_\delta$  в хвилинах приймають рівними значенням струмової та кутової похибок, відлічуваним за шкалами приладу порівняння струмів.

Похибки визначають для трансформаторів струму, відповідно до визначених замовником у заявці на калібрування умовах.

У випадках коли замовник не зазначив умов, щодо калібрування, похибки визначають при значеннях первинного струму 1; 5; 20; 100; 120 % від номінального значення, і при номінальному навантаженні вторинних обмоток.

У кожній точці виконують десять спостережень.

Похибки багатодіапазонних трансформаторів струму визначають:

- Для трансформаторів з відгалуженнями в обмотках - при всіх значеннях коефіцієнта трансформації;

- Для секціонованих трансформаторів, у яких зміна коефіцієнта трансформації досягається послідовно-паралельним з'єднанням секцій обмоток без зміни ампер витків - при будь-якому коефіцієнті трансформації (але для кожної секції).

Результати всіх вимірювань похибок трансформаторів струму заносять в протокол, рекомендована форма якого наведена в додатку А.

### 3.11.6 Розрахунок величини що вимірюють та складання бюджету невизначеності вимірювання

Згідно ЕА-4/02 метод типу А для оцінювання стандартної невизначеності вимірювання застосовується, коли для однієї з вхідних величин  $X_i$  проведені при однакових умовах вимірювання  $n$  незалежних спостережень. Якщо метод вимірювання володіє достатньою роздільною здатністю, то отримані значення показують спостережуваний розкид.

Припустимо, що неодноразово вимірювали вхідну величину  $X_i$  є кількість  $V$ . При  $n$  статистично незалежних спостереженнях ( $n > 1$ ), оцінка величини  $V$  є  $\bar{V}$ , середнє арифметичне або середнє окремих спостережуваних значень  $V_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ):

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i, \quad (2)$$

де:  $V_i$  - результат  $i$ -того вимірювання точки яку калібрують;

$n$  - кількість вимірювань;

$\bar{V}$  - середнє арифметичне значення для кожної точки.

Стандартна невизначеність, пов'язана з оцінкою  $\bar{V}$ , оцінюється наступними методами:

Дисперсія розподілу ймовірностей, що лежить в основі спостережень, оцінюється за допомогою експериментальної дисперсії  $S^2(V)$  значень  $V_i$ , яка виражається як:

$$s^2(V) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2 \quad (3)$$

Позитивний квадратний корінь з цієї дисперсії називається експериментальним стандартним відхиленням. Найкращою оцінкою дисперсії середнього арифметичного значення  $\bar{V}$  тому буде експериментальна дисперсія середнього значення. Вона визначається як:

$$s^2(\bar{V}) = \frac{s^2(V)}{n} \quad (4)$$

Позитивний квадратний корінь з дисперсії середнього значення називається експериментальним стандартним відхиленням середнього значення. Стандартна невизначеність вимірювання  $u(\bar{V})$ , пов'язана з оцінкою  $\bar{V}$  є експериментальним стандартним відхиленням середнього значення:

$$u(\bar{V}) = s(\bar{V}) \quad (5)$$

Математична модель величини яку калібрують розраховується за формулою:

$$\begin{aligned} V_x = \bar{V}_x + \delta V_{em.} + \delta V_{порів} + \delta V_{навант} + \delta V_{відл.ет} + \delta V_{Тсеред} + \\ + \delta V_{волог.серед} + \delta V_{нест.у часі} + \delta V_{Uживл} + \delta V_{методу} + \\ + \delta V_{кабелів} + \delta V_{дрейф ет.} \end{aligned} \quad (6)$$

де  $\bar{V}_x$  – середнє значення вимірюної величина;

$\delta V_{em.}$  - поправка, що враховує вплив, внесений еталоном при вимірюваннях. Зазначена в останньому свідоцтві про калібрування еталона;

$\delta V_{порів}$  - поправка, що враховує вплив, що вноситься приладом, компаратор, порівняння вторинних струмів;

$\delta V_{\text{навант}}$  - поправка, що враховує вплив, що вноситься магазином навантажень;

$\delta V_{\text{відл.ет}}$  - поправка, що враховує відхилення через роздільну здатність прилада, компаратор, порівняння вторинних струмів:

$$\delta V_{\text{відл.ет}} = 0,5 \cdot JS , \quad (7)$$

де:  $JS$  - найменше значення, яке можна відрахувати по дисплею еталона, найменше значення поділу (дискретність).

$\delta V_{T_{\text{серед}}}$  - поправка, що враховує вплив на еталон температури навколишнього середовища. Зазначена виробником в паспорті приладу, що калібрується. Якщо виробник не зазначає цю поправку, то приймається, що її значення дорівнює нулю в дозволеному діапазоні умов калібрування.

$\delta V_{\text{волог.серед}}$  - поправка, що враховує вплив на еталон відносної вологості навколишнього середовища. Зазначена виробником в паспорті приладу, що калібрується. Якщо виробник не зазначає цю поправку, то приймається, що її значення дорівнює нулю в дозволеному діапазоні умов калібрування.

Температура і вологість навколишнього середовища в лабораторії підтримується системою клімат-контролю. Контроль над параметрами навколишнього середовища проводиться за допомогою термогігрометра.

$\delta V_{\text{нест. у часі}}$  - поправка, що враховує нестабільність показань приладу у часі. Зазначена виробником в паспорті приладу, що калібрується. Якщо виробник не зазначає цю поправку, то приймається, що її значення дорівнює нулю в дозволеному діапазоні умов калібрування.

$\delta V_{U_{\text{живл}}}$  - поправка, що враховує нестабільність напруги і частоти мережі живлення. Якщо виробник не зазначає цю поправку, то приймається, що її значення дорівнює нулю в дозволеному діапазоні умов калібрування.

Значення напруги і частоти мережі забезпечуються стабілізатором напруги і частоти мережі в діапазоні, зазначеному в розділі 8, значення яких підтверджуються проведеним моніторингом параметрів живлення мережі.

$\delta V_{\text{методу}}$  - поправка, що враховує вплив обраного методу вимірювання. У даному випадку використовуються методи вимірювання, рекомендовані виробником і гарантують отримання результатів вимірювання відповідно до заявлених значень. Тому вплив цієї складової дорівнює нулю.

$\delta V_{\text{кабелів}}$  - поправка, що враховує вплив вимірювальних кабелів при вимірах. Для вимірювань використовуються кабелі з комплекту еталонів, вплив яких враховується при калібруванні еталона і є складовою частиною його поправки. Виходячи з цього, вплив цієї складової дорівнює нулю.

$\delta V_{\text{дрейф ет.}}$  - поправка, що враховує зміну значення еталона з моменту останнього калібрування. Оцінюється нульовим значенням з максимальним від нього відхиленням, яке наводиться виробником в паспорті еталона.

Обробку результатів калібрування і розрахунок невизначеності виконують за допомогою електронно-обчислювальної техніки.

Використовуючи отримані у п. данні, для кожної точки калібрування розраховують середнє арифметичне значення за формулою (2).

Для складання бюджету невизначеності вимірювання спочатку визначається стандартна невизначеність вимірювання, що виникає від розкиду виміряних показань. Для цього вважаємо експериментальне середньоквадратичне відхилення  $S(\bar{V}_x)$  за формулою:

$$S(\bar{V}_x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \left[ \sum_{i=1}^n [V_{xi} - \bar{V}_x]^2 \right]}, \quad (8)$$

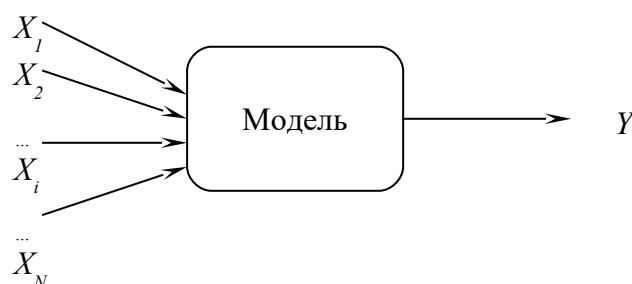
Дисперсія середнього:

$$s(\bar{V}_x)^2 = \frac{S(\bar{V}_x)^2}{n}, \quad (9)$$

Виходячи з попереднього, розраховується стандартна невизначеність вимірювання від розкиду виміряних значень:

$$u(\bar{V}_x) = s(\bar{V}_x) = \frac{S(\bar{V}_x)}{\sqrt{n}}, \quad (10)$$

Для точного уявлення розширеної невизначеності вимірювання розглянемо модель калібрування в загальному вигляді, рисунок 3.



### Рисунок 3 – Модель вимірювання в загальному вигляді

Відповідно до моделі вимірювання, вихідна величина  $Y$  - є якась функція від вхідної величини.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N), \quad (11)$$

де:  $N$  - кількість вхідних величин.

Тоді результат являє собою наступну функцію:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N), \quad (12)$$

де:  $y$  - оцінка вихідної величини, а  $x_i$  - оцінки вхідних величин відповідно.

Сумарна стандартна невизначеність оцінки вихідної величини буде розраховуватися за формулою:

$$u_i^2(y) = \sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i), \quad (13)$$

де:  $u_i^2(y)$  - це складова стандартної невизначеності вихідної величини, що отримується за стандартною невизначеності вхідного сигналу.

$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$  - коефіцієнти чутливості, пов'язані з вхідною величиною, як часткові похідні, які показують, як пов'язані між собою вхідні величини, яким чином вони між собою корелюють.

Тоді розширена невизначеність вимірювання в загальному вигляді буде виглядати так:

$$U = k \cdot u(y) = k \sqrt{c_1^2 u^2(x_1) + c_2^2 u^2(x_1) + \dots + c_i^2 u^2(x_i)}, \quad (14)$$

де  $k$  - коефіцієнт охоплення, при певній ймовірності.  $k = 2$  при нормальному законі розподілу і 95 % рівні довіри.

При оцінюванні стандартної невизначеності вимірювання за типом В невизначеність вимірювання, пов'язана оцінкою  $x_i$  вхідної величини  $X_i$  оцінюється за методом, який полягає не в статистичному аналізі ряду спостережень. Стандартна невизначеність вимірювання  $u(x_i)$  оцінюється при цьому за допомогою метрологічно обґрунтованої оцінки мінливості вхідної величини  $X_i$ , враховуючи всю наявну в розпорядженні інформацію.

Якщо можуть бути оцінені для значення величини  $X_i$  тільки верхня і нижня межа  $a_+$  і  $a_-$  (наприклад, дані виробника про вимірювальний прилад, область мінливості температури, похибка округлення або відкидання внаслідок автоматичної обробки даних), то необхідно приймати розподіл ймовірностей з постійною щільністю ймовірності між кордонами (прямокутна щільність ймовірності) для мінливості вхідної величини  $X_i$ .

Якщо для величини  $X_i$  з теоретичних чи експериментальних основ може передбачатися розподіл ймовірностей, то математичне сподівання і квадратний корінь з дисперсії цього розподілу використовуються як оцінка  $x_i$  і пов'язана з ним стандартна невизначеність вимірювань  $u(x_i)$ , отримуємо:

$$x_i = \frac{1}{2} \cdot (a_+ + a_-) \quad (15)$$

для оцінки вхідної величини  $X_i$  та

$$u^2(x_i) = \frac{1}{12} \cdot (a_+ - a_-)^2 \quad (16)$$

для квадрата стандартної невизначеності вимірювання, пов'язаної з  $X_i$ . Якщо різниця між граничними значеннями описується за допомогою  $2a$ , то рівність (16) може також бути записано в формі:

$$u^2(x_i) = \frac{1}{3} a^2 \quad (17)$$

З огляду на вплив всіх складових відповідно до математичної моделі для проведених в даному випадку вимірювань, розширена невизначеність вимірювання підраховується за формулою:

$$U(V_Y) = 2 \cdot \sqrt{c_1^2 u^2 (\overline{V_x}) + c_2^2 u^2 (\delta V_{em.}) + c_3^2 u^2 (\delta V_{порів}) + c_4^2 u^2 (\delta V_{навант}) + c_5^2 u^2 (\delta V_{відл.ем.}) + c_6^2 u^2 (\delta V_{Тсеред}) + c_7^2 u^2 (\delta V_{волог.серед}) + c_8^2 u^2 (\delta V_{нест.у часі}) + c_9^2 u^2 (\delta V_{U_{живл}}) + c_{10}^2 u^2 (\delta V_{методу}) + c_{11}^2 u^2 (\delta V_{кабелів}) + c_{12}^2 u^2 (\delta V_{дрейф ст.})}, \quad (18)$$

де  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9, c_{10}, c_{11}, c_{12}$  - коефіцієнти чутливості, що враховують взаємний вплив вхідних величин відповідно до моделі калібрування і які становлять часткові похідні. В даному випадку прямих вимірювань вхідні величини незалежні один від одного  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9, c_{10}, c_{11}, c_{12} = 1$ , тому що часткова похідна від вхідної величини дорівнює:

$$\begin{aligned} c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = c_5 = c_6 = c_7 = c_8 = c_9 = c_{10} = \\ = c_{11} = c_{12} = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} = \frac{\partial U}{\partial u} = \partial U(u) = (U)' = 1' \end{aligned} \quad (19)$$

$u(\overline{V_x})$  - Стандартна невизначеність вимірювань через розкид показань, за формулою (9),

$u(\delta V_{em.})$  - Стандартна невизначеність вимірювання вноситься еталоном, розрахована за законом нормального розподілу:

$$u(\delta V_{em.}) = \frac{U_{em.}}{2}, \quad (20)$$

$U_{em.}$  - Розширена невизначеність вимірювання з специфікації стандарту.

$u(\delta V_{порів})$  - Стандартна невизначеність вимірювання, що вноситься приладом, компаратор, порівняння вторинних струмів розрахована за законом нормального розподілу;

$u(\delta V_{навант})$  - Стандартна невизначеність вимірювання, що виникає від впливу навантаження у вторинних ланцюгах трансформатора який досліджують;

$u(\delta V_{\text{відл.ет.}})$  - Стандартна невизначеність вимірювання, що виникає від відліку показань:

$$u(\delta V_{\text{відл.ет.}}) = \frac{0,5 \cdot JS}{\sqrt{3}}, \quad (21)$$

де:  $JS$  - найменше значення, яке можна відрахувати по дисплею еталона, найменше значення поділу (дискретність),

$u(\delta V_{\text{Тсеред}})$  - Стандартна невизначеність вимірювання яка вноситься зміною температури навколишнього середовища. Зазначена виробником в паспорті приладу, що калібрується. Розраховується за законом нормального розподілу. Якщо виробник не зазначає цю невизначеність або додаткову похибку, то приймається, що її значення дорівнює нулю в дозволеному діапазоні умов калібрування.

$u(\delta V_{\text{волог.серед}})$  - Стандартна невизначеність вимірювання яка вноситься відносної вологості навколишнього середовища. Розраховується за законом нормального розподілу. Зазначена виробником в паспорті приладу, що калібрується. Якщо виробник не зазначає цю невизначеність або додаткову похибку, то приймається, що її значення дорівнює нулю в дозволеному діапазоні умов калібрування.

$u(\delta V_{\text{нест. у часі}})$  - Стандартна невизначеність вимірювання яка вноситься нестабільністю показань приладу у часі. Розраховується за законом нормального розподілу. Зазначена виробником в паспорті приладу, що калібрується. Якщо виробник не зазначає цю невизначеність або додаткову похибку, то приймається, що її значення дорівнює нулю в дозволеному діапазоні умов калібрування,

$u(\delta V_{\text{Uживл}})$  - Стандартна невизначеність вимірювання яка вноситься нестабільністю напруги і частоти мережі живлення.

Розраховується за законом нормального розподілу. Зазначена виробником в паспорті приладу, що калібрується. Якщо виробник не зазначає цю невизначеність або додаткову похибку, то приймається, що її значення дорівнює нулю в дозволеному діапазоні умов калібрування.

$u(\delta V_{\text{методу}})$  - Стандартна невизначеність вимірювання яка вноситься обраним методом вимірювання. У даному випадку використовуються методи вимірювання, рекомендовані виробником і гарантують отримання результатів калібрування відповідно до заявлених значень. Тому вплив цієї складової дорівнює нулю.

$u(\delta V_{\text{кабелів}})$  - Стандартна невизначеність вимірювання яка вноситься вимірювальними кабелями при вимірах. Для вимірювань використовуються кабелі з комплекту еталонів, вплив яких враховується при калібруванні еталона і є складовою частиною його поправки. Виходячи з цього, вплив цієї складової дорівнює нулю.

$u(\delta V_{\text{дрейф ет.}})$  - Стандартна невизначеність вимірювання яка вноситься зміною значення еталона з моменту останнього калібрування. Розраховується за законом нормального розподілу. Зазначена виробником в паспорті приладу, що калібрується. Якщо виробник не зазначає цю невизначеність або додаткову похибку, то приймається, що її значення дорівнює нулю в дозволеному діапазоні умов калібрування;

Результат вимірювання і всі складові невизначеності вимірювання представлені в бюджеті невизначеності, Таблиця 5.

**Таблиця 5** – Таблиця бюджету невизначеності вимірювання

Величина $X_i$	Оцінка $x_i$	Стандартна невизначеність $u(x_i)$	Імовірнісний розподіл	Коефіцієнт чутливості $c_i$	Складова сумарної невизначеності $u_i(y)$
$\bar{V}_x$	значення	значення	Нормальний	1,0	значення
$\delta V_{\text{ет.}}$	значення	значення	Нормальний	1,0	значення
$\delta V_{\text{порів}}$	значення	значення	Нормальний	1,0	значення
$\delta V_{\text{навант}}$	значення	значення	Рівномірний	1,0	значення
$\delta V_{\text{відл.ет.}}$	значення	значення	Прямокутний	1,0	значення
$\delta V_{T_{\text{серед}}}$	значення	значення	Нормальний	1,0	значення
$\delta V_{\text{волог. серед}}$	значення	значення	Нормальний	1,0	значення
$\delta V_{\text{нест. у часі}}$	значення	значення	Нормальний	1,0	значення
$\delta V_{U_{\text{живл}}}$	0	значення	Нормальний	1,0	значення
$\delta V_{\text{методу}}$	0	значення	Нормальний	1,0	значення
$\delta V_{\text{кабелів}}$	0	значення	Нормальний	1,0	значення
$\delta V_{\text{дрейф ет.}}$	0	значення	Прямокутний	1,0	значення
		Сумарна невизначеність		$u(V_y)$	значення
		Ефективні ступені свободи		$\nu_{\text{eff}}$	значення
		Коефіцієнт охоплення		$k(\nu_{\text{eff}})$	значення
$V_x$	значення	Розширена невизначеність		$U=u(V_y) \cdot k$	значення

Через відсутність індикації сили струму не спостерігалося розсіювання в показах значень.

Зазначена розширена невизначеність вимірювання встановлюється як стандартна невизначеність вимірювань помножена на коефіцієнт охоплення  $k = 2$ , який відповідає для нормального розподілу з ймовірністю 95 %.

Якщо за результатами калібрування встановлено що похибки вимірювань відносної струмової похибки трансформатора який калібрують  $\delta_f$  в процентах і абсолютної кутовий похибки  $\Delta_\delta$  в хвилинах з урахуванням невідповідності перевищують гранично допустиме значення згідно ДСТУ ІЕС 60044-1, ДСТУ ГОСТ 23624 або процес калібрування був призупинений у наслідок вище згаданих обставин то вимірювальний трансформатор визнається непридатним для подальшої експлуатації.

### 3.12 Оформлення результатів калібрування

#### 3.12.1 Протокол калібрування

Результати калібрування фіксуються в «Первинному записі» (Додаток А 1). Використовуючи отримані результати вимірювання, і керуючись описаними розрахунками далі оформляється протокол калібрування (Додаток Б2).

#### 3.12.2 Свідоцтво

За даними протоколу калібрування виписується Свідоцтво калібрування.

У разі невідповідностей метрологічних характеристик вимірювального трансформатора струму вказаними в замовленні на калібрування виявлених під час калібрування, виписується Довідка про непридатність.

## ПЕРЕЛІК ПРОСИЛАНЬ

1. Електрична частина станцій та підстанцій: Навч. Для вузів/А. А. Васильєв, І. П. Крючков, Є. Ф. Наяшков та ін; За ред. А. А. Васильєва. - 3-вид., Перероб. та дод. - М.: Видавництво, 1990. - 576 с.
2. Рожкова, Лііда Дмитрівна. Електроустаткування станцій та підстанцій: навч. для технікумів/Л.Д. Рожкова, В.С. Козулін. - М.: Вища школа, 1987. - 546 с.
3. ГОСТ 7746-2001. Трансформатор струму. Загальні технічні умови М: Вид-во Стандартінформ. 2001.
4. Методи діагностування вимірювальних трансформаторів струму: методичний посібник/В. А. Савельєв, А. Г. Соколов; Федеральне агентство з освіти, ГОУВПО «Іванівський державний енергетичний університет імені В.І. Леніна», - Іваново. 2005. - 136 с.
5. Обсяг та норми випробувань електрообладнання. РД 34.45.-51.300.-.97. М.: ЕНАС, 1998 - 255 с.
6. ГОСТ 1983-2001. Трансформатори напруги Загальні технічні умови М: Вид-во Стандартінформ. 2001.